

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



**“Diseño y construcción de un cicloconvertidor
monofásico / monofásico”**

PRESENTADO POR:

JOSÉ LUIS NAVAS REYES

EDWIN ALFREDO ROMERO MARTÍNEZ

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

CIUDAD UNIVERSITARIA, MARZO 2011

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

MSc. RUFINO ANTONIO QUEZADA SÁNCHEZ

SECRETARIO GENERAL :

LIC. DOUGLAS VLADIMIR ALFARO CHÁVEZ

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO

SECRETARIO :

ING. OSCAR EDUARDO MARROQUÍN HERNÁNDEZ

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DIRECTOR :

ING. JOSÉ WILBER CALDERÓN URRUTIA

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO ELECTRICISTA

Título

:

**“Diseño y construcción de un cicloconvertidor
monofásico / monofásico”**

Presentado por

:

JOSÉ LUIS NAVAS REYES

EDWIN ALFREDO ROMERO MARTÍNEZ

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Director

:

ING. JOSÉ WILBER CALDERÓN URRUTIA

San Salvador, Octubre 2011

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Director :

ING. JOSÉ WILBER CALDERÓN URRUTIA

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Director :

ING. JOSÉ WILBER CALDERÓN URRUTIA

DEDICATORIA

Primero a Dios Todopoderoso que ha sido mi fortaleza en este arduo, a María Santísima mi madre del cielo que ha sido un gran apoyo en mis momentos difíciles, a mis padres a quienes amo tanto, mis a hermanos que son tan valiosos, especialmente a mi hermano Gustavo (Q.D.D.G.) quien comparte este logro conmigo espiritualmente y demás familia y amigos.

José Luis Navas Reyes.

A Dios Todopoderoso quien a sido siempre la luz en mi camino, a mi madre que me ha regalado su apoyo incondicional en todo momento, a mis hermanos quienes me han ayudado siempre que he necesitado y a mis amigos quienes han sido un verdadero apoyo dandome animo en momentos de dificultad.

Edwin Alfredo Romero Martínez.

AGRADECIMIENTOS

Al Señor, quien todos los días da sentido a mi vida y me ha ayudado a terminar este trabajo de graduación a pesar de todas las adversidades, a mi madre María Santísima por velar siempre por mí y no permitir que me pierda en el camino, a mis padres sin quienes no lo habría logrado, gracias a su enorme sacrificio y su total apoyo, a mis hermanos de quienes siempre tengo algo que aprender, a mi tía y a aquellos amigos, quienes siempre estuvieron en los momentos que más necesité, a todos infinitas gracias.

José Luis Navas Reyes

A Dios todopoderoso, quien con su infinita misericordia me ha regalado salud, sabiduría y amor incondicional, para poder sobrellevar los obstáculos de la vida, regalándome la posibilidad de contar con una excelente madre, quien es mi amiga, maestra y apoyo en la vida, hermanos que me han brindado su colaboración cuando lo he requerido con amabilidad y aprecio, a mis amigos de los cuales me siento orgulloso de conocer ya que demuestran un verdadero ejemplo de superación.

Edwin Alfredo Romero Martinez

ÍNDICE GENERAL

Contenido	Página
DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTOS.....	iii
ÍNDICE GENERAL.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS.....	2
JUSTIFICACIÓN.....	3
ALCANCES	4
LIMITACIONES.....	5
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	6
I. TEORIA DE CICLOCONVERTIDORES.....	7
1. EL CICLOCONVERTIDOR.....	
1.1. CICLOCONVERTIDOR MONOFÁSICO.....	9
1.1.1. Principio de Funcionamiento.....	9
1.1.2. Secuencia de Disparo.....	10
1.2. CICLOCONVERTIDOR TRIFÁSICO.....	11
1.2.1. Principio de Funcionamiento.....	11
1.2.2. Secuencia de disparo.....	12
1.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS	12
.....	12
1.3.1. Ventajas	12
1.3.2. Desventajas.....	13
1.4. PUNTOS CLAVES.....	13
II. TEORIA DE DISEÑO DEL CICLOCONVERTIDOR MONOFÁSICO.....	14
2. HERRAMIENTAS DE DISEÑO.....	14
2.1. SIMULADOR DE CIRCUITOS.....	14

2.1.1.	El Simulador de circuitos PROTEUS.....	15
2.2.	DISEÑO DE CIRCUITO CICLOCONVERTIDOR.....	15
2.2.1.	Circuito de Potencia del Cicloconvertidor Monofásico..	16
2.2.2.	Puentes de Tiristores.	16
2.2.3.	Interruptores Bidireccionales.....	17
2.2.4.	Etapa de Potencia con Interruptores Bidireccionales..	18
2.2.5.	ETAPA DE CONTROL.....	22
2.2.6.	ETAPA DE ACOPLAMIENTO.....	36
2.2.7.	ETAPA DE POTENCIA.....	37
2.3.	CÁLCULOS, PARÁMETROS Y CRITERIOS DE DISEÑO.....	38
2.3.1.	Etapa Optoacopladora.....	38
2.3.2.	Etapa de Potencia.....	39
2.3.3.	Etapa de Control.....	42
III.	SIMULACIONES DEL CICLOCONVERTIDOR.....	50
3.	Simulaciones del cicloconvertidor monofasico.	50
3.1.	EL SIMULADOR.....	50
3.1.1.	Proteus ISIS.....	50
3.2.	Simulaciones de las etapas del cicloconvertidor.....	51
3.2.1.	SIMULACIÓN DE ETAPA DE POTENCIA.....	51
3.2.2.	SIMULACIÓN DE ETAPA DE ACOPLA.....	56
3.3.	SIMULACIÓN DE ETAPA DE CONTROL.....	58
3.3.1.	Sub etapa Cruce por Cero.....	58
3.3.2.	Sub etapa MCU.....	59
IV.	ELABORACIÓN DE CIRCUITOS IMPRESOS Y PRUEBAS DE LABORATORIO.....	65
4.	CIRCUITOS IMPRESOS.....	65
4.1.	EL PROGRAMA PROTEUS ARES.....	65
4.2.	ELABORACIÓN DE CIRCUITOS IMPRESOS.....	66
4.2.1.	PCB de las Fuentes de Voltaje.....	67
4.2.2.	PCB de Acople y Potencia.....	69
4.2.3.	PCB de Control.....	71
4.3.	RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EN CIRCUITOS IMPRESOS.....	74
4.3.1.	Capturas de señales de control, entrada y salida.....	74

4.3.2. Mediciones de voltaje por ángulo de disparo.....	78
CONCLUSIONES.....	80
BIBLIOGRAFIA.....	81
Anexo A: Hojas de Especificaciones Técnicas.....	82
Anexo B: Pinout del comparador LM311.....	83
Anexo C: GUÍAS DE LABORATORIO.....	84
Anexo D: Programa del PIC16F877, simulacion cicloconvertidor..	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Contenido	Página
Figura 1.1. Cicloconvertidor monofásico.....	10
Figura 1.2(a). Diagrama de circuito de un cicloconvertidor trifásico/monofásico.....	11
Figura 1.2(b). Forma de onda para una frecuencia de salida de 12Hz...11	
Figura 2.1. Interruptor Bidireccionales de CA.....	18
Figura 2.2. Cicloconvertidor monofásico, utilizando interruptores de potencia de CA.....	19
Figura 2.3. Formas de onda del cicloconvertidor monofásico, utilizando interruptores de potencia de CA.....	20
Figura 2.4. Diagrama de bloques completo del cicloconvertidor monofásico.....	22
Figura 2.5. Diagrama de bloques de la etapa de control.....	23
Figura 2.6. Circuito completo de la etapa de control utilizado para la simulación en Proteus.....	23
Figura 2.7.a. Microcontrolador PIC16F877.....	25
Figura 2.7.b. Diagrama de pines del microcontrolador PIC16F877.....	27
Figura 2.8. Circuito detector de cruce por cero.....	30
Figura 2.9. Diagramas de pines del LM311.....	31
Figura 2.10. Circuito utilizado para la simulación del detector de cruce por cero, en Proteus.....	31
Figura 2.11. Señales de entrada y salida del detector de cruce por cero, simulación realizada en Proteus ISIS.....	32
Figura 2.12. Tipos de LCD lph7366 de 8 y 9 pines.....	33
FIGURA 2.13. Etapa acopladora de 5V a 12V.....	36
Figura 2.14. Circuito de la etapa de Potencia.....	37

Figura 2.15. Cuadrantes I y II.....	40
Figura 2.16. Cuadrantes III y IV.....	41
Figura 2.17. Programa del PIC16F877 como diagrama de flujo.....	46
FIGURA 3.1. Circuito simulado de la Etapa de Potencia.....	51
FIGURA 3.2. SEÑALES DE CONTROL.....	53
FIGURA 3.3. SEÑALES DE CONTROL.....	54
FIGURA 3.4. Voltaje de Salida (en la carga).....	55
FIGURA 3.5. Voltaje de entrada (Vin).....	55
FIGURA 3.6. Etapa de acople.....	56
FIGURA 3.7. SEÑALES DE CONTROL ACOPLADAS A 12V.....	57
FIGURA 3.8. SUB ETAPA DETECTOR DE CRUCE POR CERO.....	58
FIGURA 3.9. DETECCIÓN DE CRUCE POR CERO.....	59
FIGURA 3.10. SUB ETAPA MCU.....	60
FIGURA 3.11. SEÑALES DE CONTROL DEL MCU.....	61
FIGURA 3.12. CICLOCONVERTIDOR SIMPLIFICADO.....	62
FIGURA 3.13. Señal de disparo para Q1 y Q2 comparado con Vcarga a un ángulo de disparo de 0°.....	63
FIGURA 3.14. Señal de disparo para Q2 y Q3 comparado con Vcarga a un ángulo de disparo de 0°.....	63
FIGURA 3.15. Señal de disparo para Q1 y Q4 comparado con Vcarga a un ángulo de disparo de 45°.....	64
FIGURA 3.16. Señal de disparo para Q2 y Q3 comparado con Vcarga a un ángulo de disparo de 45°.....	64
Figura 4.1. PCB Fuentes de Voltaje.....	67
Figura 4.2. PCB Fuentes de Voltaje en 3D.....	68
Figura 4.3. PCB de Etapas de Acoplamiento y Potencia.....	70
Figura 4.4. PCB de Etapas de Acoplamiento y Potencia en 3D.....	71

Figura 4.5. PCB de Etapa de Control.....	72
Figura 4.6. PCB de Etapa de Control en 3D.....	73
Figura 4.7. Señal de control para Q1.....	74
Figura 4.8. Señal de control para Q2.....	74
Figura 4.9. Señal de control para Q3.....	75
Figura 4.10. Señal de control para Q4.....	75
Figura 4.11. Señal de acople para Q1.....	75
Figura 4.12. Señal de acople para Q2.....	76
Figura 4.13. Señal de acople para Q3.....	76
Figura 4.14. Señal de acople para Q4.....	76
Figura 4.15. Señal de salida del Cicloconvertidor Monofásico/Monofásico.....	77
Figura 4.16. Osciloscopio marca Agilent Technologies, modelo DS01012A utilizado en las pruebas.....	77
Figura C.1. Típico circuito cicloconvertidor a base de SCR's.....	87
Figura C.2. Cicloconvertidor monofásico con switches bidireccionales.....	88
Figura C.3. Switch bidireccional.....	89
Figura C.4. Circuito a simular. Etapa de control y acoplamiento.....	90
Figura C.5. Circuito de potencia de la simulación.....	91
Figura C.6. Cuadrantes I y II.....	97
Figura C.7. Cuadrantes III y IV.....	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Descripción de las funciones de los pines del microcontrolador PIC16F877.....	28
Tabla 2.2. Pines del presentador LCD y su funcionamiento respectivo en operación.....	34
Tabla 2.3. Función de los bits D0 y D1 en el control del driver PCD8544.....	35
Tabla 2.4. Activación de transistores para cada semiciclo de la señal de 60 Hz.....	41
Tabla 2.5. Funcionamiento del LM311.....	43
TABLA 4.1. Porcentaje de error entre valores de V_o teóricos y prácticos.....	78
Tabla C.1. Voltajes de salida teóricos y prácticos para algunos ángulos de recorte.....	92
Tabla C.2. Activación de transistores para cada semiciclo de la señal de 60 Hz.....	98
Tabla C.3. Datos a obtener del módulo cicloconvertidor monofásico.....	100

INTRODUCCIÓN

En muchas aplicaciones industriales es necesario contar con potencia eléctrica de frecuencia, fija o variable, pero de distintas características a la del suministro eléctrico de CA con la que se dispone, esto para garantizar el funcionamiento adecuado de algunos equipos y maquinaria empleada en sistemas de potencia.

Algunas de estas aplicaciones incluyen: manejo de motores síncronos y de inducción, molinos laminadores de acero, correas para el manejo de materiales, hornos de cemento, molinos para pulido de minerales, sistemas de calefacción, vareadores de velocidad de motores entre otras. Específicamente algunas de estas aplicaciones requieren de un voltaje potente de entrada, pero a una frecuencia menor a la existente en el suministro eléctrico, debido a que es necesario una frecuencia más baja para manejar el motor a una rapidez de respuesta requerida por las aplicaciones de este tipo. Por tanto se hace necesario emplear un dispositivo entre la red eléctrica y la carga, en donde se controlen las características de la señal de suministro de potencia eléctrica según sea necesario.

El dispositivo capaz de convertir directamente CA a CA con una frecuencia más baja y capaz de regular la cantidad de voltaje de salida entregado a la carga, realizando dicha conversión, sin un enlace intermedio de conexión, se denomina: cicloconvertidor o cicloconvertidor. El cicloconvertidor hace uso de la electrónica de potencia para realizar de manera efectiva su funcionamiento, logrando alcanzar niveles de potencia elevados y una rapidez de respuesta muy buena. El dispositivo cicloconvertidor puede realizar las conversiones siguientes: monofásico/monofásico, trifásico/monofásico y trifásico/trifásico.

El presente trabajo de graduación proporciona información relativa al diseño y construcción de un módulo didáctico de un cicloconvertidor monofásico/monofásico; utilizando principalmente elementos de electrónica analógica y de potencia para su elaboración. Al inicio de este informe pueden encontrarse los objetivos que se persiguen con la realización del mismo, justificación, alcances y limitaciones, así como el planteamiento del problema, relativos al presente trabajo de graduación.

En el capítulo uno se proporciona un marco teórico en el cual se presenta información general relativa al cicloconvertidor, detalles de su funcionamiento, tipos de cicloconvertidores y algunas aplicaciones donde se involucran este tipo de dispositivos.

En el capítulo dos se presenta el diseño del dispositivo cicloconvertidor monofásico/monofásico, incluyendo detalles involucrados para la elaboración del mismo, tales como: herramientas utilizadas en el

diseño, etapas del circuito, configuraciones utilizadas, características de funcionamiento, componentes y sus datos técnicos.

En el capítulo tres se presentan las simulaciones respectivas de las etapas que componen el circuito cicloconvertidor, realizadas con el simulador de circuitos PROTEUS, detalles relativos a las simulaciones y los resultados respectivos de las mismas.

En el capítulo cuatro se presentan los detalles constructivos de las diferentes etapas que componen el circuito cicloconvertidor monofásico/monofásico, componentes principales dentro de cada una, imágenes de capturas realizadas en el laboratorio en los diferentes puntos de prueba establecidos y el circuito completo respectivo.

Al final se presentan las conclusiones del trabajo, así como también anexos con información de las hojas de datos técnicos (datasheet) de los diferentes componentes utilizados en el circuito cicloconvertidor, guías para prácticas de laboratorio, manual de usuario y guía de reparación del módulo, fotografías del circuito terminado etc.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Proporcionar a la asignatura de Electrónica de Potencia de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador, un modulo didáctico de circuito cicloconvertidor monofásico/monofásico, que sirva de material de apoyo para realizar practicas de laboratorio, que muestren el funcionamiento de este dispositivo convertidor de potencia.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar y construir un modulo didáctico de un cicloconvertidor monofásico/monofásico utilizando semiconductores de potencia (IGBTs), para obtener una señal de voltaje de salida de tres crestas positivas así como tres negativas.
- Diseñar el modulo cicloconvertidor capaz de regular el voltaje de salida desde 0 hasta 50Vrms con una tolerancia del 10%, para cumplir con especificaciones de diseño.
- Diseño de un circuito de control capaz de satisfacer la necesidad de disparo de los semiconductores de potencia, para garantizar el funcionamiento en los tiempos requeridos por el proceso.
- Desarrollar guías estructuradas que sirvan de material de apoyo, para realizar las prácticas de laboratorio relativas a cicloconvertidores, utilizando el modulo didáctico construido.
- Construir un cicloconvertidor monofásico/monofásico que cumpla con medidas adecuadas de seguridad, para garantizar su buen funcionamiento y evitar poner en riesgo a las personas que lo manipularan.
- Proporcionarle al modulo construido las protecciones eléctricas necesarias, así como también, su correcto dimensionamiento, para evitar cualquier tipo de daño al utilizarlo en las practicas de laboratorio.

JUSTIFICACIÓN

El área de electrónica de potencia, se encuentra actualmente en desarrollo en la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador, motivo por el cual, se busca contribuir a dicho desarrollo, con material didáctico que sirva para demostrar, confirmar o analizar conceptos teóricos de manera practica en el laboratorio; es necesario realizar la implantación de nuevo equipo, que sirva para satisfacer dicho menester, mejorando así, la calidad de la cátedra de electrónica de potencia. Se pretende con la implantación de un modulo didáctico de un circuito cicloconvertidor monofásico/monofásico practico, que este sea utilizado como apoyo, para brindar a los estudiantes, una enseñanza mas completa acerca de cómo se emplean los elementos de electrónica de potencia en situaciones practicas, ya sea, utilizándolos de manera individual o como parte de circuitos mas estructurados, como es el caso del circuito cicloconvertidor mencionado. Por lo que este trabajo de graduación se justifica por los siguientes aspectos:

1. Servir de apoyo para realizar las prácticas de laboratorio de la asignatura Electrónica de Potencia, para contribuir a la capacitación del alumnado de dicha cátedra, de ingeniería eléctrica.
2. Aportar información relativa al diseño y construcción de un cicloconvertidor monofásico/monofásico, con miras a fortalecer los conocimientos prácticos de los estudiantes.
3. Contribuir al desarrollo de la rama de la electrónica de potencia en la escuela de ingeniería eléctrica, aportando herramientas que contribuyan a dicho propósito.

ALCANCES

En este trabajo de graduación se deberá diseñar, simular y construir un modulo didáctico de cicloconvertidor monofásico/monofásico con una señal de voltaje de salida de tres crestas positivas y tres negativas, con tiempos de disparo desde 0 hasta 180° con una tolerancia del 10%, se deberá manipular una carga máxima de 5 A a 50V y el voltaje de salida deberá estar regulado entre 0 y 50 Vrms con una tolerancia del 10%. La parte frontal del modulo será de acrílico y se tendrá acceso a puntos de prueba que permitan hacer mediciones de niveles de voltaje y obtener las formas de ondas. Por medio de un teclado matricial se introducirá el ángulo de disparo y por medio de un indicador tipo LCD se indicara el ángulo seleccionado, por lo que el circuito de control de la etapa de potencia, así como, los controladores del teclado y presentador deberán ser controlados utilizando un microcontrolador.

El diseño deberá estar respaldado con simulaciones hechas en Spice Opus o Psim o Proteus, basándose en modelos que representen dispositivos reales. La construcción deberá cumplir con las medidas de seguridad que garanticen la integridad física de las personas que manipulen el equipo así como la auto protección de este ultimo.

Se deberán implementar dos circuitos impresos en alta calidad, uno será utilizado para la construcción del modulo y el otro quedara de reserva y en espera de financiamiento para la implantación de un segundo modulo.

En el trabajo escrito se deberá incluir.

1. Toda la teoría relacionada con el tipo de cicloconvertidor que se implementara.
2. La descripción de cada una de las secciones en la que se incluirá niveles de voltaje y formas de onda de puntos de prueba.
3. Manual de mantenimiento preventivo y correctivo.
4. Guías de laboratorio (portada, índice, marco teórico, procedimiento, tabulación de resultados, ejes para esbozar las formas de onda, asignaciones, etc.).
5. Memoria de cálculo y diseños.
6. Resultados de la simulación con su respectivo análisis.

LIMITACIONES

Las limitaciones principales son las siguientes:

- No se cuenta con información específica relativa al diseño y construcción de cicloconvertidores de manera práctica, por lo que se debe realizar lo anterior basados únicamente en información teórica general.

- Debido a la utilización de elementos relativamente modernos para la construcción del dispositivo físico, no se encuentran disponibles en el mercado nacional, por lo que se deben adquirir los mismos en el extranjero, lo cual incrementa los costos y tiempo de adquisición de dichos elementos.

- No se estudiarán normas aplicables a dispositivos reales, ya que se pretende construir un módulo didáctico y no para utilización en aplicaciones prácticas reales.

- La capacidad del dispositivo no igualará a la soportada por dispositivos reales los cuales son diseñados para soportar grandes potencias, debido a que la construcción de los mismos es mucho más compleja y costosa económicamente.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente el laboratorio de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador, cuenta con pocas herramientas practicas que permitan a los estudiantes de la materia de electrónica de potencia, realizar sus prácticas de laboratorio utilizando circuitos prácticos que muestren aplicaciones que involucren elementos reales; por lo que los estudiantes deben hacer uso de simuladores de circuitos para comprobar los conceptos teóricos proporcionados en la asignatura.

La escuela de ingeniería eléctrica, esta interesada en desarrollar el área de la electrónica de potencia, por lo que actualmente se pretende obtener insumos que contribuyan a la formación mas completa de los estudiantes de esta área de la ingeniería eléctrica. Motivo por el cual, actualmente se trabaja en fortalecimiento del laboratorio de la materia de electrónica de potencia, a través de la construcción de módulos didácticos que permitan al estudiante adquirir conceptos relativos al diseño y construcción de dispositivos electrónicos de potencia y para demostrar los conceptos teóricos relativos a los mismos.

Se pretende al realizar este trabajo de graduación contribuir al mejoramiento del laboratorio de la asignatura de electrónica de potencia y que el estudiante tenga medios más adecuados para adquirir conceptos prácticos y afianzar los teóricos.



I. TEORIA DE CICLOCONVERTIDORES.

1. EL CICLOCONVERTIDOR

En muchas aplicaciones se necesita disponer de potencia eléctrica de frecuencia, fija o variable, pero con distintas características que la suministrada por el generador con que se dispone. Por tanto deberemos colocar un dispositivo entre la red eléctrica y la carga de forma que se transforme la energía eléctrica, cambiando su frecuencia según sea necesario. A los convertidores directos de corriente alterna a corriente alterna de distinta frecuencia, se les conoce como cicloconvertidores. Estos sistemas serán capaces de proporcionar una corriente alterna mono o polifásica de amplitud y frecuencia regulables, a partir de un generador de CA.

El cicloconvertidor: es un dispositivo capaz de convertir corriente alterna con una frecuencia determinada a corriente alterna con una frecuencia menor a la inicial, cambiándola de manera directa sin un enlace intermedio de conexión, regulando además la cantidad de voltaje de salida que se entrega a la carga; consiguiendo esto con la utilización de elementos de electrónica de potencia. El cicloconvertidor es un convertidor CA-CA directo ya que no necesita una etapa intermedia para lograr su conversión; aunque también puede realizarse la misma función del cicloconvertidor mediante la conexión en cascada de un rectificador, controlado o no, y un inversor autónomo, pero al ser la potencia transformada por dos convertidores, el rendimiento en casos de potencias elevadas será menor.

La mayor parte de los cicloconvertidores tienen conmutación natural, y la frecuencia máxima de salida se limita a un valor que solo es una fracción de la frecuencia de la fuente. En consecuencia, la principal aplicación de los cicloconvertidores se da en el control a baja velocidad de grandes motores de CA de hasta 15000KW, con

frecuencias de 0 a 20Hz., donde es preciso variar la amplitud de la tensión proporcionalmente a la frecuencia.

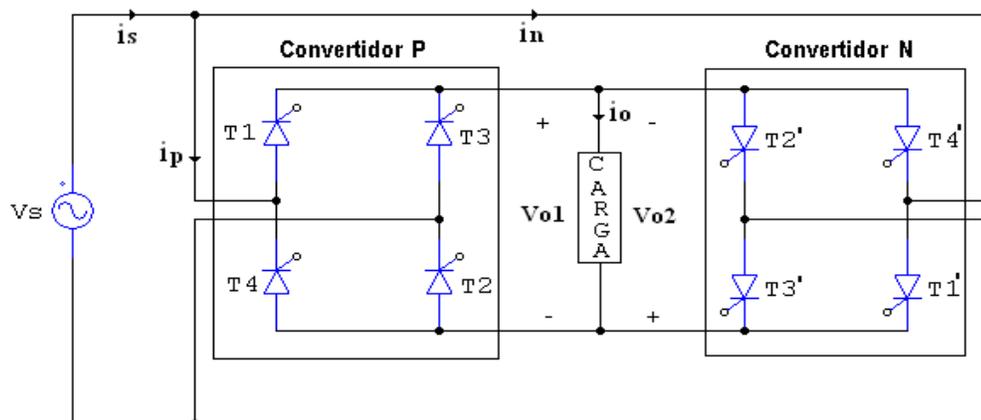
Una ventaja importante de los cicloconvertidores, reside en su funcionamiento con bloqueo de sus tiristores de forma natural y su carácter reversible, haciendo posible que cargas regenerativas puedan absorber potencia de la carga y entregarla a la entrada. Su funcionamiento con conmutación natural implica que la entrada en conducción de un tiristor debe provocar automáticamente el bloqueo del que ha entrado en conducción anteriormente. Si se está en el semiciclo positivo de corriente, este bloqueo natural exige que el voltaje que se conecta sea, en el momento de la conexión, más positivo o menos negativo que el voltaje antes conectado. Si por el contrario, se está en un semiciclo negativo, los tiristores que entran sucesivamente en conducción son los del rectificador negativo. Para que al entrar en conducción uno, se bloquee el que antes estaba en conducción, es necesario que la nueva tensión que se conecta, sea más negativa o menos positiva. Con el desarrollo de las técnicas de conversión de potencia, y los métodos modernos de control, los excitadores de motor de CA alimentados por inversor están ganando terreno sobre los excitadores alimentados por cicloconvertidor. Sin embargo, los adelantos recientes en conmutación rápida de dispositivos de potencia y en microprocesadores permiten sintetizar e implementar estrategias avanzadas de conversión para cambiadores directos de frecuencia por conmutación forzada (FCDFC, force-commutated direct-frequency changer) para optimizar la eficiencia y reducir los contenidos de armónicas. Las funciones de conmutación de los FCDFC se pueden programar para que combinen las de los convertidores ca-cd y los convertidores cd-ca.

El dispositivo cicloconvertidor puede realizar las conversiones siguientes: monofásico/monofásico, trifásico/monofásico y trifásico/trifásico, las cuales se mencionan brevemente a continuación.

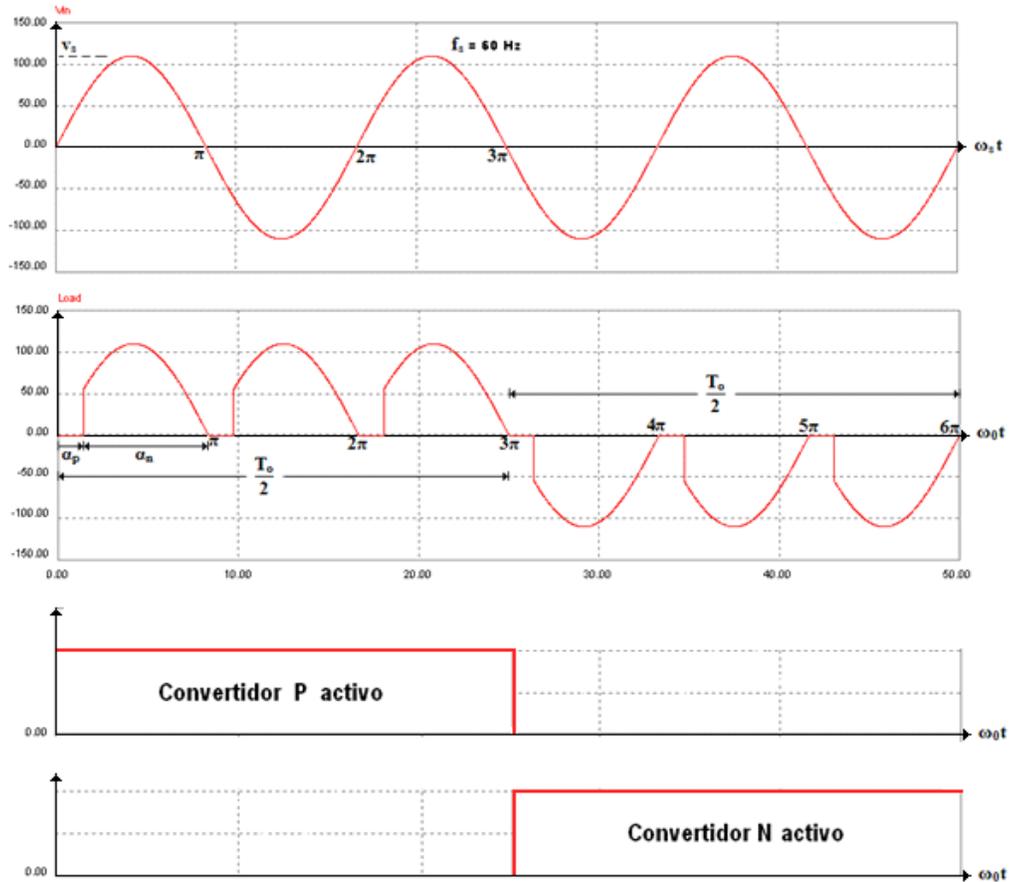
1.1. CICLOCONVERTIDOR MONOFÁSICO.

1.1.1. Principio de Funcionamiento.

El principio de funcionamiento de los cicloconvertidores monofásicos/monofásicos se puede explicar con la ayuda de la figura 1.1(a). Los dos convertidores monofásicos controlados se operan como rectificadores de puente. Sin embargo, sus ángulos de retardo son tales que el voltaje de salida de un convertidor es igual y opuesto al del otro convertidor. Si el convertidor P funciona solo, el voltaje promedio de salida es positivo, y si el convertidor N funciona, el voltaje de salida es negativo. La figura 1.1(b) muestra las formas de onda del voltaje de salida y las señales de disparo de los convertidores positivo y negativo; el convertidor positivo está activado durante el tiempo $T_o/2$, y el convertidor negativo funciona durante el tiempo $T_o/2$. La frecuencia del voltaje de salida es $f_o=1/T_o$. Si α_p es el ángulo de retardo del convertidor positivo, el ángulo de retardo del convertidor negativo es $\alpha_n= \pi- \alpha_p$. El voltaje promedio de salida del convertidor positivo es igual y opuesto al del convertidor negativo.



a) Circuito de Convertidor Dual



b) Formas de onda para cargas resistivas.

Figura 1.1. Cicloconvertidor monofásico. a) Circuito de convertidor dual. b) Formas de onda del cicloconvertidor monofásico.

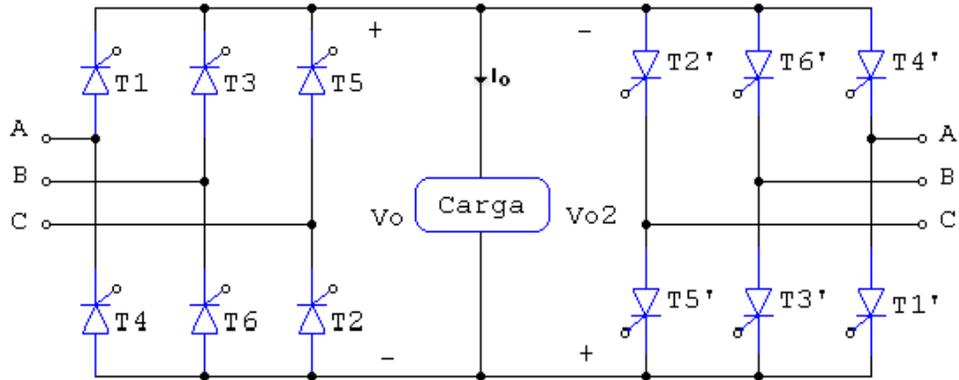
1.1.2. Secuencia de Disparo.

