



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

División de Ciencias e Ingeniería

**Diseño de un Control PWM Programado para
Inversor Fotovoltaico Interconectado a la Red
Eléctrica**

TESIS

**PARA OBTENER EL GRADO DE
INGENIERO EN REDES**

PRESENTA

JUAN GUILLERMO BUENFIL MARIN

Director de Tesis

DR. FREDDY IGNACIO CHAN PUC

Asesores

**MES. ROBERTO ACOSTA OLEA
DR. JAIME SILVERIO ORTEGÓN AGUILAR**

Chetumal, Quintana Roo, México, Octubre de 2011.



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

División de Ciencias e Ingeniería

Tesis elaborado bajo supervisión del Comité de Asesoría y aprobada como requisito parcial para obtener el grado de:

INGENIERO EN REDES

Comité de Tesis

Director: _____
DR. FREDDY IGNACIO CHAN PUC

Asesor: _____
MES. ROBERTO ACOSTA OLEA

Asesor: _____
DR. JAIME SILVERIO ORTEGÓN AGUILAR

Chetumal, Quintana Roo, México, Octubre de 2011.

AGRADECIMIENTOS

A mi hermana, mi mamá y abuela, gracias por darme a su modo la motivación para seguir adelante siendo los mejores modelos de trabajo a seguir y luchar día a día.

A mi asesor Dr. Freddy Ignacio Chan Puc gracias por dedicar parte de su tiempo para la realización de mi tesis, sus consejos, su apoyo y tenerme eterna paciencia.

A los revisores de tesis gracias por sus comentarios y acertadas sugerencias: Dr. Jaime Ortegón Aguilar, MES. Roberto Acosta Olea.

A mis compañeros de generación: Nazario Martínez, Suriel Cohuo, Miguel Trejo, Alejandro Cupul y Wilberth Gutiérrez; porque en la vida y en la carrera difícilmente se encuentran a los verdaderos amigos, gracias por todos los mejores momentos que pasamos juntos, el apoyo y lo principal de todo su amistad.

A la Universidad de Quintana Roo gracias por el apoyo económico proporcionado para la realización de mi tesis y ser mi casa de estudios del cual estoy muy orgulloso de pertenecer.

Al todo el personal que trabaja en el laboratorio de metrología gracias por brindarme todas las facilidades para poder realizar mi tesis.

A Diana Vergara gracias por ser el pilar más importante en mi vida, que a pesar de todas las adversidades siempre estás ahí cuando más lo necesito, por tu apoyo, tu comprensión, tus consejos, tus regaños y tu infinita paciencia "Te Amo".

Y por último y no menos importante gracias Dios.

DEDICATORIA

A mi Padre:

Donde quiera que te encuentres te quiero dar las gracias por todas las veces que te pedí ayuda y me la concediste, así como por haberme guiado tanto en mis estudios como en mi vida personal. Siempre serás mi ejemplo a seguir y para mí siempre estarás a mi lado, gracias por darme las fuerzas para llegar hasta el día de hoy y los que vienen.

Siempre estarás en mi recuerdo y mi corazón.

JUAN GUILLERMO

RESUMEN

Ante la gran búsqueda de generar y proporcionar energía que no se contamine para así poder dejar en segundo plano los hidrocarburos que cada vez son menos, se propone el diseño e implementación de inversores con control digital para celdas fotovoltaicas que se interconecten a la red eléctrica.

Hay muchos motivos por el cual hacer esta implementación. Uno de ellos sería el no seguir dañando el ambiente y contribuyendo al calentamiento global y el más importante es el incremento sin medida en la demanda de la energía eléctrica provocando a su vez una gran escasez y dificultad para obtenerla. Con este tipo de tecnología podríamos minimizar el impacto de tal demanda de una manera menos abrasiva al ambiente. El prototipo propuesto (inversor) puede interconectarse a la red eléctrica y ayudar a la generación o recuperación de la corriente; disminuyendo con esto el desgaste acelerado de la energía.

En el capítulo I se presenta a una breve descripción de las energías renovables existentes y de su potencial como recurso energético. De este amplio conjunto, se escoge la energía solar generada a través de medios fotovoltaicos.

Sin profundizar, se mencionan algunas regulaciones que deben cumplirse y las expectativas que se han fijado para posteriores desarrollos que se puedan ofrecer a este sector, sin olvidar que esto depende en gran medida para la futura evolución de la tecnología.

Los módulos fotovoltaicos son los principales elementos de estas instalaciones, por lo cual se describe su funcionamiento. Estos módulos se agrupan en conjuntos formando el generador fotovoltaico o arreglo y precisan de una o varias etapas de potencia que permitan convertir adecuadamente la energía generada para su posterior utilización.

En el capítulo II se abordan los sistemas procesadores de potencia. El empleo de estos convertidores electrónicos de potencia CD/CA en el área de calidad de la energía es de gran importancia, ya que por medio de ellos se realiza la función de corregir los defectos existentes en la línea de distribución. Sin embargo, los convertidores convencionales presentan la limitante para este tipo de aplicaciones de un alto contenido armónico en la tensión de salida, siendo necesario estudiar alternativas de convertidores para la aplicación en el área de calidad de la energía.

Una alternativa para los convertidores CD/CA convencionales se encuentra en las topologías multinivel. Su principal característica es la de sintetizar la tensión de salida en escalones de tensión de manera que los dispositivos semiconductores solo manejan el valor de tensión de un escalón. Así mismo, el bajo contenido armónico que presentan en la salida y las mínimas pérdidas por conmutación que se pueden conseguir hace de las topologías multinivel una excelente opción en la conversión CD/CA.

Después de haberse dado a conocer las diferentes opciones para implementar el sistema procesador de potencia, de entre todas ellas se elige la estructura llamada "Inversor Multinivel" de la cual se desprende como objeto de estudio en esta tesis combinado con un control programado PWM y su interconexión a la red eléctrica.

En el capítulo III se presenta el diseño del inversor, su fabricación y su implementación así como del diseño e implementación de los controladores (driver) para los transistores de potencia.

En el capítulo IV se muestra el diseño del control basado en un microcontrolador así como los resultados experimentales y finalmente las conclusiones del tema de investigación con sus respectivas sugerencias para trabajos futuros.

En el capítulo V se exponen finalmente las conclusiones del tema de investigación con sus respectivas sugerencias para trabajos futuros.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
ÍNDICE DE FÓRMULAS	XIII
ÍNDICE DE TABLAS	XIV
CAPÍTULO I.....	15
INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	15
1.1 <i>Generación de Energía</i>	16
1.2 <i>Energías Renovables</i>	19
1.3 <i>Sistemas de Generación</i>	20
1.3.1 <i>Motores de Combustión Interna</i>	20
1.3.2 <i>Turbinas de Gas</i>	21
1.3.3 <i>Microturbinas</i>	21
1.3.4 <i>Celdas de Combustible</i>	21
1.3.5 <i>Sistemas Fotovoltaicos</i>	22
1.3.6 <i>Sistemas Eólicos</i>	22
1.4 <i>Sistemas de Almacenamiento de Energía</i>	23
1.5 <i>Panorama de las Energías Renovables en México</i>	24
1.6 <i>La Energía Solar Fotovoltaica</i>	27
1.7 <i>La Celda Fotovoltaica</i>	28
1.8 <i>Tipos De Celdas Fotovoltaicas</i>	32
1.9 <i>Pérdidas De Energía Luminosa</i>	34
1.10 <i>Tensión, Corriente y Potencia</i>	34
1.11 <i>Forma Geométrica</i>	35
1.12 <i>El Módulo Fotovoltaico</i>	36
1.13 <i>Estructura e Interconexión Interna de Los Módulos Fotovoltaicos</i>	37
CAPÍTULO II.....	39
CONVERTIDORES DE CD/CA.....	39
2.1 <i>Inversores</i>	40
2.2 <i>Clasificación de los Inversores</i>	41
2.2.1 <i>Inversor Monofásico</i>	42
2.2.2 <i>Inversor de Medio Puente</i>	43
2.2.3 <i>Inversor de Puente Completo</i>	46

2.2.4 Inversor de Onda Cuadrada	49
2.2.5 Inversor de Onda Cuasi-Cuadrada	50
2.2.6 Inversor de Onda Senoidal Pura	52
2.2.6.1 Onda Senoidal Rectificada	52
2.2.6.1 Onda Senoidal Pura.....	53
2.3 <i>Técnicas de Modulación</i>	54
2.3.1 Modulación de varios Anchos de Pulso	55
2.3.2 Modulación Senoidal del Ancho de Pulso.....	56
2.3.3 Modulación Senoidal modificada del Ancho de Pulso	57
2.4 <i>Control por Desplazamiento de Fase</i>	58
2.5 <i>Problema de Tierras</i>	58
2.6 <i>Convertidores Multinivel</i>	59
2.7 <i>Topologías de Inversores Multinivel</i>	61
2.8 <i>Características de los Convertidores Multinivel</i>	62
2.9 <i>Desventajas de los Inversores Multinivel</i>	63
2.10 <i>Métodos de Control de los Inversores Multinivel</i>	63
2.11 <i>Driver de Disparo</i>	64
2.12 <i>Reducción de Armónicas</i>	64
CAPÍTULO III	68
DISEÑO DEL INVERSOR	68
3.1 <i>Desarrollo</i>	69
3.2 <i>Construcción del Inversor</i>	70
3.3 <i>Diseño de los Drivers</i>	77
3.4 <i>Diseño de Control</i>	80
3.5 <i>Tiempos de Disparo de la Señal Generada</i>	83
3.6 <i>Programación del PIC-16F84A</i>	84
3.7 <i>Cruce por Cero</i>	85
CAPÍTULO IV	87
SIMULACIONES Y RESULTADOS EXPERIMENTALES	87
4.1 <i>Simulación del control</i>	88
4.2 <i>Obtención de la Señal Senoidal</i>	90
4.3 <i>Resultados de Pruebas Experimentales</i>	93
CAPÍTULO V	96
CONCLUSIONES	96

BIBLIOGRAFÍA.....	99
GLOSARIO	100
ABREVIATURAS	105
ANEXOS	107
ANEXO A.- LISTA DE COMPONENTES Y HERRAMIENTAS.....	108
ANEXO B.- DATASHEET IRF640	109
ANEXO C.- DATASHEET IR2110.....	110
ANEXO D.- DATASHEET 1N4007.....	111
ANEXO E.- DATASHEET 16F877A.....	112
ANEXO F.- DATASHEET 16F84A.....	113
ANEXO G.- LISTA DE INTERCONEXIÓN INTERNA DEL INVERSOR	114
ANEXO H.- LISTA DE INTERCONEXIÓN INTERNA DEL DRIVER	115
ANEXO I.- CÓDIGO PWM PROGRAMADO.....	116

Índice de Figuras

INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	15
<i>Figura 1.1.- Diagrama de bloques de un sistema de alimentación ininterrumpida (SAI).</i>	24
<i>Figura 1.2.- Grafica de Intensidad Energética y de Emisiones.....</i>	26
<i>Figura 1.3.- Modelo circuital de La Celda Fotovoltaica y curva característica.</i>	28
<i>Figura 1.4.- Variación de las curvas características de la Celda Fotovoltaica en función de la irradiancia solar.....</i>	30
<i>Figura 1.5.- Variación de las curvas características de la celda solar en función de la temperatura.</i>	30
<i>Figura 1.6.- Corte y capas de una celda fotovoltaica.....</i>	31
<i>Figura 1.7.- Celdas Policristalinas (izq.) y Monocristalinas (der).....</i>	33
<i>Figura 1.8.- Eficiencia de empaque.....</i>	35
<i>Figura 1.9.- Símbolos utilizados para el módulo fotovoltaico.</i>	36
<i>Figura 1.10.- Característica corriente-voltaje de un módulo fotovoltaico.</i>	36
<i>Figura 1.11.- Interconexión de módulos fotovoltaicos.....</i>	37
<i>Figura 1.12.- Aparición de máximos locales de potencia debidos al sombreado de módulos conectados en serie.....</i>	38
CONVERTIDORES DE CD/CA.....	39
<i>Figura 2.1.- Circuito del inversor de medio puente.</i>	44
<i>Figura 2.2.- Formas de onda con carga resistiva.</i>	44
<i>Figura 2.3.- Formas de onda con carga resistiva.</i>	46
<i>Figura 2.4.- Formas de onda con carga resistiva.</i>	47
<i>Figura 2.5.- Formas de onda de voltaje en la carga RL del inversor en puente controlado por onda cuadrada.....</i>	50
<i>Figura 2.6.- Formas de onda de voltaje en la carga RL del inversor en puente completo controlado por cancelación de voltaje (modulación por onda casi-cuadrada).....</i>	51
<i>Figura 2.7.- Formas de onda de voltaje en la carga RL del inversor en puente completo controlado por la modulación por onda senoidal rectificada.....</i>	53
<i>Figura 2.8.- Formas de onda de voltaje en la carga RL del inversor en puente completo controlado por la modulación por onda senoidal pura.....</i>	53
<i>Figura 2.9.- Generación de la señal de excitación.....</i>	55
<i>Figura 2.10.- Generación de la señal de excitación.....</i>	56

<i>Figura 2.11.- Voltaje de salida.</i>	56
<i>Figura 2.12.- Modulación senoidal de ancho de pulso.</i>	57
<i>Figura 2.13.-La salida de tensión y de contenido armónico.</i>	57
<i>Figura 2.14.- Control por desplazamiento de fase.</i>	58
<i>Figura 2.15.-Diagramas Esquemáticos de Convertidores Multinivel.</i>	60
<i>Figura 2.16.-Elementos necesarios para un convertidor CD-CA usando un convertidor multinivel.</i>	61
<i>Figura 2.17.- Formas de conmutación para convertidores multinivel.</i>	63
<i>Figura 2.18.- Salida de voltaje por dos muescas bipolares por cada media onda.</i>	65
<i>Figura 2.19.- Voltaje de salida unipolar con dos muescas por cada media ciclo.</i>	67
<i>Figura 2.20.- Voltaje de salida para modulación senoidal modificada de ancho de pulso.</i>	67
DISEÑO DEL INVERSOR	68
<i>Figura 3.1.- Inversor Terminado en el UltiBoard.</i>	71
<i>Figura 3.2.- Vista de Impresión del Inversor Terminado en el UltiBoard.</i>	71
<i>Figura 3.3.- Placa Fenólica Limpia.</i>	72
<i>Figura 3.4.- Placa Fenólica con el circuito listo para planchar.</i>	72
<i>Figura 3.5.- Planchado del circuito.</i>	73
<i>Figura 3.6.- Circuito Planchado y enfriado.</i>	73
<i>Figura 3.7.- Circuito Limpio después del Planchado.</i>	74
<i>Figura 3.8.- Retocando las Pistas del Circuito.</i>	74
<i>Figura 3.9.- Realizando los Huecos en las Donas del Circuito.</i>	75
<i>Figura 3.10.- Quemando el Circuito de la Placa.</i>	75
<i>Figura 3.11.- Circuito listo en la Placa Fenólica.</i>	76
<i>Figura 3.12.- Estañando el Circuito de la Placa.</i>	76
<i>Figura 3.13.- Inversor Terminado.</i>	77
<i>Figura 3.14.- Drivers Terminados en el UltiBoard.</i>	78
<i>Figura 3.15.- Vista de Impresión de los Drivers Terminados en el UltiBoard.</i>	79
<i>Figura 3.16.- Drivers Terminados.</i>	79
<i>Figura 3.17.- Control Programado e Instalado en la Tarjeta de Pruebas.</i>	81
<i>Figura 3.18.- Inversor Completo y Conectado.</i>	82
<i>Figura 3.19 Señal donde se obtendrán los tiempos.</i>	83
<i>Figura 3.20.- Circuito de Protección.</i>	85
<i>Figura 3.21.- Detector de Cruce por Cero.</i>	86

SIMULACIONES Y RESULTADOS EXPERIMENTALES	87
<i>Figura 4.1 Imagen de la Simulación del Control PWM Programado.</i>	<i>88</i>
<i>Figura 4.2.- Simulación de un control PWM programado.</i>	<i>89</i>
<i>Figura 4.3.- Espectro en frecuencia del PWM programado.</i>	<i>90</i>
<i>Figura 4.4.- Salida del inversor mejorada con filtro RL.</i>	<i>91</i>
<i>Figura 4.5.- Espectro en frecuencia del PWM programado con filtro RL.</i>	<i>91</i>
<i>Figura 4.6.- Salida del inversor con filtro RL optimizado.</i>	<i>92</i>
<i>Figura 4.7.- Espectro en frecuencia del PWM programado con filtro RL Optimizado.</i>	<i>92</i>
<i>Figura 4.8.- Señales de control para cada rama del inversor.</i>	<i>93</i>
<i>Figura 4.9.- Voltaje de salida de un inversor de onda Cuadrada.</i>	<i>93</i>
<i>Figura 4.10.- Contenido armónico del Inversor de Onda Cuadrada.</i>	<i>94</i>
<i>Figura 4.11.- Señales de control para PWM programado.</i>	<i>94</i>
<i>Figura 4.12.- Voltaje de salida de un inversor con control PWM programado.</i>	<i>95</i>
<i>Figura 4.13.- Contenido armónico del Inversor con control PWM programado.</i>	<i>95</i>

Índice de Fórmulas

INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	15
(Ecuación 1.1).....	29
(Ecuación 1.2).....	29
(Ecuación 1.3).....	29
CONVERTIDORES DE CD/CA.....	39
(Ecuación 2.1).....	45
(Ecuación 2.2).....	45
(Ecuación 2.3).....	45
(Ecuación 2.4).....	47
(Ecuación 2.5).....	47
(Ecuación 2.6).....	48
(Ecuación 2.7).....	64
(Ecuación 2.8).....	64
(Ecuación 2.9).....	65
(Ecuación 2.10).....	65
(Ecuación 2.11).....	66
(Ecuación 2.12).....	66
(Ecuación 2.13).....	66
(Ecuación 2.14).....	66
(Ecuación 2.15).....	67
(Ecuación 2.16).....	67
DISEÑO DEL INVERSOR	68
(Ecuación 3.1).....	86
(Ecuación 3.2).....	86

Índice de Tablas

CONVERTIDORES DE CD/CA.....	39
TABLA 2.1.- ESTADOS DE LOS INTERRUPTORES.	48
DISEÑO DEL INVERSOR	68
TABLA 3.1.- CALCULO PARA EL TIEMPO DE DISPARO.....	83

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN A LOS

SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

1.1 Generación de Energía

Cada año en todo el mundo son más frecuentes los problemas con equipos eléctricos o de alimentación de energía eléctrica, estos pueden ser afectados por una interrupción o depresión de voltaje provocando con esto variaciones en el voltaje de línea, que estos a su vez representan una carga financiera importante a diferentes empresas boicoteando los procesos de producción de una manera parcial o total hasta que se restablezca la energía. Estas depresiones de voltajes son fenómenos usuales en los sistemas eléctricos de potencia y distribución, aún más frecuentes que las interrupciones. Por lo tanto, se tiene preocupación por la ocurrencia de estos, ya que puede ser perjudicial para equipos de alta tecnología sensibles a variaciones de los parámetros eléctricos fundamentales.