- Durante el primer medio periodo de la frecuencia de salida, $T_o/2$, opera el convertidor P como un rectificador controlado normal con un ángulo de retardo $\alpha_p = \alpha$, esto es, disparando T1 y T2 en α y disparando T3 y T4 en $\pi + \alpha$.
- Durante el segundo medio periodo $T_o/2$ opera el convertidor N como rectificador controlado normal, con un ángulo de retardo $\alpha_N = \pi - \alpha$; esto es, disparando T1' y T2' en $\pi - \alpha$ y disparando T3' y T4' en $2\pi - \alpha$.

1.2. CICLOCONVERTIDOR TRIFÁSICO

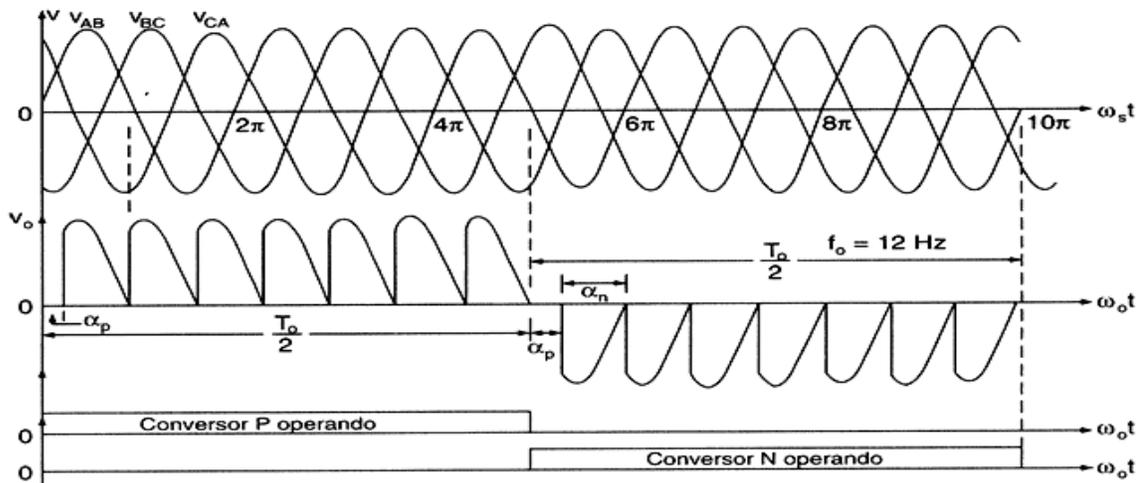
1.2.1. Principio de Funcionamiento

En la figura 1.2(a) se ve el diagrama de circuito de un cicloconvertidor trifásico/monofásico.



a) Circuito de cicloconvertidor Trifásico/Monofásico.

Dos convertidores ca-cd son rectificadores controlados trifásicos. La síntesis de la forma de onda para una frecuencia de salida de 12Hz se ve en la figura 1.2(b).



b) Formas de Onda

El convertidor positivo funciona durante la mitad del periodo de la frecuencia de salida, y el convertidor negativo durante el otro medio periodo. El análisis de este cicloconvertidor es parecido al de los cicloconvertidores monofásicos/monofásicos.

1.2.2. Secuencia de disparo.

- Durante el primer medio periodo de la frecuencia de salida, $T_o/2$, operar el convertidor P como un rectificador controlado trifásico normal con un ángulo de retardo $\alpha_p = \alpha$.
- Durante el segundo medio periodo $T_o/2$ operar el convertidor N como rectificador controlado trifásico normal, con un ángulo de retardo $\alpha_N = \pi - \alpha$.

1.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

1.3.1. Ventajas

1. En un cicloconvertidor con alimentación de CA puede reducirse la frecuencia de entrada a una frecuencia menor, directamente en una sola etapa.
2. El cicloconvertidor de conmutación natural, funciona por medio de la conmutación de fase, sin circuitos auxiliares de conmutación forzada. El circuito de potencia es más compacto, y se eliminan las pérdidas asociadas con el circuito de conmutación forzada.
3. El cicloconvertidor es intrínsecamente capaz de transferir potencia en ambas direcciones entre la fuente y carga. Puede alimentar a las cargas a cualquier factor de potencia, y también es capaz de regeneración durante todo el rango de velocidades. Esta característica hace que sea preferible que la inversión de grandes unidades que requieren una rápida aceleración y desaceleración, lo cual es adecuado para la aplicación de metal laminado.
4. La conmutación forzada provoca un cortocircuito de acción suministro. Pero, si una persona fuera de los golpes fusible, un cierre no es necesario, y cicloconvertidor sigue funcionando con cierta distorsión de las formas de onda. Una carga equilibrada se presenta a la red de suministro con las condiciones de salida no balanceada.

5. El cicloconvertidor ofrece una forma de onda sinusoidal de salida de alta calidad a bajas frecuencias, ya que se fabrica a partir de un gran número de segmentos de la forma de onda suministrada. Esto es a menudo preferible para aplicaciones de muy baja velocidad.
6. El cicloconvertidor es extremadamente atractivo para aplicaciones que requieren gran potencia y baja velocidad.

1.3.2. Desventajas

1. Se requiere de un gran número de tiristores en un cicloconvertidor, y sus circuitos de control se vuelven más complejos. No se justifica su uso para instalaciones pequeñas, pero es económico para las unidades de más de 20 kVA.
2. Para una potencia de salida y eficiencia razonable, la frecuencia de salida se limita a un tercio de la frecuencia de entrada.
3. El factor de potencia es bajo especialmente en voltajes de salida reducidos, como control de fase es usado un disparo con gran ángulo de retardo.

1.4. PUNTOS CLAVES

- Un cicloconvertidor es, básicamente, un convertidor dual monofásico o trifásico.
- Se obtiene un voltaje de salida de corriente alterna activando el convertidor P solo durante el primer periodo $T_o/2$ para producir el voltaje positivo, y el convertidor N solo durante el segundo periodo $T_o/2$ para producir el voltaje negativo.



II. TEORIA DE DISEÑO DEL CICLOCONVERTIDOR MONOFÁSICO.

2. HERRAMIENTAS DE DISEÑO

2.1. SIMULADOR DE CIRCUITOS

Existen varios simuladores de circuitos que permiten el análisis de circuitos de electrónica de potencia tales como: PSIM, SPICE, PROTEUS entre otros menos familiares; por esto surge la interrogante de cual de estos simuladores utilizar como herramienta de apoyo en el diseño de nuestro circuito cicloconvertidor, escogiendo el que mas se adapte a nuestros requerimientos de diseño tales como: librerías que posean los componentes utilizados en el diseño y que sean basadas en modelos que representen dispositivos lo mas reales posibles, que sea capaz de simular circuitos integrados complejos como microcontroladores, que posea paquetes que permitan interactuar de manera gráfica con los componentes del circuito, que posea algoritmos potentes para realizar las simulaciones lo mas cercanas a la realidad, herramientas de diseño de circuitos impresos etc. Debido a los requerimientos mencionados se realizo la búsqueda de una herramienta adecuada a nuestras necesidades de diseño, analizando los pro y contras de las alternativas encontradas. Se utilizaron simuladores como PSIM y SPICE donde pueden encontrarse muchos de los elementos principales en nuestro diseño, que ademas ofrecen una calidad aceptable respecto a las simulaciones, sin embargo para el caso de estos simuladores no se cuenta con la posibilidad de realizar la simulación del circuito completo donde se involucren elementos mas complejos tales como microcontroladores, presentadores LCD, teclados matriciales entre otros. Por otra parte el simulador de circuitos PROTEUS de Labcenter Electronics se adapta por completo a los requerimientos de diseño antes mencionados, por lo que se adopto como nuestra herramienta de apoyo para elaborar nuestro diseño..

2.1.1. El Simulador de circuitos PROTEUS

¿Por qué utilizar PROTEUS en nuestro diseño? Esta interrogante puede ser contestada si ponemos énfasis en el tipo de elementos que posee este simulador y la calidad de los mismos ya que están basados en su mayoría en modelos proporcionados por el fabricante de estos elementos, por lo que se acercan mas al funcionamiento real de los mismos, además de ofrecer el poder de un simulador completo como SPICE ya que PROTEUS se basa en este ultimo para utilizar los modelos que emplea en la simulación de circuitos, permitiendo la flexibilidad de seguir agregando modelos de elementos que otros simuladores no poseen o difícilmente se encuentran en sus librerías; ya que el simulador PROTEUS tiene mucha aceptación entre las personas que diseñan circuitos electrónicos, estos contribuyen a engrandecer las librerías que ya posee, este goza de actualizaciones permanentes y soporte técnico. Es importante el hecho de que este simulador ya cuenta con microcontroladores de la serie que utilizada en nuestro diseño y que pueden ser simulados de manera completa desde sus conexiones hasta su programación, lo que facilita dicho proceso. Todo lo anterior agregando que en este simulador es posible simular el circuito completo hace que PROTEUS nos ofrezca las mejores prestaciones a la hora de realizar el diseño del circuito de cicloconvertidor.

2.2. DISEÑO DE CIRCUITO CICLOCONVERTIDOR.

El primer paso en el diseño del circuito es la elección de los elementos con los cuales se trabajara para construir el circuito cicloconvertidor monofásico/monofásico y como estos interactuarán para realizar la función de convertidor esperada.

Los circuitos cicloconvertidores utilizan comúnmente algún tipo de tiristor o semiconductor de potencia como pueden ser: SCR's, IGBT's, GTO's entre otros. Por lo que es importante escoger el tipo de semiconductor que se adapte a las necesidades de operación de nuestro

circuito. En la mayoría de los casos se emplean SCR's como elementos de conmutación en circuitos cicloconvertidores; esto puede apreciarse en la mayoría de los libros y documentos relacionados con el tema, lo que puede ser debido a que se cuenta con mayor conocimiento de este tipo de tecnología en aplicaciones variadas desde ya hace un tiempo; sin embargo existen alternativas mas modernas que pueden proporcionar iguales o mejores resultados que los SCR's tal es el caso de los IGBT's por lo que se analiza esta ultima posibilidad.

2.2.1. Circuito de Potencia del Cicloconvertidor Monofásico.

El circuito de potencia del cicloconvertidor monofásico es parte importante del diseño, por lo que es conveniente analizar la forma mas adecuada de su implantación y los elementos que se utilizaran para la misma.

Se tienen dos opciones para implementar el circuito de potencia, en una se utilizan SCR's para controlar de manera efectiva la señal de corriente alterna a la salida del circuito y en el otro se utilizan interruptores IGBT's y puentes de diodos para realizar dicha función. A continuación comparamos el funcionamiento de estas, con el objetivo de determinar la opción más conveniente para nuestra aplicación.

2.2.2. Puentes de Tiristores.

El primer diseño antes mencionado es el más común de utilizar, el cual utiliza puentes de tiristores (generalmente SCR's) para rectificar la señal de entrada y determinar el flujo de corriente en la carga de manera controlada, gracias a los tiristores. Se emplea la conmutación natural para el apagado de los SCR's, por lo que no se cuenta con el control absoluto entre el estado de conducción y de bloqueo de dichos dispositivos, lo que produce un retardo en su

respuesta debido a la forma de operación, ya que es necesario que una corriente inversa alcance cierto valor limite para producir el cambio de estado de conducción a bloqueo de los mismos, por lo que se pierde precisión en el control de dichos dispositivos.

El problema anterior puede ser resuelto, utilizando un circuito adicional para garantizar el apagado oportuno de los tiristores previamente activados, el cual es llamado comúnmente red SNUBBER, pero esto hace que el circuito se vuelva mas complicado de construir e incrementa su tamaño, ya que es necesario un circuito snubber por cada SCR que se utiliza.

Lo anterior adicionado a que se debe controlar un mínimo de ocho tiristores para obtener un buen funcionamiento, hace mas complejo al circuito de control para manejar dichos elementos; aunque es importante mencionar que existe la ventaja de que los SCR's con las dimensiones adecuadas para nuestro caso, se encuentran fácilmente en nuestro país, lo que los hace mas fáciles de conseguir e incluso menos costosos.

2.2.3. Interruptores Bidireccionales.

El segundo diseño esta basado en la utilización de interruptores de corriente alterna con un puente de diodos rectificador, en donde los elementos de conmutación controlados utilizados son los IGBTs (aunque también es posible utilizar SCR's). Los IGBT's proporcionan una mayor rapidez de conmutación al compararlos con los SCR's del diseño anterior, proporcionando además un mejor control en la conmutación de los mismos ya que estos trabajan basados en cambios de estados y no se apagan de manera natural como los tiristores antes descritos, lo que proporciona tiempos de conducción mas precisos, y por consiguiente una señal de corriente alterna mas precisa en la carga. Lo anterior es una ventaja con respecto al primer diseño propuesto (con SCR's). Además debido al menor numero de elementos de conmutación IGBT's con el que funciona este

diseño, es importante mencionar que el circuito de control, que se encargará de la activación de los transistores de potencia, será menos complejo, ya que controlara la mitad de elementos de conmutación que con el diseño de SCR's. No obstante lo anterior, existe el inconveniente de la disponibilidad de los interruptores IGBTs en el mercado nacional, ya que no se comercializan en nuestro país, por lo que tendría que realizarse un pedido al extranjero.

Basados en lo anterior el diseño adoptado sera el que emplea los interruptores Bidireccionales con elementos de conmutación IGBT's y puente de diodos rectificadores. En la figura 2.1 se muestra un interruptor bidireccional de CA.

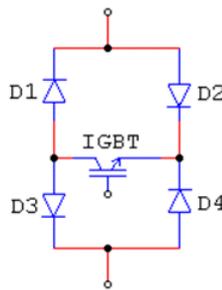


Figura 2.1. Interruptor Bidireccionales de CA.

2.2.4. Etapa de Potencia con Interruptores Bidireccionales.

A continuación se muestra el diagrama de la etapa de potencia del circuito cicloconvertidor monofásico/monofásico, utilizando interruptores Bidireccionales de CA.

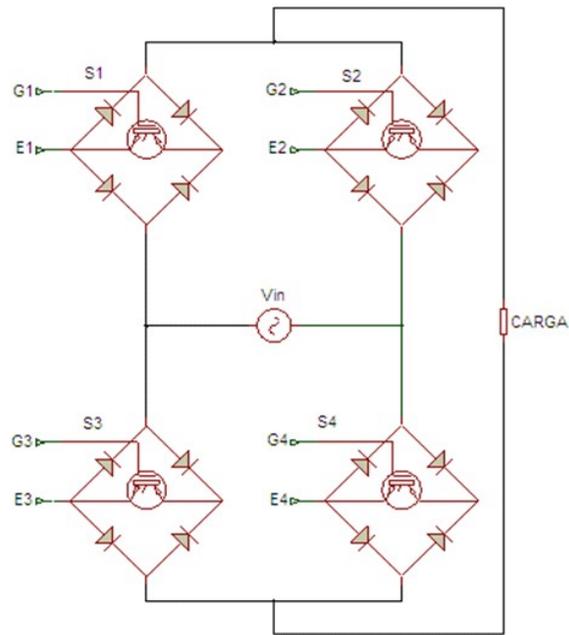
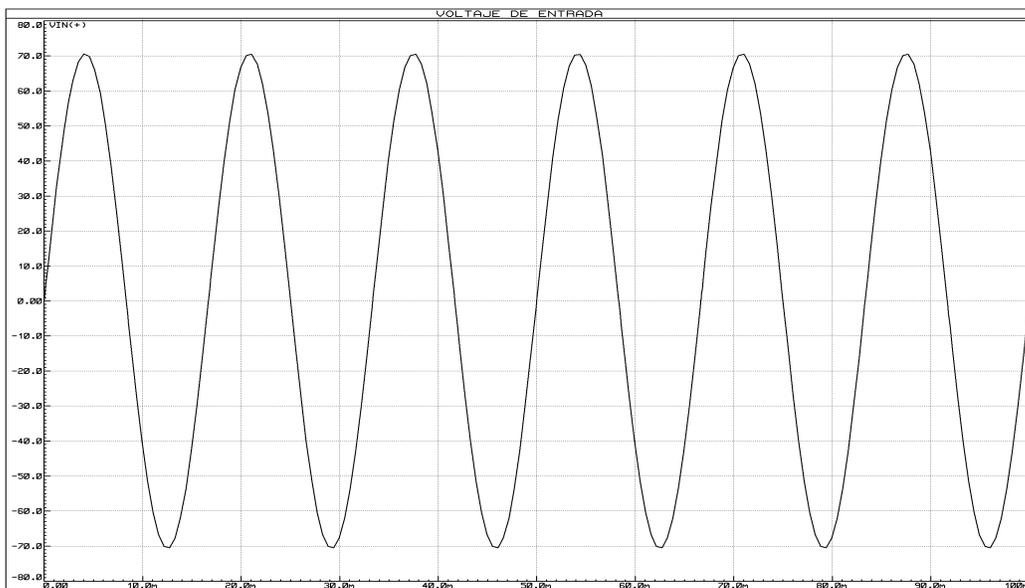
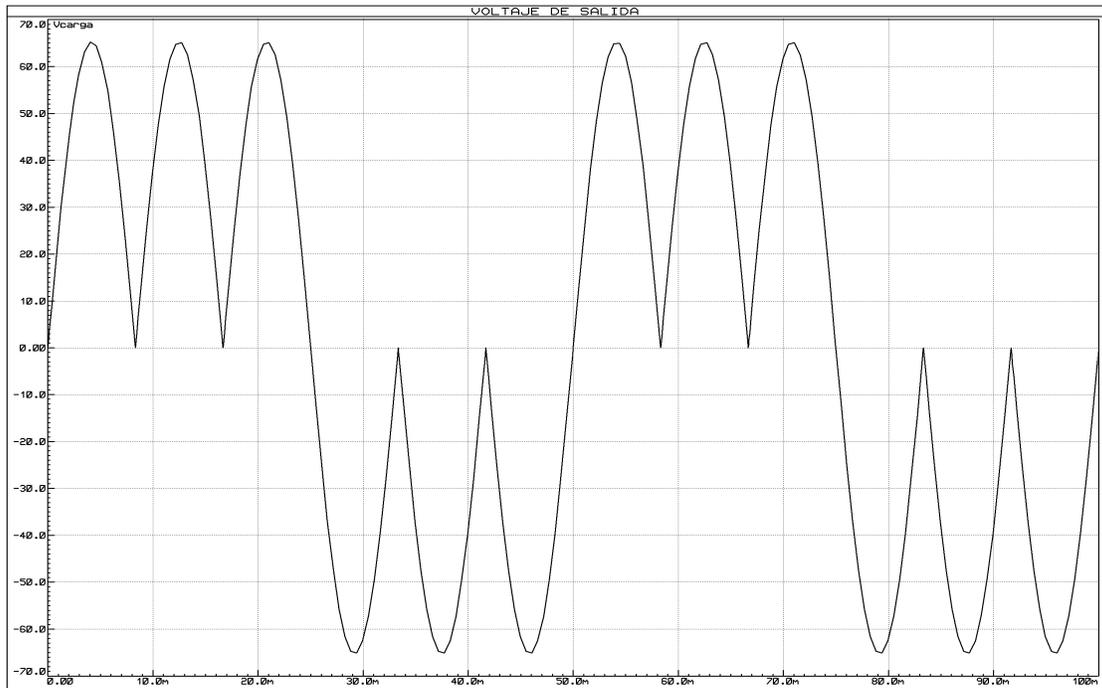


Figura 2.2. Cicloconvertidor monofásico, utilizando interruptores de potencia de CA. Se utiliza IGBT's como elementos semiconductores de potencia controlados.

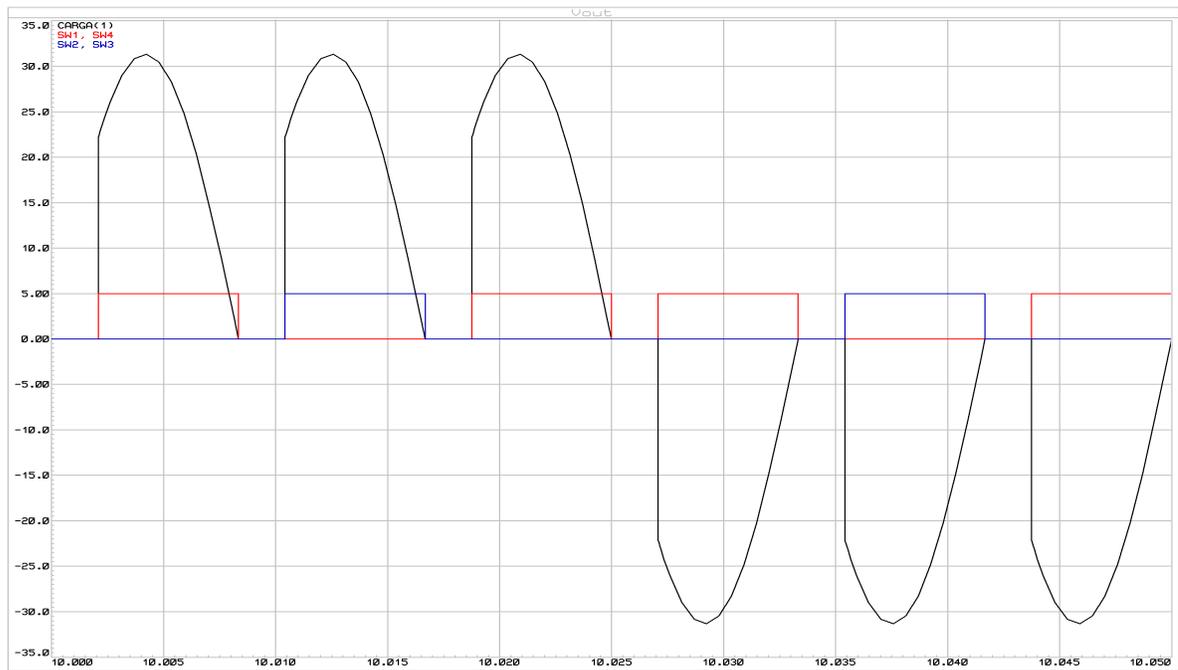
En la **figura 2.3** se muestran las formas de ondas de entrada, salida y salida con recorte mostrando los pulsos de disparo respectivamente.



a) Voltaje de entrada



b) Voltaje de salida



c) Voltaje de salida con un ángulo de disparo.

Figura 2.3. Formas de onda del cicloconvertidor monofásico, utilizando interruptores de potencia de CA.

Ahora que se conoce el circuito funcional (ideal) del cicloconvertidor monofásico/monofásico se procede a la implantación de un circuito que realice la misma función pero utilizando elementos con comportamiento mas similares a los reales, con miras a la construcción del dispositivo físico.

Para realizar el diseño del modulo cicloconvertidor monofásico/monofásico utilizaremos el simulador de circuitos electrónicos PROTEUS el cual posee librerías de electrónica de potencia, pero igualmente de microelectrónica digital y análoga; por lo que es muy conveniente para nuestros propósitos de diseño. Primeramente se debe de entender el funcionamiento teórico del circuito como se menciona en el marco teórico, en la sección de cicloconvertidores monofásicos/monofásicos.

Como se menciona en el marco teórico se deben emplear dispositivos semiconductores de potencia para poder controlar la señal de voltaje de salida del circuito cicloconvertidor, estos deben ser disparados(activados) para poder formar una trayectoria de corriente desde la entrada hasta la salida, por lo que se hace necesario conmutar dos interruptores de potencia por cada semiciclo de la señal alterna de entrada, con el objetivo de activar el par adecuado para poder obtener las crestas positivas y negativas que necesitamos en la señal de salida de voltaje.

Para poder activar o desactivar los interruptores de potencia Bidireccionales de manera efectiva y hacerlo en el momento preciso, se necesitara diseñar un circuito de control capaz de realizar esta tarea de manera correcta y con la rapidez necesaria para no afectar al proceso de control de la señal de voltaje de salida, como se requiere. Para realizar el circuito de control se utilizara un dispositivo inteligente que actúe de manera automática en el proceso mencionado; el dispositivo comúnmente utilizado en la actualidad es un microcontrolador, el cual debe ser adaptado para trabajar a los niveles de voltaje requeridos por esta tecnología y acoplarse de manera efectiva con los niveles de voltaje que se tendrán a la entrada y salida del dispositivo cicloconvertidor, en donde se tiene un voltaje relativamente muy alto con respecto al de funcionamiento del microcontrolador; por lo que se hace necesario encontrar un método de aislamiento entre el circuito de control y el de potencia a la salida del modulo cicloconvertidor, donde actuaran como se menciona anteriormente, los interruptores de potencia como elementos principales.

Por lo mencionado anteriormente el circuito cicloconvertidor monofásico/monofásico estará conformado por tres etapas principales, las cuales son: Etapa de control, etapa de acoplamiento y etapa de potencia.

El diagrama de bloques general del cicloconvertidor monofásico se muestra en la **figura 2.4** en este se presentan las etapas antes mencionadas.

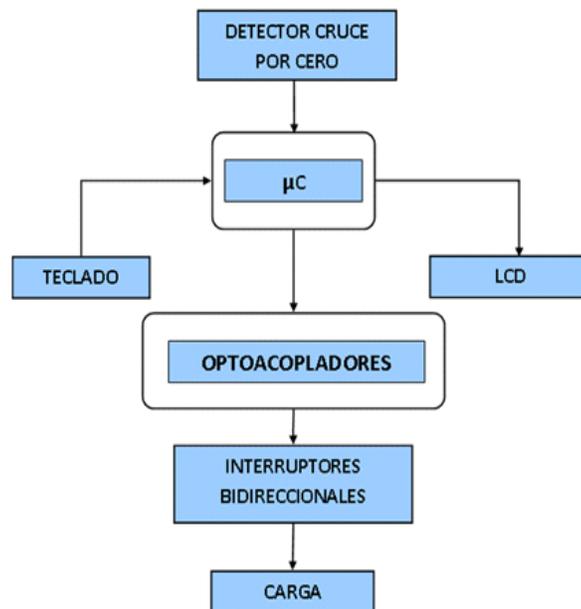


Figura 2.4. Diagrama de bloques completo del cicloconvertidor monofásico

Las tres etapas principales que conforman el diagrama de bloques de la **figura 2.4** se detallan a continuación en las siguientes secciones.

2.2.5. ETAPA DE CONTROL

La etapa de control del modulo cicloconvertidor se detalla en el diagrama de bloques de la **figura 2.5**. La etapa se conforma principalmente por los siguientes elementos: Un microcontrolador, circuito detector de cruce por cero, teclado matricial y presentador LCD.

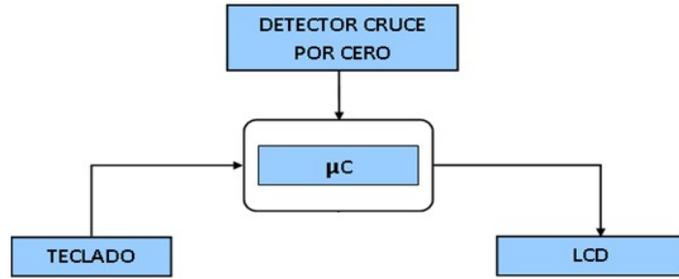


Figura 2.5. Diagrama de bloques de la etapa de control.

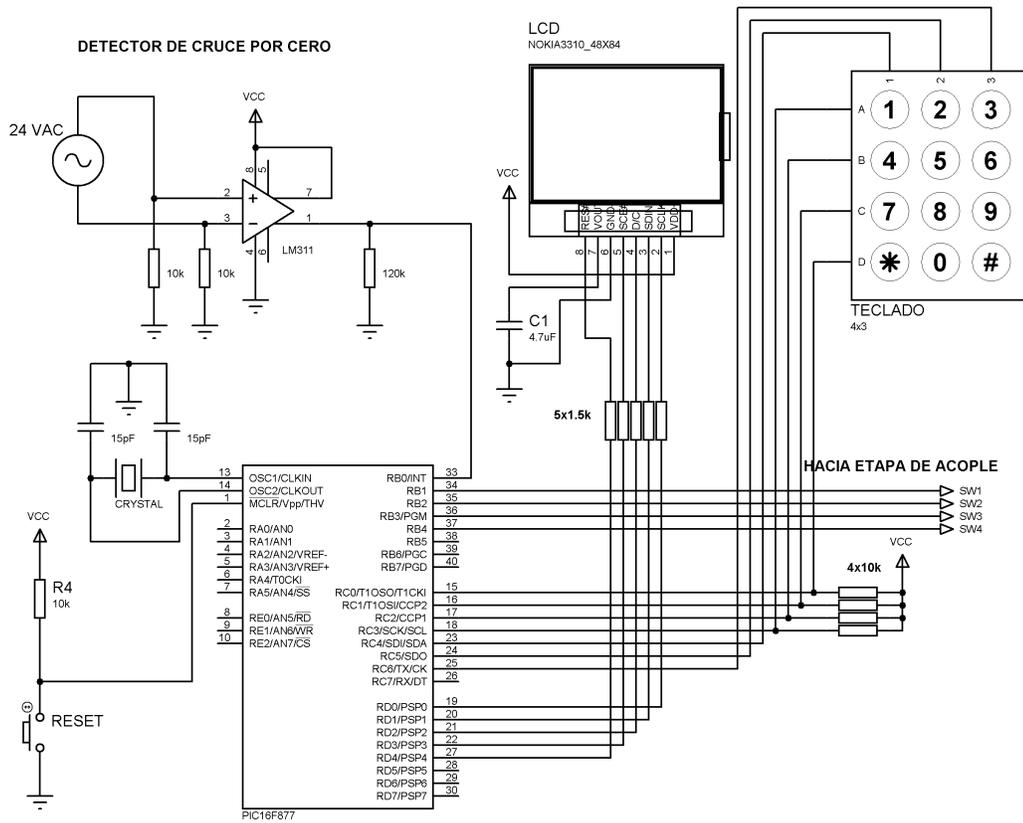


Figura 2.6. Circuito completo de la etapa de control utilizado para la simulación en Proteus.

2.2.5.1. LÓGICA DE CONTROL UTILIZANDO UN MICROCONTROLADOR

Un microcontrolador es un circuito integrado o chip independiente, que incluye internamente las tres unidades funcionales de una computadora como son: unidad central de procesamiento, memoria y periféricos de E/S. Son diseñados para reducir el costo económico y el consumo de energía de un sistema en particular. Por eso el tamaño de la unidad central de procesamiento, la cantidad de memoria y los periféricos incluidos dependerán de la aplicación, por lo que es necesario hacer una buena elección del dispositivo que se utilizara para los propósitos particulares de diseño.

El microcontrolador es el cerebro del modulo cicloconvertidor, este se encarga de establecer la lógica de funcionamiento del mismo, enviando señales para la activación oportuna de los elementos de disparo de los transistores IGBTs, con lo que se consigue la forma de onda de salida adecuada para el cicloconvertidor con el numero de crestas establecido y con ángulos de disparo que generan los recortes en la onda de voltaje de salida. Lo anterior se consigue gracias a la señal de entrada proveniente del detector de cruce por cero (como se explicara posteriormente) lo que le permite al microcontrolador establecer una referencia relativa de la señal alterna de entrada, y llevar acabo la lógica programada. El microcontrolador además recibe señales del teclado matricial, a través del cual se introducen los diferentes ángulos de disparo que el modulo cicloconvertidor soporta de manera dinámica, los cuales están comprendidos desde 0° hasta 180° y que corresponden a los valores máximo y mínimo de voltaje RMS respectivamente.

También el microcontrolador envía información al presentador LCD relativa al ángulo introducido desde el teclado matricial, además de ayuda y advertencias en la introducción del mismo, entre otras cosas.

Para poder realizar la función de controlar el disparo efectivo de los interruptores Bidireccionales con IGBTs, se requiere de un microcontrolador que posea los recursos necesarios y suficientes para realizar tal acción, como lo son: una buena rapidez de respuesta, capacidad de almacenar información (ángulos de retardo), ser fácilmente programable, poseer capacidad de interrupción externa generada por hardware, poseer un numero adecuado de puertos para poder

manejar el teclado y presentador LCD requeridos, temporizadores, interrupciones por software entre otros.

Dados los requerimientos anteriores se escogió el microcontrolador de la familia de rango medio PIC16F877 de la compañía Microchip Technology inc. Ya que cumple con los requerimientos antes mencionados, es económico, se tienen conocimientos básicos previos del funcionamiento del mismo y porque se requiere uno solo para llevar a cabo la función de control y manejo de dispositivos; adaptándose de manera adecuada a nuestras necesidades.

2.2.5.2. EL MICROCONTROLADOR PIC16F877

El microcontrolador PIC16F877 (ver figura 2.7.a)es un circuito integrado fabricado por la empresa Microchip Technologies Inc.; este pertenece a la familia de rango medio de microcontroladores con instrucciones de programa de 14 bit de longitud y bus de datos de 8 bits, el cual se encarga de generar las señales de encendido de los transistores IGBT's en los interruptores bidireccionales de la etapa de potencia del cicloconvertidor, bajo la lógica de control establecida, para generar la onda de señal de voltaje deseada a la salida del cicloconvertidor. Este microcontrolador goza de mucha popularidad y es actualmente es uno de los mas utilizados a nivel mundial, lo anterior radica en su buen desempeño, bajo costo y prestaciones que ofrece como son: rapidez de operación, se pueden escribir programas y borrarlos muchas veces, existe mucha documentación técnica y experimental accesible relativa a este dispositivo, la cantidad y funcionalidad de los periféricos que posee es adecuada para muchas aplicaciones etc.



Figura 2.7.a. Microcontrolador PIC16F877.

2.2.5.3. CARACTERISTICAS GENERALES

Como se mencionó en el apartado anterior, un microcontrolador (MCU) es un circuito integrado que incorpora una unidad central de proceso (CPU) y una serie de recursos internos (módulos periféricos). La CPU permite que el microcontrolador pueda ejecutar instrucciones almacenadas en una memoria. Los recursos internos son memoria RAM, memoria ROM, memoria EEPROM, posee puertos serie, 5 puertos de entrada / salida, temporizadores, convertidor análogo a digital y buses de interfaz serie especializados, como I²C etc. Se puede decir que es una evolución del microprocesador, al añadirle a este último las funciones que antes era necesario situar externamente con otros circuitos. El ejemplo típico está en los puertos de entrada / salida y en la memoria RAM, en los sistemas con microprocesadores es necesario desarrollar una lógica de control y unos circuitos para implementar las funciones anteriores, con un microcontrolador no hace falta porque lo lleva todo incorporado, además en el caso de tener que ampliar el sistema ya ofrece recursos que facilitan esto.

2.2.5.4. CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO

Las características principales de este microcontrolador son:

1. El microcontrolador PIC16F877 es un circuito integrado de 40 pines fabricado con tecnología CMOS, existen en diferentes tipos de encapsulado como por ejemplo DIP, SOIC y PLCC.
2. Set de 35 instrucciones.
3. La memoria programable es de 8Kx14 palabras tipo FLASH, la memoria de datos (RAM) es de 368x8 bytes y la memoria de datos no volátil (EEPROM) es de 256x 8 bytes.
4. Capacidad de atender interrupciones por hardware y software.
5. Hasta 15 fuentes de interrupción posibles.
6. Rango de voltaje de operación de 2.0 a 5.5 V y 25mA.
7. La velocidad de operación máxima de reloj es de 20MHz, cada instrucción se ejecuta en dos ciclos de reloj por

tanto, cada instrucción se ejecuta en 200ns.

8. Tipo de oscilador seleccionable (RC, HS, XT, LP y externo).
9. Todas las instrucciones se ejecutan en un único ciclo de instrucción, excepto las de salto.
10. Puerto Paralelo Esclavo de 8 bits (PSP).
11. Posee Comunicación Síncrona SPI (Serial Peripheral Interface) y Comunicación Asíncrona SCI (Serial Communication Interface).

2.2.5.5. DIAGRAMA Y DESCRIPCIÓN DE PINES

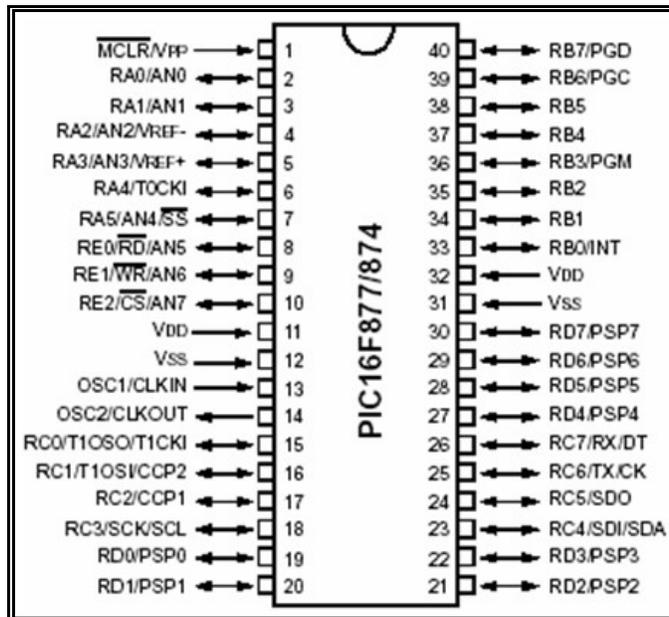


Figura 2.7.b. Diagrama de pines del microcontrolador PIC16F877.

# PIN	NOMBRE DE PIN	DESCRIPCIÓN
25, 26	RX, TX	Interface de comunicación serial asíncrona SCI
23, 24, 18	SDI, SDO, SCK	Interface de comunicación serial síncrona SPI
19-22, 27-30, 8-10	PSP0-PSP7, /RD, /WR, /CS	Interface de comunicación paralela
1, 39, 40	/MCLR, PGD, PGC	Interface de programación
1-5, 7-10	AN0 – AN7	Convertidor Analógico Digital
2-7	RA0 – RA5	Puerto A de datos bidireccional
33-40	RB0 – RB7	Puerto B de datos bidireccional
15-18, 23-26	RC0 – RC7	Puerto C de datos bidireccional
19-22, 27-30	RD0 – RD7	Puerto D de datos bidireccional
8-10	RE0 – RE2	Puerto E de datos bidireccional
33	INT	Petición de interrupción
13,14	CLKIN, CLKOUT	Entrada y salida de reloj respectivamente
11	VDD	Alimentación 5 V
12	VSS	Tierra digital.

Tabla 2.1. Descripción de las funciones de los pines del microcontrolador PIC16F877.

2.2.5.6. DETECCIÓN DE CRUCE POR CERO

Para poder controlar de manera efectiva la señal de voltaje a la salida del circuito cicloconvertidor, se hace necesario detectar el momento preciso en que la señal senoidal cruza por cero, momento que se toma como referencia para realizar el disparo de los elementos de conmutación IGBT's que generan las crestas requeridas en la señal de

voltaje a la salida; en nuestro caso dicha señal de salida poseerá tres crestas positivas y tres negativas. El circuito de cruce por cero (figura 2.8) es necesario para indicarle al microcontrolador en que semiciclo se encuentra la señal alterna de voltaje de entrada, ya sea, en uno positivo o en uno negativo y el número de los mismos que han pasado. La referencia es cuando la señal cruza por cero o dicho de otra manera cuando la señal de voltaje de entrada de CA se vuelve cero, lo cual ocurre al inicio y final de cada semiciclo de señal.

Con esta información se establece como referencia de 0° de ángulo de disparo de los IGBT's desde que se detecta un cruce por cero hasta 180° después de transcurrido un semiciclo de la señal. Además se establece el número de crestas que se dejarán pasar y donde se dará el cambio de polaridad de la onda de voltaje de salida del cicloconvertidor.

La información de cruce por cero se le proporciona al microcontrolador, el cual lo utiliza como referencia para el disparo adecuado de los IGBT's en la etapa de potencia del cicloconvertidor, esta señal de cruce por cero genera una interrupción externa en el microcontrolador la cual realizara la rutina de interrupción que lleva a cabo la generación de la señal de salida con la cantidad de crestas requeridas por las especificaciones sin ángulo de recorte. El circuito de cruce por cero tiene además otra función, la de acoplar al nivel de voltaje de la señal alterna de entrada de 120V a 60Hz a un nivel de voltaje adecuado para el buen funcionamiento del microcontrolador de 5Vdc; consiguiendo un aislamiento efectivo (entre estos dos niveles de tensión) del microcontrolador con respecto a la señal de entrada.

El aislamiento eléctrico se logra por medio de un transformador que reduce los 120Vrms de entrada a 12Vrms para que el voltaje de la línea sea "monitoreada" por un comparador **LM311**, el cual proporcionará a su salida una señal cuadrada de voltaje de 5Vdc con lo que consigue acomodar la señal de entrada para el microcontrolador a un nivel adecuado.

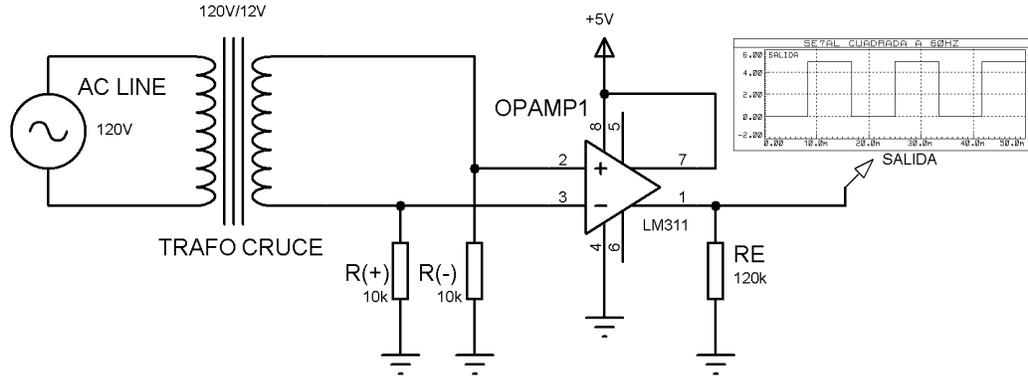


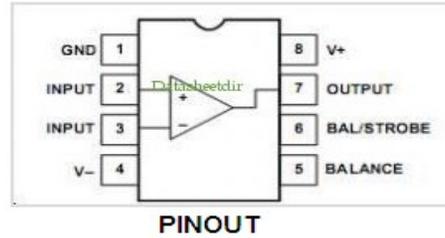
Figura 2.8. Circuito detector de cruce por cero.

2.2.5.7. Detalles de funcionamiento del DCPC.

El funcionamiento del detector de cruce por cero se detalla a continuación.

Se aplica la señal de corriente alterna a la entrada de un comparador LM311 que posee dos salidas una a colector abierto y otra a emisor abierto, como se muestra en la **figura 2.8**, de las cuales se utiliza la salida a emisor abierto (pin 1) conectándose la salida a colector abierto en el terminal positivo de la fuente de alimentación. Cuando se encuentra la señal de entrada (**ver figura 2.8**) en un semiciclo positivo se compara el voltaje entre las entradas no inversora (+) e inversora (-) conectadas al transformador (Trafo Cruce) y mientras la diferencia de voltaje no sea cero se obtiene un nivel bajo (L) a la salida del comparador. En el caso del semiciclo negativo, lo que sucede primero es que el comparador detecta el instante en el cual el transformador entrega 0vac y en ese momento se realiza el cambio de nivel de bajo a alto (H) en la salida del comparador (**ver figura 2.8**). Lo anterior se repite nuevamente, haciéndose los cambios de nivel de voltaje de salida de bajo a alto y de alto a bajo cada vez que el voltaje de entrada haga un cruce por la línea de 0V. Ya que la salida es a **emisor abierto** es necesario conectar una resistencia (RE) en dicha salida de emisor para que se pueda obtener la señal deseada para activar al microcontrolador, como se observa en la **figura 2.8**.

2.2.5.8. Diagrama de pines e información técnica.



4.0 Absolute Maximum Ratings for the LM111/LM211 (Note 10)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

Total Supply Voltage (V_{DD})	36V
Output to Negative Supply Voltage (V_{7-2})	50V
Ground to Negative Supply Voltage (V_{1-2})	30V
Differential Input Voltage	$\pm 30V$
Input Voltage (Note 4)	$\pm 15V$
Output Short Circuit Duration	10 sec
Operating Temperature Range	

LM111	-55°C to 125°C
LM211	-25°C to 85°C
Lead Temperature (Soldering, 10 sec)	260°C
Voltage at Strobe Pin	$V^- - 5V$
Soldering Information	
Dual-In-Line Package	
Soldering (10 seconds)	260°C
Small Outline Package	
Vapor Phase (60 seconds)	215°C
Infrared (15 seconds)	220°C
See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" for other methods of soldering surface mount devices.	
ESD Rating (Note 11)	300V

2.2.5.9. Simulación del circuito detector de cruce por cero.

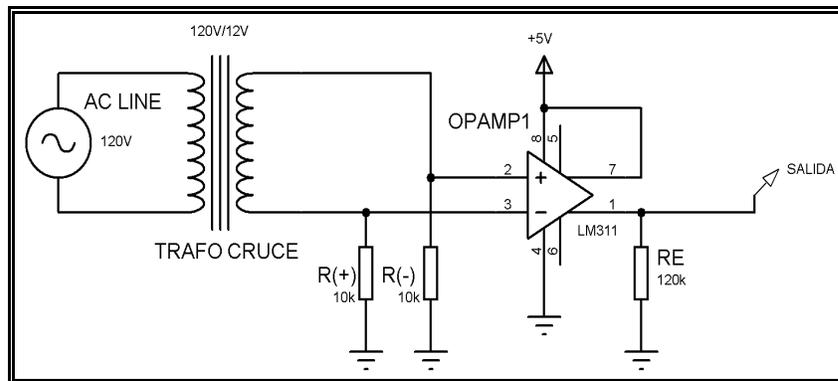


Figura 2.10. Circuito utilizado para la simulación del detector de cruce por cero, en Proteus.

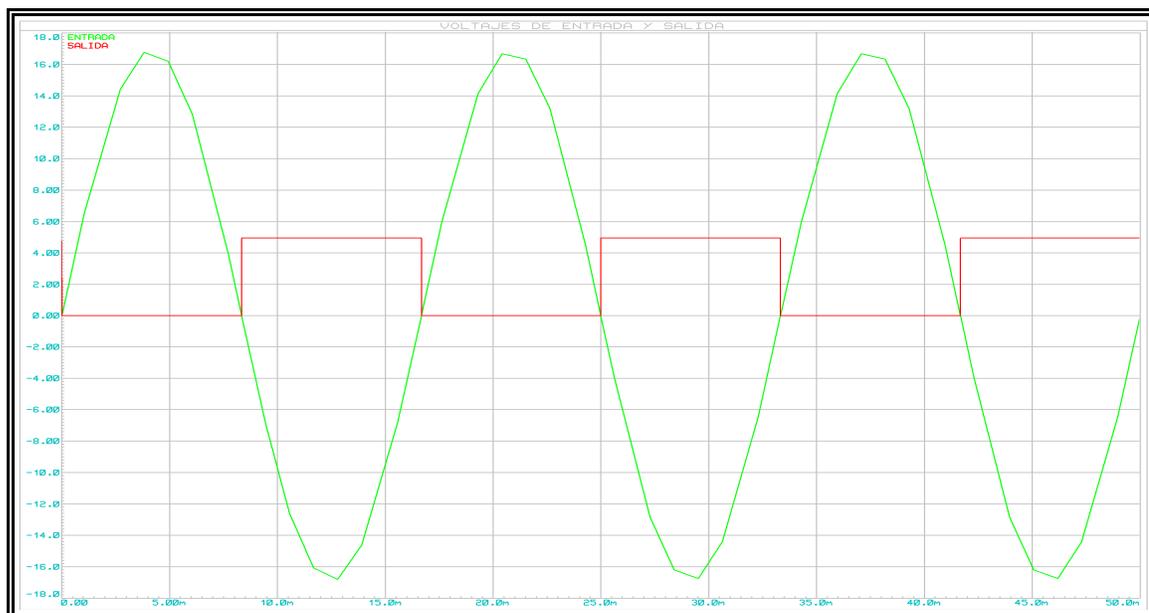


Figura 2.11. Señales de entrada y salida del detector de cruce por cero, simulación realizada en Proteus ISIS.

La señal cuadrada del detector de cruce por cero es aplicada al pin RB0 del microcontrolador PIC16F877, donde dicho pin se utiliza para efectuar una interrupción externa generada por hardware, la cual detiene momentáneamente la ejecución normal del programa efectuándose en microcontrolador y lo obliga a dar prioridad a la rutina de interrupción, ejecutándola cada vez que exista un cambio de estado en el pin Rb0 o dicho de otra manera cuando exista cruce por cero de la señal senoidal de entrada, basándose en la señal proporcionada por el detector de cruce por cero la cual es su referencia.

La rutina de interrupción se encarga de generar la señal de disparo de los dispositivos IGBT's que forman parte de los interruptores Bidireccionales y dependiendo del semiciclo en el que se encuentre la señal de entrada, dejara pasar o rectificara el mismo, hasta que el conteo de los semiciclos transcurridos sea de tres, dejando pasar tres crestas positivas; luego de lo anterior realizara el disparo de dispositivos adecuados para cambiar de polaridad en la señal de salida de voltaje y realizara de manera similar el paso de tres crestas negativas; luego de esto repetirá cíclicamente este proceso generando la señal de voltaje esperado como la de la figura 1.1 c.

2.2.5.10. MODULO LCD.

El modulo LCD consta de una pantalla de cristal liquido LPH 7366 de 48 x 84 píxeles cuyo controlador es el PCD 8544. Los LCD basados en este controlador pueden ser encontrados en algunos teléfonos celulares Nokia, este LCD es monocromático y esencialmente existen dos tipos.

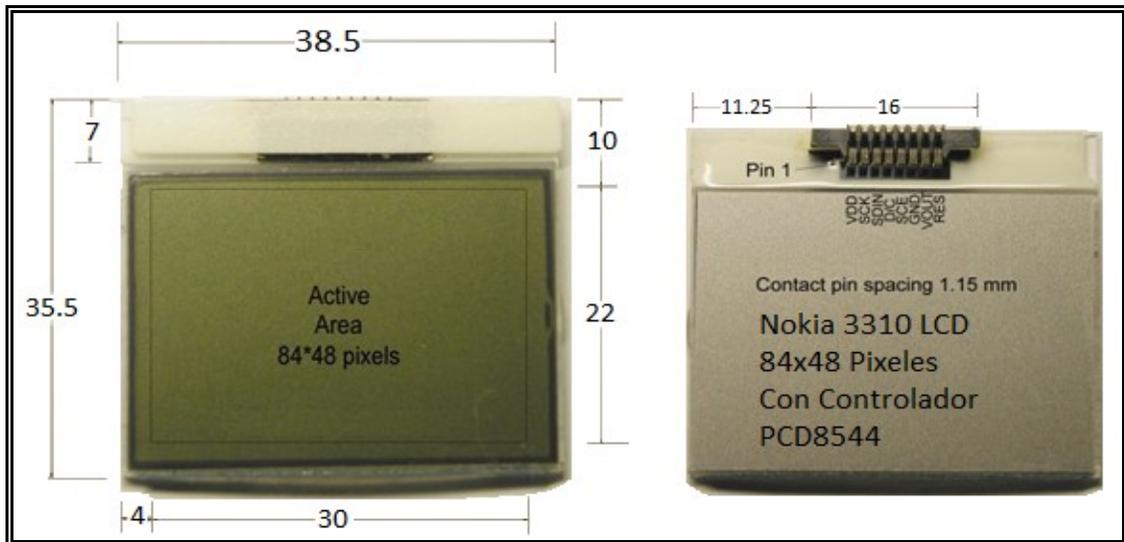


Figura 2.12. Tipos de LCD lph7366 de 8 y 9 pines.

El modelo de LCD utilizado en nuestro modulo de cicloconvertidor es el mostrado en la figura 2.12, el cual tiene 9 pines de los cuales el pin #8 no se utiliza, los 8 pines restantes están descritos en la tabla 2.3.

El archivo *lcdNokia.inc* contiene las rutinas de inicialización y manejo de esta pantalla, por ejemplo: configuración, desplegar un carácter ó cadena de caracteres, limpiar pantalla, etc.

La tabla 2.2 muestra el conjunto de instrucciones del controlador *PCD8544*, en esta se muestra el formato de las instrucciones para el control del LCD, este formato esta dividido en dos modos que dependen del estado del pin D/\bar{C} . Si este es "0" lógico el *byte* enviado es interpretado como comando; un "1" lógico indicara al LCD que el *byte* enviado es un dato.

2.2.5.11. CONTROLADORES DEL MODULO LCD

El LCD LPH7366 tiene una resolución de 48x84 es como imaginarse una matriz de 48x84 espacios y rellenando cada espacio adecuado con fondo negro, se puede llegar a realizar una figura, letra, número, o algún símbolo en especial. Nuestro interés no es dibujar si no mostrar texto o números y símbolos de escritura.

Para controlar el LCD, éste cuenta con su propio driver al cual hay que enviar una serie de comandos para ponerlo en funcionamiento, este es el **PCD8544**.

INSTRUCCION	D/\bar{C}	BYTE								DESCRIPCIÓN
		DB7	DB6	DB5	DB4	DB3	DB2	DB1	DB0	
ESTE BLOQUE DE INSTRUCCIONES ES VALIDO PARA H = 0 , H = 1										
NOP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	No hay operación.
CONJUNTO DE FUNCIONES	0	0	0	1	0	0	PD	V	H	Control sobre el chip modo y set de instrucciones.
GRUPO DE INSTRUCCIONES BASICAS (H = 0)										
Escritura de dato	1	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0	Escribe dato en la RAM del display.
Control del Display	0	0	0	0	0	1	D	0	E	Configuración de modos del display.
Selecciona dirección Y de la RAM	0	0	1	0	0	0	Y2	Y1	Y0	Selecciona Y dirección de RAM 0 < Y < 5
Selecciona dirección X de la RAM	0	1	X6	X5	X4	X3	X2	X1	X0	Selecciona X dirección de RAM 0 < X < 83
GRUPO DE INSTRUCCIONES EXTENDIDO (H = 1)										
Selecciona Vop	0	0	Vop6	Vop5	Vop4	Vop3	Vop2	Vop1	Vop0	Escribe al registro Vop.

Tabla 2.2. Pines del presentador LCD y su funcionamiento respectivo en operación.

El display es configurado con su voltaje de operación en un rango de 3 - 10.68 V el cual es configurable por medio de Vop6-Vop0 según la siguiente formula:

$$V_{LCD} = a + (VOP6 \text{ to } VOP0) * b \text{ [V]}.$$

Donde a = 3.06 y b = 0.06.

Proporcionando un rango de programación de 3.00 a 10.68 a temperatura ambiente.

La descripción de la función de los bits de la tabla 2.3 se menciona a continuación:

BIT		0	1
PD		Se habilita el chip (activa)	El chip esta apagado
V		Modo de direccionamiento horizontal	Direccionamiento vertical
H		Se usan las instrucciones básicas	Usa las instrucciones extendidas
D	E	Descripción	
0	0	Display en blanco	
1	0	Modo normal	
0	1	Todos los segmentos encendidos	
1	1	Modo de video inverso	

Tabla 2.3. Función de los bits D0 y D1 en el control del driver PCD8544.

Modo de Direccionamiento Horizontal: Cada byte (dato) que se envía al LCD, llena verticalmente ocho píxeles de la memoria del LCD, y estos bytes se van colocando en forma adyacente, llenando fila por fila. Una fila corresponde a un sub-arreglo de 84x8 obteniendo el total de 6 filas.

2.2.6. ETAPA DE ACOPLAMIENTO.

Como los transistores IGBT trabajan con un nivel de voltaje distinto al del MCU (microcontrolador) se necesita acoplar la señal de control originada en él (MCU) al rango de trabajo de los transistores.

Para ello es necesario de un dispositivo que pueda trabajar con ambos rangos de voltaje, para que de esta manera, funcione como un intermediario. El PIC16F877 opera a niveles lógicos TTL por lo que perfectamente puede manejar un dispositivo como el LED. Así se tiene la opción de trabajar con optoacopladores que como bien lo dice su nombre, acoplan una señal con nivel de voltaje de un tipo bajo (como el TTL) a otro de un nivel un poco más alto, tal es el caso de los 12V de trabajo del transistor IGBT.

El acople lo logra por medio de un LED y un fototransistor internos. Es un acople óptico lo cual no solamente permite llevar de 5V a 12V sino también aislar físicamente la parte mas delicada del circuito: el control a base de microcontrolador. Ese aislamiento se da entre etapa de control y etapa de potencia.

En la figura 2.13 se observa el circuito con optoacoplador utilizado para acondicionar los 12V de activación que requiere cada transistor.

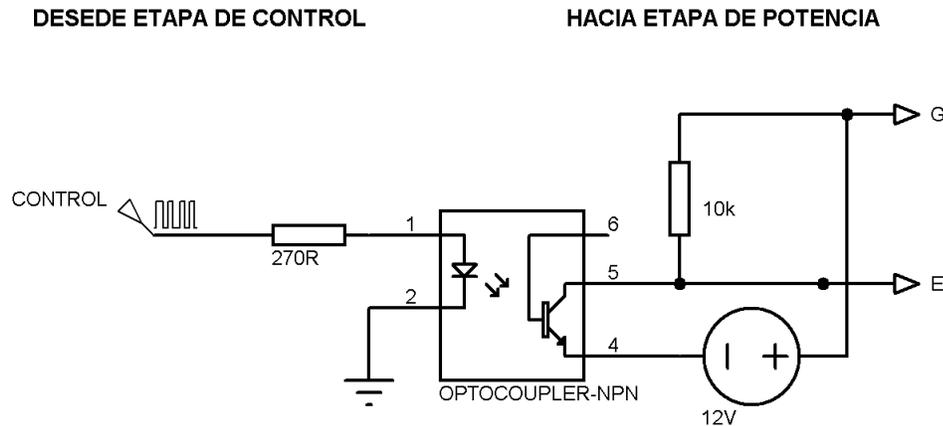


FIGURA 2.13. Etapa acopladora de 5V a 12V.

2.2.7. ETAPA DE POTENCIA.

la etapa de potencia se detallo en la seccion 2.2 donde se explico el funcionamiento del switch bidireccional. Esta es la base del diseño, un arreglo de interruptores bidireccionales de la manera más sencilla, el puente H. El puente H permite mayor flexibilidad para generar formas de onda como las de los cicloconvertidores ya que este solamente requiere de un control a base de lógica: activación por pares de transistores. La forma de trabajo del puente H es en X. Debe tenerse cuidado de no activar pares (Q1, Q2) ni (Q3, Q4) ya que esto produciria un corto circuito. La secuencia de disparo para generar una onda de cicloconvertidor de 20Hz a partir de uno de 60Hz es (Q1, Q4), (Q2, Q3), (Q1, Q4) y luego repetirla ciclicamente.

El circuito se muestra en la figura 2.14.

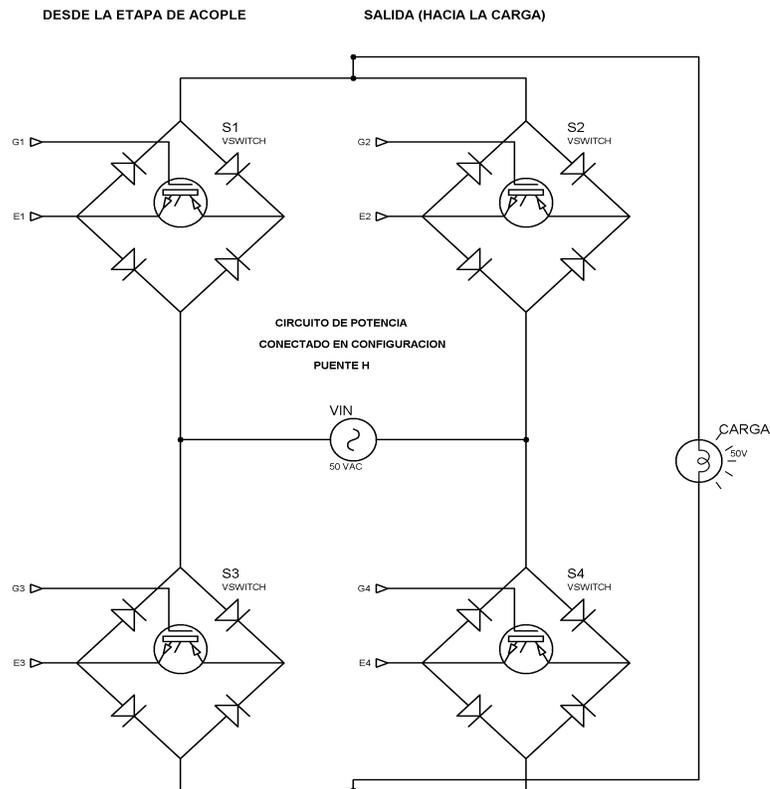


Figura 2.14. Circuito de la etapa de Potencia.

2.3. CÁLCULOS, PARÁMETROS Y CRITERIOS DE DISEÑO.

2.3.1. Etapa Optoacopladora.

En la etapa acopladora, se encuentran los componentes que acondicionan una señal de 5V del MCU a los 12V de los transistores.

¿Por qué 12V? La respuesta es sencilla, el transistor que se está utilizando en el diseño del cicloconvertidor monofásico/monofásico es del tipo IGBT (Isolated Gate Bipolar Transistor) del fabricante ST. Específicamente se trata del STGP7NC60H el cual puede activarse a partir de los 10V hasta 20V como máximo. Por lo general se suele activar este tipo de transistores a 15V incluso hay algunos que tienen solamente este valor como voltaje de trabajo.

El por qué 12V y no 15V se debe a una conveniencia en el diseño en cuanto a velocidad de apagado teniendo en cuenta una lógica muy sencilla. Mientras más alto, más tarda en caer. Eso quiere decir que si trabajamos a 12V el transistor se apagará más rápido que si trabaja a 15V; aunque no parezca una gran diferencia apagarse unos cuantos nanosegundos antes, es de mucha importancia en el diseño ya que del apagado veloz depende el que no se produzca un corto circuito en la etapa de potencia. Otra manera de apagar al transistor más rápido es invirtiendo la polaridad entre sus terminales G (Gate) y E (Emitter) pero esto conlleva a construir un circuito que logre tal efecto por lo tanto la opción (aunque más lenta que ésta última) que se escogió en aras a la reducción de tamaño del circuito fué la de trabajar con 12V.

En cuanto al valor de las **resistencias de compuerta (RG)** se puede tomar como parámetro la resistencia sugeridas en el Datasheet del transistor en la mayoría de los casos la cual toma el valor de **10k**. Este valor no afecta al optoacoplador puesto que al encenderse el transistor interno que éste posee tiene la capacidad de conducir la corriente que la resistencia demanda.

Ahora se hace el análisis de la resistencia del LED interno. Este cálculo se hace como se haría para cualquier LED normal, un voltaje próximo a los 1.2V y un valor de corriente entre 10mA a 20mA. Los pines del MCU son capaces de suministrar esa corriente por un tiempo prolongado pero debe aclararse que a lo sumo el pin que más corriente entrega, tiene un valor de corriente de 2/3 del valor calculado. Esto es debido que a la forma de señal de control, para condiciones de voltaje máximo en la salida es de 2/3t encendido y 1/3t apagado. Por lo tanto la resistencia de LED es:

$$R_{LED} = \frac{V_{CC} - V_{LED}}{I_{LED}} = \frac{5V - 1.2V}{15mA} = 253 \Omega \approx 270 \Omega$$

Para mayor información del optoacoplador 4N25 consultar el datasheet en el apéndice A.