Ya que los procesos modernos industriales se basan hoy en electrónica sofisticada y sensible a cambios en la frecuencia y forma de onda de la alimentación de voltaje y corriente se tuvieron que adaptar los controles de velocidad ajustable, controladores lógicos programables y otros tantos controles para poder reemplazar a los controles electromecánicos. Por otro lado, detrás del mejoramiento de la eficiencia, velocidad y precisión de los procesos industriales actuales, debido a la incorporación de electrónica de pequeña señal en ellos, se encuentra una mayor vulnerabilidad de éstos a fenómenos en redes eléctricas tales como depresiones de voltaje, interrupciones de voltaje, sobrevoltaje y otros fenómenos asociados a la calidad de la energía de suministro. Para tener una calidad de energía totalmente ideal, la alimentación de voltaje debe idealmente ser una forma de onda sin deformaciones o desviaciones de frecuencia fundamental. Sin embargo, debido a la incorporación masiva de un gran número de convertidores electrónicos y altas cargas no lineales en redes eléctricas, entre otros, cada vez es más complicado suministrar a los usuarios el voltaje y corriente con la calidad necesaria.

Debido a que en el mundo y en nuestro país hay una creciente crisis energética (ya que la energía eléctrica es un recurso no renovable y de alto costo para generación, almacenamiento y distribución), algunas empresas o usuarios han empezado a migrar a fuentes renovables de energía para evitar las variaciones o picos de energía. En México las celdas fotovoltaicas no son la primera opción, ni la más viable técnica o económicamente, ni la que está aportando en este momento o se piense que va a aportar los mayores porcentajes a las necesidades energéticas.

Las distintas fuentes renovables de energía no suplirán las mayores necesidades energéticas pero podrían mejorar la calidad del servicio y abaratar los costos, pero desgraciadamente en nuestro país no han querido arriesgarse a tal escenario. La opción de las celdas fotovoltaicas es muy reducida en aportación cuantitativa, sobre todo por sus altos costos de generación actuales. Aun que sus aplicaciones, en un sentido cualitativo, sin duda son y seguirán siendo apreciables en el ramo de las telecomunicaciones, equipos automáticos remotos, mecanismos de control, etc.

Actualmente en nuestro estado, el incremento de la población, la proliferación de empresas y PYMES, han provocado que el servicio eléctrico sea cada vez más costoso y difícil de restablecer principalmente por encontrarnos a merced de los fenómenos naturales. Pero para ventaja nuestra podemos incursionar en “La Era Verde” o unirnos al “GREEN TEAM” por la ubicación geográfica, dicho de otra forma en la utilización de fuentes de energía renovable. Una de estas energías es la solar, para luego generar la energía eléctrica en las celdas fotovoltaicas y posteriormente inyectarla a la red.

En México la Comisión Federal de Electricidad (CFE), es la encargada de la generación, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica en el país. Actualmente atiende a 25.3 millones de usuarios y sigue en aumento.

Muchos de los sistemas electrónicos utilizados dentro del campo de la industria tienen algo en común, la utilización de electrónica de potencia dentro de su diseño e implementación. Esta área de la electrónica tiene gran relevancia ya que combina la energía, la electrónica y el control.

Actualmente estamos experimentando una revolución similar a la de la miniaturización ya que se está gestando la extensión progresiva de las técnicas de electrónica de potencia en las industrias más tradicionales. Estos avances espectaculares asociados a los semiconductores de potencia han permitido la reducción del equipo en peso y volumen, con un ahorro económico considerable. Además, se ha mejorado el rendimiento de los equipos y sistemas industriales. Por lo tanto, cada día es más común el uso de la electrónica de potencia en la industria y el hogar.

Tomando en cuenta lo anterior, en este proyecto de tesis propuesto se desarrolló una etapa de potencia, correspondiente a un convertidor CD-CA, encargado de transformar la energía de corriente continua a corriente alterna. Esto por lo general se hace utilizando algún tipo de modulación, como es la modulación por ancho de pulso PWM que permite controlar tanto la ganancia como la frecuencia del inversor. La ganancia del inversor se puede definir como la relación entre el voltaje de salida CA y el voltaje de entrada CD.

Por otro lado, otra etapa de gran importancia dentro del diseño de un sistema electrónico es el control PWM y el filtrado de las señales. Es difícil encontrar un sistema o aparato electrónico en el que no se encuentre algún tipo de control y filtro. Estos son muy usados porque permiten discriminar de la señal de entrada los armónicos no deseados, es decir, que dejan pasar solamente las frecuencias que resultan de alguna utilidad y elimina cualquier tipo de interferencia o ruido ajeno a ellas.

Esta etapa de filtrado también ha sido integrada dentro del sistema propuesto como salida de la etapa de potencia, tomando en cuenta que la salida de los inversores reales contienen ciertos armónicos que se desean discriminar para obtener una señal senoidal como salida final.

Los inversores son ampliamente usados y algunas de sus aplicaciones pueden ser las siguientes:

- Controladores de motores de corriente alterna.
- Fuentes de poder interrumpibles (UPS).
- Fuentes de Corriente alterna.
- Generadores o compensadores estáticos de potencia reactiva.

1.2 Energías Renovables

El consumo masivo de recursos energéticos de orígenes fósiles, agotables y contaminantes, plantea el problema de encontrar nuevas fuentes de energía los cuales sustituyan al carbón, al petróleo, al gas natural y al uranio cuando se agoten los yacimientos actuales y futuros.

Las nuevas fuentes de energía deben ser renovables y no contaminantes para evitar los inconvenientes del actual modelo de consumo energético y poder alcanzar el cumplimiento del Protocolo de Kioto. Además, es interesante que su tecnología permita ubicarlas en cualquier lugar sin necesidad de desarrollar grandes infraestructuras.

La mayoría de las Energías Renovables (ER) más utilizadas derivan de forma directa o indirecta de la actividad solar. Se pueden listar a modo de ejemplo:

- Solar (fotovoltaico y fototérmico).
- Eólica.
- Hidráulica. (Agua)
- Biomasa (materia orgánica e inorgánica)

Las ER se puede entender como aquellas que permiten satisfacer las necesidades energéticas presentes sin poner en compromiso las necesidades de energía de las generaciones futuras y de los países en desarrollo. Todas estas ER, cuentan actualmente con el apoyo de políticas y decretos que tratan de favorecer y regular la expansión en el territorio.

1.3 Sistemas de Generación

La generación de energía eléctrica consiste en transformar la energía química, mecánica, térmica o luminosa, algunas otras, en energía eléctrica, cuando hay un déficit en la generación de energía de algún lugar, o cuando existe una corte en el suministro eléctrico. En lugares donde la electricidad es indispensable para mantener alguna actividad, por ejemplo, en hospitales, fábricas, oficinas, tiendas de autoservicio, centros comerciales, etc., es necesario el uso de generadores eléctricos.

Los motores y generadores eléctricos, son un grupo de aparatos que se utilizan para convertir la energía mecánica en eléctrica, o a la inversa, con medios electromagnéticos. A una máquina que convierte la energía mecánica en eléctrica se le denomina generador, alternador o dínamo, y a una máquina que convierte la energía eléctrica en mecánica se le denomina motor y estas se dividen en los siguientes tipos:

1.3.1 Motores de Combustión Interna

Estas máquinas, queman combustibles fósiles con el objeto de obtener energía mecánica a partir de energía química. Pistones hacen girar el eje de un generador para convertir la energía mecánica en energía eléctrica. Los motores pueden ser del tipo de ignición por chispa, consumiendo gas natural, propano o gasolina, o bien de ciclo diesel, quemando en este caso combustible diesel o aceite pesado. El generador eléctrico que accionan es generalmente de tipo síncrono, estando directamente acoplado a la red de distribución en el caso de sistemas de gran potencia.

1.3.2 Turbinas de Gas

Al igual que los motores de combustión interna, las turbinas de gas mezclan combustibles fósiles junto con aire, con el objetivo de crear energía térmica. Los gases procedentes de la combustión a alta temperatura y alta presión, se expanden en la turbina permitiendo la conversión de la energía calorífica en energía mecánica por medio del giro del eje de la turbina. El acoplamiento entre el eje de la turbina y el del generador se realiza por medio de engranajes reductores. Al igual que en el caso de motores de combustión interna, si se trata de sistemas de elevada potencia, el generador está directamente acoplado a la red.

1.3.3 Microturbinas

Su principio de funcionamiento es similar al de las turbinas de gas.

Estos dispositivos pueden funcionar con una amplia variedad de combustibles tales como gas natural, gasolina, diesel, keroseno, nafta, alcohol, propano, metano, etc.

Las microturbinas comerciales emplean habitualmente gas natural como primer combustible. Disponen de un generador de imán permanente girando a alta velocidad, generando corriente alterna a muy alta frecuencia. Estos generadores no pueden ser conectados directamente a la red de distribución por lo que su salida debe conectarse un inversor que rectifique primero esta tensión de alta frecuencia, generando después una señal alterna compatible con la red de distribución eléctrica.

1.3.4 Celdas de Combustible

Estos elementos generan electricidad y agua a partir de la reacción química entre hidrógeno y oxígeno. Hay varios tipos disponibles (ácido fosfórico, óxido sólido, y membrana de intercambio). Las celdas de combustible generan energía eléctrica en corriente continua que debe ser transformada en alterna mediante un inversor.

1.3.5 Sistemas Fotovoltaicos

Transforman la energía solar en energía eléctrica. Producen electricidad en corriente continua, y al igual que en el caso de la celdas de combustible, debe conectarse un inversor a su salida.

1.3.6 Sistemas Eólicos

Los sistemas de generación eólicos transforman la energía del viento en energía eléctrica. Existen tres tecnologías distintas:

- **Generador de Inducción.-** En el cual la turbina eólica está directamente conectada al eje de un generador de inducción con rotor tipo jaula, conectado a la red de distribución directamente (sin inversor). Este tipo de generador necesita aporte de potencia reactiva para trabajar, pudiendo ser aportada por la red de distribución o por condensadores conectadas a la salida del generador. No pueden generar potencia reactiva.
- **Generador de Inducción Asíncrono Doblemente Alimentado.-** Estos dispositivos están conectados a la red de distribución mediante un inversor.
- **Generador Síncrono de Imán Permanente.-** Proporciona energía eléctrica con frecuencia variable con la velocidad del viento. Un inversor de corriente es conectado a la salida, haciendo de interfaz entre el generador y la red.

1.4 Sistemas de Almacenamiento de Energía

Las tecnologías de almacenamiento de energía, se clasifican en función de la energía total almacenada, el tiempo y el transitorio requerido para su operación. Estos dispositivos permiten mejorar el funcionamiento del sistema eléctrico de varias formas. En primer lugar, permiten trabajar a los generadores en régimen constante a pesar de las posibles fluctuaciones en la carga.

En segundo término, pueden hacer frente a variaciones en las fuentes de energía primaria cuando estas no son gestionables (sol, viento, etc.). Por último, permite considerar al conjunto de generadores-almacenamiento como una única unidad con capacidad de generación predecible. Dos son los principales dispositivos de almacenamiento de energía:

- **Sistemas de Baterías:** Almacenan energía eléctrica en forma de energía química. Son fuentes de corriente continua o ininterrumpida por lo que es necesario el empleo de un inversor para la generación de corriente alterna (véase la Figura 1.1).
- **Sistemas Flywheel (Volante de Inercia):** Una de sus principales características es la rápida respuesta en comparación con los sistemas de almacenamiento químicos. Un motor eléctrico hace girar el volante, proporcionando energía al sistema, al cual está acoplado un generador para convertir la energía cinética en eléctrica. Este generador está conectado a un inversor que hace de interface con la red de distribución.

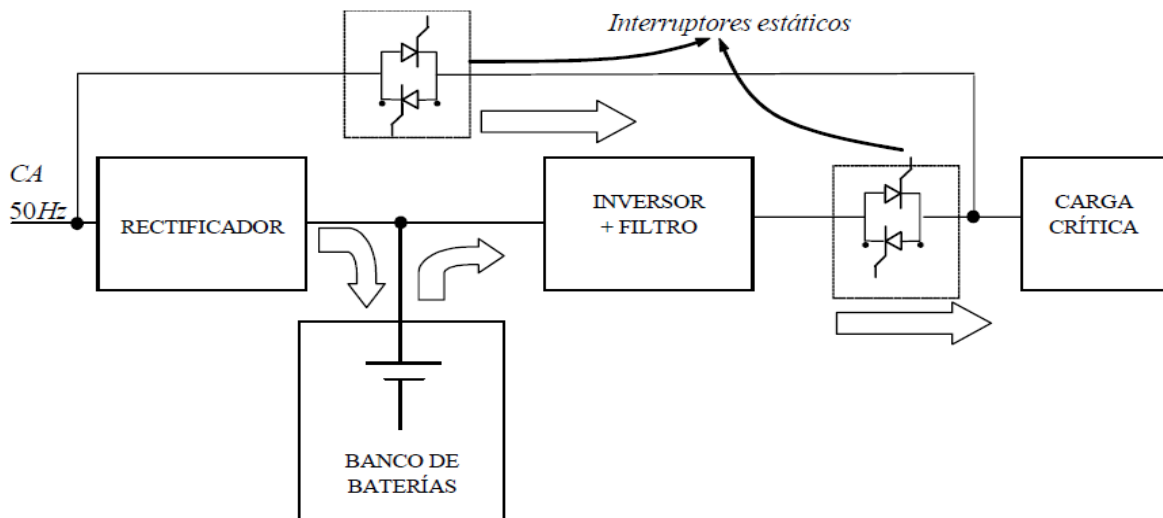


Figura 1.1- Diagrama de bloques de un sistema de alimentación ininterrumpida (SAI).

1.5 Panorama de las Energías Renovables en México

La Secretaría de Energía (SENER), ha buscado el desarrollo y difusión de tecnologías energéticas alternativas. Ha dedicado esfuerzos a la creación de políticas energéticas con el criterio de sustentabilidad; desarrollando instrumentos y mecanismos financieros, y fortaleciendo el marco regulatorio, con el fin de eliminar barreras y abrir ventanas de oportunidades para nuevos proyectos. Las acciones estratégicas que se han aplicado permitirán fomentar el desarrollo regional, propiciando un mejor aprovechamiento de los recursos naturales, reduciendo la contaminación ambiental y mejorando la calidad de vida.

En este sentido, la Comisión Federal de Electricidad (CFE), inició las actividades preparatorias para la construcción del proyecto eólico La Venta II, que contará con recursos del Fondo para el Medio Ambiente Mundial.

Los apoyos recibidos por instituciones y por Gobiernos internacionales, como es el caso de la cooperación entre México y Alemania, a través de la GTZ (Cooperación Técnica Alemana), han propiciado la participación de los distintos actores bajo las siguientes vertientes: cooperación y asistencia técnica, financiamiento, desarrollo tecnológico y desarrollo de mercados.

Con respecto al tema fiscal, en la actualidad existe dentro de la Ley del Impuesto sobre la Renta una depreciación acelerada del 100% para inversión es en maquinaria y equipo para la generación de energía proveniente de fuentes renovables, lo cual resulta muy atractivo como instrumento de promoción.

Por otra parte, durante el mes de enero de 2005, entró en vigencia un Contrato de Interconexión para Fuentes Intermitentes con Potencia Acreditada, emitido por la Comisión Reguladora de Energía (CRE), el cual permite calcular y acreditar el aporte de capacidad que estos proyectos proporcionan a la red eléctrica.

La Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión aprobó recientemente la iniciativa de Ley para el Aprovechamiento de las Fuentes Renovables de Energía. Esta iniciativa prevé entre otros instrumentos, la creación de un fideicomiso que permitirá que las fuentes de energía renovable, alcancen en el 2012, un 8 por ciento en la participación de la generación de electricidad nacional, esto sin considerarla aportación de las grandes hidroeléctricas. Con esta Ley, México se unirá al grupo de países, que cuentan con políticas públicas para fomentar el desarrollo de tecnologías para el aprovechamiento de las fuentes renovables de energía.

La Secretaria de Energía (SENER) asumirá un papel primordial en la aplicación de dicha Ley. En su papel de rector de la política y la planeación energética del país, continuará coordinando, integrando, y promoviendo políticas y programas energéticos en fomento de estas fuentes alternas de energía.

La implementación de medidas como las anteriormente mencionadas, permitirá avanzar en los compromisos que México ha adquirido en el contexto de la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC) y su Protocolo de Kioto, así como en el marco de la Conferencia Internacional de Energías Renovables de Bonn 2004.

Finalmente, la participación de México como anfitrión de foros internacionales, tales como: el Foro Internacional sobre Políticas para Energías Renovables en Conexión con la Red, con apoyo del Fondo Mundial para el Medio Ambiente (GEF) y el Banco Mundial (BM); y por otro lado ,la Reunión sobre Energías Limpias, Cambio Climático y Desarrollo Sustentable; refrenda los compromisos que el sector energía ha hecho a favor de la diversificación energética y el desarrollo económico en armonía con el medio ambiente.

Gracias a los esfuerzos realizados en materia energética para encaminar al país hacia un desarrollo sustentable, en los últimos 10 años México ha logrado disminuir tanto la intensidad energética (consumo de energía primaria en PJ/PIB en \$) como la intensidad de emisiones (emisiones de CO² en kg/PIB en \$) tal como se muestra en la Figura 1.2. (1)

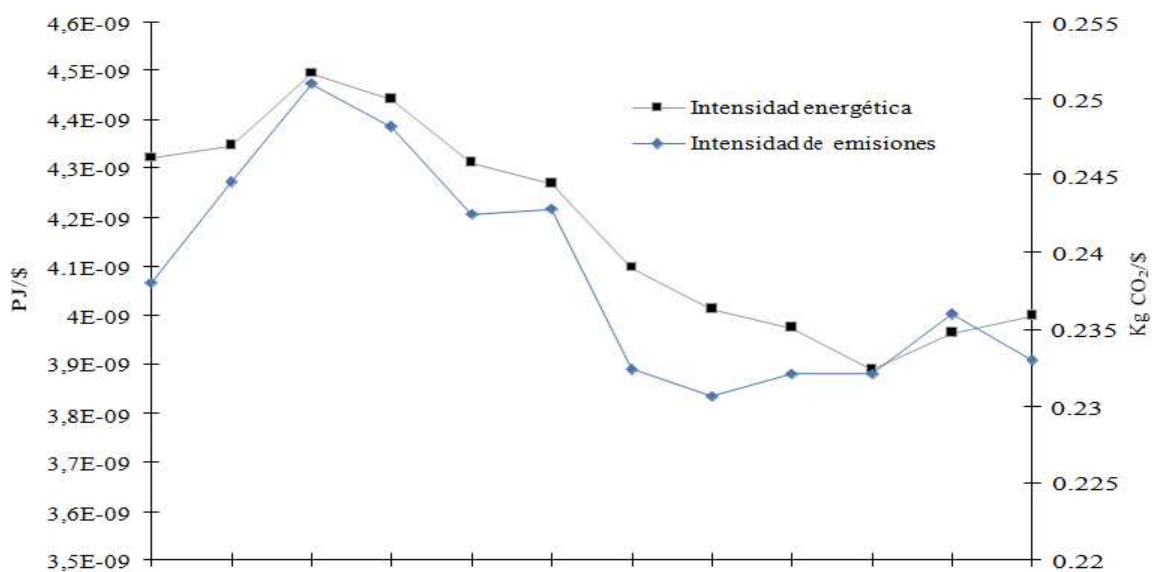


Figura 1.2.- Grafica de Intensidad Energética y de Emisiones.