2.3.2. Etapa de Potencia.

Como ya se había mencionado, el transistor a utilizar es el STGP7NC60H de STMicroelectronics. El transistor tiene capacidad para conducir hasta 14A con un voltaje máximo VCE = 600V y un voltaje de activación VGE = 10V hasta 20V. El Puente de Diodos debe tener como requisito mínimo soportar hasta 5A debido a que este es el valor de corriente nominal que el cicloconvertidor debe suministrar, así que se escogió un puente de diodos de 6A x 600V.

El transistor IGBT recibe el voltaje de activación a través de RG (ver figura 2.13) con un valor de 10k.

El switch bidireccional que está formado por el transistor IGBT y el puente de diodos es el elemento que permite que llegue energía a la

carga. Para que la carga se energice se debe realizar una conexión de cuatro switches bidireccionales conectados en un arreglo matricial.

Este arreglo de 4 switches del diseño es conocido como PUENTE H debido a que el diagrama del circuito forma una especie de H (ver figura 2.14).

Para formar el voltaje de salida deseado de un cicloconvertidor monofásico de cuatro cuadrantes activado por ángulo de desfase y sin corriente de circulación (con bloqueo), que es el caso de nuestro cicloconvertidor, se debe tener una lógica de activación de los switches bidireccionales.

Primero se analizará la activación por cuadrantes, para ello hay que referirse a las figuras 2.15 y 2.16 en la cual apreciamos la polaridad del voltaje de la fuente y el sentido de la corriente en la carga. El color rojo es polaridad positiva y el azul negativa.

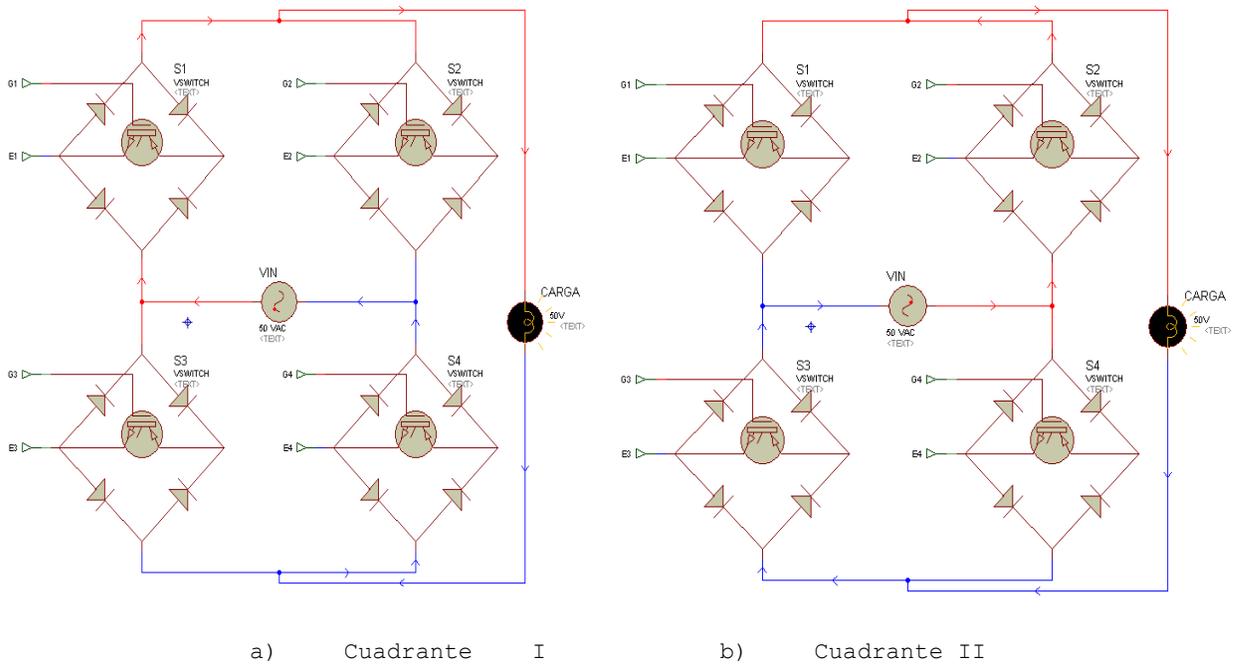


Figura 2.15. Cuadrantes I y II

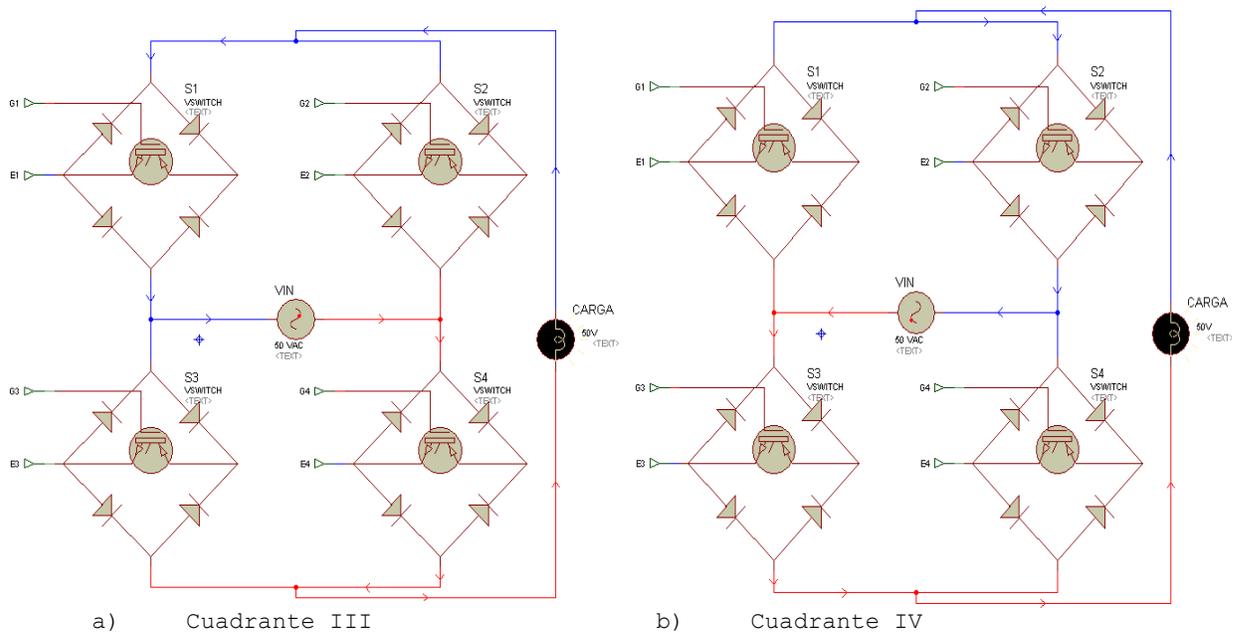


Figura 2.16. Cuadrantes III y IV

Para ilustrarlo mejor analícese la tabla 2.4 en donde se observa no solamente el cuadrante, sino también se verá la lógica de activación de los transistores de los interruptores bidireccionales.

Semicyclo (Señal de 60Hz)		Transistores Activados		Polaridad V (señal de 60Hz)		Polaridad I (Carga)		Cuadrante
1	+	Q1	Q4	+	-	+	-	I
2	-	Q2	Q3	-	+	+	-	II
3	+	Q1	Q4	+	-	+	-	I
4	-	Q1	Q4	-	+	-	+	III
5	+	Q2	Q3	+	-	-	+	IV
6	-	Q1	Q4	-	+	-	+	III

Tabla 2.4. Activación de transistores para cada semicyclo de la señal de 60 Hz.

Para entender la lógica de cuadrantes solo basta recordar que V esta en el eje de las abscisas e I en el de las ordenadas. La activación por semiciclo se haría de acuerdo a la lógica de la tabla 2.4 donde el ciclo de 20Hz comenzaría en semiciclo 1 de la señal de 60Hz, medio ciclo de la señal de 20Hz se cumpliría con el semiciclo 3 de la señal de 60Hz y el semiciclo negativo de la señal de 20Hz es el resto de semiciclos de 60Hz, desde el cuarto hasta el sexto.

2.3.3. Etapa de Control.

En la etapa de control se deben tener en cuenta principalmente dos componentes: el amplificador operacional comparador y el microcontrolador. El que más atención requiere es definitivamente el MCU por su alto grado de complejidad. Primero se analiza lo concerniente al comparador.

El comparador utilizado es el LM311, que como se especificaba en la sección 2.3 se escogió porque tiene una respuesta muy veloz a los cambios de voltaje. Sus terminales realizan la comparación a una velocidad suficientemente rápida para producir un retardo de unos cuantos nanosegundos y no afectar de gran manera el inicio de cada cresta de la señal de salida del cicloconvertidor.

Los valores de resistencia simplemente se escogieron a través de valores estándar para trabajar con circuitos con niveles lógicos TTL.

Lo principal en el comparador es precisamente la tarea de comparación. Como ya se había mencionado antes, el LM311 posee dos salidas: una es a colector abierto y la otra es a emisor abierto. La que se utilizó es a emisor abierto, ya que ésta cumplía su tarea de manera similar a como lo hacía un diseño previo del circuito detector de cruce por cero el cual incluía un optoacoplador en lugar del comparador. El optoacoplador no se utilizó mas debido a que producía asimetría entre crestas

adyacentes debido a que el tiempo en que la salida del optoacoplador permanecía en estado alto no era el mismo que en estado bajo. Eso se corrigió enormemente con el uso del LM311.

La tabla 2.5 muestra el desempeño del LM311 y la forma en la que indica al PIC16F877 cuando hay un cruce por cero y cual es la polaridad del semiciclo que comienza.

Señal de 60Hz (Polaridad)		Polaridad Terminales LM311		Flanco Generado	Estado de Salida (Emisor)
		(+)	(-)		
1	+	+	-	Bajada	L
2	-	-	+	Subida	H

Tabla 2.5. Funcionamiento del LM311

Ahora se analiza el funcionamiento del MCU (PIC16F877).

Primero se debe hacer notar que la conexión de pines tanto para el display LCD, teclado matricial y las salidas hacia la etapa de acondicionamiento se hace de manera arbitraria. Luego, en la programación es que se le da el comportamiento respectivo.

Como lo que se necesita en el PIC16F877 es un programa, esa es la forma de analizarse la etapa de control de manera completa ya que es en el MCU en donde se puede distinguir que tarea realiza cada dispositivo conectado a él.

Primero se aclara que contando todos los tiempos de respuesta de cada uno de los dispositivos sumados a las instrucciones intermedias antes de realizar el encendido y el apagado de los transistores, no excede los 20uS por lo que el margen de error es muy pequeño en la generación del voltaje de salida.

Con lo anterior ya sabido, se evalúa en primer lugar que módulos o que interrupciones utilizar de dicho MCU. Hay una rutina que tiene la

prioridad en todo el proceso la cual es la de detección de cruce por cero ya que la precisión del voltaje de salida depende de que tan rápido se haga la activación de los transistores a partir del cruce por cero. Por ello se dice hacer uso de únicamente dos interrupciones, la interrupción externa (INTE) y la interrupción por desbordamiento de uno de sus tres temporizadores internos (del PIC). La elección del temporizador recayó en la precisión que éste podría dar a los disparos de los interruptores, por ello se escogió el Timer 1 (TMR1) ya que éste permitía una precisión de hasta $1\mu\text{s}$ en los disparos debido al uso de un cristal de cuarzo de 4MHz como reloj del PIC.

La lectura del teclado donde se ingresan los ángulos a ser activados, se prefirió utilizar en modo sondeo (consultar si se activó alguna tecla) y el manejo del LCD se hizo a partir de una librería ya existente para él.

Al temporizador se le debía indicar como realizar los retardos, entonces se llegó a la conclusión de que se debía transformar el dato ingresado como tres dígitos BCD (ángulo de disparo) a formato binario para que de esta manera el temporizador entendiera la instrucción. Sólo había que superar otro inconveniente, el temporizador genera la interrupción por desbordamiento, y al ser éste de 16 bits por lo que el número correspondiente al binario se quedaría corto porque el máximo valor del ángulo en binario es de 180 mientras que para desbordar el timer debe llegar hasta 64 un poco más de mil microsegundos.

Esto llevó a tomar en cuenta dos cosas importantes, primero el de verificar a cuantos microsegundos equivale cada grado de los 180 que hay en un semiciclo de la señal de 60Hz y la segunda es que aunque no se alcance el conteo necesario para desbordar el TMR1 la única opción es la de trabajar con el complemento, por lo que a cada ángulo debía de aplicársele esta operación, de esta manera sólo se resta lo que se necesita contar hasta desbordar, del total de los cerca de 64 mil conteos que el temporizador tiene.

Resueltos los problemas anteriores, se procede a realizar los cálculos respectivos, así para calcular el dato a cargar en los registros asociados a la temporización de TMR1 del PIC (TMR1L y TMR1H) lo cual se hace tomando en cuenta que:

$$Desbordamiento_{Timer1} = \frac{4}{Frecuencia_{Oscilador}} * Preescaler * (65535 - TMR1)$$

donde: Frecuencia_oscilador = 4MHz, Preescaler = 1

y TMR1 = (TMR1H_TMR1L)

Ahora se llega a la parte clave del diseño, la programación del MCU. Si la programación es incorrecta, todo el circuito funcionará mal puesto que todo depende de lo que el PIC haga. Todo dispositivo trabaja para y por lo que el PIC haga o deje de hacer.

Habiendo cubierto ya una parte importante en el diseño como lo es la etapa de temporización se debe, ahora, darle el correcto uso de acuerdo a la lógica de control en el programa.

Para mostrar la lógica de programación del PIC16F877 se ha creado el flujograma de la figura 2.17.

En dicho flujograma se observa a grandes rasgos lo que sucede dentro del microcontrolador a la hora de hacer las operaciones respectivas a la orden dada desde el teclado, desde el temporizador o desde el detector de cruce por cero.

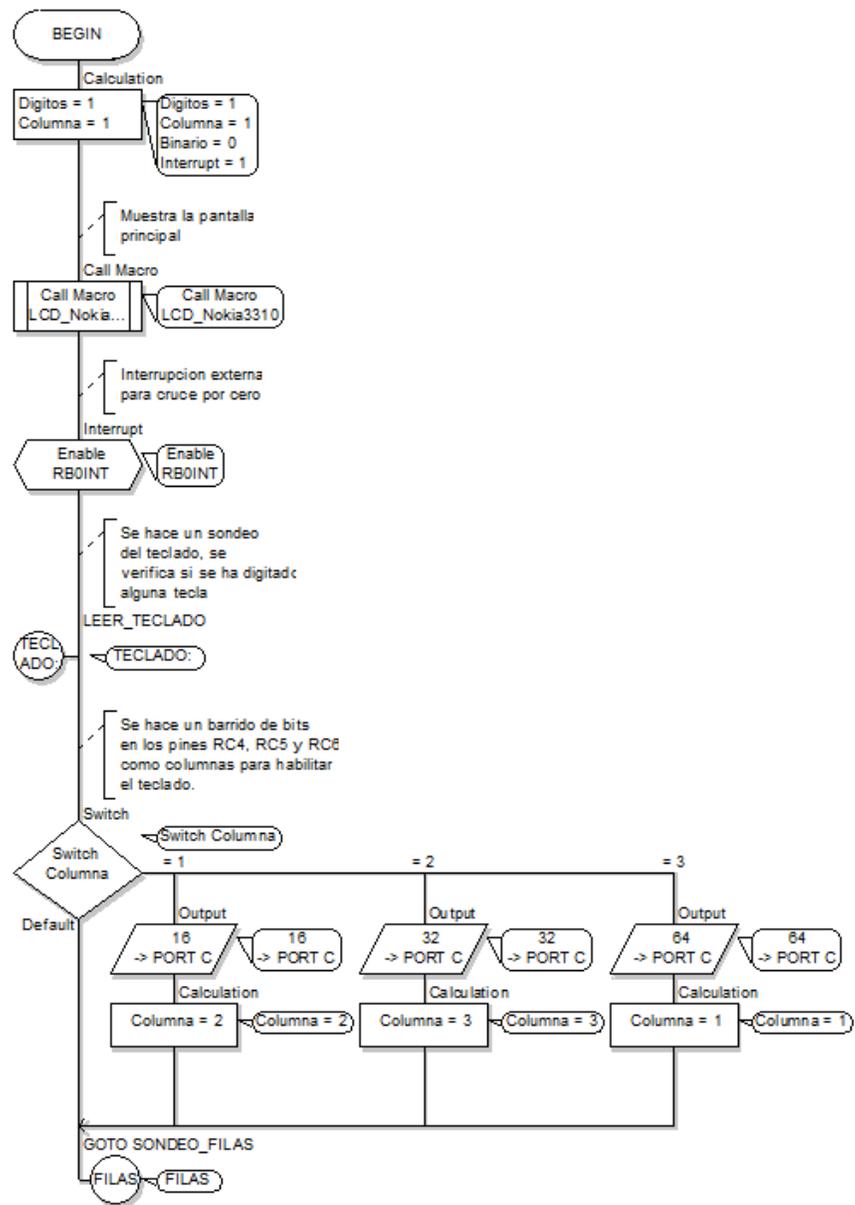


Figura 2.17.a. Barrido de columnas de teclado (Dato de Tecla)

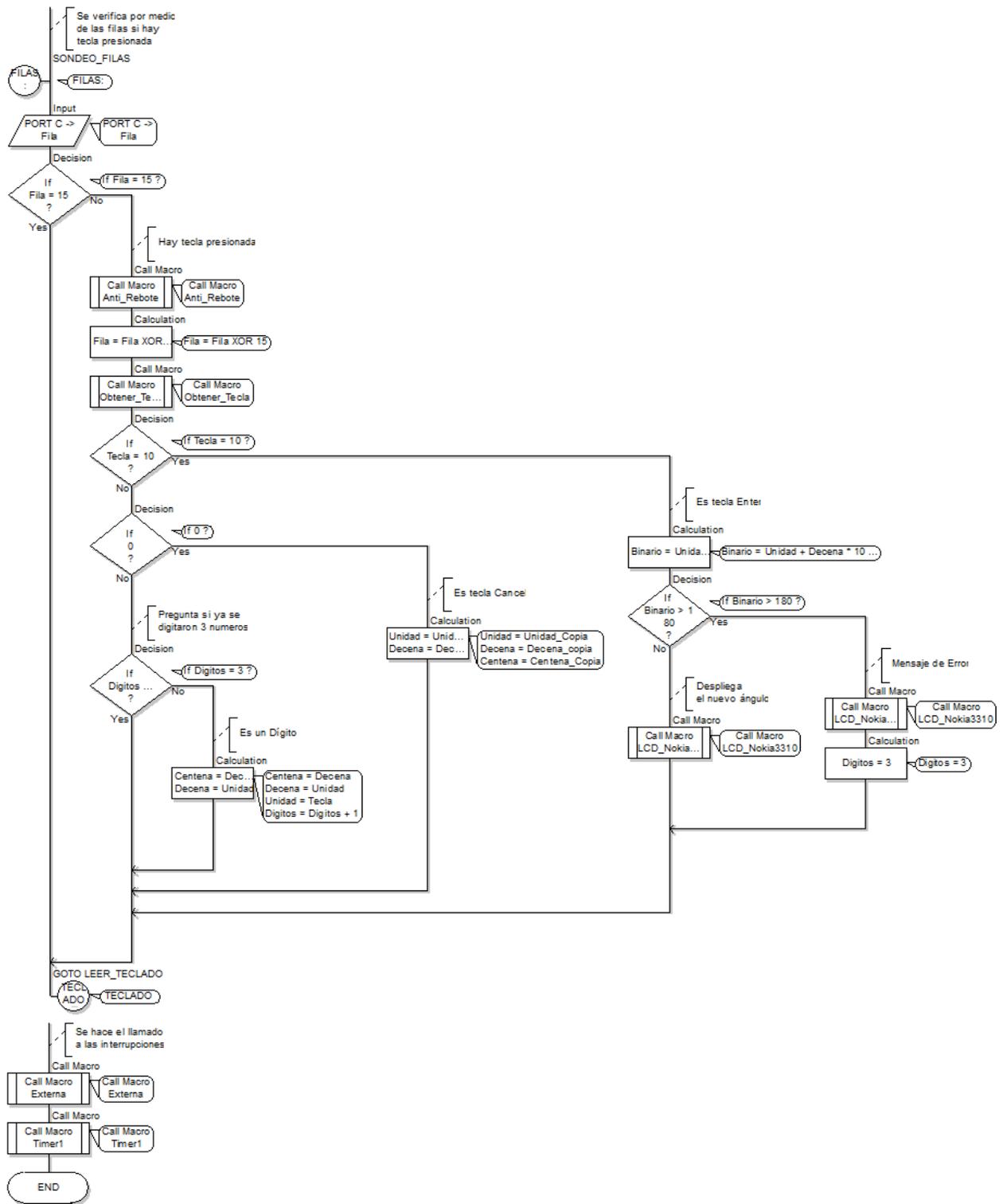


Figura 2.17.b. Lectura de Filas de teclado y operaciones enter, dígito, cancel y llamado de interrupciones

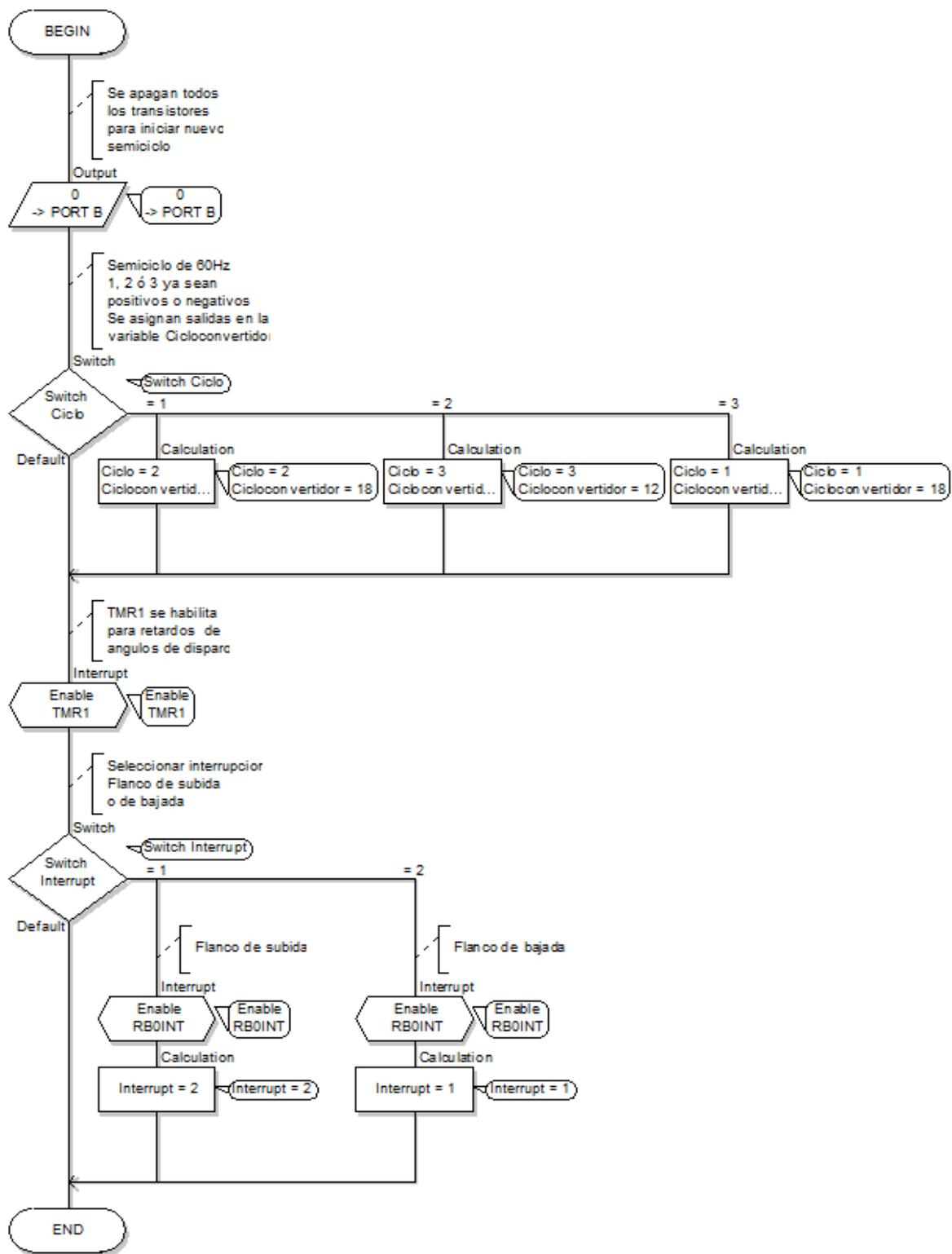


Figura 2.17.c. Rutina de Interrupción Externa para el cruce por cero.

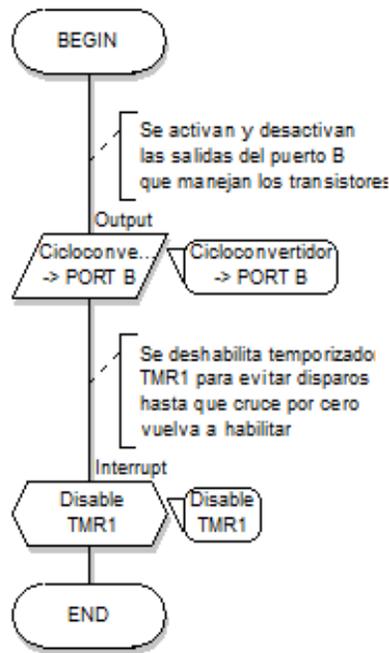


Figura 2.17.d. Rutina de Interrupción de temporizador para angulo de disparo.

El flujograma de la figura 2.17 muestra de forma bastante detallada aunque no completa lo que hace el PIC. Aquí se puede apreciar perfectamente lo que se decía anteriormente respecto de la complejidad del PIC16F877 en cuanto a su análisis.

Cabe destacar que éste es solamente un bosquejo de lo que es el programa realmente ya que dicho programa fué realizado en lenguaje ensamblador y el flujograma, que es más pictórico que funcional, en el programa Flowcode. Lo de pictórico y no funcional se refiere a que un programa para microcontroladores PIC puede desarrollarse perfectamente bien en Flowcode y utilizarse para programar el PIC, ¿qué quiere decir esto? Dicho en palabras más sencillas se hace el flujograma bien muy detallado y se puede generar el archivo de formato *.hex para programar el PIC.

Con esta última figura se pone fin a este capítulo, quedando algunos detalles que no son desarrollados en esta parte del texto pero que pueden ser tratados en los apéndices A para información técnica sobre los dispositivos y en el apéndice D para ver la programación del MCU.



III. SIMULACIONES DEL CICLOCONVERTIDOR.

3. Simulaciones del cicloconvertidor monofasico.

3.1. EL SIMULADOR

Como se mencionó en el capítulo anterior, el software que se escogió para la simulación del cicloconvertidor monofásico es Proteus de Labcenter Electronics.

Proteus tiene dos programas principales: Proteus ISIS y Proteus ARES. Se describe brevemente, a continuación, el programa Proteus ISIS, Proteus ARES se describirá más adelante.

3.1.1. Proteus ISIS.

ISIS (Intelligent Schematic Input System - Sistema de Enrutado de Esquemas Inteligente), es el programa de simulación del software Proteus. El programa se auxilia del módulo VSM (Virtual System Modeling - Sistema Virtual de Modelado). El módulo VSM permite simular en tiempo real circuitos incluso con microcontroladores, en especial los de la serie 16F de Microchip, que es el MCU, utilizado en el diseño.

ISIS además de utilizar la simulación en tiempo real, también puede simular en forma de SPICE con la herramienta llamada PROSPICE.

Las simulaciones incluidas en este capítulo, están realizadas con PROSPICE, ya que las simulaciones en tiempo real deben principalmente interactuar con el usuario.

Atendiendo la estructura del diseño en etapas, se han realizado las simulaciones de etapa por etapa y la simulación del circuito completo

al unir todas estas etapas. Luego de realizado el diseño de cada una de estas etapas, se procedió a simularlas para comprobar que su funcionamiento sea acorde al diseño.

3.2. Simulaciones de las etapas del cicloconvertidor.

3.2.1. SIMULACIÓN DE ETAPA DE POTENCIA.

El circuito de potencia simulado se muestra a continuación.

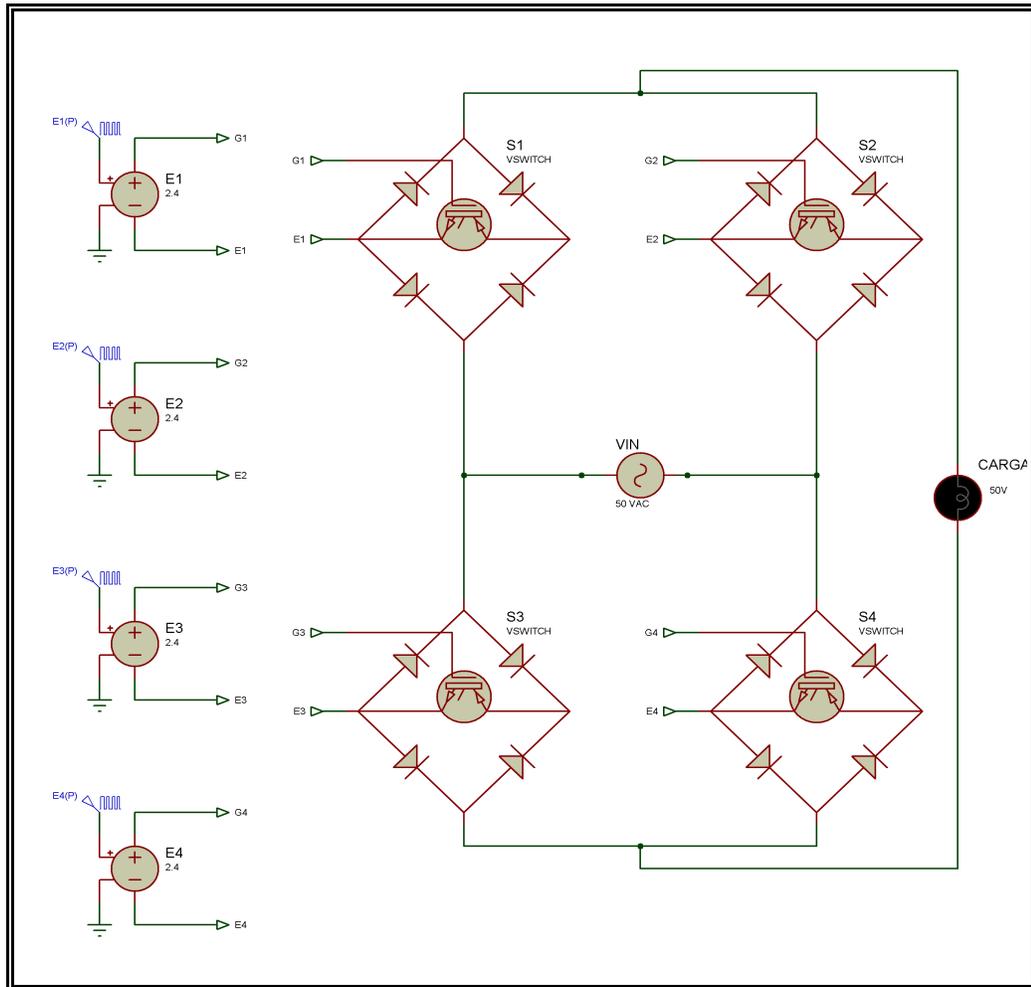


FIGURA 3.1. Circuito simulado de la Etapa de Potencia.

En la figura 3.1 observamos la estructura en puente H que realizan los interruptores bidireccionales con IGBT y puente de diodos, activados cada uno por una fuente de voltaje controlada por voltaje. El voltaje de control tiene niveles lógicos de 0V-5V y es simulado con una fuente generadora de patrones.

Cada nivel lógico "1" (5V) habilita al transistor correspondiente, mientras que cada nivel lógico "0" lo deshabilita.

Los generadores de patrones (E1(P) a E4(P))envían las señales de control de activación-desactivación hacia las fuentes de voltaje controladas por voltaje (E1 a E4) las cuales tienen una ganancia de 2.4. Este valor de ganancia se debe a que el generador de patrones trabaja a niveles lógicos de voltaje mientras que los transistores IGBT se activan a partir de los 10V.

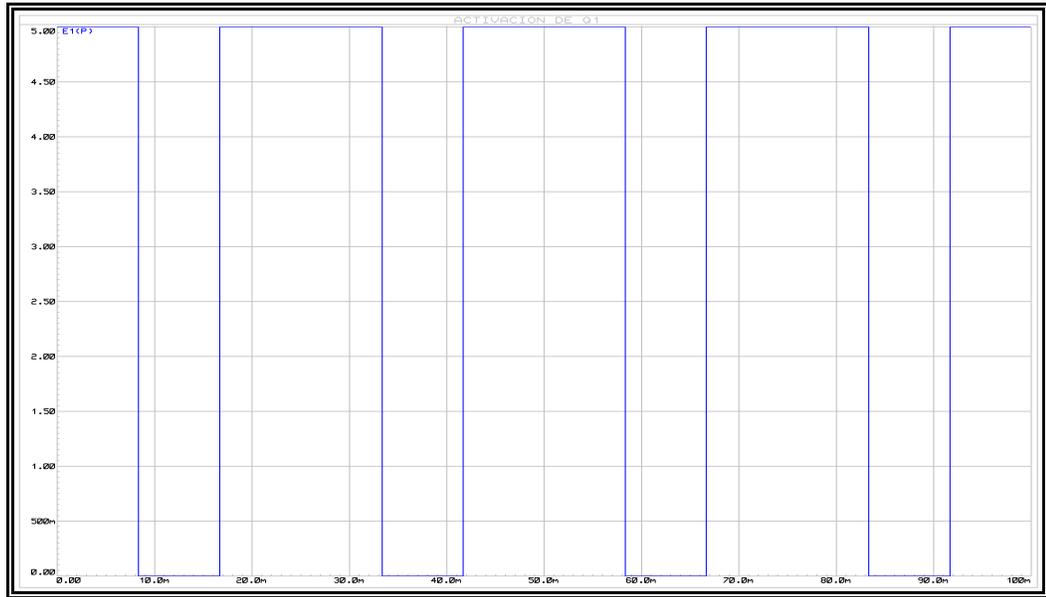
Esto es así: **$V_{GE} = (5V) (2.4) = 12V$**

Este voltaje es mayor a los 10V del límite inferior de activación de los transistores IGBT con lo cual garantizamos que el transistor se "encienda". Se debe recordar que este es voltaje que escogido en la parte correspondiente al diseño del circuito.

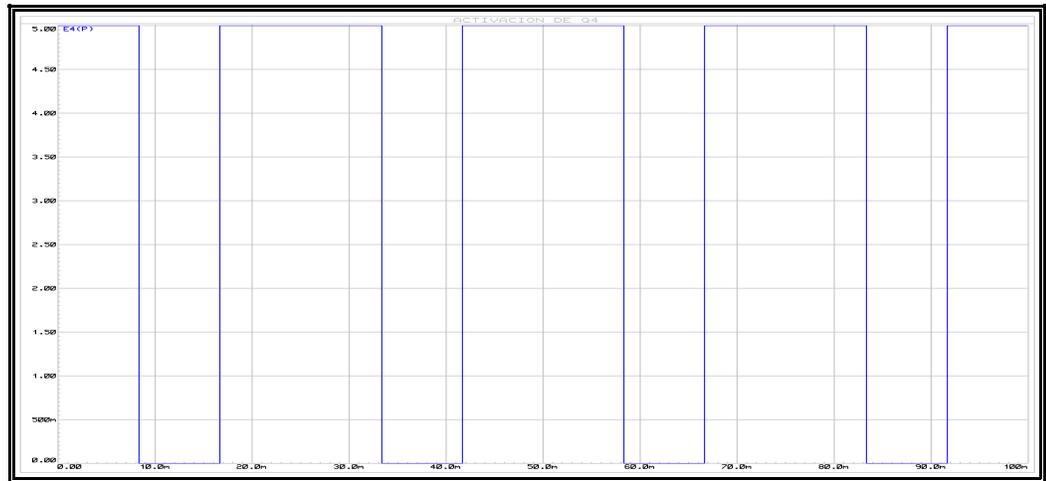
Cada arreglo IGBT - Puente de diodos forma un switch controlado por voltaje por lo que se le denomina en el diagrama de la simulación VSWITCH.

Como se conoce ,del capítulo de diseño, la activación de los switches bidireccionales controlado por voltaje (VSWITCH) se hace por pares. El par VSWITCH1, VSWITCH4 se activa con una señal de control idéntica para ambos IGBT's (Q1, Q4); del mismo modo lo hace el par (VSWITCH2, VSWITCH3).

En la figura 3.2 observamos la señal de activación de Q1 y Q4. Se puede observar que es idéntica en ambos casos.

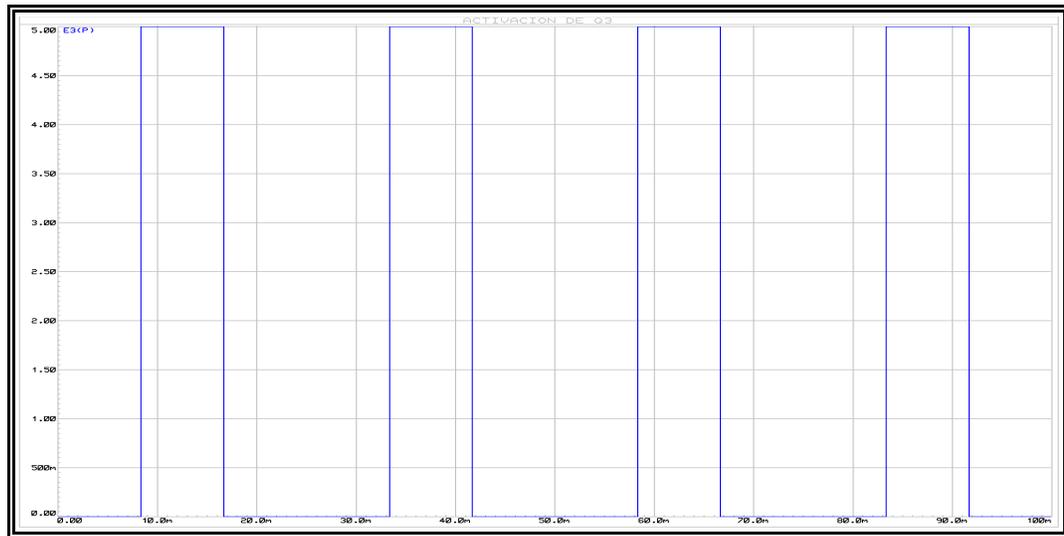


a) Q1

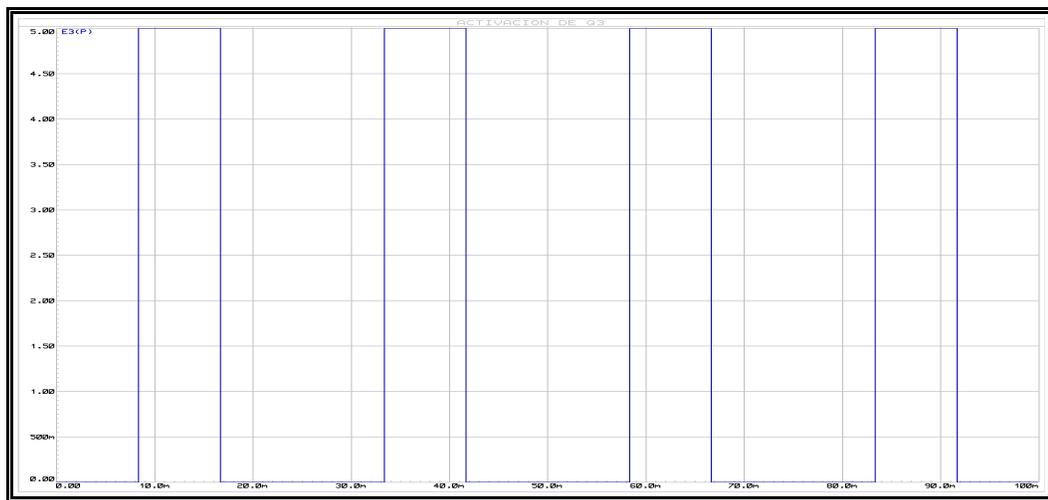


b) Q4

FIGURA 3.2. SEÑALES DE CONTROL.



a) Q2



b) Q3

FIGURA 3.3. SEÑALES DE CONTROL.

Las señales para ambos pares de transistores (Q1, Q4) y (Q2, Q3) provocan la señal de salida en la carga como se muestra en la figura 3.4.

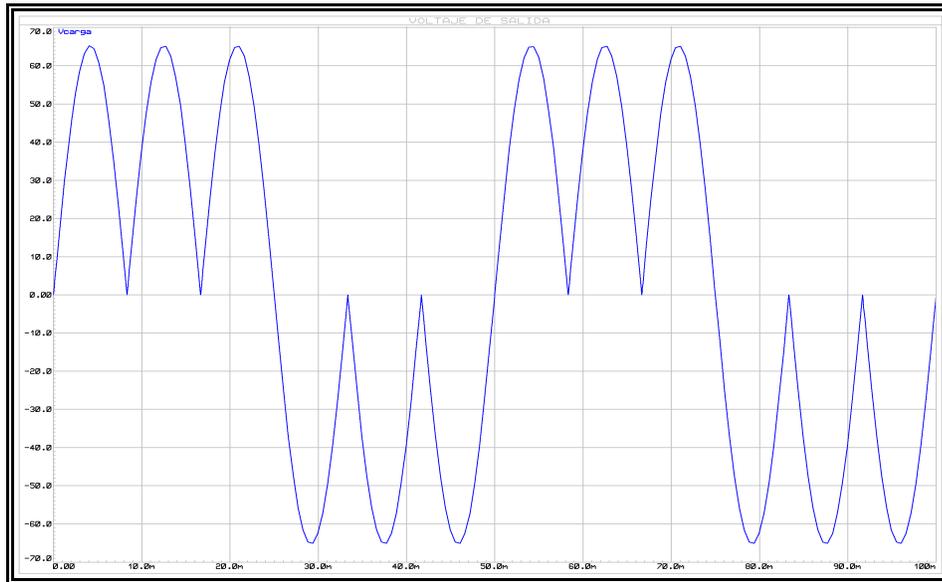


FIGURA 3.4. Voltaje de Salida (en la carga) .

Se pueden apreciar 2 ciclos del voltaje de salida a 20Hz que corresponden a 6 ciclos del voltaje de entrada V_{in} como puede verse en la figura 3.5.

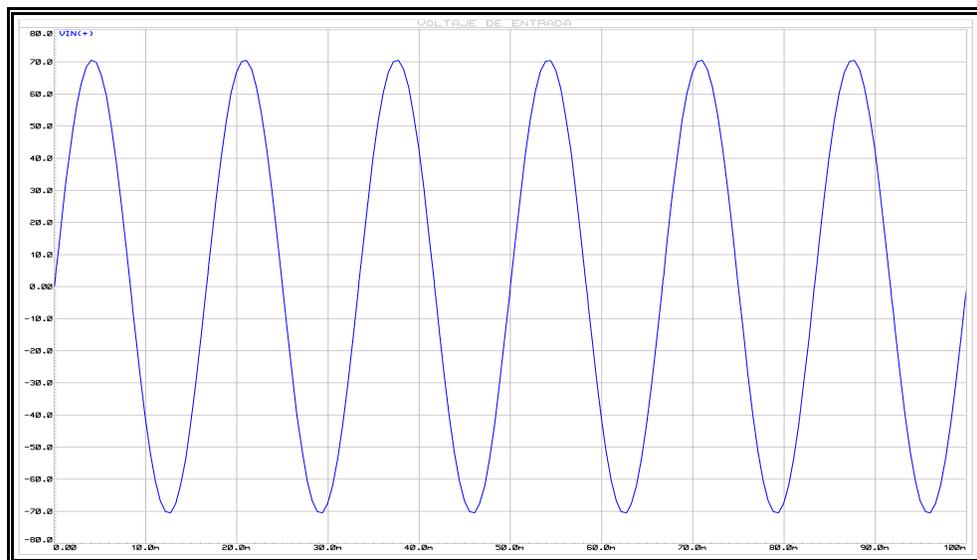


FIGURA 3.5. Voltaje de entrada (V_{in})

3.2.2. SIMULACIÓN DE ETAPA DE ACOPLE.

El circuito de la etapa de acople para cada uno de los transistores se hace por medio de circuito optoacopladores como se señaló en el capítulo del diseño.

Cada transistor recibe una señal de cada optoacoplador por separado. Como el circuito es idéntico para cada transistor solo se muestra como es la conexión para un transistor en la figura 3.6.

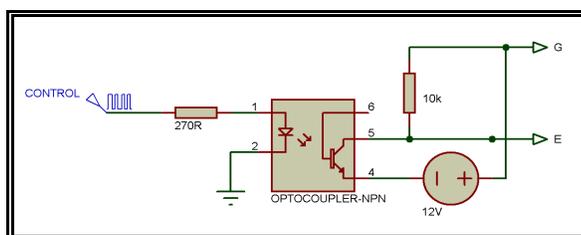
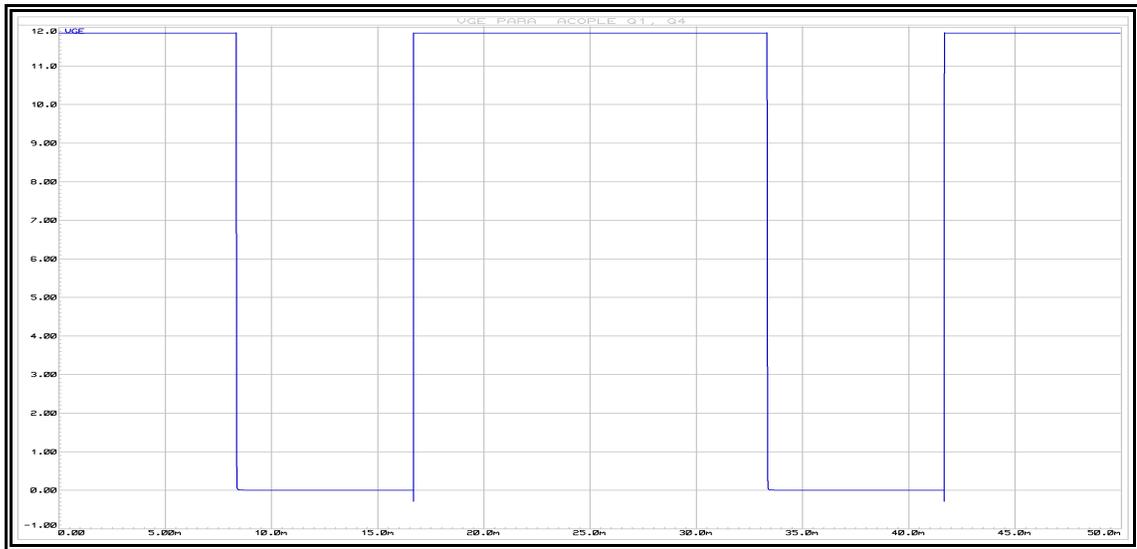


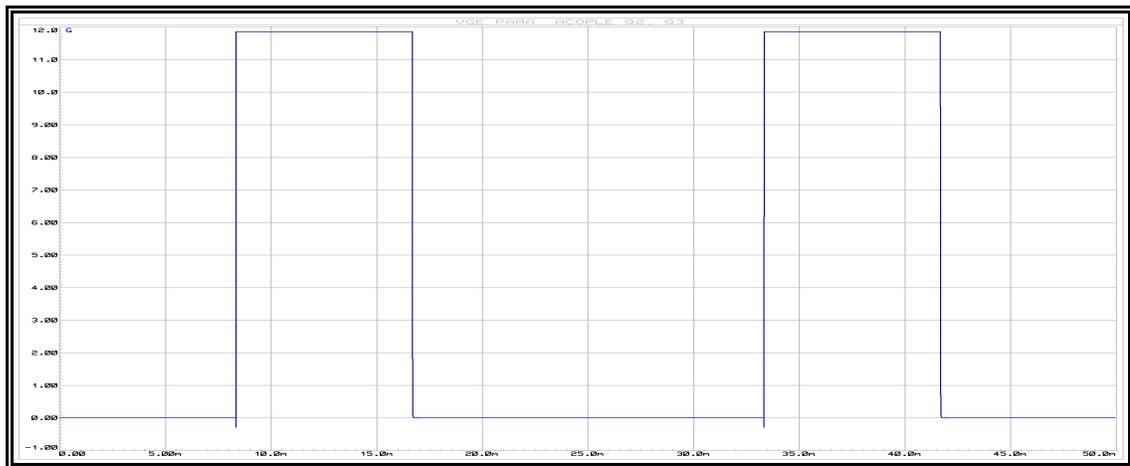
FIGURA 3.6. Etapa de acople. Se repite un circuito idéntico a este por cada transistor.

Como se mencionara en el capítulo anterior, los transistores se activan por pares, por lo que podemos trazar solo una gráfica para cada uno de los dos pares de transistores, (Q1, Q4) y (Q2, Q3). Desde luego que para cada transistor es una señal independiente solo que para cada transistor de un par son idénticas. Ver estas señales en la figura 3.7.

Nótese que cada optoacoplador, con sus respectivas conexiones, reemplazaría a las fuentes de voltaje controladas por voltaje. Los 12V que necesita cada transistor para activarse, ahora son suministrados por fuentes independientes de 12V.



a) Q1 y Q4



b) Q2 y Q3.

FIGURA 3.7. SEÑALES DE CONTROL ACOPLADAS A 12V.

3.3. SIMULACIÓN DE ETAPA DE CONTROL.

La etapa de control puede separarse en dos partes o sub etapas: la sub etapa de Cruce por Cero y la sub etapa MCU.

3.3.1. Sub etapa Cruce por Cero.

Esta sub etapa esta formada por un comparador LM311 y sus respectivas resistencias, ver figura 3.8. En esta simulación observamos como el voltaje de entrada suministrado por un transformador es comparado entre sus terminales dando como resultado a la salida del comparador una señal cuadrada. Esta señal cuadrada cambia conforme el voltaje de entrada (entre los terminales "+" y "-") hace un cruce por cero voltios para cambiar de polaridad, como puede apreciarse en la figura 3.9.

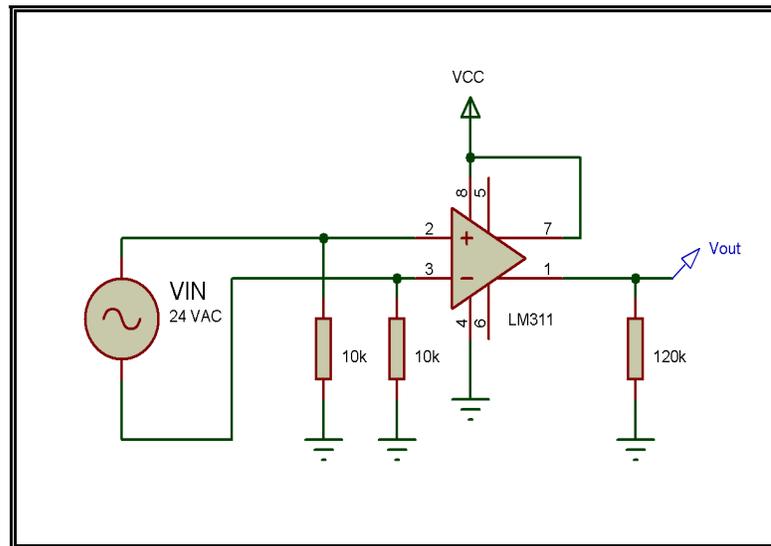


FIGURA 3.8. SUB ETAPA DETECTOR DE CRUCE POR CERO.

La señal cuadrada resultante, la cual coincide en cada uno de sus flancos con los cruces por cero voltios de las terminales de entrada ("+" y "-") es inyectada a la sub etapa MCU para que este genere las señales de control correspondientes.

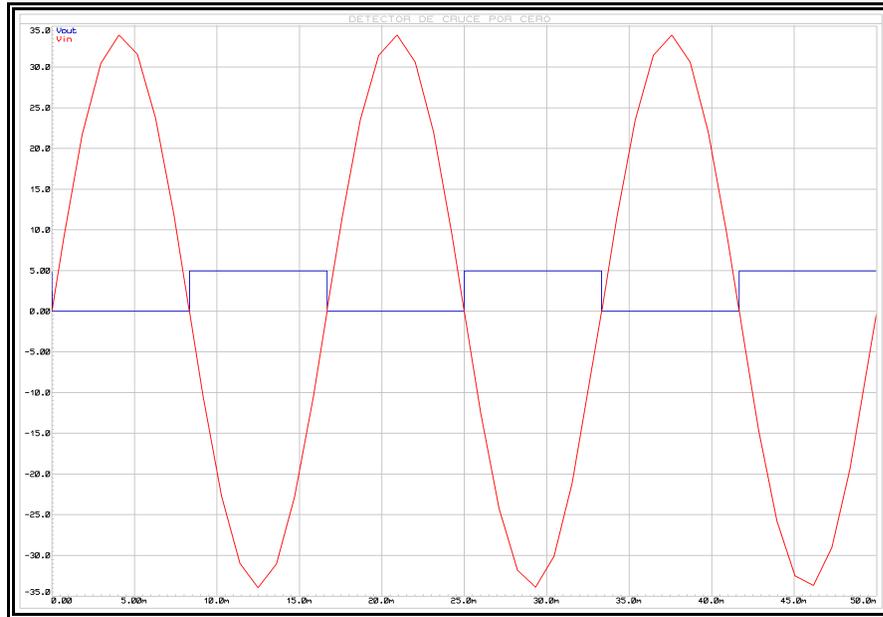


FIGURA 3.9. DETECCIÓN DE CRUCE POR CERO.

3.3.2. Sub etapa MCU.

La sub etapa MCU depende de la sub etapa Cruce por cero, por lo que ésta última se incluye en la simulación del MCU, ver figura 3.10.

El MCU es cargado con el programa en formato *.hex, el cual detecta los cruces por cero de la señal de entrada y genera las respectivas señales de control en sus salidas RB1 hasta RB4 las cuales a su vez activarán o desactivarán desde Q1 hasta Q4 respectivamente.

Las señales de control que proporciona el MCU se muestran en la figura 3.11.

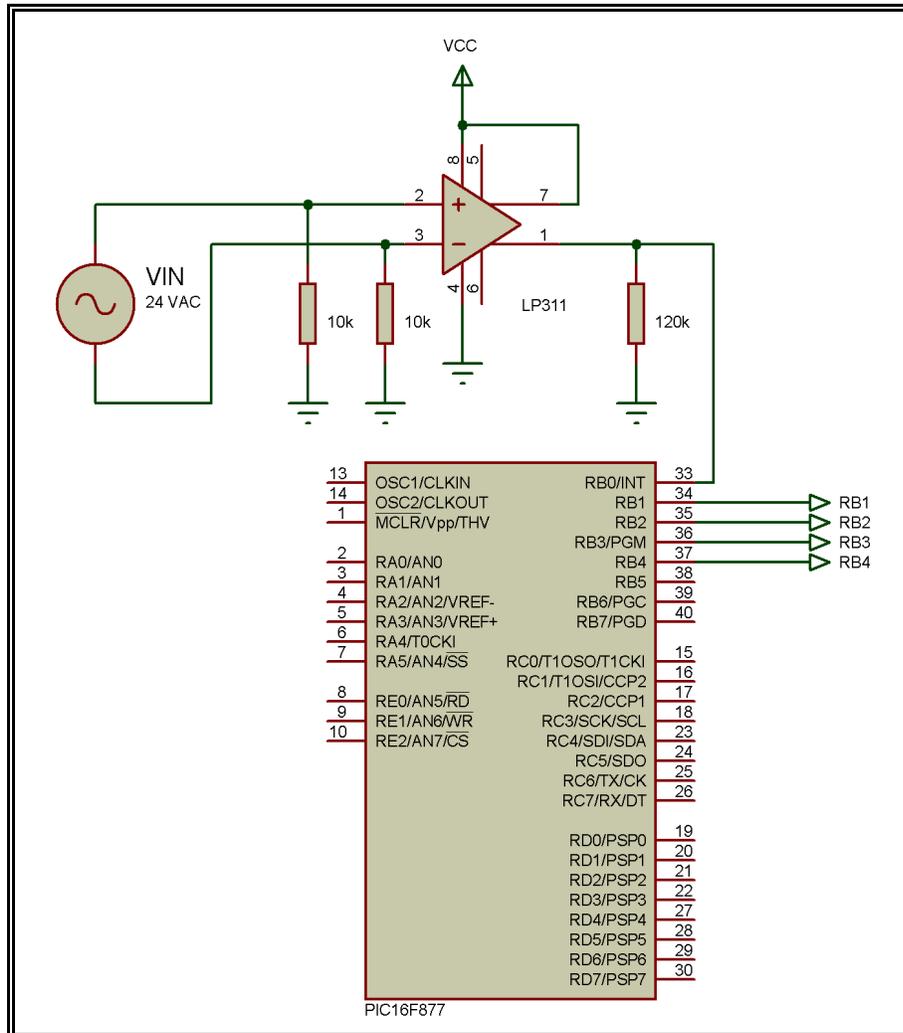
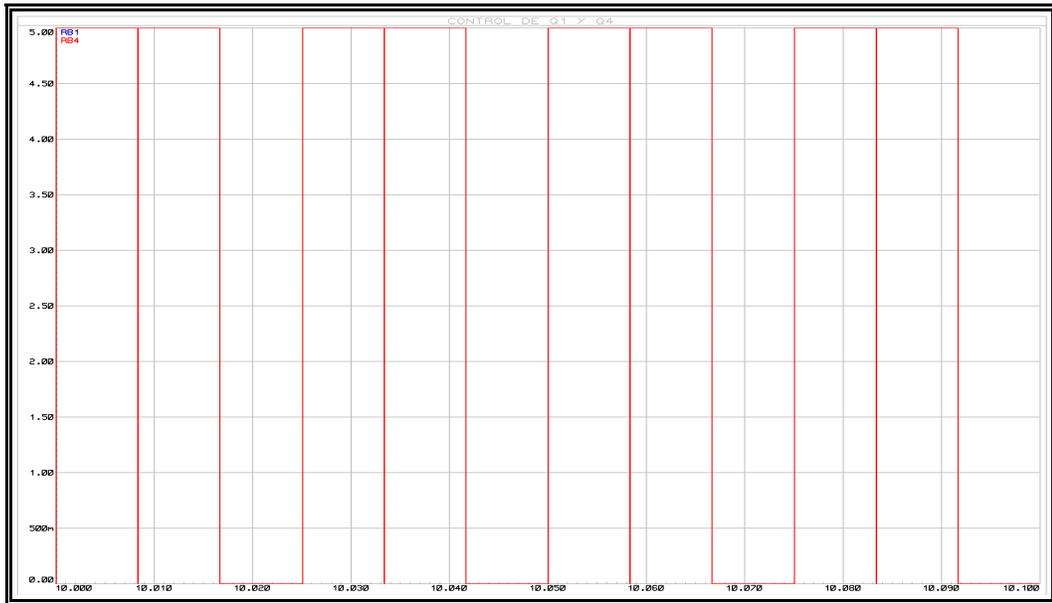
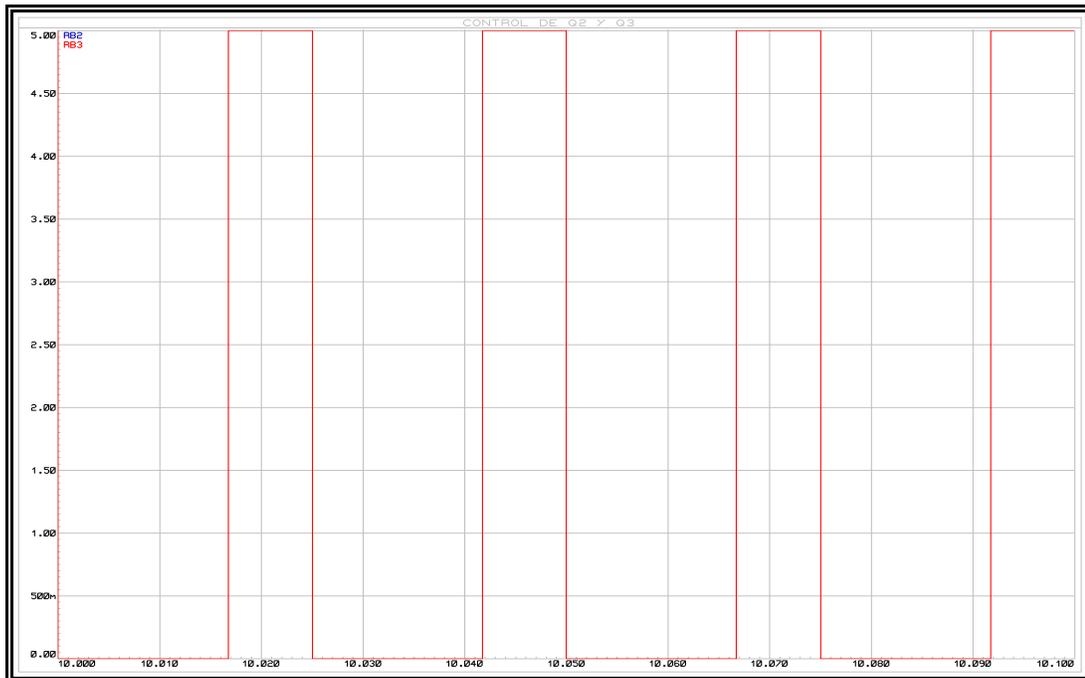


FIGURA 3.10. SUB ETAPA MCU.

El circuito completo se puede simular sustituyendo toda la etapa de acople y la de potencia por switches controlados por voltaje, como puede verse en la figura 3.12.



a) Q1 y Q4



b) Q2 y Q3

FIGURA 3.11. SEÑALES DE CONTROL DEL MCU.