1.6 La Energía Solar Fotovoltaica

El aprovechamiento de la energía solar, se realiza principalmente mediante la utilización de dos tipos de tecnologías:

- **Termosolares.-** Es la que usan la energía del sol para el calentamiento de fluidos, mediante colectores solares, que alcanzan temperaturas de 40 a 100 °C (planos), o “concentradores” con los que se obtienen temperaturas de hasta 500 °C.
- **Fotovoltaicas.-** Es la que utiliza el efecto fotovoltaico para generar energía, mediante el flujo de electrones que genera un material semiconductor llamado celdas solares al incidir la luz sobre él. Este tipo de generación de electricidad es especialmente útil en lugares aislados a los que no llega la electricidad. Sin embargo, su expansión como fuente de generación de energía para la red eléctrica ha sido muy rápido durante los últimos años, especialmente en países como Alemania.

En España, debido a los favorables niveles medios de irradiación solar y a los incentivos económicos del gobierno, la producción de energía solar fotovoltaica ha crecido rápidamente, tanto, que ha sido necesaria una actualización de las retribuciones.

Por consiguiente en México, sigue siendo de gran importancia el esfuerzo en investigación para optimizar el rendimiento del sistema y reducir el costo de los elementos de la cadena de captación y conversión de energía.

1.7 La Celda Fotovoltaica

La transformación de la energía luminosa en eléctrica toma lugar en la naturaleza durante el proceso de fotosíntesis, pero desde el punto de vista práctico (menores pérdidas) sólo tiene valor comercial la que toma lugar dentro de un diodo semiconductor. Como el proceso de elaboración de estos diodos precede al de la manufactura de las Celdas Fotovoltaicas, las unidades tienen un alto grado de repetitividad.

Las Celdas Fotovoltaicas o solares son manufacturadas usando diferentes materiales y procesos para crear los diodos, ya que los fabricantes continúan explorando la manera de abaratar el costo o incrementar la eficiencia de conversión de las mismas.

La Celda Fotovoltaica es el elemento que convierte la energía procedente del Sol en forma de fotones en energía eléctrica. Están formadas, básicamente, de una unión p-n fabricada en un material semiconductor. El modelo circuital se representa en la Figura 1.3.

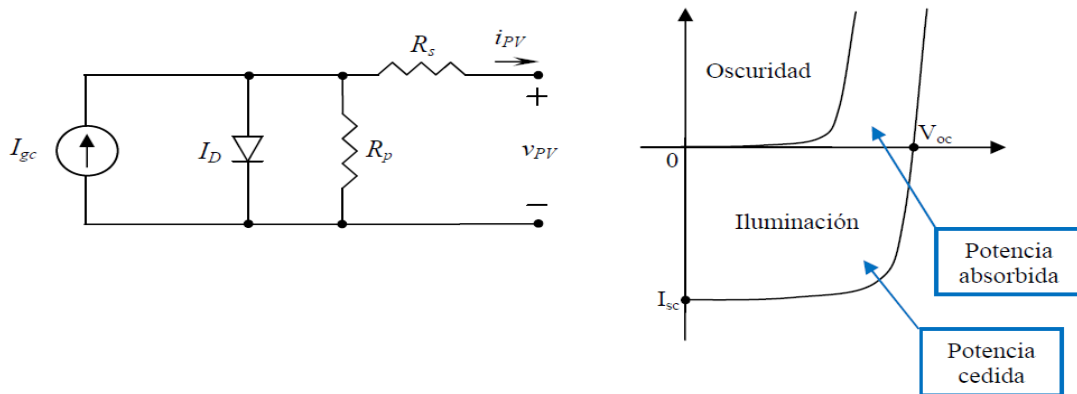


Figura 1.3.- Modelo circuital de La Celda Fotovoltaica y curva característica.

Dónde:

- I_{gc} es la corriente inducida por la luz incidente y, por tanto, depende de la irradiancia solar (G) y de la temperatura (T).
- I_D es la corriente a través del diodo formado por la unión p-n de la celda.
- R_s es una resistencia interna de la celda y se debe a la malla de metalización, a la resistencia de los contactos y a la resistencia del propio semiconductor con el que se ha fabricado.
- R_p tiene su origen en imperfecciones de la calidad de la unión p-n que constituye la celda y es responsable de la existencia de fugas de corriente.

El modelo de la celda se representa de forma simplificada, considerando nulas las resistencias R_s y R_p , mediante la ecuación (1.1):

(Ecuación 1.1)

$$i_{PV} = I_{gc}(G, T) - I_D(T) = I_{gc} - I_{satc} \cdot \left\{ e^{\frac{v_{PV} + i_{PV} R_s}{\eta V_t}} - 1 \right\} - \frac{v_{PV} + i_{PV} R_s}{R_p}$$

Resolviendo:

(Ecuación 1.2)

$$i_{PV} = I_{gc} - I_{satc} \cdot \left\{ e^{\frac{v_{PV}}{\eta V_t}} - 1 \right\}; \text{ con } R_s = 0; R_p \rightarrow \infty$$

- V_t es la tensión térmica que se define como:

(Ecuación 1.3)

$$V_t = \frac{kT}{e}$$

- k = constante de Boltzmann (1.38×10^{-23} J/K).
- T = temperatura en grados Kelvin.
- e = carga del electrón (1.61×10^{-19} C)
- η es una constante que representa el coeficiente de emisión que varía entre 1 y 2 dependiendo del proceso de fabricación.
- I_{satc} es la corriente de saturación del diodo.

El comportamiento de la celda sometida a diferentes valores de irradiancia solar y temperaturas se puede describir mediante la relación corriente-voltaje y potencia-voltaje se puede observar mediante las Figuras 1.4 y 1.5.

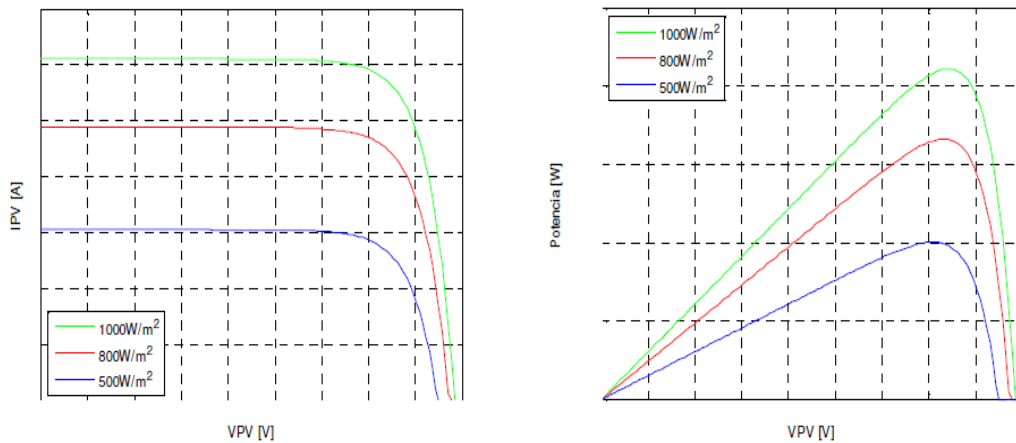


Figura 1.4.- Variación de las curvas características de la Celda Fotovoltaica en función de la irradiancia solar.

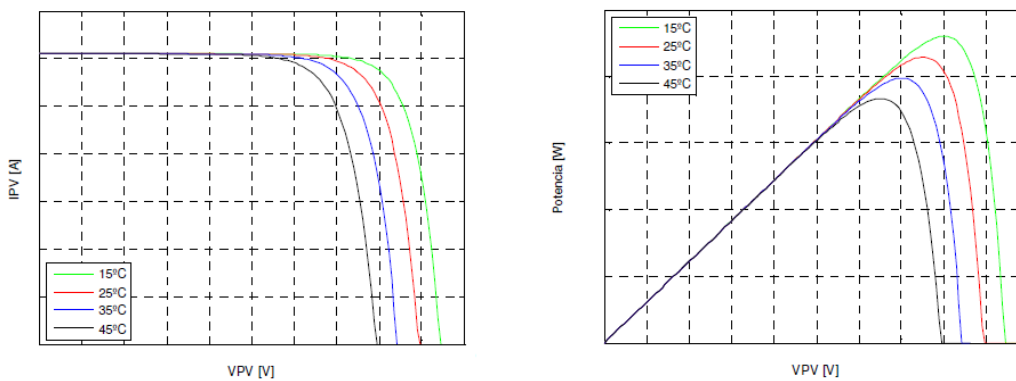


Figura 1.5.- Variación de las curvas características de la celda solar en función de la temperatura.

La potencia que puede entregar la celda solar aumenta con la irradiancia solar y cuando disminuye la temperatura. El punto de máxima potencia varía de posición en función de las condiciones ambientales y, por tanto, es necesario definir algún sistema que permita ajustar el punto de trabajo.

Cuando la luz solar que incide sobre la zona adyacente a la unión tiene el espectro y nivel de energía requerido por el material Silicio (Si) el bombardeo de los fotones crea pares de cargas libres (Figura 1.6), los que se mueven libremente. Algunos de estos pares se recombinan o neutralizan antes de migrar a la zona de unión, pero un elevado porcentaje de electrones del lado P y de hoyos del lado N serán impulsados a través de la unión. La dirección del campo eléctrico E (Figura 1.6) hace que estas cargas no puedan volver, alterándose el estado de equilibrio. Las cargas libres están listas para sostener una corriente cuando se conecten el lado N y P a una carga eléctrica externa.

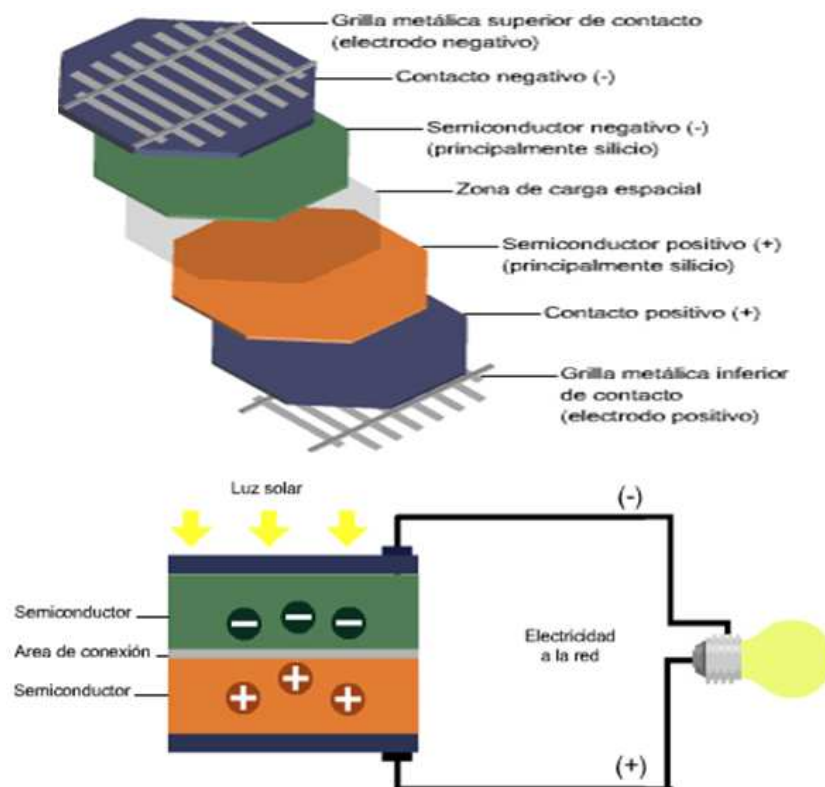


Figura 1.6.- Corte y capas de una celda fotovoltaica.

1.8 Tipos De Celdas Fotovoltaicas

El mercado ofrece numerosos tipos de Celdas Fotovoltaicas. Algunas gozan de más difusión que otras debido a que fueron introducidas hace largo tiempo atrás. Todas las celdas pertenecen a uno de los grupos mencionados a continuación:

- Monocristalinas.
- Policristalinas.
- Amorfas.

El orden dado es el mismo cuando se considera el costo o la eficiencia de conversión.

Las celdas de estructura monocristalina fueron las primeras en ser manufacturadas, ya que se podían emplear las mismas técnicas usadas previamente en la fabricación de diodos y transistores.

A este tipo de celdas, conocidas simplemente como cristalinas, se le asigna la abreviatura (cSi). El proceso de fabricación del cristal de silicio requiere un alto consumo de energía eléctrica, lo que eleva el costo de estas celdas, las que proporcionan los más altos valores de eficiencia.

La versión Policristalinas (pSi) se obtiene fundiendo silicio de grado industrial, el que se vierte en moldes rectangulares, de sección cuadrada. Como el costo del material y el procesado se simplifican, las celdas Policristalinas alcanzan un valor intermedio entre las cristalinas y las amorfas.

Las celdas de cSi se reconocen a simple vista, ya que su superficie es uniforme. Expuestas a la luz actúan como un espejo grisáceo (Figura 1.7).

Las celdas Policristalinas reflejan la luz en forma no uniforme, pudiéndose observar las imperfecciones en el cristal. Tienen, asimismo, una coloración azulada (Figura 1.7).



Figura 1.7.- Celdas Policristalinas (izq.) y Monocristalinas (der).

El otro tipo corresponde a las celdas amorfas. Como su nombre lo indica no poseen una estructura cristalina. Precisamente esa simplificación en la estructura conduce a un abaratamiento drástico de las mismas.

Es un hecho que cuando más se aleja la técnica de fabricación de una Celda Fotovoltaica de la estructura cristalina pura, más defectos estructurales aparecerán en la sustancia semiconductor, los que aumentan el aprovechamiento de las cargas libres, disminuyendo la eficiencia de conversión.

Para reducir este efecto, el espesor del material activo en estas celdas es diez 10 veces menor que el de una celda de cSi. Esto, a su vez, contribuye a bajar el costo.

Para compensar el bajo nivel de conversión los fabricantes adicionan uniones, las que responden a diferentes frecuencias del espectro luminoso. Los depósitos activos se hacen sobre una lámina continua de acero inoxidable de bajo espesor que permite que las celdas sean flexibles. Si se requiere una estructura rígida se les agrega un marco metálico. Otros ofrece un modelo similar que usa dos capas convertoras.

1.9 Pérdidas De Energía Luminosa

Estas pérdidas ocurren fuera del material semiconductor. Su mención y análisis ayudarán al lector a entender algunos detalles auxiliares contenidos en las hojas de especificaciones.

Consideraremos:

- La reflectancia de la superficie colectora.
- El “sombreado” de los contactos.

La superficie colectora de una celda de cSi actúa como un espejo, reflejando hasta el 30% de la luz incidente. Para disminuir la reflectancia, la superficie de colección recibe una capa antirreflexiva de monóxido de silicio (SiO), la que disminuye la reflectancia a un 10%. Una segunda capa baja la reflectancia a un 4%, pero incrementa el costo. La necesidad de una capa antirreflexiva se extiende a todo tipo de celdas, si bien el tratamiento es diferente.

El contacto ubicado sobre la superficie colectora utiliza una rejilla metálica, de trazos finos, la que contribuye a disminuir el área activa de la celda. A este problema se lo conoce como el “sombreado” de los contactos y no debe confundirse con el sombreado externo sobre el área colectora. Esta reducción, en celdas modernas, varía entre un 3% y un 5% de la superficie activa.

1.10 Tensión, Corriente y Potencia

El voltaje de unión depende exclusivamente del material usado (nivel de Fermi para el cristal usado). Para las celdas de silicio este valor es de alrededor de 0.5 V. Como las cargas son impulsadas por un campo eléctrico fijo, el voltaje de una celda fotovoltaica es de corriente continua (CC). Por lo tanto, hay un lado positivo (lado P) y otro negativo (lado N), asumiendo que la corriente circula en sentido opuesto al de los electrones.

El valor de la corriente dependerá del valor de la carga, la irradiación solar, la superficie de la celda y el valor de su resistencia interna. En un instante determinado, la potencia eléctrica proporcionada por la Celda Fotovoltaica está dada por el producto de los valores instantáneos del voltaje y la corriente de salida.

1.11 Forma Geométrica

El método de fabricación determina, en gran parte, la forma geométrica de la Celda Fotovoltaica.

Las primeras versiones de cSi eran redondas, pues el cristal puro tenía una sección circular. Versiones más recientes tienen forma cuadrada, o casi-cuadrada, donde las esquinas tienen vértices a 45°.

Las celdas de pSi son cuadradas porque el molde donde se vierte el semiconductor fundido tiene esta forma.

La forma cuadrada permite un mayor compactado de las mismas dentro del módulo fotovoltaico, disminuyendo la superficie que se necesita para colocar un determinado número de celdas (Figura 1.8).

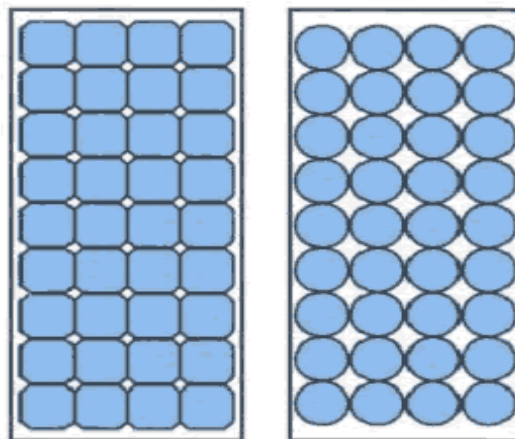


Figura 1.8.- Eficiencia de empaque.

1.12 El Módulo Fotovoltaico

El Módulo fotovoltaico está formado por la agrupación de celdas solares en serie y paralelo hasta obtener los valores de voltaje y corriente deseados (véase la Figura 1.9). El conjunto se encapsula de forma que las celdas solares queden protegidas e la corrosión y la superficie posterior está totalmente sellada para proteger de la humedad y de daños mecánicos.



Figura 1.9.- Símbolos utilizados para el módulo fotovoltaico.

La representación estándar de un módulo fotovoltaico viene definida por su característica corriente-voltaje (Figura 1.10).

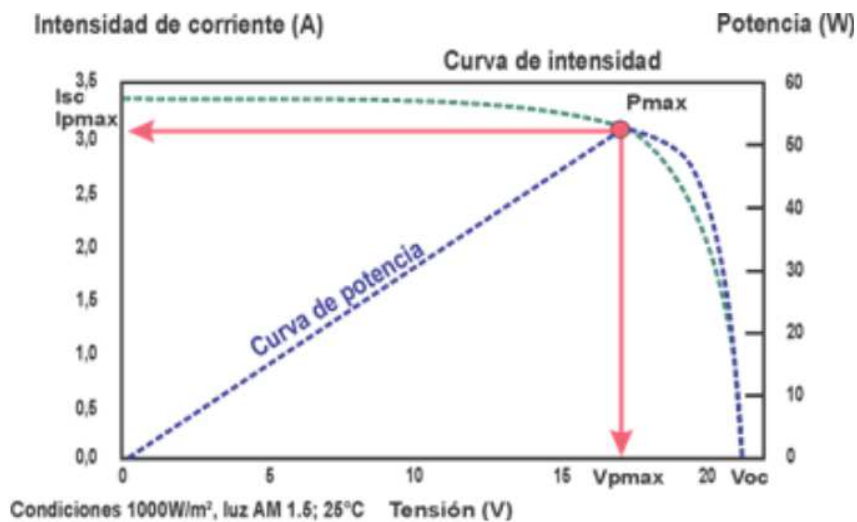


Figura 1.10.- Característica corriente-voltaje de un módulo fotovoltaico.

Los puntos más importantes de la curva son la corriente de cortocircuito (I_{sc}), el voltaje en circuito abierto (V_{oc}), los valores de corriente y voltaje en el punto de máxima potencia (I_{mp} , V_{mp}) y la potencia máxima (P_{mp}).