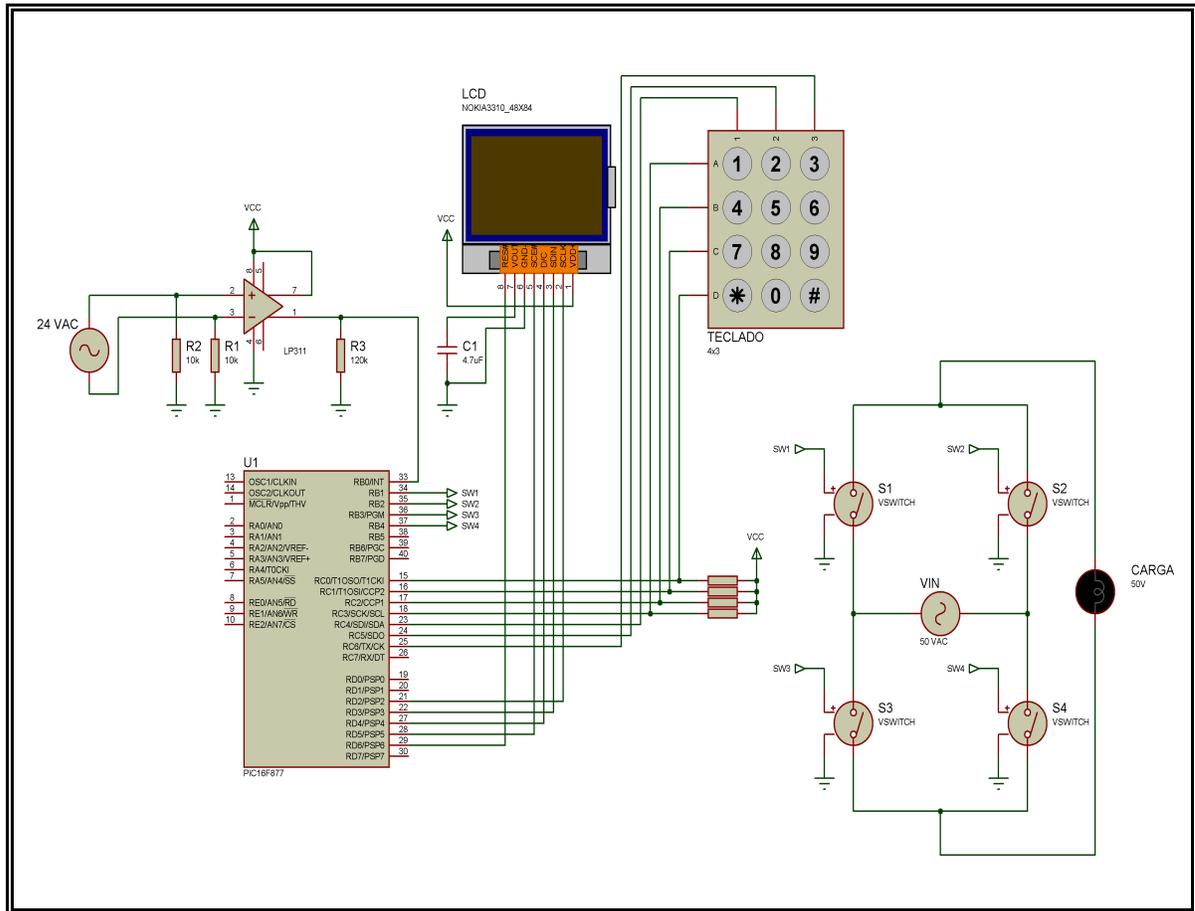


FIGURA 3.12. CICLOCONVERTIDOR SIMPLIFICADO.

Las gráficas de entrada salida y de control para un ángulo de 0° se observan en la figura 3.13 para los transistores Q1 y Q4 y en la figura 3.14 para los transistores Q2 y Q3.

En las figuras 3.15 y 3.16 se muestran las gráficas de (Q1, Q4) y de (Q2, Q3) pero para un ángulo distinto de 0° , el voltaje de entrada de 50V se cambió por uno de 24V con el propósito de que se vea más claro el control que ejercen las salidas SW1 y SW4 en el voltaje de salida Vout. Estas señales se simularon siempre con el mismo programa que se grabó en el PIC real, lo que demuestra el gran potencial del simulador.

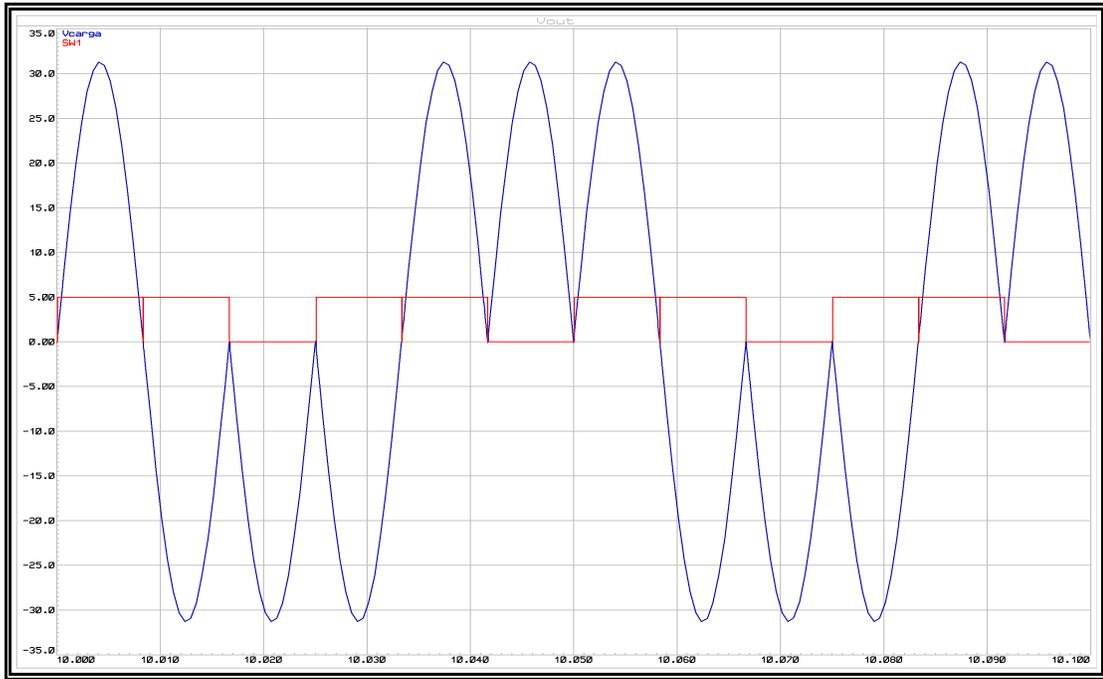


FIGURA 3.13. Señal de disparo para Q1 y Q4 comparado con Vcarga a un ángulo de disparo de 0°.

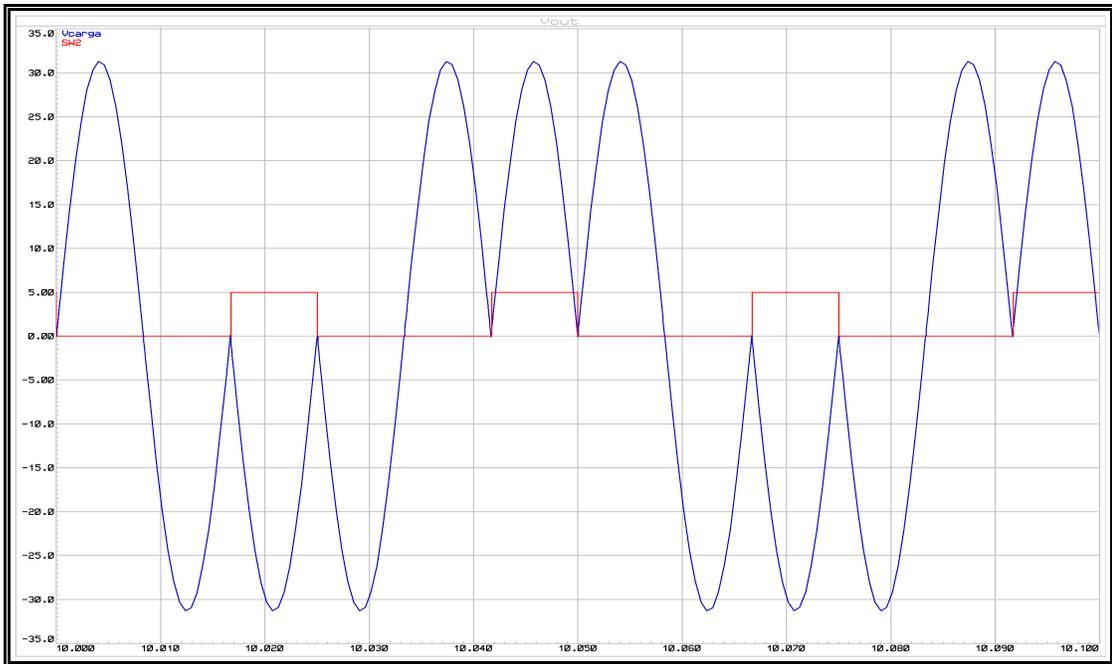


FIGURA 3.14. Señal de disparo para Q2 y Q3 comparado con Vcarga a un ángulo de disparo de 0°.

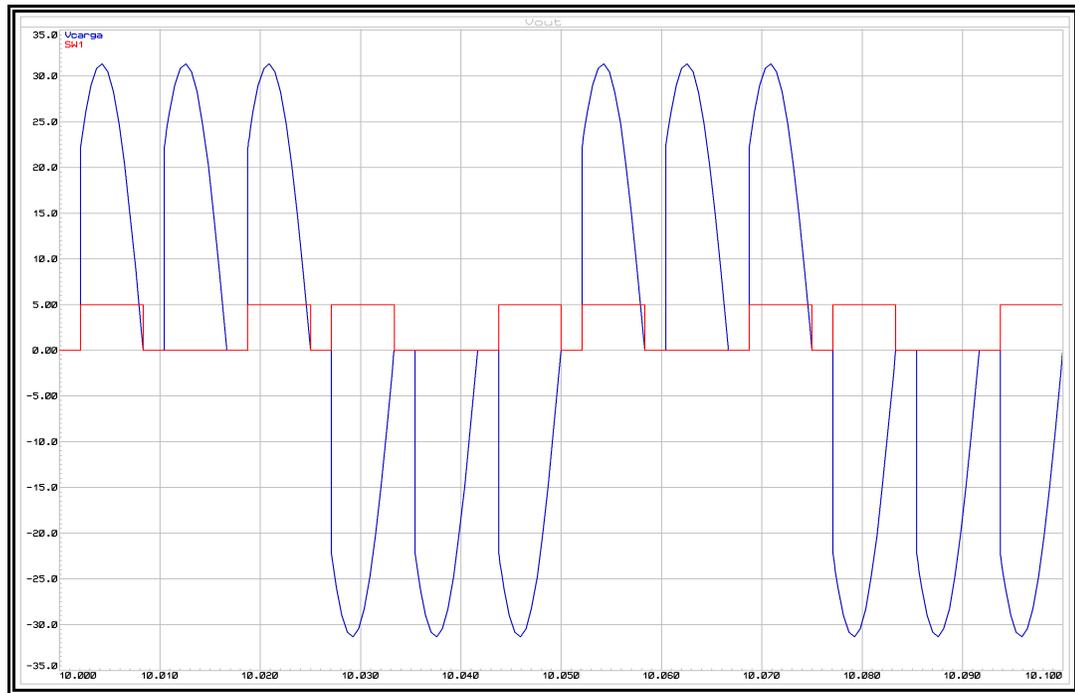


FIGURA 3.15. Señal de disparo para Q1 y Q4 comparado con Vcarga a un ángulo de disparo de 45° .

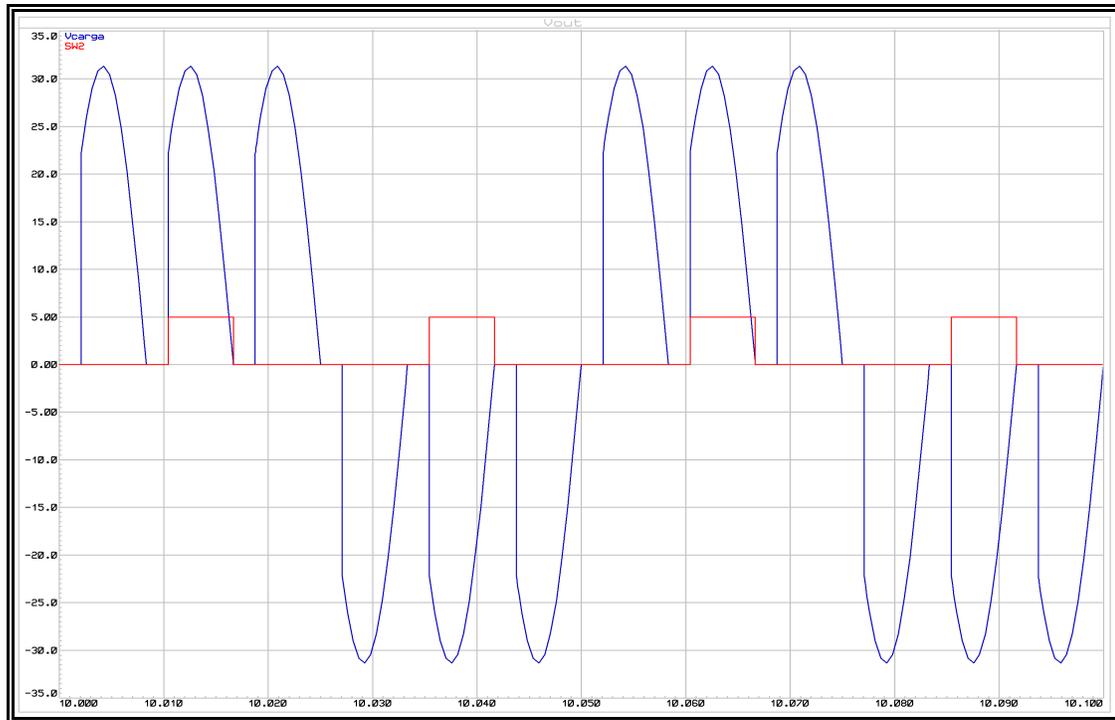


FIGURA 3.16. Señal de disparo para Q2 y Q3 comparado con Vcarga a un ángulo de disparo de 45° .



IV. ELABORACIÓN DE CIRCUITOS IMPRESOS Y PRUEBAS DE LABORATORIO.

4. CIRCUITOS IMPRESOS

4.1. EL PROGRAMA PROTEUS ARES.

ARES (Advanced Routing and Editing Software - Software de Edición y Ruteo Avanzado) es el programa de Proteus que permite la elaboración de circuitos impresos. Esta es otra de las razones de peso de haber escogido el software Proteus en el diseño y construcción del Cicloconvertidor Monofásico.

Hay una gran variedad de programas de computadora que realizan tareas similares a la de Proteus ARES pero de manera más complicada o con más limitantes tales como Eagle (Cadsoft), Live Wire, PCB Wizard, Trax Maker (de Circuit Maker) entre otros muchos.

Entre las ventajas que presenta este programa están las de tener un gran número de "packages" (encapsulados) para los diferentes dispositivos entre sus librerías, la facilidad de crear componentes sencillos cuando es necesario, reasignar encapsulados a otros dispositivos, adquirir librerías creadas por otros usuarios del programa, la facilidad de crear las "pistas" con un comando llamado Autorouter, la facilidad también de hacer el ruteo de forma manual, crear Top Silk Screen (la serigrafía de los componentes en la parte superior), etc.

Con todas estas ventajas y otras más, Proteus ARES es la mejor herramienta encontrada para crear los circuitos impresos del Cicloconvertidor Monofásico.

La creación de PCB's (Printed Circuit Board - Tablet de Circuito Impreso) se puede realizar de dos maneras: de forma directa insertando los encapsulados de los dispositivos y realizando la conexión eléctrica (por medio de un comando apropiado) o trasladando el circuito directamente desde Proteus ISIS. Cabe mencionar que esta última es la más recomendada sobre todo en circuitos de gran tamaño o de gran complejidad en sus conexiones, ya que de esta manera se puede primero simular el circuito en Isis y luego con muy pocas modificaciones pasar el circuito a ARES por medio de un archivo Netlist. Solamente se necesita presionar el botón de ARES en ISIS y el circuito se traslada a un archivo de PCB.

Las modificaciones que por lo general se hacen son asignar encapsulados a dispositivos que no lo tienen, modificar encapsulados de acuerdo a la necesidad de quien diseña el PCB, crear terminales para la alimentación del circuito entre otras.

Al hacer el enrutado de manera automática se utiliza el módulo Electra Autorouter.

Otra herramienta muy importante en la elaboración de circuitos impresos es la herramienta ARES 3D ya que de esta manera se tiene una vista previa del PCB que se esta diseñando y de esta manera se puede corregir para optimizar espacios, verificar posición de dispositivos, etc.

El diseño de todos los PCB's se realizó a una sola cara (la inferior),

procurando contener el menor tamaño posible y la mejor distribución de los elementos de forma manual (no con la herramienta Autoplacer). Otra característica de todos los circuitos impresos desarrollados en ARES para el Cicloconvertidor monofásico es el de no tener ni un tan solo puente en la parte superior de la tableta.

4.2. ELABORACIÓN DE CIRCUITOS IMPRESOS.

La elaboración de circuitos impresos partió de migrar el diseño del circuito simulado en ISIS a ARES. Se fabricó tres PCB's los cuales son:

- PCB de las Fuentes de Voltaje.
- PCB de Etapa de Acople y Potencia.
- PCB de Etapa de Control.

Se tomó la decisión de unir la etapa de acople con la de potencia debido al pequeño tamaño de la etapa de acople y por evitar posibles efectos de distorsión de las señales de control de los transistores IGBT. Este tipo de efectos desagradables pueden producirse cuando el transistor está muy alejado de la fuente de activación por lo que es conveniente asegurarse de que esté lo más cerca posible.

El lado del PCB que contiene las pistas (bottom copper) se obtuvo por el método del planchado, con impresión a base de tonner (impresión laser) y atacado o "quemado" con cloruro férrico (percloruro de hierro).

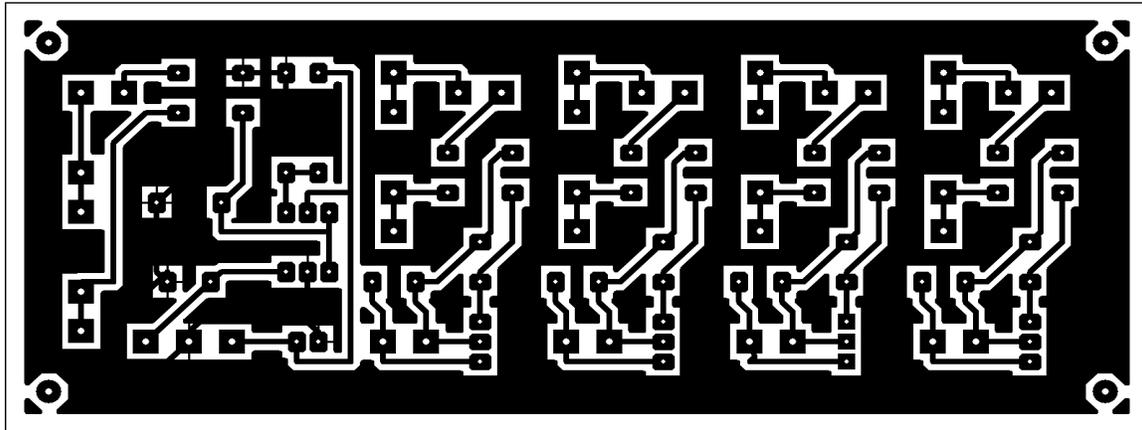
ARES permite imprimir directamente los PCB's hacia el papel a utilizar a escala real o convertir el archivo del formato *.LYT (formato de ARES) a otros formatos como *.bmp o *.pdf de donde luego también se

pueden imprimir a escala. Esta conversión de los archivos de formato de ARES a otros formatos permite volver "portables" los circuitos impresos ya que no es necesario tener instalado Proteus ARES en la computadora que debe imprimir los PCB's solo se necesita un software para poder manipular archivos *.pdf o software para manipular archivos de imagen.

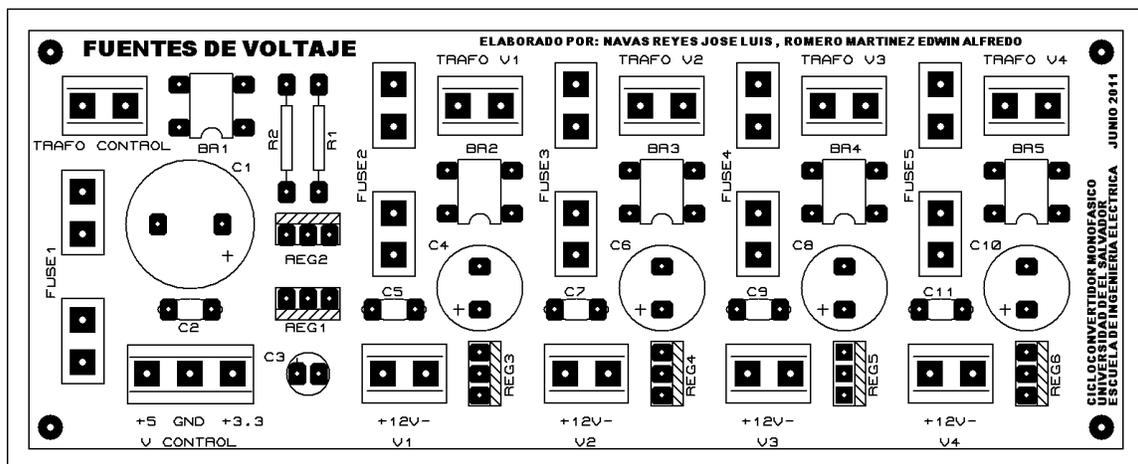
4.2.1. PCB de las Fuentes de Voltaje.

Este PCB contiene todas las fuentes de voltaje del circuito: fuente de 5V para la etapa de control (MCU) y el lado de nivel TTL de optoacopladores, cuatro fuentes de 12V para operación de transistores y una fuente de 3.3V para la pantalla LCD.

La cara inferior del PCB de las fuentes (bottom copper) se puede apreciar en la figura 4.1, la cara superior (top silk) en la figura 4.2 y la vista en 3D en la figura 4.3.



a) Cara Inferior (Bottom Copper)

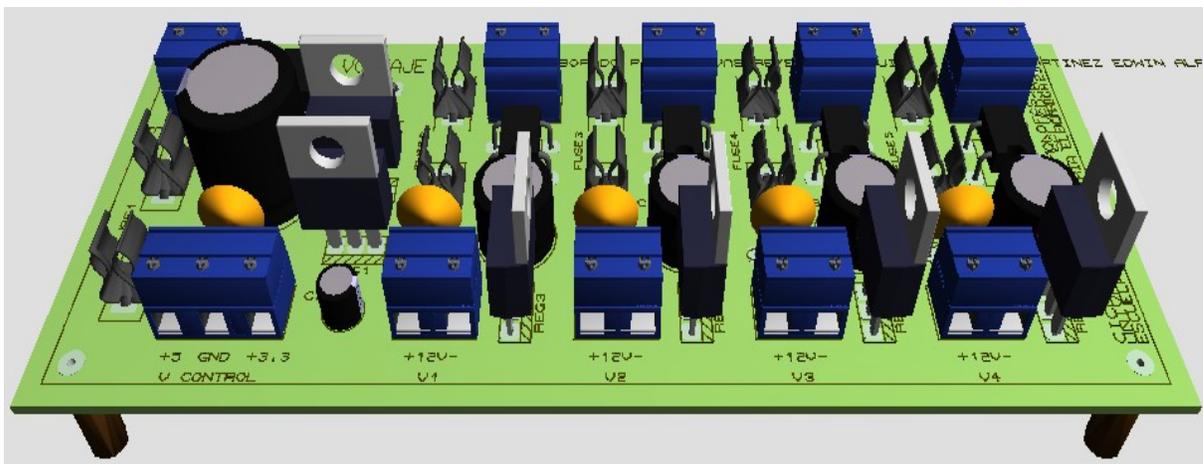


b) Cara Superior (Component Side)

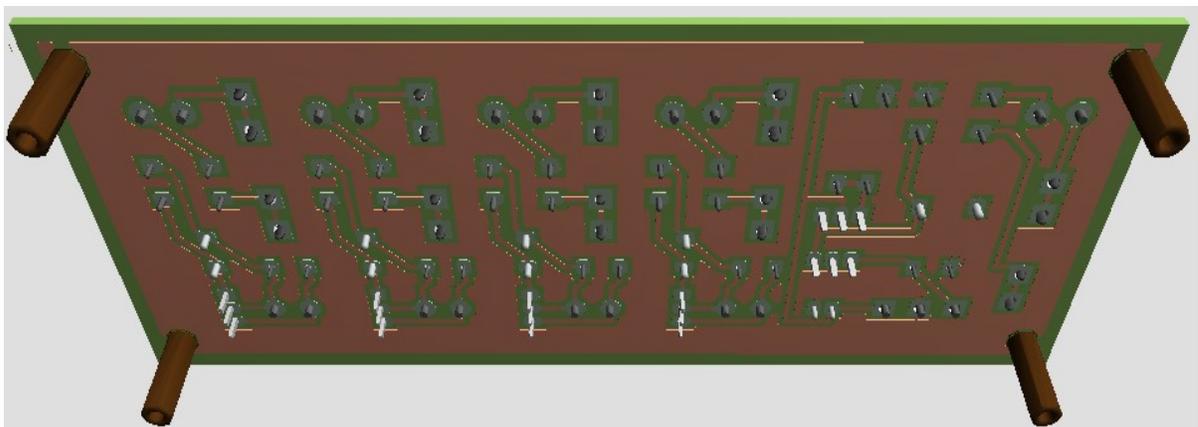
Figura 4.1. PCB Fuentes de Voltaje.

Para generar la vista en 3D, se busca en el menú la opción output y luego 3D Visualization. Se puede generar vistas desde cinco ángulos diferentes predeterminados entre las cuales se incluye la vista superior, pero además existe una opción en la cual por medio del mouse de la computadora se puede mover el PCB visto en 3D a la posición deseada simplemente haciendo click izquierdo sobre el circuito impreso y moviendo el ratón en cualquier dirección sin soltar el botón para hacer girar el PCB y moviendo el ratón hacia cualquier posición deseada para desplazar el PCB soltando el botón.

Luego de seleccionar el ángulo preferido para ver el PCB, este se puede hacer girar automáticamente mediante una opción llamada Auto Spin.



a) Cara Superior (Component Side)



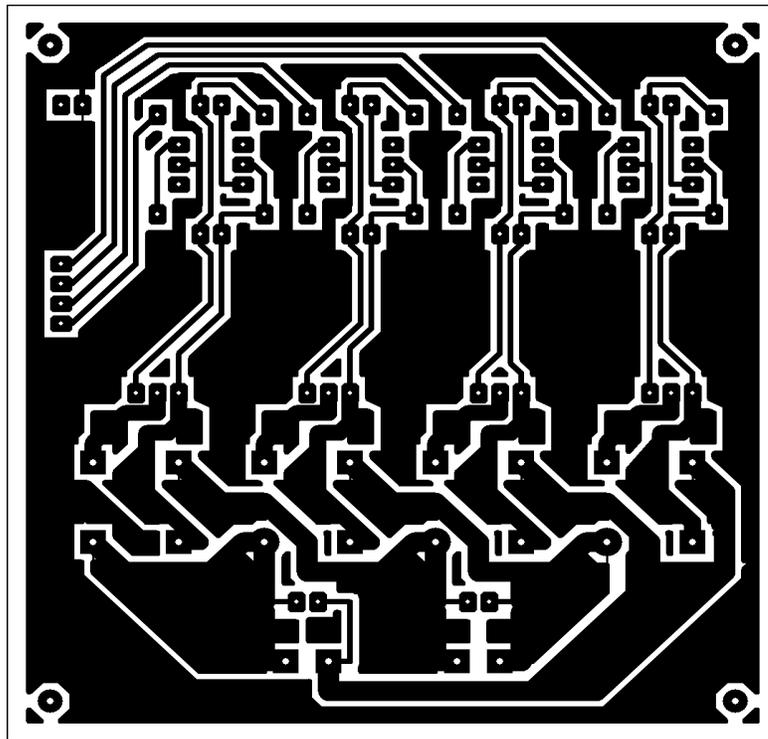
b) Cara Inferior (Bottom Copper)

Figura 4.2. PCB Fuentes de Voltaje en 3D.

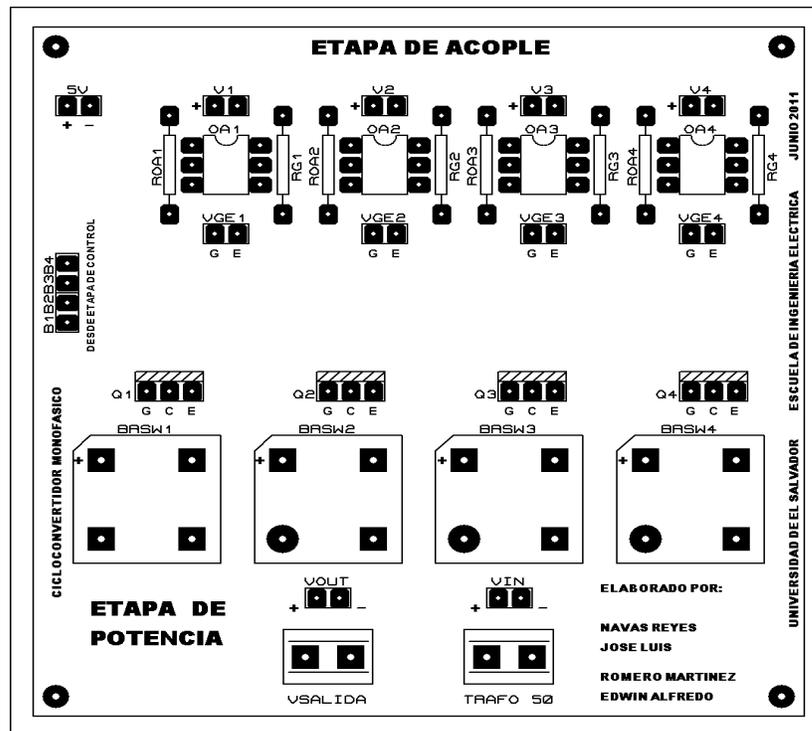
4.2.2. PCB de Acople y Potencia.

Se explicó anteriormente el por qué unir estas dos etapas en una sola tableta. Otra ventaja que produce unir ambas etapas es la de tener menor número de conectores para comunicar PCB con PCB. Este circuito impreso no solo posee dispositivos a niveles de voltaje que corresponden a electrónica de potencia, en la parte en la que se comunica con el MCU (PIC16F877) los niveles de voltaje con los cuales se trabaja son lógicos.

Se puede apreciar en la figura 4.4, 4.5 y 4.6, el circuito impreso, la cara superior y la vista en 3D respectivamente, del PCB de Acople y Potencia.

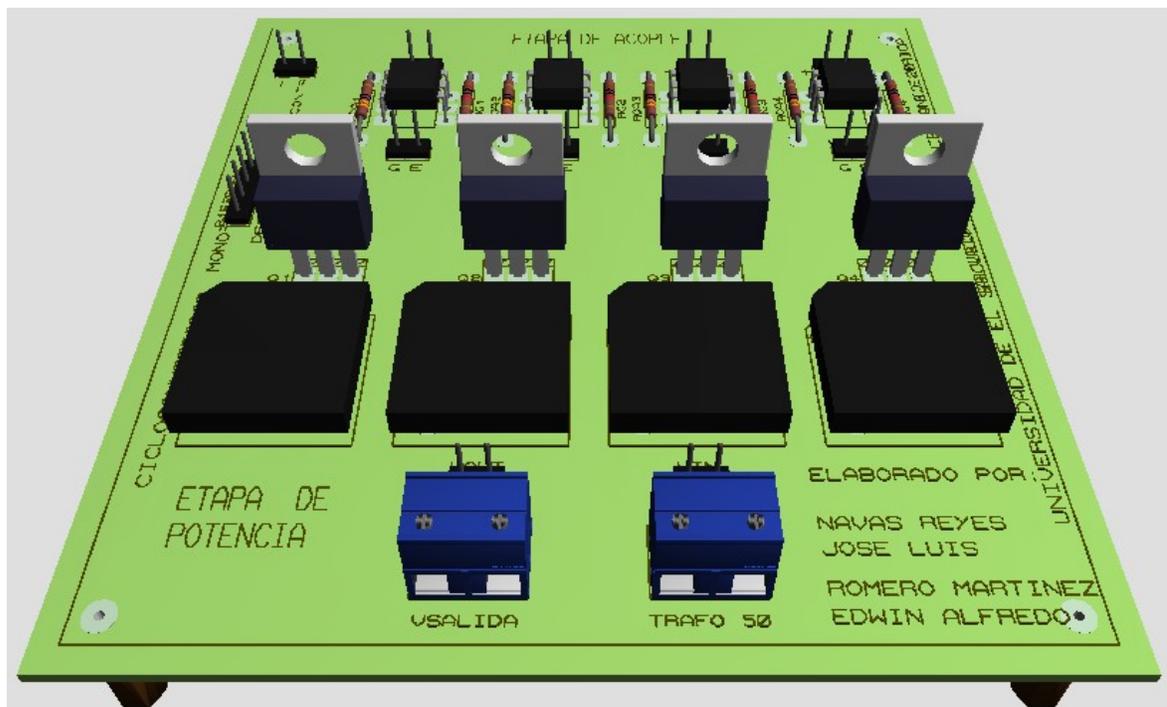


a) Cara Inferior (Bottom Copper)

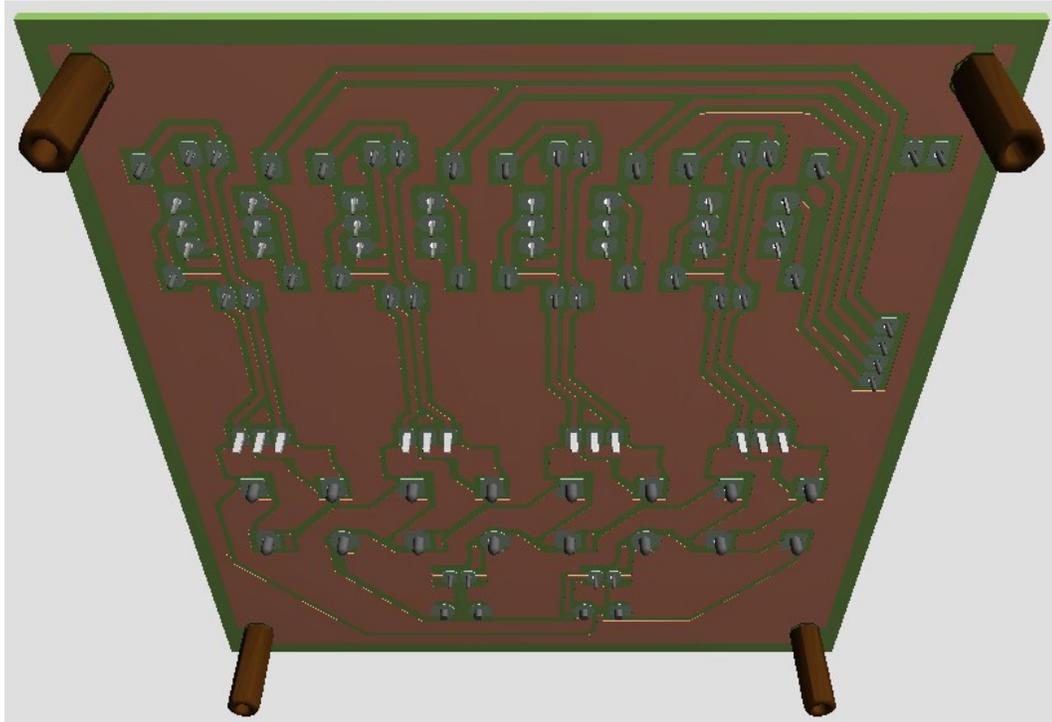


b) Cara Superior (Component Side)

Figura 4.3. PCB de Etapas de Acoplamiento y Potencia.



a) Cara Superior (Component Side)

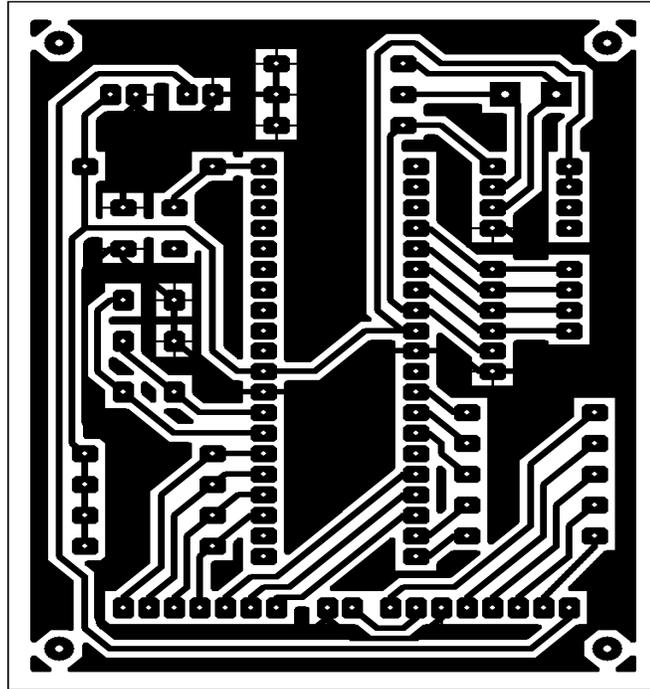


b) Cara Inferior (Bottom Copper)

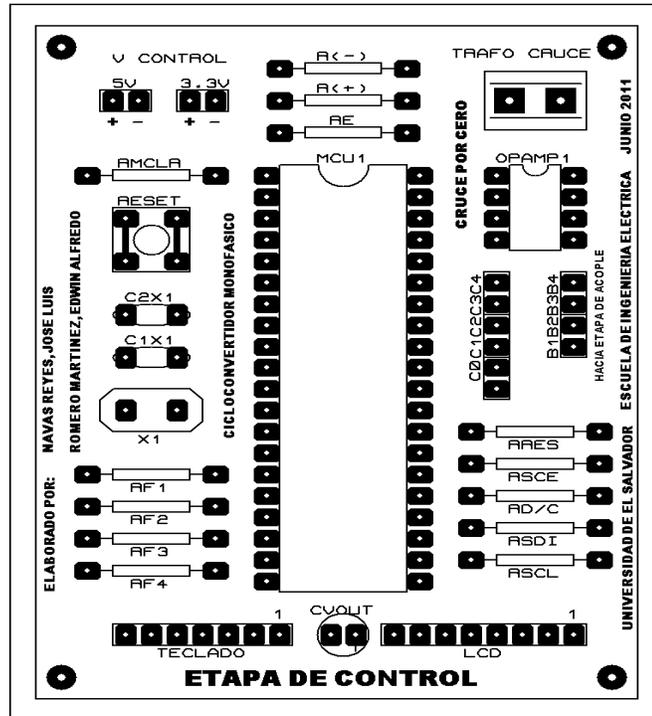
Figura 4.4. PCB de Etapas de Acoplamiento y Potencia en 3D.

4.2.3. PCB de Control.

El PCB de control contiene al "cerebro" del Cicloconvertidor, el MCU PIC16F877, además contiene todas sus conexiones y elementos como salidas para teclado, para display LCD, resistencias,, cristal de 4 MHz etc. Su circuito impreso, su vista superior y su vista en 3D se pueden apreciar en las figuras 4.7 4.8 y 4.9 respectivamente.

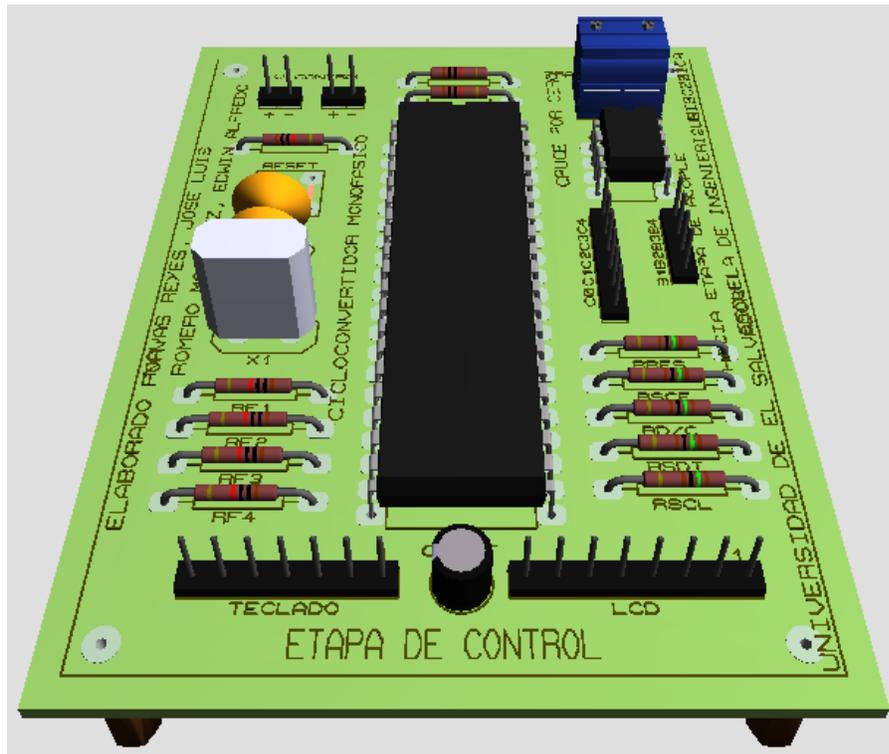


a) Cara Inferior (Bottom Copper)

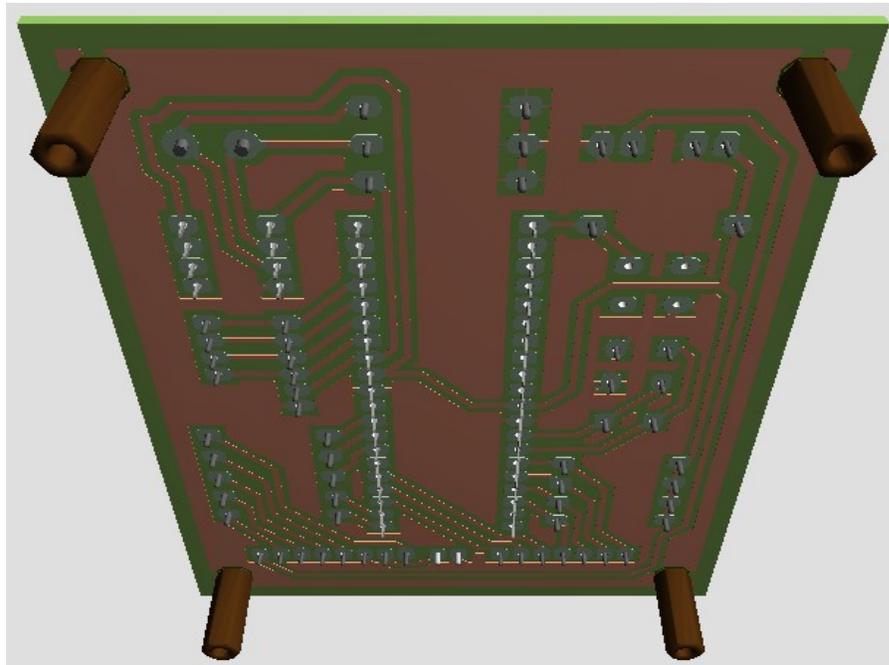


b) Cara Superior (Component Side)

Figura 4.5. PCB de Etapa de Control.



a) Cara Superior (Component Side)



b) Cara Inferior (Bottom Copper)

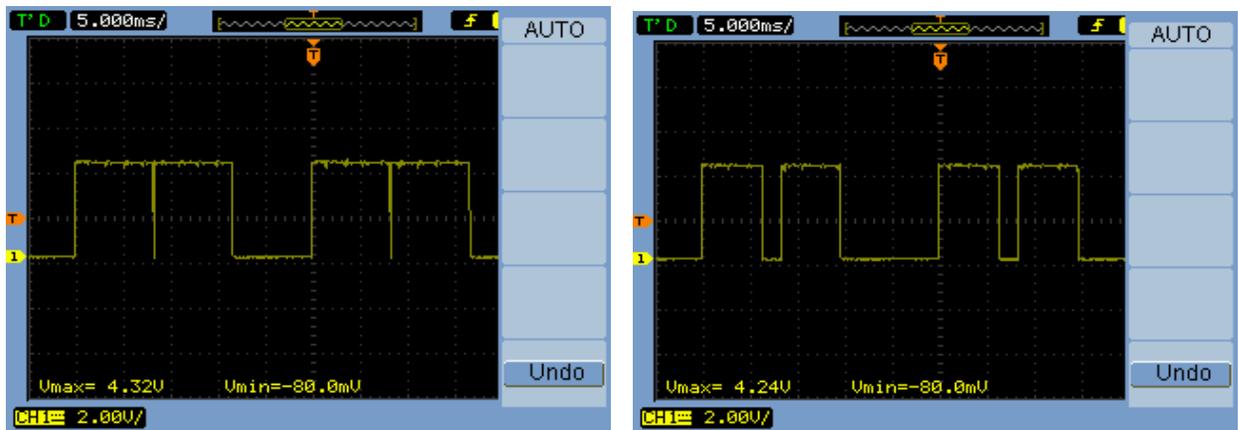
Figura 4.6. PCB de Etapa de Control en 3D.

4.3. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EN CIRCUITOS IMPRESOS.

4.3.1. Capturas de señales de control, entrada y salida.

Luego del montaje de los componentes en su respectivo circuito impreso, corresponde probar cada etapa con el propósito de corroborar los resultados obtenidos en las simulaciones.

A cada transistor IGBT (de Q1 a Q4) corresponde una salida del puerto B (RB) del microcontrolador PIC16F877 por lo que se realizó la prueba a cada uno de los pines que componen la señal de control del puerto B (desde RB1 hasta RB4 Q1). Dicha señal de control se analiza para dos condiciones distintas, la primera medición se hace para un ángulo de disparo de 0° desde el inicio de cada semiciclo de la señal de 60Hz de la línea y la segunda a un ángulo de disparo de 45° .



a) Disparo a 0°

b) Disparo a 45°

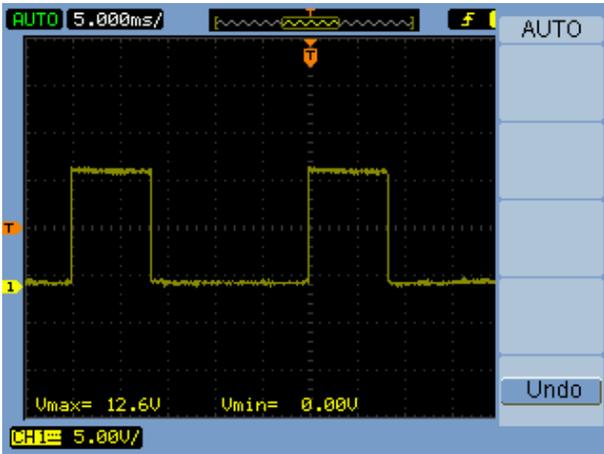
Figura 4.7. Señal de control para Q1 (pin RB1 del PIC - C1).



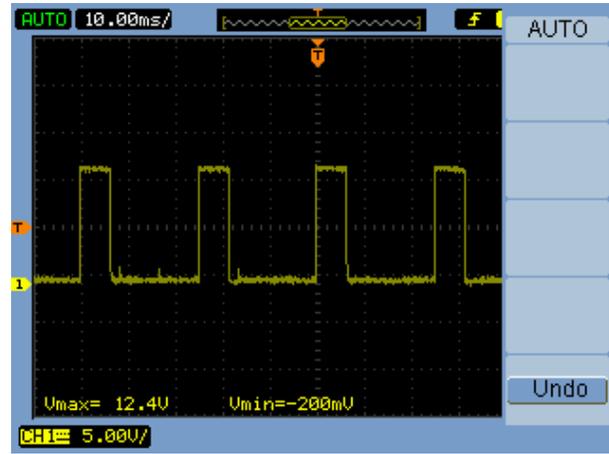
a) Disparo a 0°

b) Disparo a 45°

Figura 4.8. Señal de control para Q2 (pin RB2 del PIC - C2).

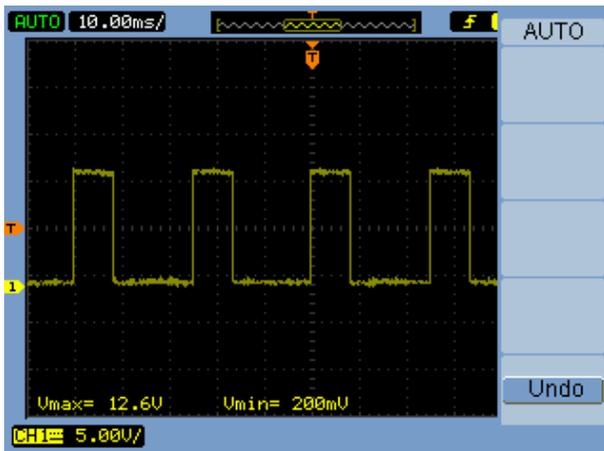


a) Disparo a 0°

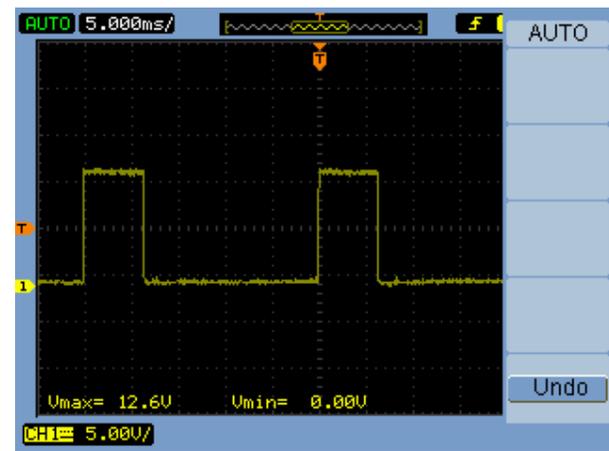


b) Disparo a 45°

Figura 4.12. Señal de acople para Q2 (Optoacoplador 2 - VGE2)



a) Disparo a 0°

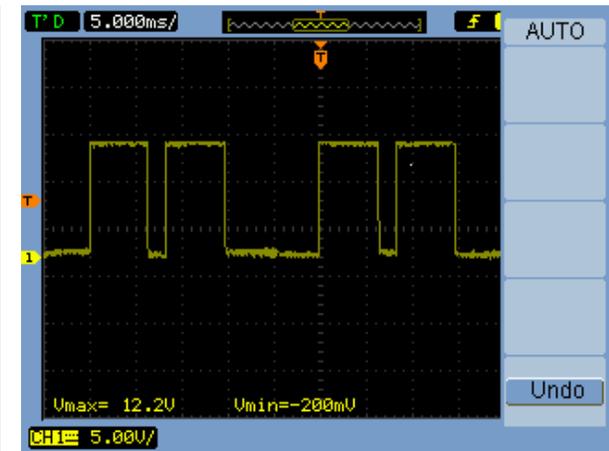


b) Disparo a 45°

Figura 4.13. Señal de acople para Q3 (Optoacoplador 3 - VGE3).



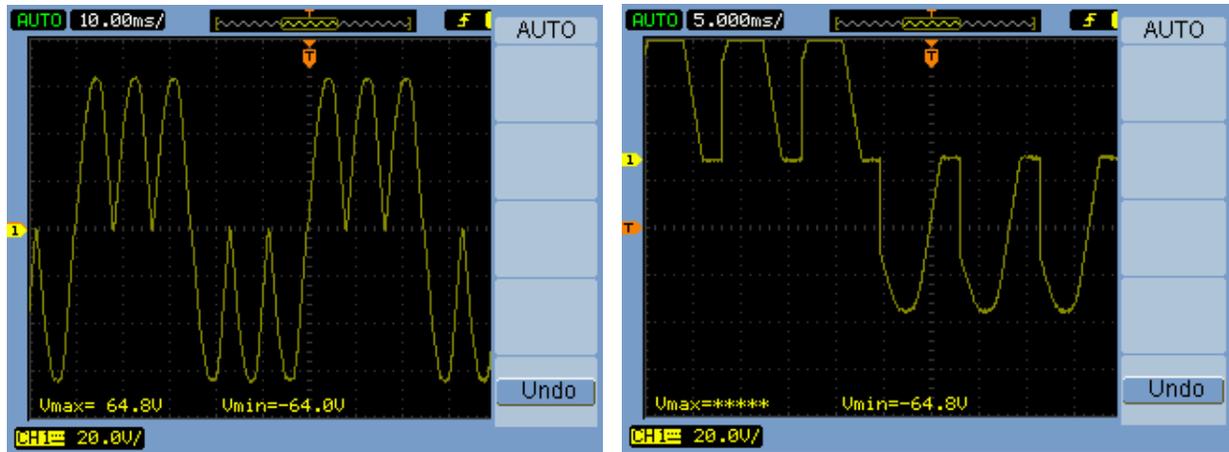
a) Disparo a 0°



b) Disparo a 45°

Figura 4.14. Señal de acople para Q4 (Optoacoplador 4 - VGE4).

Para comparar la prueba realizada a salida del circuito se hace de igual manera que en los dos casos anteriores, una captura de la salida a un ángulo de disparo a 0° y otro a 45° . La señal de entrada solamente necesita ser capturada una vez puesto que ésta no sufre ninguna modificación.



a) Disparo a 0°

b) Disparo a 45°

Figura 4.15. Señal de salida del Cicloconvertidor Monofásico/Monofásico.

Las capturas corresponden a las mediciones realizadas en un osciloscopio de la marca Agilent Technologies, más específicamente con el modelo DS01012A. El osciloscopio trabaja con una frecuencia máxima de 100 MHz y es de 2 canales y se muestra en la figura 4.16.

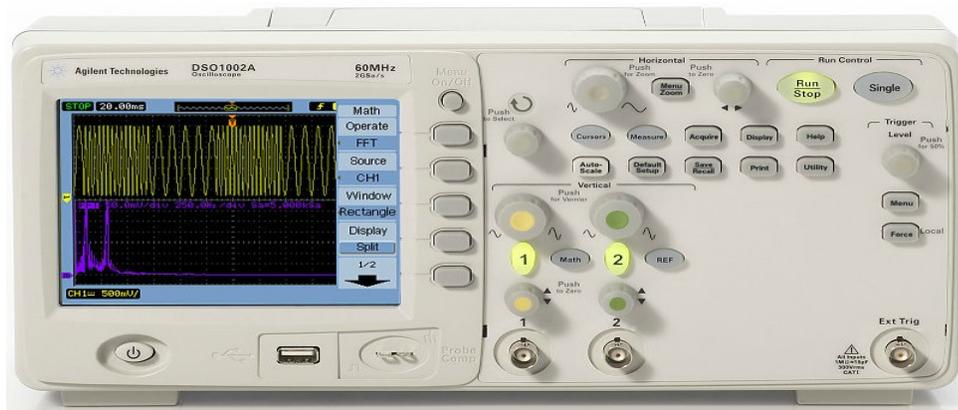


Figura 4.16. Osciloscopio marca Agilent Technologies, modelo DS01012A utilizado en las pruebas.

4.3.2. Mediciones de voltaje por ángulo de disparo.

Las capturas de las diferentes señales que se muestran en la sección anterior no reflejan el resultado completo, son solamente una pequeña muestra de los resultados completos los que si revelarán la eficiencia o precisión del circuito cicloconvertidor en su desempeño.

Se realizó un grupo de mediciones con un osciloscopio. A partir de los datos obtenidos por el instrumento (V_{rms}), se procede a realizar una comparación del voltaje de salida del circuito tanto teórico como práctico con ángulos de disparo de 10° de separación (desde 0° hasta 180°), como una muestra más completa. El análisis se muestran en la tabla 4.1. El voltaje de salida teórico ha sido calculado por la ecuación de V_o para el Cicloconvertidor Monofásico:

$$V_o(rms) = V_i(rms) \sqrt{\frac{1}{\pi} (\pi - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2})}$$

Angulo de disparo (Grados - α°)	Voltaje de Salida (Valor Teórico [V])	Voltaje de Salida (Valor Medido [V])	Error (%)
0	50	49.8	0.4
10	49.97	49.7	0.54
20	49.77	49.4	0.74
30	49.27	48.7	1.14
40	48.33	48	0.66
50	46.87	46.5	0.74
60	44.84	44.5	0.68
70	42.23	42	0.46
80	39.05	38.9	0.3
90	35.35	35.4	0.1
100	31.22	31.4	0.36
110	26.77	27	0.46
120	22.11	22.4	0.58
130	17.39	17.8	0.82
140	12.8	13.2	0.8
150	8.49	8.53	0.08
160	4.69	4.89	0.4
170	1.67	1.75	0.16
180	0	0.03	0.06
PROMEDIO	-	-	0.5

TABLA 4.1. Porcentaje de error entre valores de V_o teóricos y prácticos.

RESULTADO FINAL

Con el análisis de la tabla 4.1, notamos que el promedio del error para todos los valores de voltaje de salida es de 0.5% por lo que el rendimiento del circuito queda dentro del rango de error permitido el cual es del 10% como porcentaje de error máximo para un buen funcionamiento.

CONCLUSIONES

- Tomando en cuenta el bajo porcentaje de error entre los datos obtenidos teóricamente y las pruebas realizadas del circuito, el cual es del 0.5%, se puede comprobar que el cicloconvertidor monofásico/monofásico cumple con el standard de calidad requerido ya que este porcentaje se encuentra dentro del rango del 10% por debajo del valor ideal deseado.
- Los cicloconvertidores son máquinas diseñadas para manejar motores de gran tamaño, con un torque alto y una baja velocidad con el propósito de disminuir la elevada corriente de arranque que éstos suelen demandar, la cual es de al menos una vez y media el valor de la corriente nominal de trabajo. El cambio a una frecuencia inferior permite obtener un arranque más suave.
- Aunque los cicloconvertidores están recomendados para usarse en motores, esto no quiere decir que no se puedan utilizar en cargas resistivas aunque esto no tenga mucho sentido ya que la resistencia no se ve afectada por el parámetro frecuencia. En cargas resistivas solamente se ve afectada la potencia.
- Cuando los cicloconvertidores trabajan con cargas resistivas se emplean para modificar la potencia de consumo de la resistencia por medio del ángulo de desfase o de recorte, así se modifica el voltaje de salida reduciendo de esta manera la potencia entregada a la carga.
- Los cicloconvertidores monofásicos son poco implementados ya que el uso de éstos se enfoca principalmente en motores de alta potencia y esto conlleva a usar motores trifásicos y no monofásicos.

BIBLIOGRAFIA

- Muhammad H Rashid, "Electrónica de Potencia, Circuitos, dispositivos y aplicaciones". México, 3a Edición. Prentice Hall, 2004.
- Sugandhi R.K., Sugandhi K.K., "Tiristores, conceptos y aplicaciones", México, 1a Edición, Editorial Limusa 1985.
- Mloney, Timothy J., "Electrónica industrial moderna", 5a Edición, Pearson educación, México, 2006.
- <http://www.uv.es/emaset/iep00/temas/IEP9-0506.pdf>
- http://www.docentes.utonet.edu.bo/ocondoric/wp-content/uploads/TEMA_7.pdf
- [http://tec.upc.es/el/TEMA-6%20EP%20\(v1\).pdf](http://tec.upc.es/el/TEMA-6%20EP%20(v1).pdf)
- http://www.uma.es/investigadores/grupos/electronica_potencia/index.php?option=com_content&view=article&catid=15%3Abloque-2-convertidores&id=88%3A52-convertidores-ca-ca-de-magnitud-y-frecuencia-variables-&Itemid=105
- <http://oretano.iele-ab.uclm.es/~carrion/potencia/descargaME/problematika.pdf>

Anexo A: Hojas de Especificaciones Tecnicas.

- Datasheet PIC 16F877
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39582b.pdf>

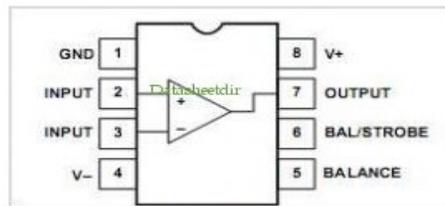
- Datasheet 4N25
http://denethor.wlu.ca/pc200/data_sheets/4N25_f.pdf

- Datasheet STGP7NC60H
<http://www.soiseek.com/STMICROELECTRONICS/STGP7NC60HD/>

- LM311
<http://www.soemtron.org/downloads/disposals/lm311n.pdf>

- PCD8544 (LCD_NOKIA 3310)
<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/philips/PCD8544U.pdf>

Anexo B: Pinout del comparador LM311



PINOUT

4.0 Absolute Maximum Ratings for the LM111/LM211 (Note 10)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

Total Supply Voltage (V_{SD})	36V
Output to Negative Supply Voltage (V_{7d})	50V
Ground to Negative Supply Voltage (V_{1d})	30V
Differential Input Voltage	$\pm 30V$
Input Voltage (Note 4)	$\pm 15V$
Output Short Circuit Duration	10 sec
Operating Temperature Range	

LM111	-55°C to 125°C
LM211	-25°C to 85°C
Lead Temperature (Soldering, 10 sec)	260°C
Voltage at Strobe Pin	$V^- - 5V$
Soldering Information	
Dual-In-Line Package	
Soldering (10 seconds)	260°C
Small Outline Package	
Vapor Phase (60 seconds)	215°C
Infrared (15 seconds)	220°C
See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" for other methods of soldering surface mount devices.	
ESD Rating (Note 11)	300V

Anexo C: GUÍAS DE LABORATORIO

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA



**GUIA # 1: SIMULACIÓN DEL CICLOCONVERTIDOR
MONOFÁSICO/MONOFÁSICO EN PROTEUS ISIS**

CATEDRÁTICO:

ING. JOSÉ WILBER CALDERÓN URRUTIA

CIUDAD UNIVERSITARIA, OCTUBRE 2011

OBJETIVOS

Objetivo General

Simular el cicloconvertidor monofásico/monofásico haciendo uso del software Proteus ISIS.

Objetivos Específicos

- Obtener a través de simulación las señales de control para cada uno de los transistores IGBT del circuito del cicloconvertidor monofásico/monofásico.
- Obtener por medio de la simulación las señales de acondicionamiento para cada uno de los opto acopladores.
- Obtener por medio de la simulación cada una de las señales de control provenientes del Puerto B del PIC16F877.
- Obtener por medio de simulación la señal de salida del inversor monofásico de cuatro etapas.
- Comparar por medio de la simulación la señal del voltaje de salida del cicloconvertidor monofásico/monofásico.

MARCO TEÓRICO

Introducción

El uso de cicloconvertidores está cada vez más de moda, específicamente en áreas donde se manejan motores de gran tamaño, los cuales tienen características de consumo de potencia alto. El propósito del uso de cicloconvertidores para controlar motores radica en el hecho de que éstos pueden generar un arranque más suave. Es bien sabido que un motor al arrancar puede llegar a consumir más de vez y medio el valor de la corriente nominal del mismo, lo que puede provocar inconvenientes en los usuarios de la red donde se encuentre conectado el motor. Es ahí donde entra en acción el cicloconvertidor el cual provee al motor un valor de frecuencia menor al de la línea provocando así una reducción significativa en la corriente de arranque.

El cicloconvertidor puede no obstante operar cargas resistivas ya que su topología no es exclusiva para cargas inductivas pudiendo llegar a ser una buena herramienta para el control de equipos de calefacción, cocinas eléctricas y cualquier tipo de carga resistiva. Lo único que puede mencionarse en contra del uso de carga netamente resistiva es que se desaprovechan las características que posee para controlar cargas inductivas.

Pero ¿cómo se tiene el control de la velocidad de un motor y el conocimiento de cuánto calor se le debe aplicar a un tanque de agua entonces?

Si el cicloconvertidor es de frecuencia fija, el control de dichos parámetros se realiza alterando el parámetro voltaje.

Es bueno saber que hay diferentes tipos de cicloconvertidores entre monofásicos/monofásicos, trifásicos monofásicos, trifásicos monofásicos, de corriente circulante, de bloqueo de corriente, de frecuencia fija, de frecuencia variable, etc.

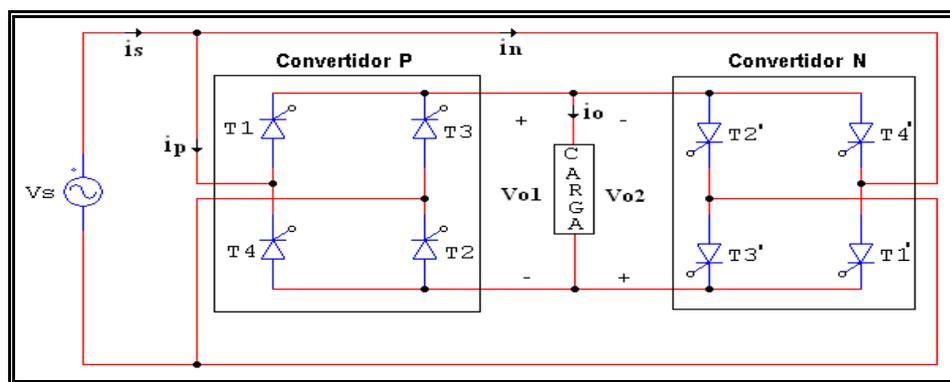
El cicloconvertidor de la práctica de laboratorio es del tipo de bloqueo de corriente en la carga y controlado por ángulos de retardo. Como el cicloconvertidor del laboratorio está diseñado con fines didácticos, el nivel de voltaje es de 50V en la salida y no presenta carga inductiva, solamente carga resistiva.