A parte de la relación corriente- voltaje, es importante tener en cuenta la eficiencia energética del módulo fotovoltaico, es decir, el cociente entre la energía producida por el dispositivo y la energía incidente que se puede obtener. Este parámetro viene determinado por el material utilizado a la hora de fabricar las celdas solares y puede variar entre el 4% y el 40%.

1.13 Estructura e Interconexión Interna de Los Módulos Fotovoltaicos

La interconexión serie-paralelo de módulos fotovoltaicos constituye el generador fotovoltaico. Es interesante agrupar módulos de características similares y que estén sometidos a condiciones ambientales idénticas con el fin de maximizar la potencia generada (Figura 1.11).

Igual que en el caso de la agrupación de celdas solares, la agrupación de módulos permite escalar la curva de potencia y obtener un único punto de máxima potencia igual a la suma de las máximas potencias de cada módulo, siempre y cuando todos ellos sean iguales y se encuentren en las mismas condiciones de trabajo.

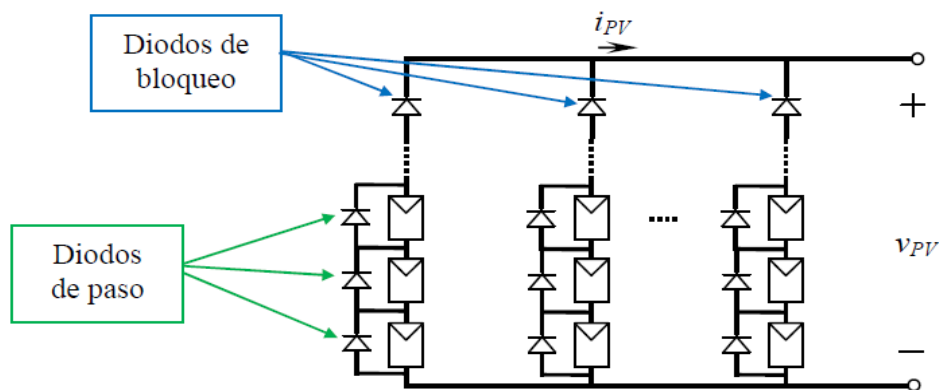


Figura 1.11.- Interconexión de módulos fotovoltaicos.

Cuando se conectan en paralelo varias ramas de módulos fotovoltaicos, puede darse el caso que alguna de ellas resulte severamente sombreada o deteriorada, y que la corriente a través de otra rama derive hacia ésta. Los diodos de bloqueo conectados en serie en cada una de las ramas en paralelo evitan el paso de corriente en sentido inverso, aislando las ramas defectuosas.

Los diodos de paso en paralelo con cada módulo se añaden para evitar la pérdida de potencia del generador cuando uno de los módulos limita la corriente de su serie. En este caso aparecen máximos locales de potencia en la característica corriente-voltaje del generador. Este fenómeno se puede representar mediante la Figura 1.12.

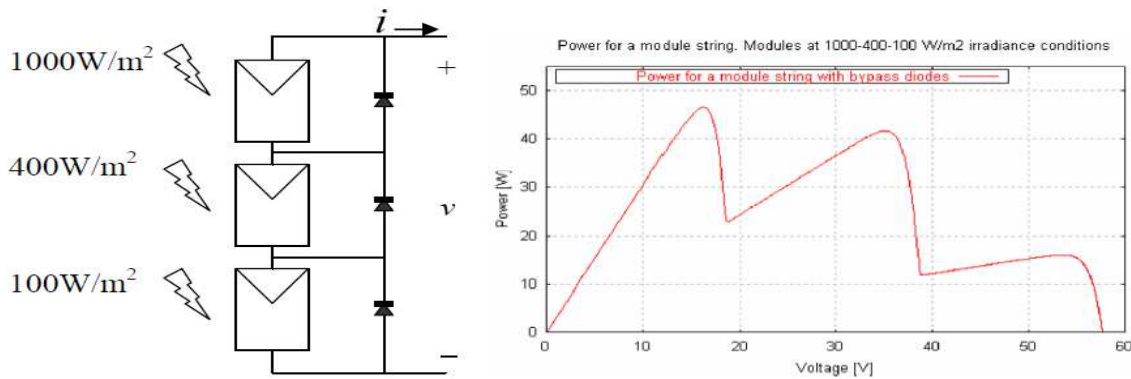


Figura 1.12.- Aparición de máximos locales de potencia debidos al sombreado de módulos conectados en serie.

Este fenómeno se puede producir con facilidad cuando se interconectan en serie una gran cantidad de módulos para alcanzar valores de voltaje elevados.

Las situaciones de sombreado parcial o total se intentan solucionar mediante la incorporación de sistemas de seguimiento que permiten posicionar los diferentes en el punto donde incide mayor irradiancia. Sin embargo, esto no garantiza una irradiancia uniforme para todos ellos.

CAPÍTULO II

CONVERTIDORES DE CD/CA

2.1 Inversores

Los convertidores de corriente directa CD a corriente alterna CA se conocen como inversores. La función de un inversor es cambiar un voltaje de entrada en corriente directa CD a un voltaje simétrico de salida en corriente alterna CA con magnitud y frecuencia deseadas. Tanto el voltaje de entrada como la frecuencia de salida pueden ser fijos o variables. Si se modifica el voltaje de entrada de CD y la ganancia del inversor se mantiene constante, es posible obtener un voltaje variable de salida. Por otra parte, si el voltaje de entrada en CD es fijo y por lo tanto no es controlable, se puede obtener un voltaje de salida variable sí se varía la ganancia del inversor. Esto por lo general se hace utilizando algún tipo de modulación, como es la modulación por ancho de pulso (PWM) que permite controlar tanto la ganancia como la frecuencia del inversor. La ganancia del inversor se puede definir como la relación entre el voltaje de salida CA y el voltaje de entrada CD.

En los inversores, las formas de onda del voltaje de salida deberían ser senoidales. Sin embargo, en los inversores reales no son senoidales y contienen ciertas armónicas. Para aplicaciones de baja y mediana potencia, se pueden aceptar los voltajes de onda cuadrada o casi cuadrada; para aplicaciones de alta potencia, son necesarias las formas de onda de baja distorsión. Dada la disponibilidad de los dispositivos semiconductores de potencia de alta velocidad, es posible reducir significativamente el contenido armónico del voltaje de salida mediante diversas técnicas de conmutación.

Estos inversores utilizan por lo general señales de control moduladas por ancho de pulso PWM, para producir un voltaje de salida de corriente alterna. El voltaje y la corriente de entrada del inversor pueden ser fijos o variables, y puede ser obtenido del voltaje de línea o de un generador de voltaje de corriente alterna a través de un rectificador y un filtro. También, puede ser obtenido de una batería, una celda de combustible, o de un arreglo de celdas solares.

A un inversor se le llama Inversor de Fuente de Voltaje Vsi, si el voltaje de entrada se mantiene constante y la corriente es variable; o Inversor de Fuente de Corriente Csi si la corriente de entrada se mantiene constante y el voltaje variable.

Los inversores son utilizados en control de motores, sistemas de alimentación Ininterrumpibles (UPS, por sus siglas en inglés) y en general, en aquellas aplicaciones que necesiten de una tensión de salida en CA controlada. Los inversores también pueden ser utilizados para resolver problemas de distorsión en la red eléctrica como: contaminación armónica, mala regulación, bajo factor de potencia etc.

2.2 Clasificación de los Inversores

Existen demasiados puntos de vista desde los cuales se pueden clasificar los circuitos inversores en este sentido, una posible clasificación que se puede realizar de los inversores según con que semiconductor se implementen los interruptores:

- Tiristores.
- Transistores.

Los primeros se pueden subdividir a su vez en inversores de bloqueo natural o forzado (con fuente inversa de tensión o de corriente); los segundos es posible a su vez subdividirlos en autoexcitados o con excitación independiente.

Es posible establecer otra clasificación en función de las características de salida:

- Medio puente
- Puente completo monofásico
- Puente completo trifásico

O en sus características de entrada:

- Inversor alimentado en Voltaje
- Inversor alimentado en corriente

Según de qué tipo sea la fuente primaria de entrada. La inclusión o no de un transformador de aislamiento introduce una característica más a la hora de clasificar este tipo de convertidores.

Para el caso de los inversores con transistores, se puede establecer otra clasificación basándose en el método de excitación de la base de los transistores que configuran la topología de potencia:

- Inversores de onda cuadrada
- Inversores De Onda Cuasi-senoidal
- Inversores De Onda Senoidal Pura

Para nuestro tema de estudio se elige usar el Inversor de onda Senoidal Pura ya que este tiene o intenta tener un trazado senoidal totalmente limpio, por su alta eficiencia y versatilidad ya que con este tipo de inversor se pueden usar todo tipos de aparatos eléctricos o motores eléctricos de toda índole.

2.2.1 Inversor Monofásico

Los inversores se pueden clasificar dependiendo del número de fases de voltaje de corriente alterna que genera a la salida, cuando se genera una sola fase de voltaje a la salida se conoce como inversor monofásico, y en inversor trifásico cuando se genera tres fases de voltaje a la salida. Cada tipo de inversor puede subdividirse en inversores de tres niveles que sintetizan una señal de corriente alterna con tres niveles de voltaje de CD, y en inversores multinivel los cuales sintetizan la señal de voltaje de corriente alterna a la salida con más de tres niveles de voltaje de CD.

2.2.2 Inversor de Medio Puente

La principal función de un inversor es producir una señal senoidal alterna en la salida con magnitud y frecuencia que pueden ser controladas. En la Figura 2.1 se muestra el circuito de un inversor de medio puente. Su estructura consta de dos capacitores de igual valor conectados en serie a través de la señal de entrada CD, de tal forma que, cada capacitor se carga a la mitad del voltaje de entrada, es decir, a $(V_s/2)$. Es necesario tener valores altos de capacitores para poder asumir que el potencial en el punto O permanece esencialmente constante con respecto a la terminal N. Asimismo los transistores del inversor de medio puente tienen que soportar un voltaje de valor igual al voltaje de entrada y el valor máximo del voltaje de la onda cuadrada de salida es igual a la mitad del voltaje de entrada. Se tiene la desventaja que uno de sus transistores no está aterrizado.

Su principio de operación es el siguiente: Cuando sólo el transistor Q1 está activo durante el tiempo $T_o/2$, el voltaje instantáneo a través de la carga V_o es $V_s/2$. Si sólo el transistor Q2 está activo durante un tiempo $T_o/2$, aparece el voltaje $-V_s/2$ a través de la carga. El circuito debe diseñarse de tal suerte que, Q1 y Q2 no estén activos simultáneamente. En la Figura 2.2 se muestra las formas de onda para los voltajes de salida y las corrientes de los transistores en el caso de una carga resistiva.

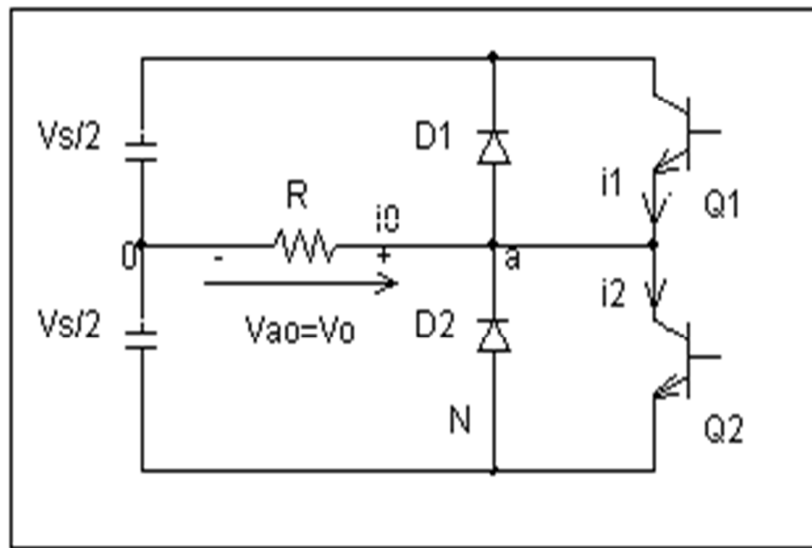


Figura 2.1.- Circuito del inversor de medio puente.

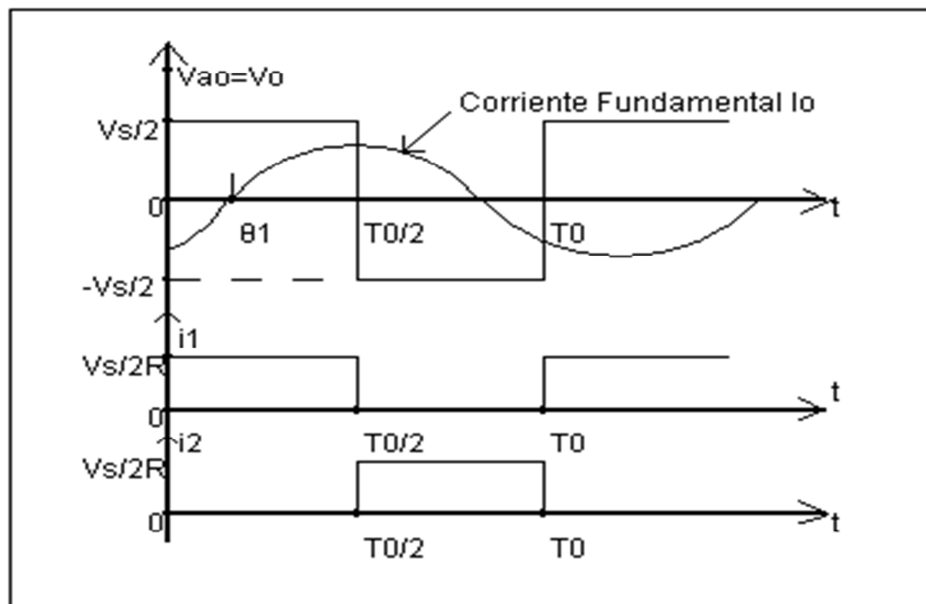


Figura 2.2.- Formas de onda con carga resistiva.

El voltaje RMS de salida se obtiene a partir de la Ecuación 2.1:

(Ecuación 2.1)

$$V_o = \left(\frac{2}{T_0} \int_0^{T_0/2} \frac{V_s^2}{4} dt \right)^{1/2} = \frac{V_s}{2}$$

El voltaje instantáneo de salida por serie de Fourier mediante la Ecuación 2.2:

(Ecuación 2.2)

$$V_o = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{2V_s}{n\pi} \text{Sen} . n\omega t = 0 \text{ para } n = 2, 4 \dots$$

Donde $\omega = 2\pi f_0$ es la frecuencia del voltaje de salida en radianes/segundo.

Para $n=1$, la ecuación proporciona el valor RMS de la componente fundamental como (2.3) :

(Ecuación 2.3)

$$V_1 = \frac{2V_s}{\sqrt{2\pi}} = 0.45 V_s$$

2.2.3 Inversor de Puente Completo

El inversor de puente completo consiste en cuatro transistores. Cuando los transistores Q1 y Q2 se activan simultáneamente, el voltaje de entrada V_s aparece a través de la carga. Si los transistores Q3 y Q4 se activan al mismo tiempo, el voltaje a través de la carga se invierte, y adquiere el valor de $-V_s$ mediante la Figura 2.4. Con la misma entrada de voltaje CD, el máximo valor de voltaje a la salida del inversor de puente completo es el doble que el de medio puente. Esto implica que para la misma potencia, la corriente de salida y la corriente de conmutación son la mitad de aquellas para el inversor de medio puente. Para altas potencias, esto es una clara ventaja. El inversor de puente completo es utilizado para arreglos que requieran grandes potencias. Su principal desventaja es que dos de sus transistores no se encuentran aterrizados. En la Figura 2.3 se muestra el circuito para el inversor de puente completo.

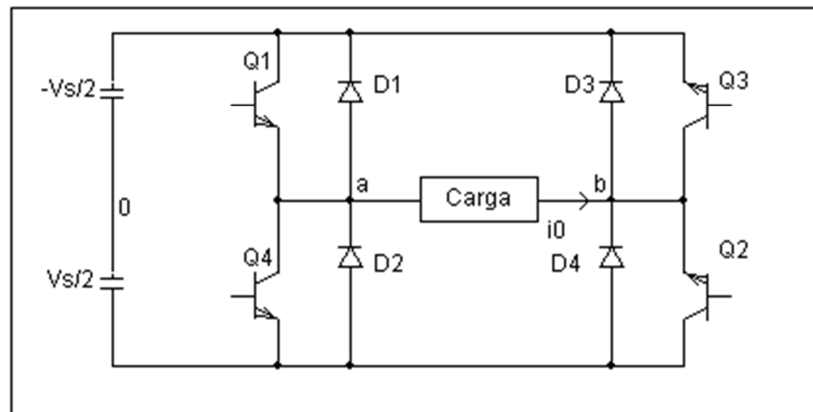


Figura 2.3.- Formas de onda con carga resistiva.

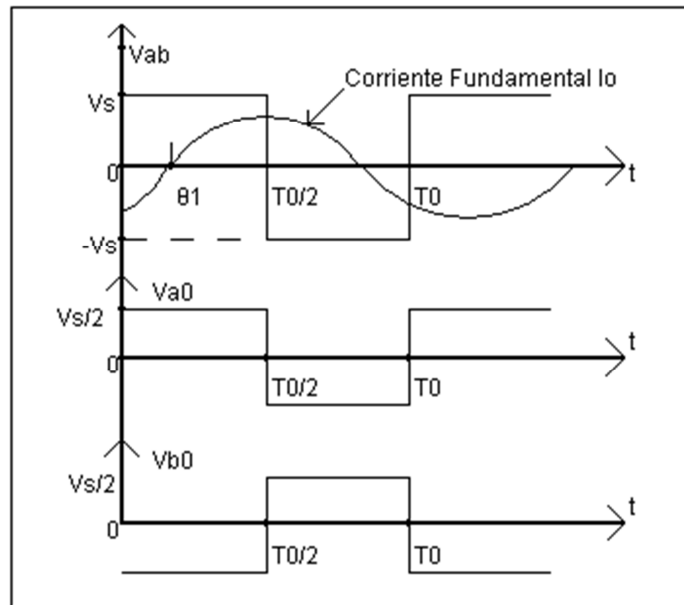


Figura 2.4.- Formas de onda con carga resistiva.

El voltaje RMS de salida se puede determinar a partir de la Ecuación 2.4:

(Ecuación 2.4)

$$V_o = \left(\frac{2}{T_0} \int_0^{T_0/2} V_s^2 dt \right)^{1/2} = V_s$$

Voltaje instantáneo de salida por serie de Fourier mediante la Ecuación 2.5:

(Ecuación 2.5)

$$V_o = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4V_s}{n\pi} \text{Sen} . n\omega$$

Y para una $n=1$, la ecuación proporciona el valor RMS de la componente fundamental como en la Ecuación 2.6:

(Ecuación 2.6)

$$V_1 = \frac{4V_s}{\sqrt{2\pi}} = 0.90 V_s$$

El Voltaje de salida V_C puede ser $+V_{CC}$, $-V_{CC}$, ó 0, dependiendo del estado de los interruptores. En la Tabla 2.1 se muestran los circuitos equivalentes para algunas de las posibles combinaciones de los interruptores y el voltaje de salida que se obtiene al cerrar determinadas parejas de interruptores.

Interruptores cerrados	Voltaje de salida V_C
S1 y S2	$+V_{CC}$
S3 y S4	$-V_{CC}$
S1 y S3	0
S2 y S4	0

Tabla 2.1.- Estados de los Interruptores.

Observe que S1 y S4 no deberían estar cerrados al mismo tiempo, ni tampoco S2 y S3 para evitar un corto circuito en la fuente de continua. Los interruptores reales no se abren y se cierran instantáneamente, por tanto debe tenerse en cuenta los tiempos de conmutación al diseñar el control de los interruptores. El solapamiento de los tiempos de conducción de los interruptores resultaría en un circuito denominado, en ocasiones, fallo de solapamiento en la fuente de tensión continua. El tiempo permitido para la conmutación se denomina tiempo muerto ("blanking time"). Para obtener un voltaje de salida V_C igual a cero se pueden cerrar al mismo tiempo los interruptores S1 y S3 o bien S2 y S4. Otra forma de obtener un voltaje cero a la salida sería eliminando las señales de control en los interruptores, es decir, manteniendo abiertos todos los interruptores.

2.2.4 Inversor de Onda Cuadrada

La técnica de modulación o el esquema de conmutación más sencillo del inversor en puente completo es el que genera un voltaje de salida en forma de onda cuadrada. En éste caso los interruptores conectan la carga a $+V_{cc}$ cuando S1 y S2 están cerrados (estando S3 y S4 abiertos) y a $-V_{cc}$ cuando S3 y S4 están cerrados (estando S1 y S2 abiertos). La conmutación periódica de la tensión de la carga entre $+V_{cc}$ y $-V_{cc}$ genera en la carga un voltaje con forma de onda cuadrada. Aunque esta salida alterna no es senoidal pura, puede ser una onda de alterna adecuada para algunas aplicaciones.

La forma de onda de la corriente en la carga depende de los componentes de la carga. En una carga resistiva, la forma de onda de la corriente se corresponde con la forma del voltaje de salida. Una carga inductiva tendrá una corriente más senoidal que voltaje, a causa de las propiedades de filtrado de las inductancias. Una carga inductiva requiere ciertas consideraciones a la hora de diseñar los interruptores del inversor, ya que las corrientes de los interruptores deben ser bidireccionales. Para ello, se suelen poner diodos en antiparalelo con cada uno de los interruptores. En el caso del ondulator en puente se utilizarían cuatro diodos en antiparalelo con cada uno de los interruptores. Para el caso del medio puente y del push-pull se utilizarían 2 diodos, uno para cada interruptor.

La Figura 2.5 muestra la forma de onda de la tensión de salida V_c para un inversor en puente de onda completa con modulación por onda cuadrada. Este tipo de modulación no permite el control de la amplitud ni del valor eficaz del voltaje de salida, la cual podría variarse solamente si el voltaje de entrada V_{cc} fuese ajustable.

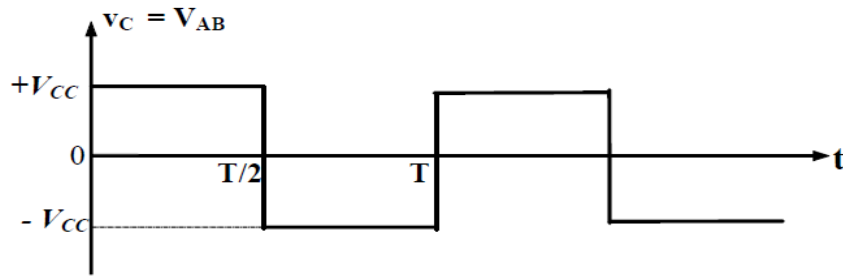


Figura 2.5.- Formas de onda de voltaje en la carga RL del inversor en puente controlado por onda cuadrada.

Este tipo de inversores son los más económicos del mercado, sirven para conectar pequeños aparatos electrónicos. Este tipo de inversores generan alta distorsión armónica y pueden llegar a quemar dispositivos electrónicos delicados o incluso motores.

2.2.5 Inversor de Onda Cuasi-Cuadrada

En la figura 2.5 se puede observar que aunque a la salida se ha obtenido un voltaje alterno, ésta no se parece en absoluto a una senoidal pura. De hecho, se recuerda que una onda cuadrada periódica pura tiene infinitos armónicos sobre la frecuencia fundamental.

Para solucionar este inconvenientes existen varias alternativas. La primera es añadir un filtro tipo LC a la salida, lo cual es costoso dado el elevado número de armónicos de baja frecuencia que se deben filtrar. La segunda alternativa es mejorar el control de los interruptores de potencia.

Una alternativa que permite ajustar el valor eficaz del voltaje de salida y eliminar los armónicos de baja frecuencia es la llamada onda cuasi-cuadrada o cancelación de voltaje, en la cual se mantiene un nivel de tensión nulo sobre la carga durante parte del período. De esta manera, mejoramos el contenido de armónicos del voltaje de salida. El voltaje que se obtiene utilizando la modulación por onda cuasi-cuadrada se puede apreciar en la Figura 2.6.

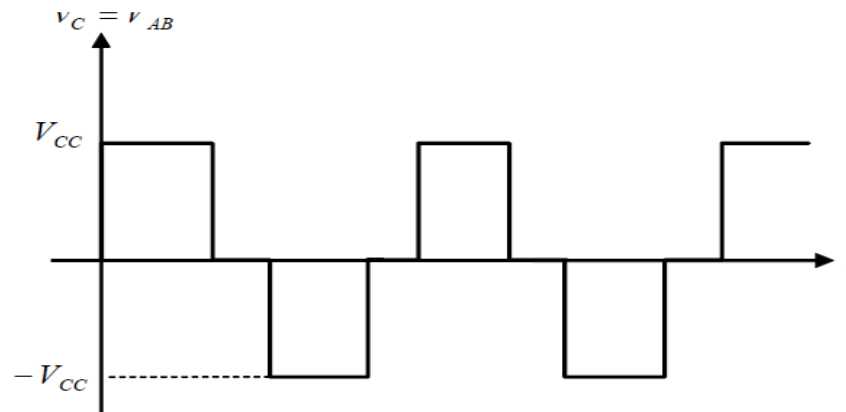


Figura 2.6.- Formas de onda de voltaje en la carga R_L del inversor en puente completo controlado por cancelación de voltaje (modulación por onda casi-cuadrada).

Para obtener éste tipo de onda, una posibilidad sería la siguiente: cuando se desea voltaje positivo en la carga se mantienen S1 y S2 conduciendo (S3 y S4 abiertos). El voltaje negativo se obtiene de forma complementaria (S3 y S4 cerrados y S1 y S2 abiertos). Y, como ya se ha comentado, los intervalos de voltaje nulo se obtienen cerrando simultáneamente los interruptores S1 y S3 manteniendo S2 y S4 abiertos o bien cerrando S2 y S4 mientras S1 y S3 se mantienen abiertos. Otra forma de obtener voltaje nulo en la salida es manteniendo todos los interruptores abiertos durante el intervalo de tiempo deseado.

Si se efectúa un análisis de Fourier de la forma de onda cuasi-cuadrada, se observaría que están presentes los múltiplos impares de la frecuencia de conmutación, lo que significa que el filtraje de dicha señal para la obtención apenas de la fundamental requiere un filtro con frecuencia de corte muy próxima de la propia frecuencia deseada. Éste espectro varía de acuerdo con el ancho del pulso.

Estos tipos de inversores son los más instalados en el mercado nacional, operan prácticamente con cualquier aparato electrónico, sí su potencia es suficiente arrancan motores, generan baja distorsión armónica. Sus precios son competitivos y podemos encontrar un par de marcas de prestigio.

2.2.6 Inversor de Onda Senoidal Pura

La función principal de un inversor de onda senoidal es la de cambiar la corriente continua suministradas por una batería a corriente alterna, similar a las que se tiene en casa, los parámetros de salida los define el fabricante del equipo, que pueden ser 230 voltios 50 Hz ó 115 voltios 60 Hz, en muchos casos pueden ser configurados por el usuario.

Su uso es muy habitual en instalaciones solares aisladas, vehículos especiales donde se requiere suministro de corriente alterna y en embarcaciones de recreo y profesionales.

Existen dos tipos de inversores en el mercado,

- Onda senoidal rectificada
- Onda senoidal pura

La diferencia entre ambos, a parte del precio es la calidad de onda senoidal resultante.

2.2.6.1 Onda Senoidal Rectificada

En el caso de la onda senoidal rectificada, erróneamente denominado "onda cuadrada", tiene una onda senoidal con unos pequeños ruidos en su trazado como en la Figura 2.7, esto por la forma que se está obteniendo la onda. Es poco eficiente y no es recomendable para aplicaciones electrónicas que requiera una calidad de corriente alterna bastante alta.

Se puede utilizar para iluminación, pequeños motores eléctricos, electrodomésticos y portátiles.

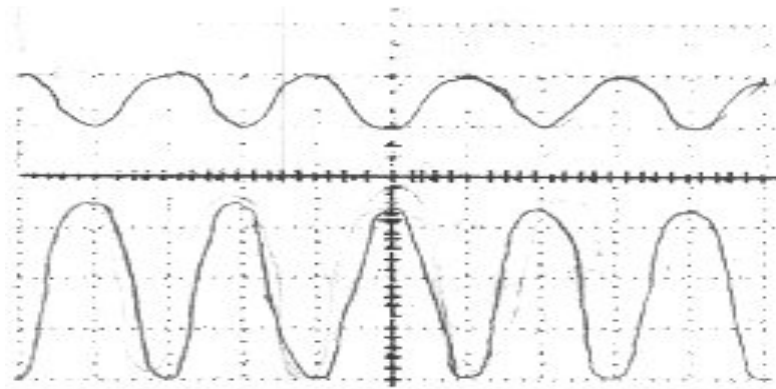


Figura 2.7.- Formas de onda de voltaje en la carga RL del inversor en puente completo controlado por la modulación por onda senoidal rectificada.

2.2.6.1 Onda Senoidal Pura

Por su trazado totalmente limpio es el que se recomienda, por su alta eficiencia y versatilidad mediante la Figura 2.8. En el tiempo actual tenemos muchos equipos electrónicos sofisticados, desde una videoconsola hasta una pantalla de LCD, Plasma o de LED's, que necesitan una calidad de corriente senoidal EXCELENTE, así evitamos un daño apreciable en los equipos, tanto a nivel doméstico a nivel profesional.

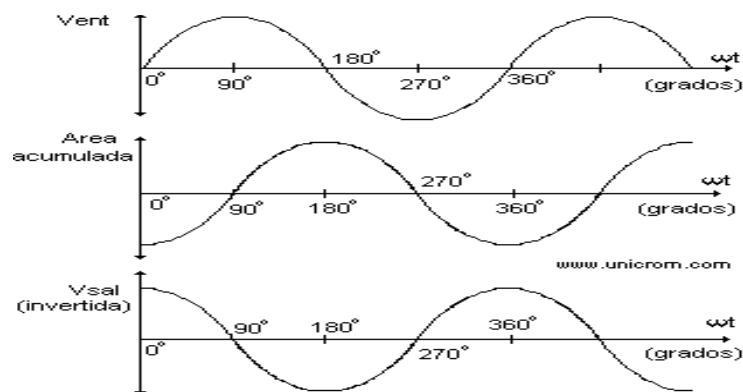


Figura 2.8.- Formas de onda de voltaje en la carga RL del inversor en puente completo controlado por la modulación por onda senoidal pura.

2.3 Técnicas de Modulación

Existen varias técnicas para modificar la ganancia del inversor, el método más eficiente de controlar la ganancia o voltaje de salida es incorporar en los inversores el control de modulación del ancho de pulso (PWM) esta técnica es la manera más simple de generar una tensión de CA a partir de una tensión en CD. La principal característica de la modulación PWM basada en una portadora que consiste en que el filtrado del voltaje de salida es más sencillo, ya que las frecuencias de portadora es generalmente elevada, y por lo tanto el tamaño del filtro a la salida del inversor es reducido.

- Sin embargo, esta técnica presenta algunas desventajas, entre las cuales se pueden mencionar las siguientes:
 - Atenuación de la componente fundamental del voltaje PWM.
 - Incremento de las frecuencias de conmutación, lo cual significa un esfuerzo mayor en los dispositivos de potencia asociados, y por lo tanto, una degradación de los mismos.
 - Generación de componentes armónicos de alta frecuencia.

Debido a esto y a multitud de diversos factores mencionamos algunas técnicas comúnmente utilizadas:

- Modulación de un solo ancho de pulso
- Modulación de varios anchos de pulso
- Modulación senoidal del ancho de pulso
- Modulación senoidal modificada del ancho de pulso
- Control por desplazamiento de fase
- Modulación de un solo ancho de pulso

El control por modulación de un solo ancho de pulso existe un solo pulso por cada medio ciclo. El ancho de pulso se hace variar, a fin de controlar el voltaje de salida del inversor. La figura muestra las señales de excitación y el voltaje de salida para el inversor monofásico en configuración mediante la figura 2.9.

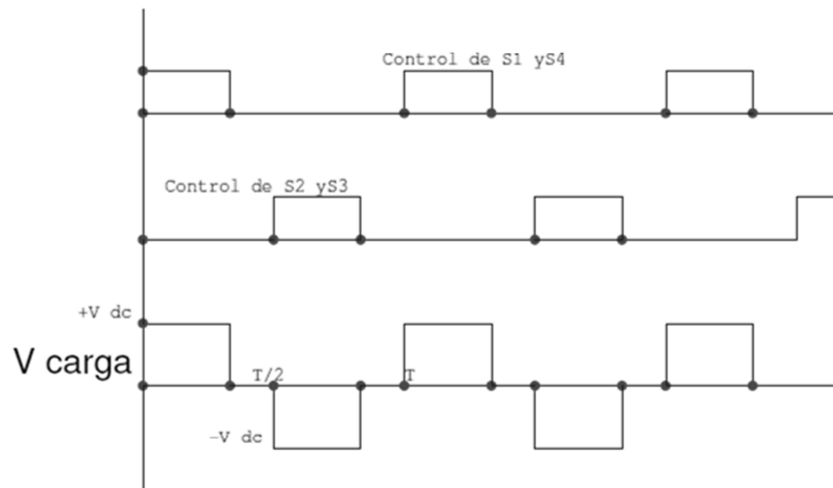


Figura 2.9.-Generación de la señal de excitación.

2.3.1 Modulación de varios Anchos de Pulso

También se le conoce como modulación uniforme de ancho de pulso (UPWM). Utilizando varios pulsos en cada semiciclo de voltaje de salida puede reducirse el contenido armónico. Mediante la comparación de una señal de referencia con una señal portadora se generan los pulsos de disparo, tal como se muestra en la Figura 2.10. La frecuencia de la señal de referencia establece la frecuencia de la señal por cada ciclo. El índice de modulación controla el voltaje de salida. En la Figura 2.11 se muestra el voltaje de salida, teniendo en cuenta que los pulsos positivos se generan debido a la excitación simultánea de S1 y S4 y los negativos con la de S2 y S3.

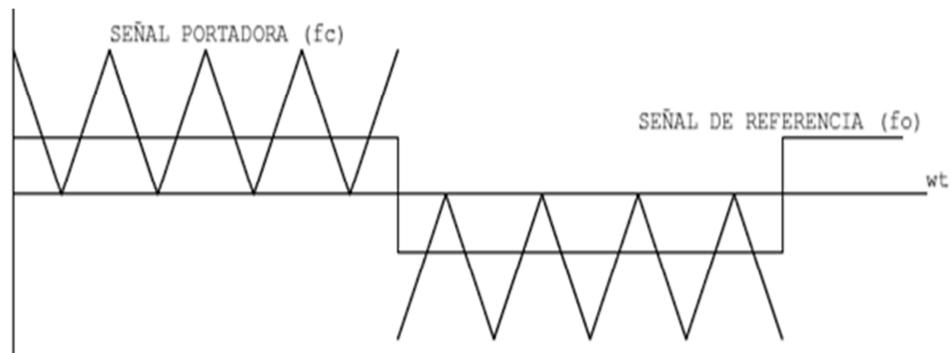


Figura 2.10.- Generación de la señal de excitación.

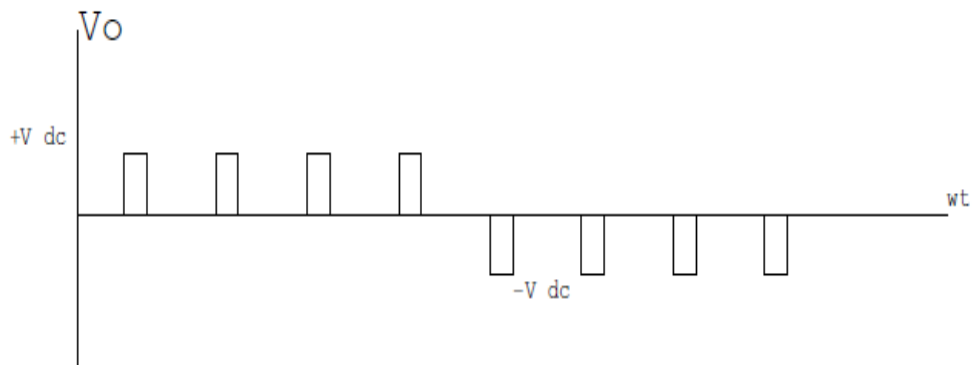


Figura 2.11.- Voltaje de salida.

2.3.2 Modulación Senoidal del Ancho de Pulso

En vez de mantener igual el ancho de todos los pulsos, en la modulación senoidal se varía en proporción con la amplitud de una onda evaluada en el centro del mismo pulso. Las señales de compuerta se generan al comparar una señal senoidal de referencia con una onda portadora triangular unidireccional, tal como se muestra en la Figura 2.12. La frecuencia de la señal de referencia, f_r , determina la frecuencia de salida del inversor, f_o , y su amplitud pico controla el índice de modulación, M , y en consecuencia, el voltaje RMS de salida.

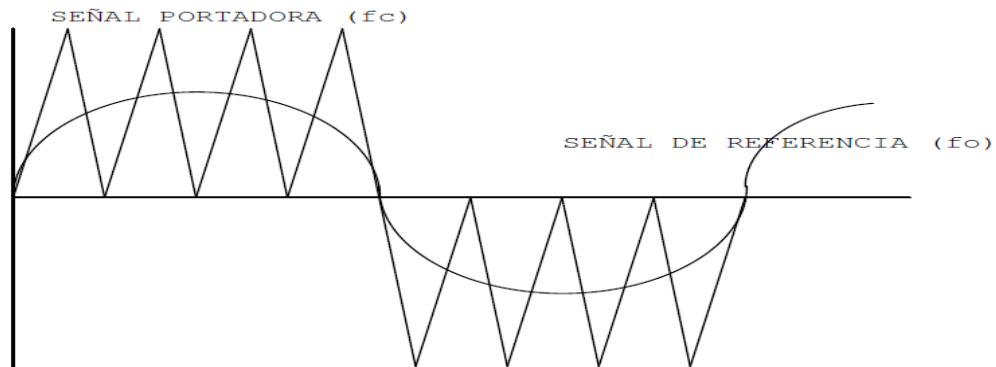


Figura 2.12.- Modulación senoidal de ancho de pulso.

2.3.3 Modulación Senoidal modificada del Ancho de Pulso

En la modulación senoidal de ancho de pulso, los anchos de los pulsos más cercanos al pico de la onda senoidal no cambian considerablemente, luego en la modulación senoidal modificada (MSPWM) durante los 70 grados alrededor del pico (treinta antes y treinta después) los interruptores están encendidos. Este tipo de modulación permite que se reduzca el número de conmutaciones de los dispositivos de potencia y las pérdidas de conmutación, incrementando la componente fundamental y mejorando las características armónicas (Figura 2.13).