Cicloconvertidor monofásico/monofásico

A pesar de ser uno de los cicloconvertidores menos complejos (todos son bastante complejos), su uso es muy limitado debido a lo que ya se mencionó: se utilizan principalmente para el manejo de motores de alta potencia, una baja velocidad y un torque bastante grande, por ejemplo motores de grúas, de molinos, de barcos grandes, etc.

Este tipo de motores grandes son por lo general, por su elevado consumo de potencia, trifásicos y por ende deben ser controlados con cicloconvertidores trifásico/trifásico.

Lo anterior no quita que haya motores de tipo monofásico que puedan ser controlados por este tipo de equipo (cicloconvertidor) sobre todo si esto nos contribuye a economizar energía y a proteger las instalaciones de nuestro lugar de trabajo o de residencia.



C.1. Típico circuito cicloconvertidor a base de SCR's

En la figura C.1. se puede observar el circuito cicloconvertidor construido con SCR's. Este diseño incluye 8 tiristores (SCR's), cuatro para generar la parte positiva de la señal y cuatro para generar la

parte negativa. Es por ello que a cada bloque se le denomina convertidor P para la parte positiva y convertidor N para la negativa. Esto tiene como consecuencia el hecho de necesitar 8x2 líneas de control por lo que se vuelve bastante complejo, sobre todo en esta etapa ya que además de necesitarse muchas líneas de conexión, también aumenta el espacio físico que ocupa sin contar el peso que puede llegar a tener el cual depende de la capacidad de los dispositivos.

Se presenta en la figura C.2. una forma alternativa, la conexión matricial. Más específicamente esta configuración es conocida como PUENTE H ya que su topología recuerda la forma de la letra H.

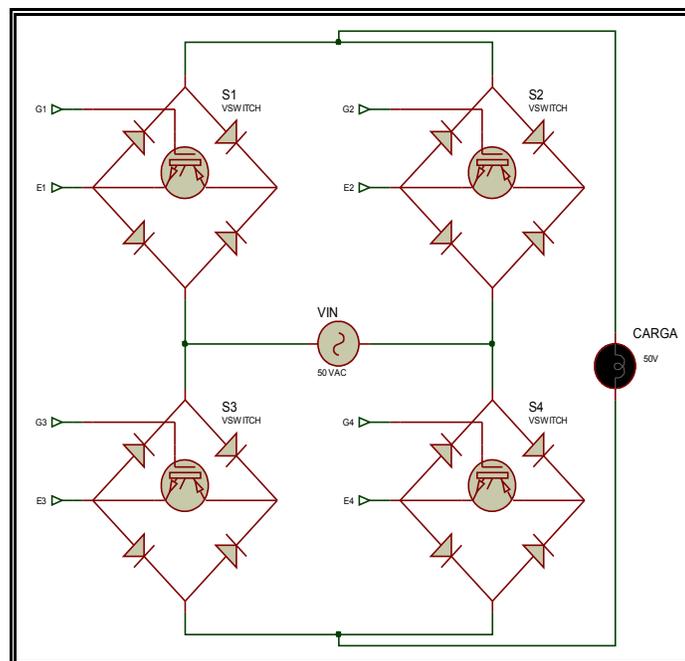


Figura C.2. Cicloconvertidor monofásico con switches bidireccionales.

Ahora la pregunta que debe hacerse es ¿qué es un switch bidireccional? Un switch bidireccional es aquel que es capaz de conducir corriente en ambos sentidos entre sus terminales tal como lo hace el switch del foco de nuestra casa. La diferencia está en que el interruptor del foco no puede ser controlado mediante señales electrónicas de activación y los denominados switches bidireccionales en electrónica de potencia si pueden.

En la figura C.3. se puede apreciar un switch bidireccional.

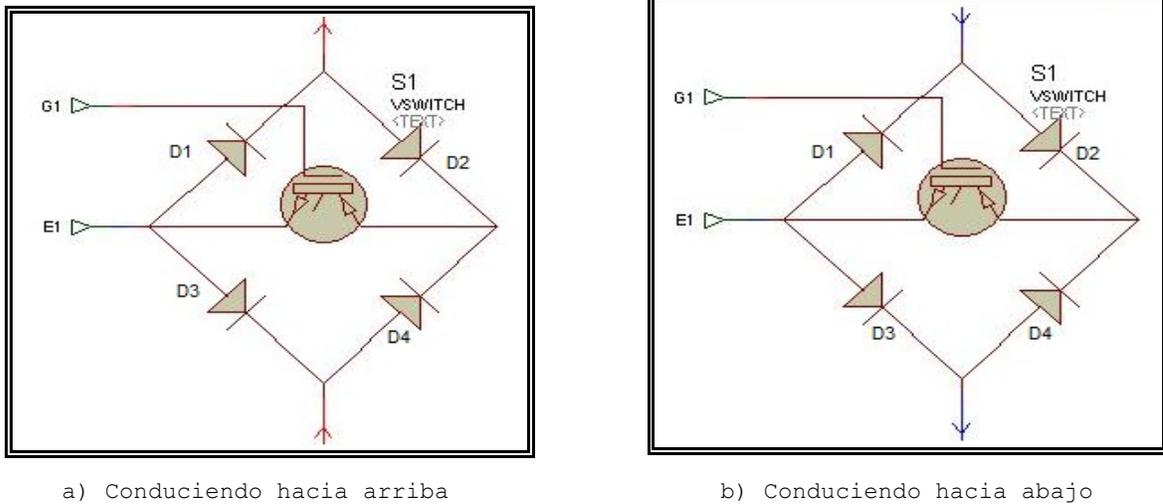


Figura C.3. Switch bidireccional

Puede conducir en ambas direcciones porque el transistor ubicado en el centro del puente de diodos se lo permite, así si el diodo D4 conduce, solo espera la activación del transistor para dejar pasar la corriente a través de colector - emisor y luego por el diodo D1 en el caso de la figura C3.a) Para la figura C3.b) es similar el diodo D2 conduce y luego entrega la corriente a D3 a través de los terminales colector - emisor del IGBT. El transistor conduce siempre porque la dirección de los diodos del puente lo polariza siempre en directa.

El voltaje de salida V_o que presenta este tipo de cicloconvertidores tiene la forma:

$$V_o(rms) = V_i(rms) \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2} \right)} \quad \text{EC (1)}$$

Donde: $V_o(rms)$ es el voltaje de salida, $V_i(rms)$ el voltaje de entrada y α es el ángulo de desfase o de disparo de los interruptores bidireccionales para nuestro caso.

PROCEDIMIENTO

Se recomienda antes de realizar la simulación, tener conocimientos previos de Proteus ISIS ya que esto evitará problemas en el desarrollo de la práctica.

El circuito a simular se muestra a continuación en las figuras C.4. y C.5.

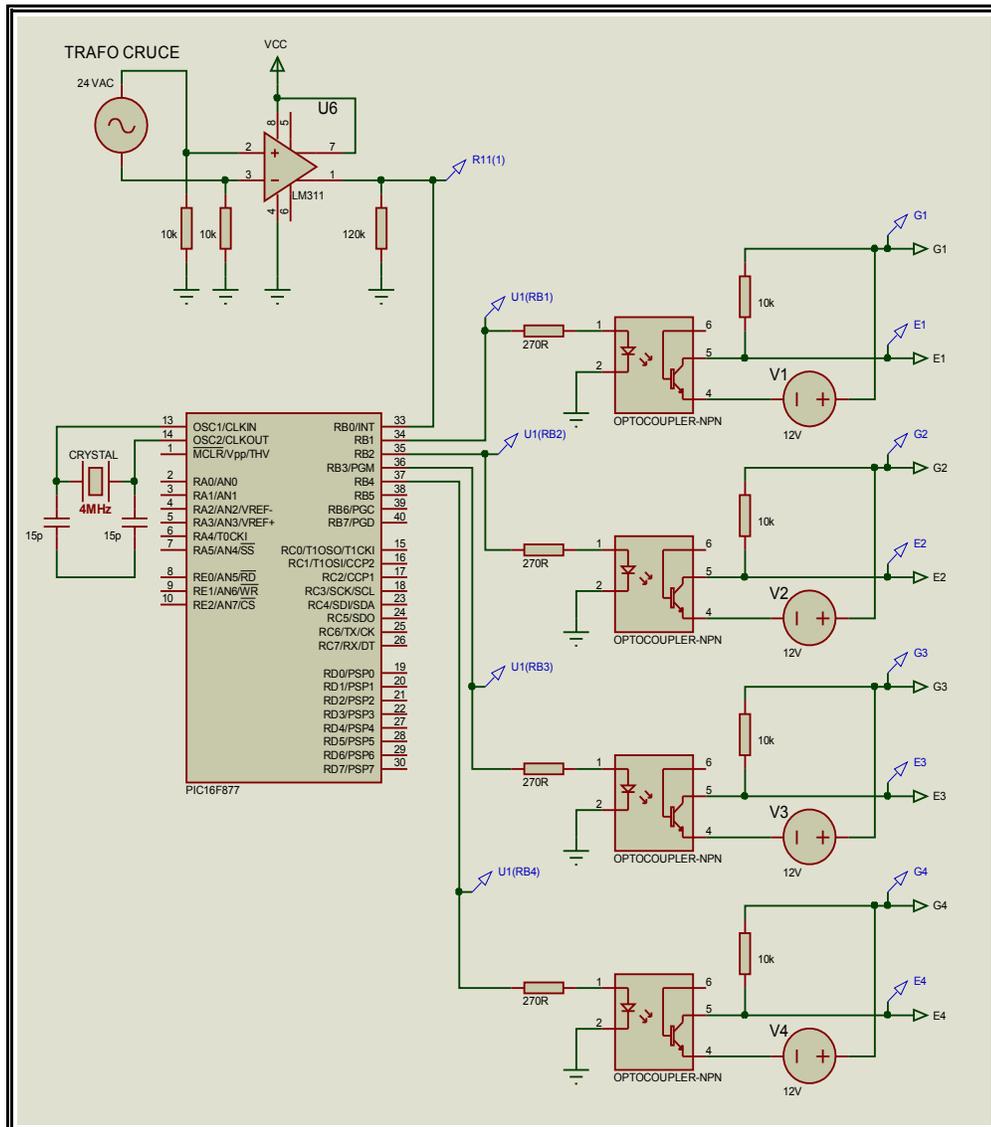


Figura C.4. Circuito a simular. Etapa de control y acoplamiento.

Utilice las puntas de prueba sugeridas en el diagrama, con el fin de ahorrarle problemas para nombrarlas y como criterio de uniformidad en el desarrollo de la práctica con todos sus demás compañeros.

Pida al instructor que le proporcione el archivo programa del PIC16F877 para poder realizar la práctica. El archivo tiene como nombre Cicloconvertidor Monofasico-Monofasico Int.hex y está disponible para diferentes ángulos de disparo.

En la misma área de trabajo dentro de proteus ubicar el circuito de potencia, el de la figura C.5.

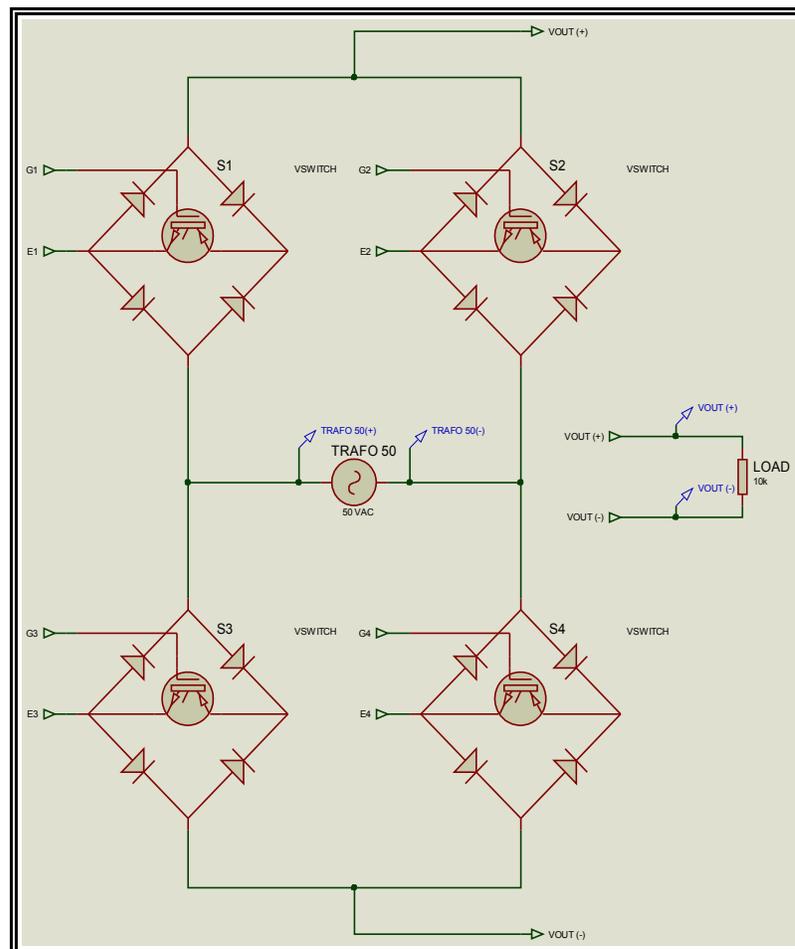


Figura C.5. Circuito de potencia de la simulación.

Obtener las señales de todos los puntos que se le indican utilizando la herramienta para graficar ANALOGUE contenida en el menú Graph Mode. Seleccionar en las gráficas los puntos de inicio desde 0 hasta 50mS o hasta 100mS.

En el caso de las señales de control del microcontrolador, definir una sola punta de prueba con respecto a tierra. Para la señal acoplada en la compuerta de cada transistor IGBT usar dos puntas de prueba como se indica en la figura C5 y figura C4, hacer lo mismo para la de entrada y la de salida.

Debe haber al menos 11 gráficas resultantes por cada simulación.

Luego de haber realizado la primera parte de la simulación, procedemos a realizar la segunda parte, la cual consiste en simular en tiempo real. Para ello conectar un voltímetro AC a la carga y luego presionar el botón de iniciar simulación (el botón play). El voltímetro AC lo encontramos entre los instrumentos de medición de Proteus ISIS.

Tomamos la lectura del voltímetro para luego compararlo con el valor teórico obteniendo de EC(1) haciendo $V_i = 50V$. Con estos datos llenar la tabla C.1:

Angulo de disparo [Grados]	Vo(Teórico) [V]	Vo(Simulado) [V]
0		
30		
60		
90		
120		
150		
180		

Tabla C.1. Voltajes de salida teóricos y prácticos para algunos ángulos de recorte.

Comparar los datos y realizar conclusiones de lo observado en la tabla C1.

Ahora procede la última parte de la simulación, la de simulación en tiempo real con teclado y display LCD. Correr la simulación en tiempo real y probar diferentes ángulos de recorte de la señal. Consultar al instructor de como variar los ángulos de disparo o recorte mediante el teclado. Comparar la última simulación y concluir para los ángulos especificados en la tabla C.1.

4. ASIGNACIONES

1. Simular la la forma de corriente en la carga y compruebe su respuesta usando la ley de ohm.
2. ¿Qué tanto se aproximan o se alejan los valores simulados de los teóricos?.
3. ¿Cuál es la potencia suministrada a la carga?
4. Investigar la secuencia de disparo de los transistores y compararla con las gráficas de las señales de control y de acoplamiento.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA



**GUIA # 2: USO DEL MÓDULO DIDÁCTICO
CICLOCONVERTIDOR MONOFÁSICO/MONOFÁSICO**

CATEDRÁTICO:

ING. JOSÉ WILBER CALDERÓN URRUTIA

CIUDAD UNIVERSITARIA, OCTUBRE 2011

OBJETIVOS

Objetivo General

Usar el módulo didáctico Cicloconvertidor monofásico/monofásico con el fin de ver los diferentes tipos de señales que permitan comprender el funcionamiento de los cicloconvertidores.

Objetivos Específicos

- Obtener las señales acondicionadas por los opto acopladores para cada uno de los transistores IGBT del circuito Cicloconvertidor monofásico/monofásico.
- Obtener las señales de control procedentes directamente del microcontrolador en sus respectivos puntos de prueba.
- Obtener la señal de cruce por cero que recibe el microcontrolador procedente del circuito detector de cruce por cero.
- Obtener la señal de salida del Cicloconvertidor monofásico/monofásico.
- Observar el comportamiento del Cicloconvertidor monofásico/monofásico con una carga real.

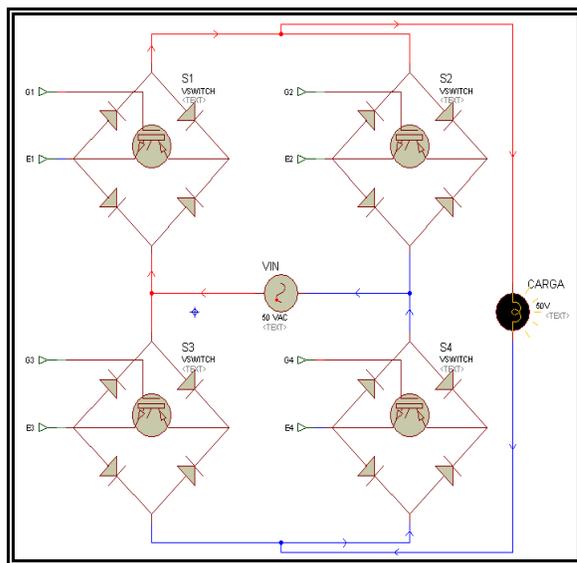
MARCO TEÓRICO

Introducción

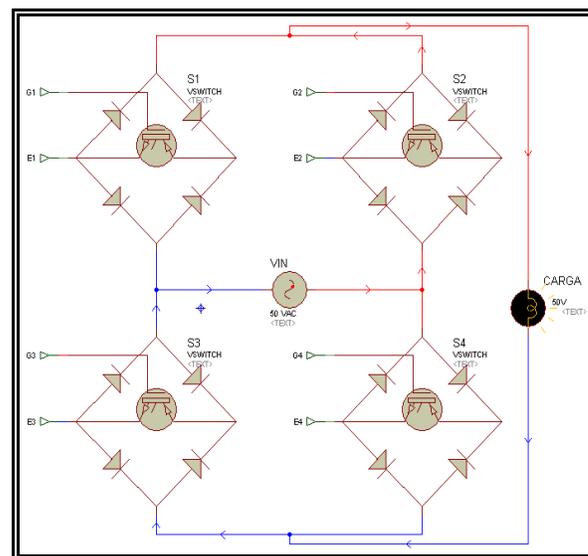
El uso de cicloconvertidores está cada vez más de moda, específicamente en áreas donde se manejan motores de gran tamaño, los cuales tienen características de consumo de potencia alto. El propósito del uso de cicloconvertidores para controlar motores radica en el hecho de que éstos pueden generar un arranque más suave. Es bien sabido que un motor al arrancar puede llegar a consumir más de vez y medio el valor de la corriente nominal del mismo, lo que puede provocar inconvenientes en los usuarios de la red donde se encuentre conectado el motor. Es ahí donde entra en acción el cicloconvertidor el cual provee al motor un valor de frecuencia menor al de la línea provocando así una reducción significativa en la corriente de arranque.

Para formar el voltaje de salida deseado de un cicloconvertidor monofásico de cuatro cuadrantes activado por ángulo de desfase y sin corriente de circulación (con bloqueo), que es el caso de nuestro cicloconvertidor, se debe tener una lógica de activación de los switches bidireccionales.

Primero se analizará la activación por cuadrantes, para ello hay que referirse a las figuras C.6. y C.7. en las cuales apreciamos la polaridad del voltaje de la fuente y el sentido de la corriente en la carga. El color rojo es polaridad positiva y el azul negativa.

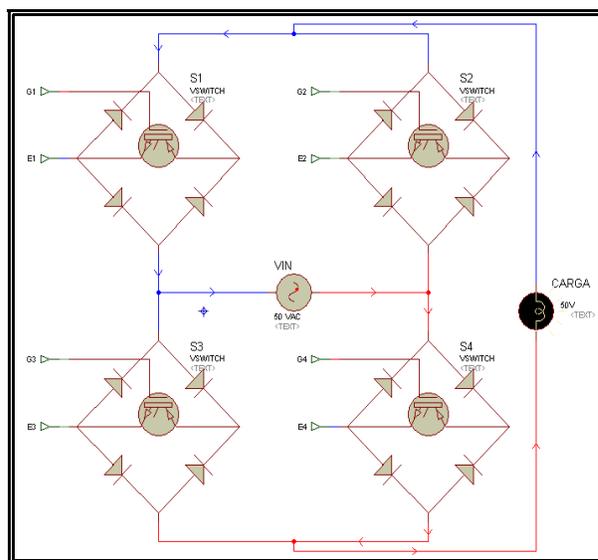


a) Cuadrante I

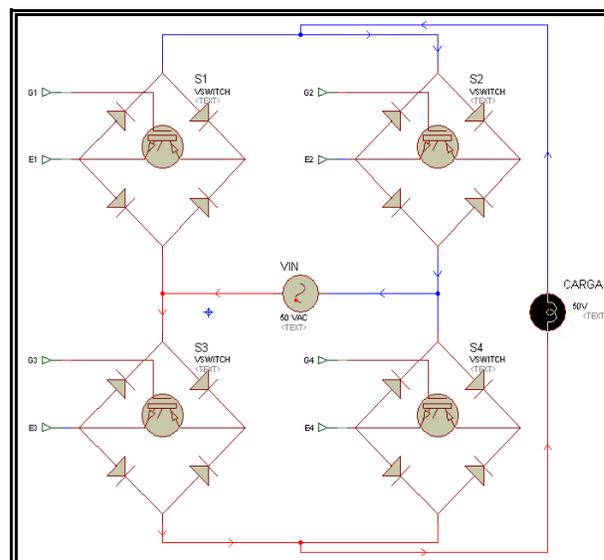


b) Cuadrante II

Figura C.6. Cuadrantes I y II



a) Cuadrante III



b) Cuadrante IV

Figura C7. Cuadrantes III y IV

Para ilustrarlo mejor, analizar la tabla C.2 en donde se observa no solamente el cuadrante sino también se verá la lógica de activación de los transistores, de los interruptores bidireccionales.

Semicyclo (Señal de 60Hz)		Transistores Activados		Polaridad I (Carga)		Cuadrante
1	+	Q1	Q4	+	-	I
2	-	Q2	Q3	+	-	II
3	+	Q1	Q4	+	-	I
4	-	Q1	Q4	-	+	III
5	+	Q2	Q3	-	+	IV
6	-	Q1	Q4	-	+	III

Tabla C.2. Activación de transistores para cada semicyclo de la señal de 60 Hz.

La activación por semicyclo se haría de acuerdo a la lógica de la tabla C.2 donde el ciclo de 20Hz comenzaría en semicyclo 1 de la señal de 60Hz, medio ciclo de la señal de 20Hz se cumpliría con el semicyclo 3 de la señal de 60Hz y el semicyclo negativo de la señal de 20Hz es el resto de semicyclos de 60Hz, desde el cuarto hasta el sexto.

El voltaje de salida V_o que presenta este tipo de cicloconvertidores tiene la forma:

$$V_o(rms) = V_i(rms) \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\pi - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2} \right)} \quad \text{EC (1)}$$

Donde: $V_o(rms)$ es el voltaje de salida, $V_i(rms)$ el voltaje de entrada y α es el ángulo de desfase o de disparo de los interruptores bidireccionales para nuestro caso.

El Modulo Didáctico Cicloconvertidor monofásico/monofásico.

El modulo didáctico está compuesto por el circuito con chasis de acrílico, el módulo de carga y los cables conectores.

Procedimiento

Antes de comenzar con la práctica, asegurarse del buen estado de todos los cables, tomas, y cualquier equipo a utilizar ya sea éste de medición como el osciloscopio para prevenir accidentes que pongan en riesgo su salud y su propia vida además de evitar algún daño al circuito.

Con la práctica de simulación previamente realizada, se tiene mayor claridad de como utilizar el módulo, y de que es lo que se debe hacer en esta práctica.

1. Identificar las partes que componen el módulo y hacer la respectiva conexión. Siempre se debe hacer cuidadosamente, examinado cualquier error posible.
2. Encender el módulo y esperar que el circuito comience a funcionar para poder operarlo por medio del teclado.
3. Apagar la salida del circuito desde el teclado y conectar la carga.
4. Encender las salidas desde el teclado y efectuar las mediciones correspondientes.
5. Recordar que la EC(1) se debe utilizar para obtener los datos teóricos y la lectura de voltaje se hará mediante el osciloscopio quien además permitirá ver la señal tanto en la salida como en las señales de control y de acoplamiento.
6. Con lo especificado anteriormente llenar la tabla C.6.

Angulo de disparo [Grados]	Vo(Teórico) [V]	Vo(Práctico) [V]
0		
12		
24		
36		
48		
60		
72		
84		
96		
108		
120		
132		
144		
156		
168		
180		

Tabla C.3. Datos a obtener del módulo cicloconvertidor monofásico.

CUESTIONARIO

Comprobar las señales para los ángulos simulados en la práctica anterior y graficarlas, ¿Son diferentes? ¿Si son diferentes a qué se debe?.

¿Qué sucede con la carga, qué observa para cada una de las pruebas realizadas?

¿Qué características tiene la señal de cruce por cero?

¿Cómo cree usted que afecta al circuito el hecho de que la señal de cruce por cero presente este patrón?

¿Qué relación tiene la forma de la señal de cruce por cero con las señales de control y con la salida?

¿Se observa un cambio proporcional en el patrón de la señal de control con la señal de acople y la señal de voltaje de salida al cambiar el ángulo de recorte?

PROGRAMA EN LENGUAJE ENSAMBLADOR

Anexo D: Programa del PIC16F877, simulacion cicloconvertidor.

```
processor 16F877

LIST    P=16F877      ;Se indica el modo de procesador

INCLUDE <P16f877.inc>;se incluye la definicion de los
                        ;registros internos

__config 0x3F71      ;Configuracion de bits
                        ;Proteccion deCodigo: OFF
                        ;Debug: OFF

                        ;FLASH program Memory Write: ON
                        ;Data EE memory Code Protection:
OFF

                        ;Low Voltage ICSP: OFF

                        ;Brown out Reset: OFF

                        ;Power up Timer: ON
                        ;Watch Dog: ON

                        ;Cristal: XT

ORG .0
GOTO PROGRAMA

ON_OFF EQU    0x23
TEMP1  EQU 0x24
TEMP2  EQU    0x25
BINARIO EQU    0x34
ANGULO_L EQU    0x35
ANGULO_H EQU    0x36
W_TEMP EQU    0x40
CICLO  EQU    0x41
CONVERTIDOR EQU 0x42
```

```

ORG    .4
GOTO  INTERRUPCIONES

ORG    .5

```

PROGRAMA

```

;      INICIALIZANDO VARIABLES

```

```

MOVLW  .0
MOVWF  BINARIO
MOVLW  .1
MOVWF  ON_OFF
CLRF   CICLO
CLRF   CONVERTIDOR
MOVLW  0xFF
MOVWF  ANGULO_H
MOVWF  ANGULO_L

```

```

;      CONFIGURANDO E INICIALIZANDO PUERTOS

```

```

CLRF   PORTB

```

```

MOVLW  b'00000001'
MOVWF  TRISB

```

```

MOVLW  b'11000101'      ;\      Seleccionamos Prescaler (64) del TMR0 y Flanco
MOVWF  OPTION_REG      ;/      ascendente en RB0, TMR0 = OFF

```

```

BSF    PIE1,TMR1IE

```

```

BCF    STATUS,RP0

```

```

CLRF   T1CON

```

```

BSF    INTCON,PEIE

```

```

BSF    INTCON,INTE

```

```

BSF    INTCON,GIE

```

```
;FUNCION_PROCESAR_DATO
```

```
;ESTA ES LA NUEVA FORMA DE CALCULAR LOS DATOS DE DISPARO (AHORA PARA TMR1)
```

```
    MOVLW  .0  
    XORWF  BINARIO,W  
    BTFSS  STATUS,Z  
    GOTO   CALCULAR_TMR1  
    MOVLW  0xFF  
    MOVWF  ANGULO_L  
    MOVLW  0xFF  
    MOVWF  ANGULO_H  
    GOTO   ESPERAR_INTERRUPCIONES
```

```
CALCULAR_TMR1
```

```
    CLRF   ANGULO_H  
    CLRF   ANGULO_L  
    MOVF   BINARIO,W  
    MOVWF  TEMP1
```

```
SUMA_GRADOS
```

```
    MOVLW  .46  
    ADDWF  ANGULO_L,F  
    BTFSS  STATUS,C  
    GOTO   SIGUE_SUMANDO?
```

```
BYTE_H
```

```
    INCF   ANGULO_H,F
```

```
SIGUE_SUMANDO?
```

```
    DECF   TEMP1,F  
    BTFSS  STATUS,Z  
    GOTO   SUMA_GRADOS
```

```
CONVERTIR_TMR1
```

```
    MOVLW  0xFF  
    XORWF  ANGULO_L,W  
    MOVWF  ANGULO_L  
    MOVLW  0xFF
```

```

XORWF  ANGULO_H,W
MOVWF  ANGULO_H

ESPERAR_INTERRUPCIONES
      GOTO  ESPERAR_INTERRUPCIONES

INTERRUPCIONES

      BTFSS INTCON,INTF
      GOTO  TIMER1

EXTERNA

      MOVWF W_TEMP
      BCF   INTCON,INTF
      CLRF  PORTB

      MOVLW .0
      XORWF CICLO,W
      BTFSS STATUS,Z
      GOTO  PRUEBA_CICLO2
      GOTO  CICLO1

PRUEBA_CICLO2
      MOVLW .1
      XORWF CICLO,W
      BTFSS STATUS,Z
      GOTO  CICLO3
      GOTO  CICLO2

CICLO1
      INCF  CICLO,F
      MOVLW b'00010010'
      MOVWF CONVERTIDOR

      GOTO  CAMBIAR_FLANCO

```

CICLO2

```
INCF   CICLO,F
MOVLW b'00001100'
MOVWF  CONVERTIDOR

GOTO   CAMBIAR_FLANCO
```

CICLO3

```
CLRF   CICLO

MOVLW b'00010010'
MOVWF  CONVERTIDOR
```

CAMBIAR_FLANCO

```
BSF    STATUS,RP0
MOVLW b'01000000'
XORWF  OPTION_REG,F
```

;Cuando señal de entrada en RB0 es cuadrada no se deshabilita timer1

;CONFIGURANDO Y ACTIVANDO TEMPORIZADOR

```
MOVF   ANGULO_L,W
MOVWF  TMR1L
MOVF   ANGULO_H,W
MOVWF  TMR1H
```

```
BSF    T1CON,TMR1ON ; Se pone en marcha TMR1
```

;NO_TIMER1

```
MOVF   W_TEMP,W
```

```
RETFIE
```

TIMER1

```
BCF          T1CON, TMR1ON
BCF  PIR1, TMR1IF
MOVWF  W_TEMP

MOVLW  .0
XORWF  ON_OFF
BTSS   STATUS, Z
GOTO   ENCENDER_SALIDAS
GOTO   NO_ENCENDER_SALIDAS
```

ENCENDER_SALIDAS

```
MOVF  CONVERTIDOR, W
IORWF PORTB, F
```

; SALIDA_NORMAL

NO_ENCENDER_SALIDAS

```
MOVF  W_TEMP, W
```

```
RETFIE
```

```
END
```