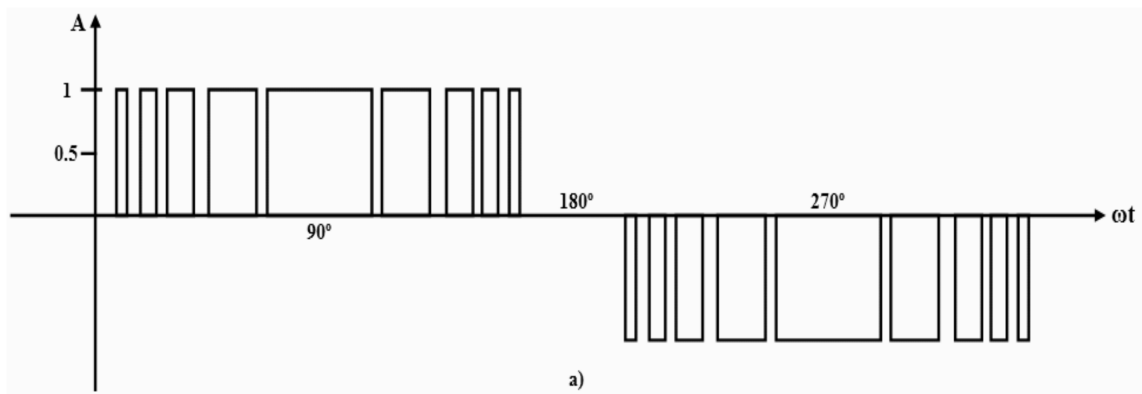


Figura 2.13.-La salida de tensión y de contenido armónico.

2.4 Control por Desplazamiento de Fase

Este control se puede obtener usando varios inversores y sumando el voltaje de salida de los inversores individuales. Un ejemplo sería tener dos inversores de medio puente y sumarlos. Un desplazamiento de fase entre ellos controlaría el descenso en cero de la onda rectangular de salida, Figura 2.14, controlando mediante esto el voltaje RMS de salida.

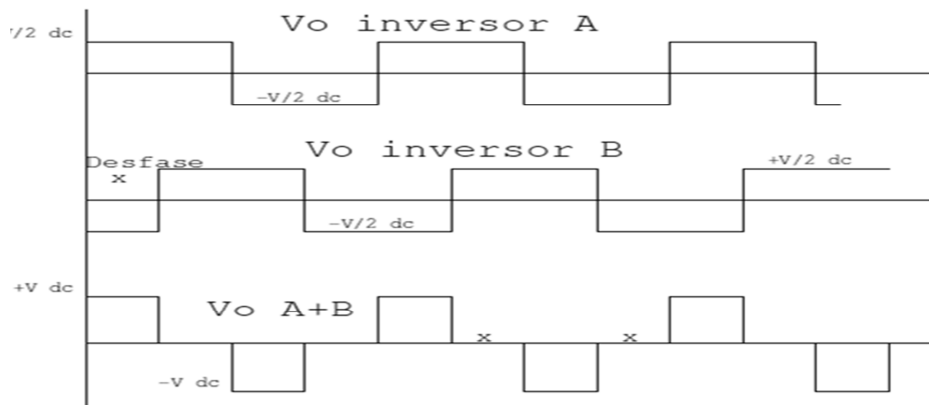


Figura 2.14.- Control por desplazamiento de fase.

2.5 Problema de Tierras

La importancia de la utilización de una referencia física a tierra, en un pequeño sistema de generación de energía (PSGE), radica en la necesidad de aumentar la seguridad durante el mantenimiento del PSGE. Además se logran las siguientes ventajas:

- Protección contra descargas atmosféricas,
- Disminución del acoplamiento magnético (EMC, por sus siglas en inglés),
- Protección contra pulsos electromagnéticos (EMP, por sus siglas en inglés).

La referencia física a tierra se utiliza en aplicaciones en donde el nivel de voltaje de CD de entrada supera los 100 Voltios. Al mismo tiempo, un inversor que esté conectado a la línea de distribución de energía en el cual posea una conexión de línea a neutro, debe utilizar dicha referencia física a tierra.

Las topologías con aislamiento físico, entre el PSGE y las líneas de distribución de energía no tienen problemas en la utilización de dicha referencia. Sin embargo, la mayoría de las topologías sin aislamiento no pueden cumplir con dicho requerimiento. Esto puede traer como consecuencia que no puedan utilizarse en aplicaciones que requieran conexión a las líneas de distribución de energía.

2.6 Convertidores Multinivel

Existen diferentes topologías para la conversión de energía de CD-CA, por lo que en este capítulo se empezara entendiendo el concepto de multinivel, se mencionarán las topologías más comunes, se presentará las ventajas y desventajas de la conversión multinivel en general y se analiza el convertidor multinivel con diodo anclado al neutro, para tres y cinco niveles, además se presentan las técnica de control para conmutación.

Los convertidores multinivel incluyen un arreglo de semiconductores de potencia y capacitores como fuentes de voltaje, el voltaje generado de salida tiene forma de onda escalonada considerando que los interruptores se cierran y se abren en tiempos diferentes, dependiendo del número de interruptores de potencia los voltajes en la salida crece sumando los voltajes de los capacitores, mientras que los interruptores de potencia soportan voltajes reducidos (Figura 2.15).

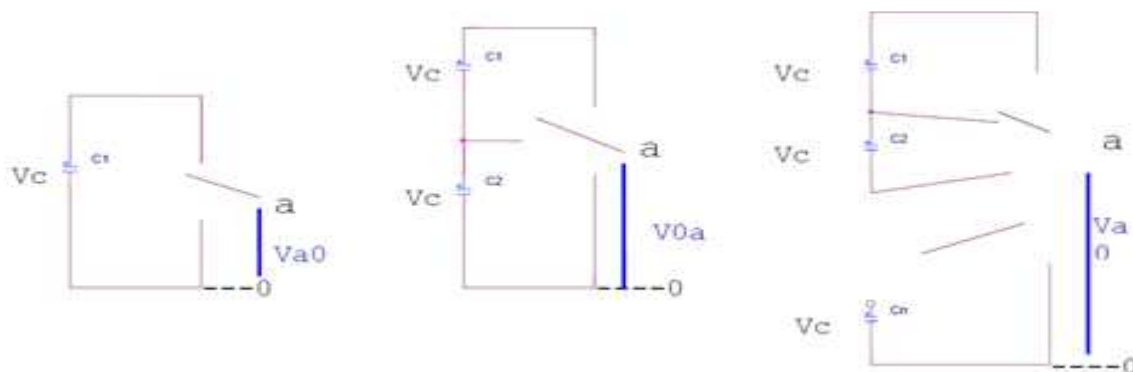


Figura 2.15.-Diagramas Esquemáticos de Convertidores Multinivel.

Los convertidores multinivel en los últimos años se han consolidado como una opción más para convertir energía CD-CA en el rango de potencia media y alta desde el punto de vista económico y técnico, se podrá encontrar un incremento en las aplicaciones donde la conversión de la energía se realiza mediante convertidores multinivel.

La técnica de conversión multinivel se considera un área joven en el campo de la conversión de energía, presentando expectativas que hacen pensar en un gran potencial para una más amplia aplicación en el futuro. La forma más general de entender los convertidores CD-CA multinivel es considerarlo como un seccionador de voltaje. El voltaje alterno de salida, de valor elevado, se obtiene a partir de diferentes niveles de voltaje continuo de entrada, de un valor más pequeño accionando adecuadamente los interruptores del convertidor (Figura 2.16), siendo esta la diferencia básica respecto a un convertidor CD-CA convencional, donde el voltaje continuo de entrada presenta un único nivel.

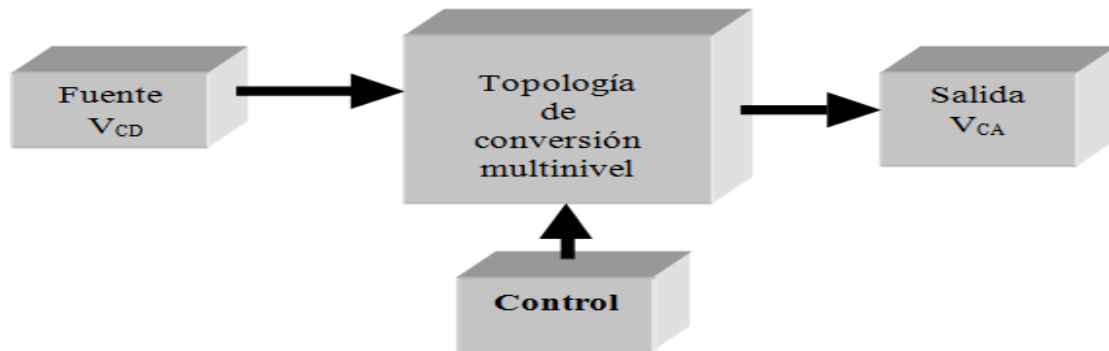


Figura 2.16.-Elementos necesarios para un convertidor CD-CA usando un convertidor multinivel.

2.7 Topologías de Inversores Multinivel

Las topologías multinivel básicas que son objeto de mayor estudio son las siguientes:

- Convertidor con diodos anclado
- Convertidor con capacitores flotantes
- Convertidor con conexión en cascada de puentes monofásicos

Existen además otras topologías que despiertan menos interés como son las siguientes:

- Convertidor asimétrico híbrido.
- Convertidor con puentes en cascada y fuentes CD-CD con aislamiento.
- Convertidor con topologías multinivel en cascada.
- Convertidor con conmutación suave.
- Rectificador elevador de 3 niveles/convertidor matricial.
- Inversores acoplados por transformador.
- Convertidor diodo/capacitor anclado.
- Convertidor nuevo diodo anclado.
- Convertidor multinivel generalizado.

2.8 Características de los Convertidores Multinivel

Las características más relevantes de los convertidores multinivel son las siguientes:

- La disposición del voltaje (VCD) de entrada en múltiples niveles permite aumentar varias veces la tensión de trabajo del convertidor empleando los mismos interruptores que un convertidor convencional. Cada interruptor debe bloquear únicamente la tensión correspondiente a un único nivel de continua, evitando de esta manera el inconveniente del equilibrado estático y dinámico de la asociación serie de los dispositivos electrónicos.
- La potencia de los convertidores se incrementa al emplear voltajes mayores, sin necesidad de incrementar la corriente, evitando así mayores pérdidas durante la conducción, y por consecuencia mejorar el rendimiento del convertidor.
- El voltaje de salida obtenida en un convertidor multinivel CD-CA presenta un contenido armónico menor que el obtenido en un convertidor CD-CA convencional de potencia equivalente. Teóricamente puede obtenerse una distorsión armónica nula si se dispone de un número infinito de niveles de la tensión de entrada trayendo como consecuencia la reducción del peso y costo de los filtros.
- La corriente de entrada absorbida presenta una distorsión armónica baja y usando un método de modulación adecuado, puede llegar a cancelarse la tensión en modo común.
- Pueden operar con una baja frecuencia de conmutación considerando frecuencia del orden debajo de 1000 Hertz.
- La respuesta dinámica del convertidor es más rápida, por tener más niveles de tensión de salida y emplear filtros de menor tamaño.

2.9 Desventajas de los Inversores Multinivel

Algunos inconvenientes de los convertidores multinivel son:

- Cuando se emplea un número grande de interruptores (más de 7) la complejidad del control se incrementa.
- Es necesario tener diferentes niveles de tensión de entrada, que pueden obtenerse con capacitores o mediante varias fuentes de continua. Cuando se emplean capacitores las tensiones de estos deben de permanecer constantes o equilibradas en cualquier condición de trabajo, con objeto que cada capacitor actúe como una fuente de tensión constante.

2.10 Métodos de Control de los Inversores Multinivel

Las técnicas de conmutación de los convertidores multinivel, de acuerdo a la frecuencia de conmutación de los interruptores pueden agruparse en 5 categorías como en la Figura 2.17.

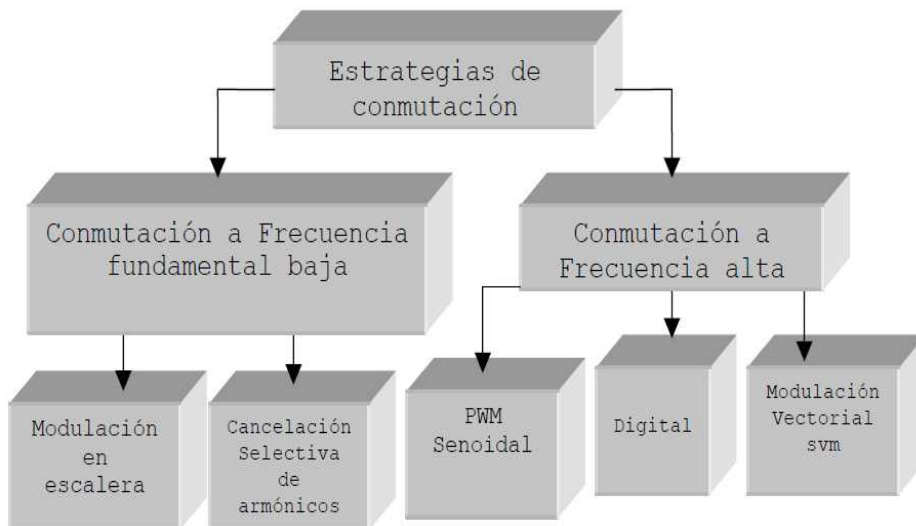


Figura 2.17.- Formas de conmutación para convertidores multinivel.

Lo que se busca con las diferentes técnicas de conmutación son las siguientes características:

- Minimización de los contenidos armónicos de la tensión de salida en el inversor.
- Regulación de la amplitud y frecuencia de salida.
- Equilibrio de las tensiones instantánea de los capacitores, cuando la topología lo requiere.

2.11 Driver de Disparo

Las señales de control de disparo de los MOSFETS que entregan los optoacopladores van a la entrada de los drivers, estos se encargan de convertirlas en voltajes para encender y apagar los MOSFETS. Los drivers IR2110, trabajan a altas velocidades de disparo y son ideales para el circuito, ya que están diseñados para manejar una fuente flotante mediante la implementación de un condensador de arranque con el cual se genera el voltaje de disparo para los MOSFETS superiores de cada una de las ramas del puente de salida.

2.12 Reducción de Armónicas

La Ecuación 2.7 indica que mediante una elección adecuada del ángulo de desplazamiento se puede eliminar la armónica de orden n , β , si

$$\operatorname{sen} \frac{n\beta}{2} = 0 \quad (\text{Ecuación 2.7})$$

Despejando queda

$$\beta \frac{360^\circ}{n} \quad (\text{Ecuación 2.8})$$

Y la tercera armónica quedará eliminada, si $\beta = 360/3 = 120^\circ$. Se puede eliminar un par de armónicas no deseadas en la salida de los inversores monofásicos si se colocan en forma simétrica dos muescas de voltaje bipolar, tal y como se muestra en la Figura 2.18. La serie de Fourier del voltaje de salida se puede expresar como en la Ecuación 2.9:

(Ecuación 2.9)

$$V_o = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \beta_n \text{Sen} . n\omega t$$

Donde

(Ecuación 2.10)

$$\begin{aligned} \beta_n &= \frac{4V_s}{\pi} \left[\int_0^{\alpha_1} \text{sen} n\omega t d(\omega t) - \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \text{sen} n\omega t d(\omega t) + \int_{\alpha_2}^{\alpha_2} \text{sen} n\omega t d(\omega t) \right] \\ &= \frac{4V_s}{\pi} \frac{1 - 2 \cos n \alpha_1 + \cos n \alpha_2}{n} \end{aligned}$$

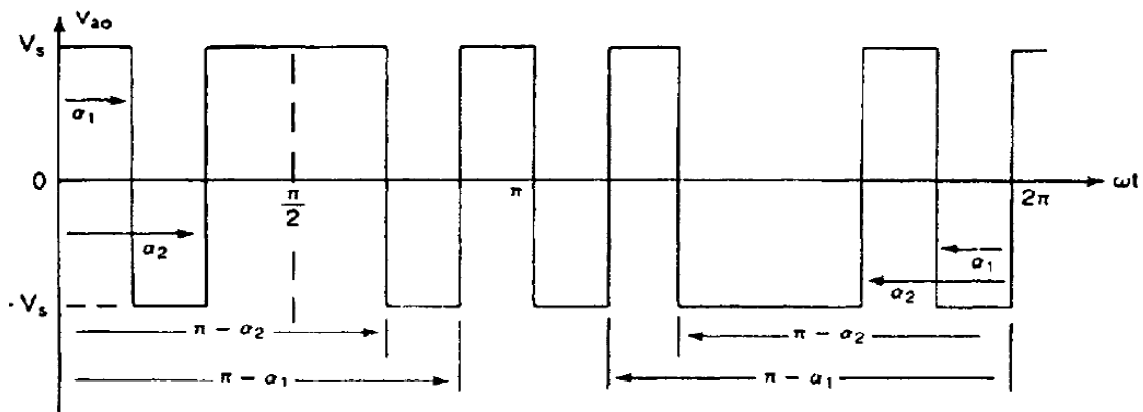


Figura 2.18.- Salida de voltaje por dos muescas bipolares por cada media onda.

La ecuación 2.10 se puede extender hasta m muescas por cada cuarto de onda creando

(Ecuación 2.11)

$$\beta_n = \frac{4V_s}{n\pi} (1 - 2 \cos n \alpha_1 + 2 \cos n \alpha_2 - 2 \cos n \alpha_3 + 2 \cos n \alpha_4 - \dots)$$

La tercera y la quinta armónica se eliminarían si B3=B5= 0 y la ecuación 2.11 da las ecuaciones necesarias a resolver.

(Ecuación 2.12)

$$1 - 2 \cos 3 \alpha_1 + 2 \cos 3 \alpha_2 = 0 \quad o \quad \alpha_2 = \frac{1}{3} (\cos 3 \alpha_1 - 0.5)$$

(Ecuación 2.13)

$$1 - 2 \cos 5 \alpha_1 + 2 \cos 5 \alpha_2 = 0 \quad o \quad \alpha_2 = \frac{1}{5} (\cos 5 \alpha_1 + 0.5)$$

Estas ecuaciones se pueden resolver en forma iterativa si se supone inicialmente que $\alpha_1 = 0$ y repiten los cálculos para α_1 y α_2 . El resultado es $\alpha_1 = 23.62^\circ$ y $\alpha_2 = 33.3^\circ$.

Con muescas de voltaje unipolar, como las que se muestran en la Figura 3.19, La Ecuación 2.14 es el coeficiente β_n está dado por:

(Ecuación 2.14)

$$\beta_n = \frac{4V_s}{\pi} \left[\int_0^{\alpha_1} \text{sen } nwt \, d(wt) - \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \text{sen } nwt \, d(wt) \right] = \frac{4V_s}{\pi} \frac{1 - 2 \cos n \alpha_1 + \cos n \alpha_2}{n}$$

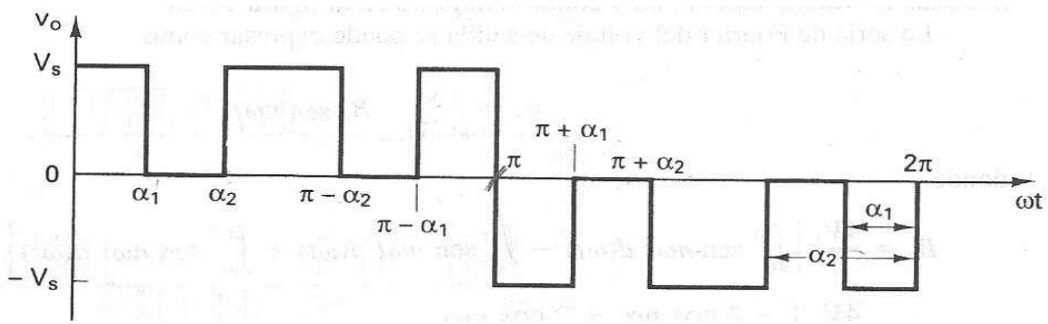


Figura 2.19.- Voltaje de salida unipolar con dos muescas por cada media ciclo.

La tercera y quinta armónicas se eliminarían mediante las ecuaciones

$$1 - \cos 3 \alpha_1 + \cos 3 \alpha_2 = 0'$$

(Ecuación 2.15)

$$1 - \cos 5 \alpha_1 + \cos 5 \alpha_2 = 0$$

(Ecuación 2.16)

Resolviendo estas ecuaciones mediante iteraciones, obtenemos $\alpha_1 = 17.83^\circ$ y $\alpha_2 = 37.97^\circ$.

Las técnicas modificadas de modulación senoidal de ancho de pulso se pueden aplicar para generar las muescas que eliminarán eficazmente ciertas armónicas del voltaje de salida, tal y como se muestra en la Figura 2.20.

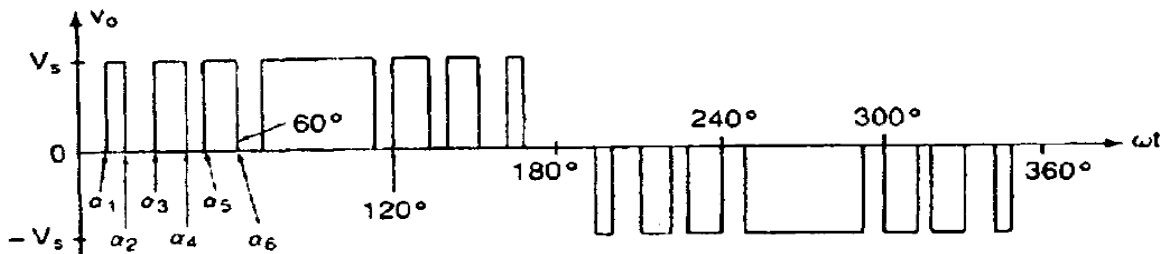


Figura 2.20.- Voltaje de salida para modulación senoidal modificada de ancho de pulso.

CAPÍTULO III

DISEÑO DEL INVERSOR

3.1 Desarrollo

Para armar e implementar un Control de un Inversor de Corriente PWM Programado y conectado a la red eléctrica, se debe de diseñar un plan estructurado e ir fijando metas de que es lo que esperamos obtener al finalizar su construcción y la obtención de los resultados al someterlos a las pruebas. Una vez hecha la investigación previa en el ámbito teórico y contar ya con los conocimientos necesarios en circuitos y electrónica para su construcción se debe elegir los materiales correctos, el software y la herramientas necesarias para llevar a cabo el diseño de los circuitos que conformarán el proyecto (véase Anexo A). Ya que el proyecto se conforma a través de un armado modular es necesario saber cuáles son los circuitos que se debe diseñar y construir para realizar las pruebas de drivers, potencia, control y filtrado.

El circuito más importante para realizar este trabajo es el Inversor de Corriente el cual necesitamos armar primero, uno de nuestros primeros diseños fue a través de una tableta de circuitos llamada *protoboard* el cual es el comúnmente usado para prácticas y diseños previos; el problema con esta tableta fue que por ser un diseño complejo que contaba con demasiadas conexiones de cables presentaba problemas de continuidad y otras veces simplemente no funcionaba así que se optó por realizarlo a través de un circuito impreso, ya que este método proporciona un menor margen de error, se es más ordenado y se puede realizar en un circuito pequeño para ahorrar espacio.

Después se procede diseñar los driver del inversor, estos se encargarán de controlar los switcheos de las entradas del puente que tiene el inversor.

Por último se procede a realizar la programación del chip que se va a encargar del control de todo el inversor y decidir en qué momento va a sincronizar con la corriente alterna.

3.2 Construcción del Inversor

Un inversor como se ha mencionado, convierte la corriente alterna en directa, para ello es necesario contar con 4 MOSFET modelo IRF640 que se conectarán en modo de puente completo. Estos MOSFETS tendrán el trabajo de soportar niveles de voltaje y corriente elevados que a su vez transfieren la corriente directa para transformarla en corriente alterna. De igual forma se contará con 4 resistencias de 220Ω cuya única función es interactuar con los sistemas flotantes y los driver de control que después se explicaran con más detalle. Se emplean 4 disipadores de calor de 38mm modelo TO-220 para los MOSFET, ya que estos se calientan demasiado al interactuar con niveles de energía muy altos y sus respectivas terminales modelos TRT-02 y TRT-03 para las conexiones de entrada y salida del circuito.

Lo primordial y que se debe hacer siempre antes de comenzar el diseño, es necesario leer a detalle la hoja de especificaciones (Datasheet). En nuestro caso para los IRF640 véase el Anexo B para saber cómo realizar las conexiones de forma adecuada así se podrá prevenir algún error en la etapa de diseño y pruebas.

Se procede a diseñar el circuito del inversor mediante el programa UltiBoard Versión 11 ya que es la más actual y trae consigo mejoras. Uno de los detalles del programa es que al generar las pistas del circuito primero las acomoda en orden automático y después uno puede posicionarla a su gusto para poder ajustar el diseño (para saber la interconexión de los circuitos véase el Anexo G), también se tiene que engrosar diferentes pistas del circuito ya que por estas pasan voltajes altos y con esta acción evitaremos el calentamiento. La Figura 3.1 muestra el circuito impreso.

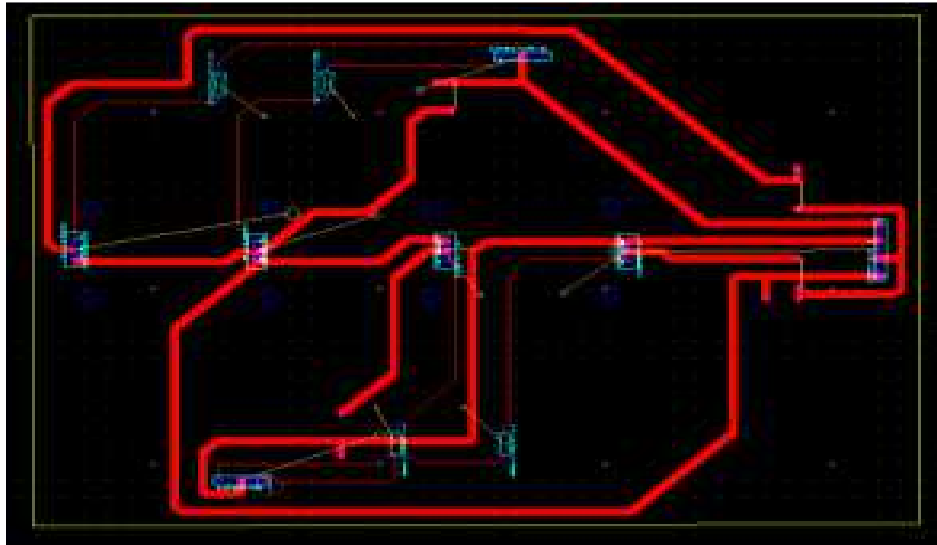


Figura 3.1.- Inversor Terminado en el UltiBoard.

Una vez terminado el circuito en el programa, se procede a la impresión en un papel especial llamada hoja de transferencia (véase el Anexo A). No es necesario tener una impresora especial basta con una impresora de inyección de, el resultado de la impresión se puede apreciar mediante la Figura 3.2.

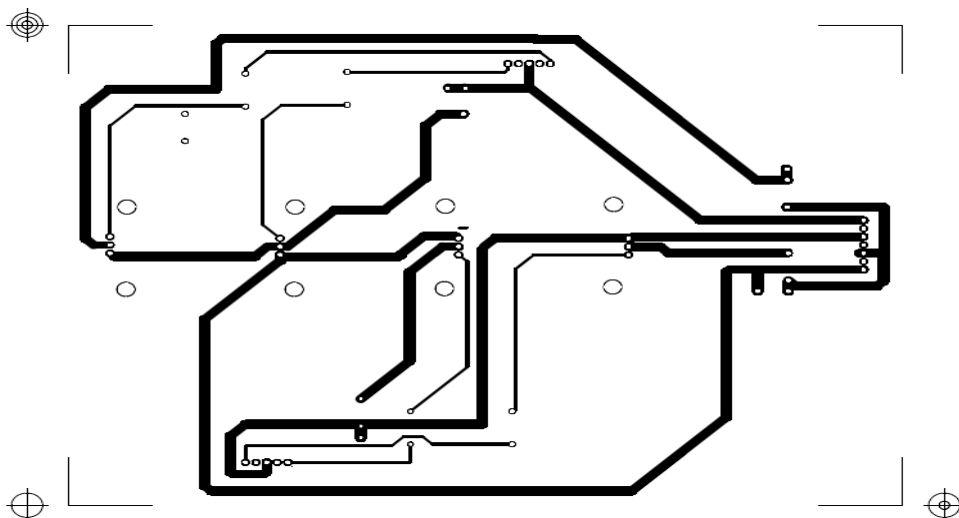


Figura 3.2.- Vista de Impresión del Inversor Terminado en el UltiBoard.

Ya teniendo el circuito impreso se procede a limpiar nuestra placa fenólica con jabón para quitarle todo residuo de grasa de las manos o polvo y se seca quedando como en la Figura 6.3.



Figura 3.3.- Placa Fenólica Limpia.

A continuación se procede a pegarle la hoja de transferencia anteriormente impresa (véase la Figura 3.4) y luego se procede a plancharlo aproximadamente de 10 a 15 minutos con la temperatura más alta de la plancha (véase Figura 3.5).



Figura 3.4.- Placa Fenólica con el circuito listo para planchar.



Figura 3.5.- Planchado del circuito.

Una vez terminado de planchar se esperan unos minutos para que se enfriara y deberá quedar impreso como la Figura 3.6.



Figura 3.6.- Circuito Planchado y enfriado.

Ahora se procede a quitar el papel de la placa fenólica y así asegurar de que el circuito haya quedado perfectamente transferido a la placa como en la Figura 3.7, si por algún motivo las pistas no quedaron perfectamente transferidas se pueden retocar manualmente como en la Figura 3.8 con un plumón de tinta permanente .

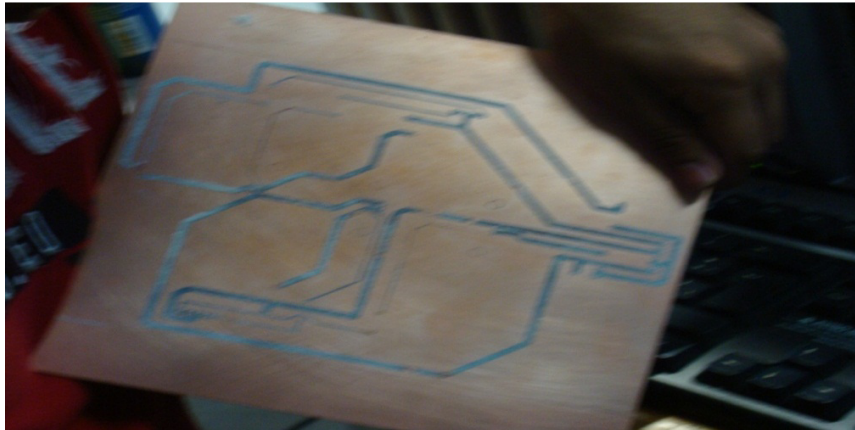


Figura 3.7.- Circuito Limpio después del Planchado.

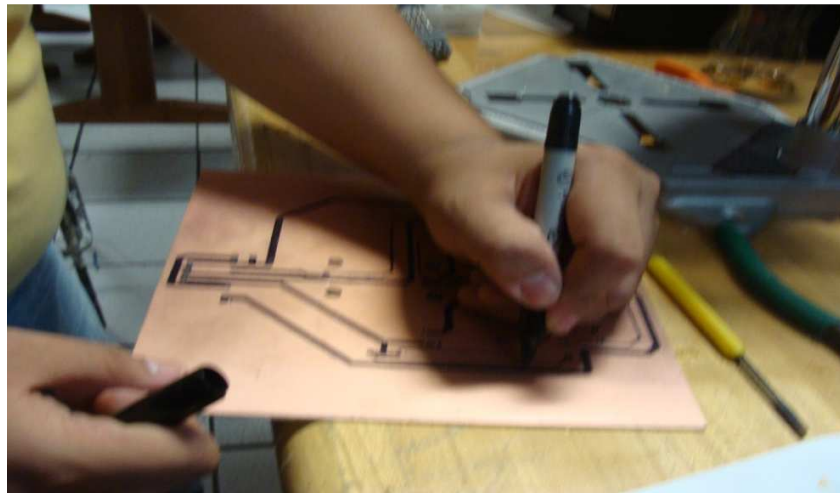


Figura 3.8.- Retocando las Pistas del Circuito.

Se realizan los huecos de las donas del circuito con una herramienta de perforación marca dremel (véase Anexo A), estos huecos es donde se van a insertar los componentes electrónicos (véase la Figura 3.9).



Figura 3.9.- Realizando los Huecos en las Donas del Circuito.

Ya teniendo el circuito listo y con sus respectivos huecos, luego se sumerge nuestra placa fenólica en una mezcla de cloruro férrico y agua para quitar el excedente de cobre y dejar solo el que este debajo de las líneas previamente pintadas como en la Figura 3.10.



Figura 3.10.- Quemando el Circuito de la Placa.

Se realiza un nuevo lavado para quitar la mezcla de ácido con agua y dejar de esta manera el circuito listo para empezar a estañar véase la Figura 3.11.

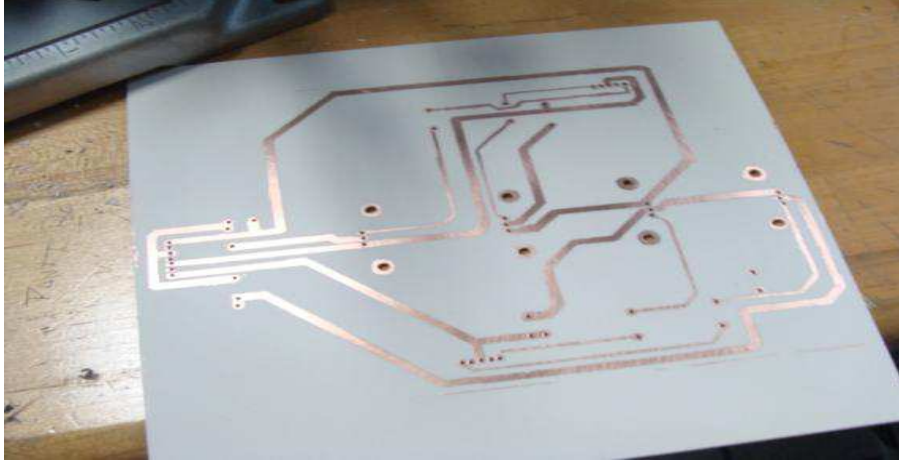


Figura 3.11.- Circuito listo en la Placa Fenólica.

Después del proceso de quemado con su respectiva limpieza, el inversor está listo para estañar así que se procede a llenarlo de pasta y estañar las pistas del circuito véase la Figura 3.12.

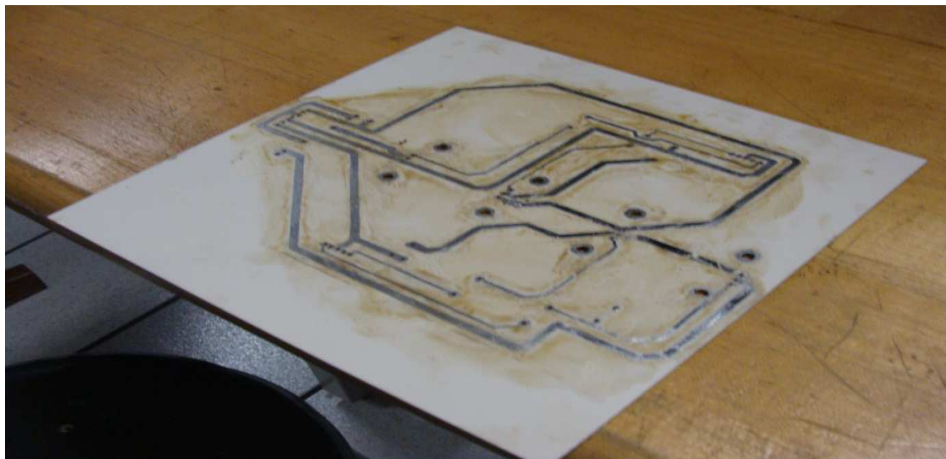


Figura 3.12.- Estañando el Circuito de la Placa.

Ahora se procede a soldar todos los componentes electrónicos y colocar sus cables en el inversor para finalizar su armado como en la Figura 3.13.

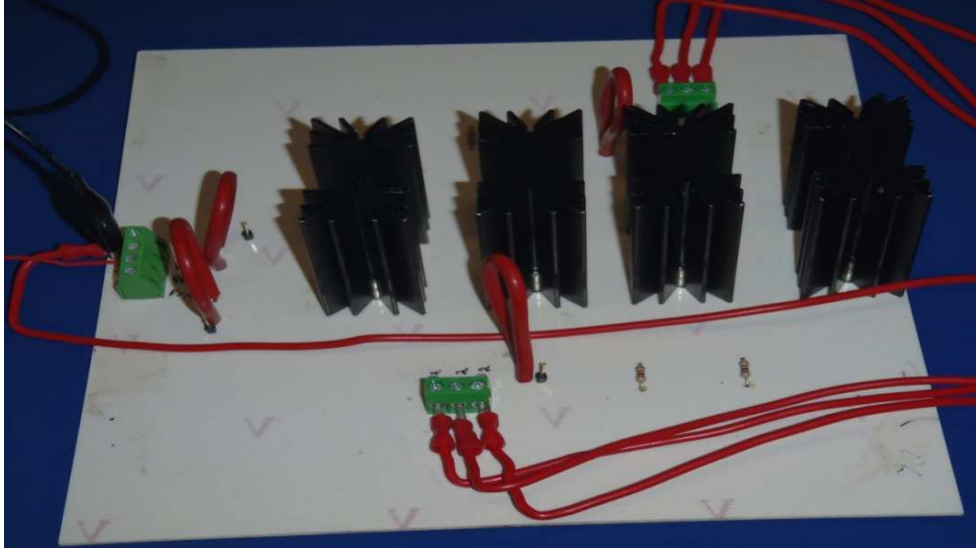


Figura 3.13.- Inversor Terminado.

Teniendo en cuenta que el inversor ya fue terminado necesitamos probarlo. Para saber si funciona correctamente es necesario conectarlo con sus respectivos drivers, así que a continuación se procede a diseñarlos.

3.3 Diseño de los Drivers

Los drivers como se sabe, son los encargados de controlar las fases del puente completo y la parte de potencia para hacer funcionar de manera adecuada el inversor de corriente, para ello es necesario contar con:

- a) 1 MOSFET modelo IR2110 (véase el Anexo C), que nos permite los switcheos de cada una de las ramas del inversor controlando la señal de entrada y permite un voltaje flotante.
- b) 1 capacitor cerámico modelo 103 que sirve para filtrar ruidos.

- c) 1 Diodo rectificador modelo 1N4007 (véase el Anexo D) debido a que estos diodos manejarán valores de corriente elevados, asegurándonos con esto que proporciona seguridad en los picos de corrientes variados y mayores que su corriente nominal máxima de funcionamiento ya que trabajar con voltajes inversos de algunas centenas de voltios.
- d) 1 Capacitor Electrolítico de 25v 220 μ F.
- e) Terminales modelos TRT-02 y TRT-03 para las conexiones de entrada y salida del circuito.

Lo primordial y que se debe hacer siempre antes de comenzar el diseño, es conocer las especificaciones de los IR2110 para saber cómo realizar las conexiones de forma adecuada así podremos prevenir algún error en la etapa de diseño y pruebas. De este mismo Datasheet se obtuvo el modelo de los drivers.

Se procede a diseñar el circuito de los drivers mediante el programa UltiBoard Versión 11 (véase la Figura 3.14) y para saber la interconexión de los circuitos véase el Anexo H.

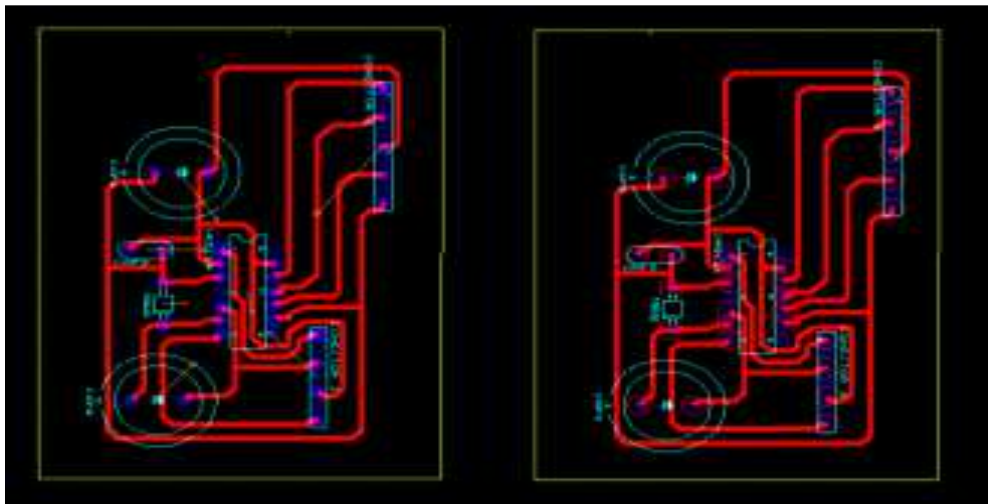


Figura 3.14.- Drivers Terminados en el UltiBoard.

Una vez terminado el circuito en el programa, se procede a la impresión en una hoja de transferencia (véase la Figura 3.15).

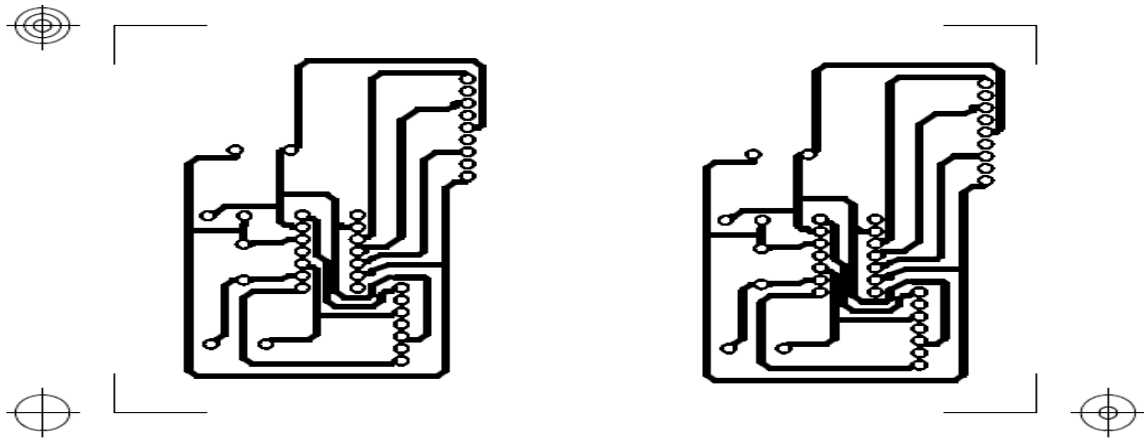


Figura 3.15.- Vista de Impresión de los Drivers Terminados en el UltiBoard.

Como son 2 ramas del inversor se debe construir 2 drivers para que se pueda hacer funcionar el inversor de manera correcta; ya que anteriormente se explicó cómo construir el inversor, los drivers se construyen de la misma manera así que se omite esa parte y se muestra los drivers ya terminados como en la Figura 3.16.

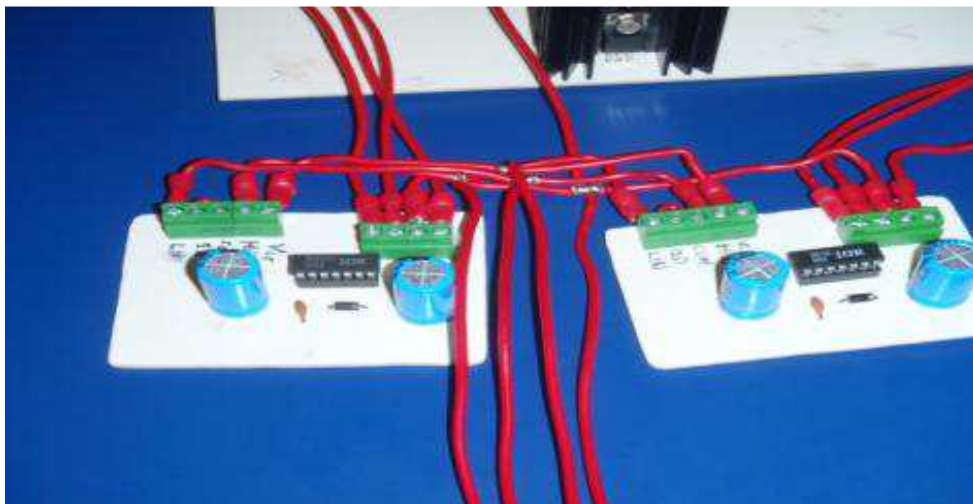


Figura 3.16.- Drivers Terminados.

3.4 Diseño de Control

Esta etapa es una de las más complejas pero importante; ya que el control es el encargado de regular el inversor de corriente y de sincronizar la línea eléctrica con el inversor para poder enviar la corriente por medio de la modulación PWM, ya activa en la programación del PIC seleccionado.

Lo primordial y que se debe hacer siempre antes de comenzar el diseño, es leer a detalle el Datasheet del PIC16F877A (véase el Anexo E), para saber cómo realizar las conexiones de forma adecuada así podremos prevenir algún error en la etapa de diseño y pruebas.

Una vez conocido como está integrado el PIC 16F877A por dentro se procedió a hacer el código mediante un programa llamado Microcode Studio Plus, el cual por medio de una simple rutina nos permite generar pulsos en la salida del puerto que se escoja. Esto permite generar una señal cuadrada y con la ayuda de un inversor generar una señal cuadrada bipolar. Se procede a medir la salida con el osciloscopio para verificar sea la deseada para luego programar el PIC con el programa llamado US-Burn.

Después de varias pruebas más, no se obtuvo la señal deseada, por ello se tuvo que volver a replantear toda la programación para poder obtener los resultados deseados. Después de varias pruebas se concluyó que para ello era necesario utilizar un diferente lenguaje de programación que utilizara lenguaje ensamblador y se procedió a empezar la programación en otro programa llamado MPLAB, el cual permite mayores tiempos de disparo de señal en microsegundos, lo cual es necesario para obtener la señal deseada. En esta ocasión se prefirió utilizar el PIC16F84A (véase Anexo F), por su fácil manejo en programar la salida mediante pulsos una vez terminado, su capacidad de manejar diferentes oscilaciones y tener un puerto ya designado para la detección del cruce por cero. Ahora se programa el PIC con el mismo código (véase Anexo I).

Para generar los pulsos se necesita dos salidas, en este caso utilizo las compuertas RA0 y RA1, la primera para generar una positiva y la segunda para su complemento en negativo. El PIC fue probado mediante una tarjeta de pruebas llamada PIC MILENIUM BOARD (PMB) como en la Figura 3.17.

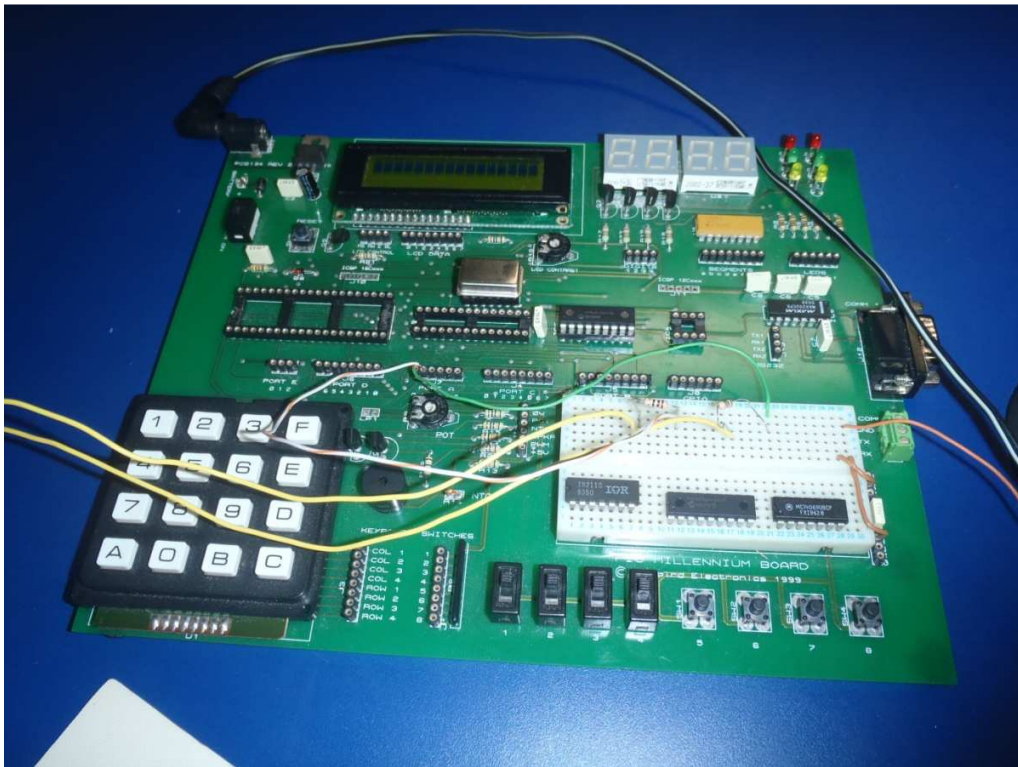


Figura 3.17.- Control Programado e Instalado en la Tarjeta de Pruebas.

Una vez terminado el control, se procedió a conectar todas las partes, las cuales son inversor de corriente, los drivers y el control. Al igual contaremos con dos fuentes que nos proporcionen energía, una para el inversor de corriente, uno más para los drivers y el control para luego tomarlas lecturas mediante el Scopemeter de la marca FLUKE obteniendo un mínimo de errores y quedando completo todo el inversor como en la Figura 3.18.

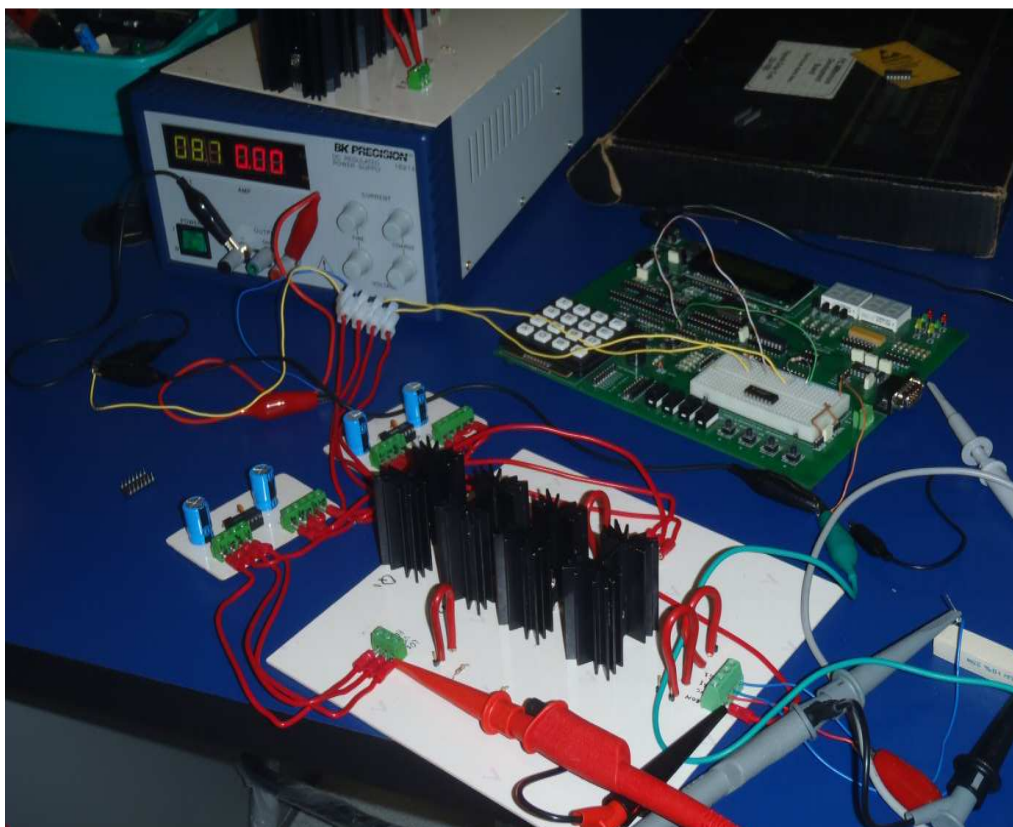


Figura 3.18.- Inversor Completo y Conectado.

Para el siguiente paso, una vez obtenido el tren de pulsos, en el diseño, es necesario programar el microcontrolador 16F84A o encontrar la forma de realizar un programa para generar dicha señal de manera digital. De manera analógica era la primera opción, pero debido a los instrumentos de medición cabe la posibilidad de realizar alguna toma de las señales erróneamente aunque se comprobó llevándola a cabo a la práctica.

Para realizar la programación en el microcontrolador que genere los pulsos de la señal cuadrada hay que basarse en la sección 2.12 y de la Figura 3.19 donde se fue resolviendo todas las ecuaciones para la reducción de los armónicos y obtener los tiempos de conmutación.

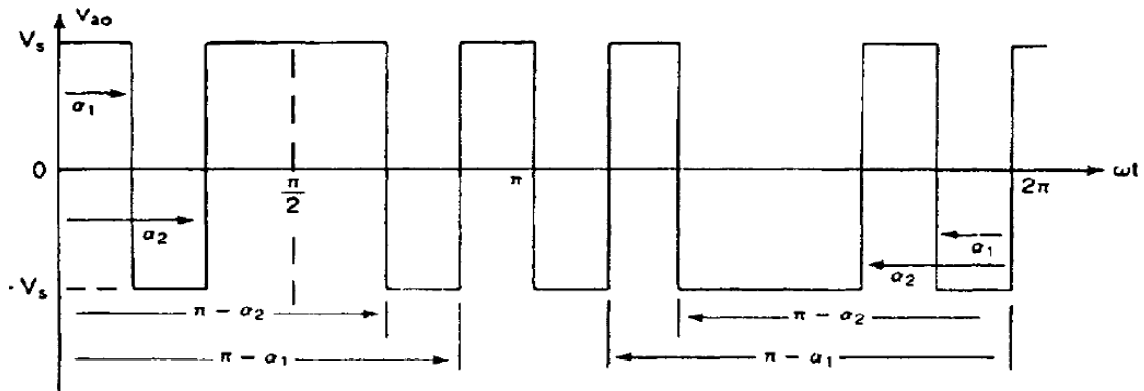


Figura 3.19 Señal donde se obtendrán los tiempos.

3.5 Tiempos de Disparo de la Señal Generada

Una vez obtenida la salida, se procede a medir de manera segura los tiempos de disparo de la señal, así como los lapsos de pausa y su duración de todos ellos. Para ello los tiempos obtenidos los vaciamos en la segunda columna de la tabla y en la tercera columna se dividen los tiempos obtenidos por el factor común que en este caso es 64 para obtener la duración que nos servirán para realizar la programación del control PWM senoidal en el microcontrolador 16F84A y lo podemos apreciar en la tabla 3.1.

Status	Tiempo	Duración
Encendido	1080	17
Apagado	450	7
Encendido	5240	82
Apagado	450	7
Encendido	1080	17

Tabla 3.1.- Calculo para el Tiempo de Disparo.

3.6 Programación del PIC-16F84A

Para realizar la programación del Microcontrolador 16F84A es necesario contar con un programador que se adecue a las necesidades requeridas. Para ello, se utilizó el programador PIC-600 con puerto USB, que se conectada directamente a la computadora.

Paso seguido se realizó una pequeña rutina en el programador virtual de PICBasic para el microcontrolador 16F84A. Esta rutina genera en determinado tiempo una señal de disparo, conforme a los tiempos de medición obtenidos anteriormente. La señal de disparo, lo que hace es generar de forma manual una señal cuadrada, que es necesaria para utilizarla de modulador de la ganancia de inversor de corriente.

Posteriormente, se procedió al armado de cada uno de los componentes, el inversor, los drivers y en control, que no es más que una rutina del microcontrolador 16F84A. En las salidas de inversor, Ho y Lo, se conecta una resistencia, la cual. Si el controlador funciona correctamente empezará a calentarse por la acción de la corriente que pase por ella.

Para comprobar que trabaje correctamente el controlador, se utilizó un osciloscopio digital en donde fue conectado a la entrada del inversor donde se tomaban muestras de la señales, para comprobar que el controlador este generando la señal cuadrada senoidal. Después de múltiples pruebas se concluyó que el programador virtual no maneja velocidades menores de microsegundos (μs), por ello la señal de salida del control no reflejaba la señal cuadrada y lo único que mostraba el monitor del osciloscopio era el ruido en la señal. Aunado a esto el PIC 16F84A no se encontraba sujetado de manera correcta a la base, por esta razón no se podía trabajar de manera adecuada.

Una vez analizado cada uno de los errores, se optó en primera instancia por cambiar el PIC 16F84A para tener un mejor control sobre él, a lo cual, para solucionar este error se utilizó el PMB para evitar cambiar de PIC. Lo segundo fue cambiar el programador por otro que manejara el lenguaje ensamblador ya que básicamente permite manejar grandes velocidades para cada uno de los tiempos de disparo menores a microsegundos utilizando el US-Burn, Una vez solucionados los problemas se procedió a realizar las pruebas.

3.7 Cruce por Cero

Un detector de cruce por cero se implementa utilizando el pin RB0 el cual es capaz de detectar alguna interrupción externa al PIC, en este caso se logra utilizando los flancos de subida o de bajada.

El voltaje de la línea eléctrica es de 120V, si aplicamos ese voltaje directamente a un pin del PIC este sería dañado en segundos. El PIC tiene un circuito de protección en las terminales de entrada/salida, este circuito está formado por diodos que protegen al PIC de cualquier valor mayor a VDD y menor a VSS como se puede observar en la Figura 3.20. Ellos pueden tomar varios miliamperímetros de corriente sin ocasionarle ningún daño físico al PIC.

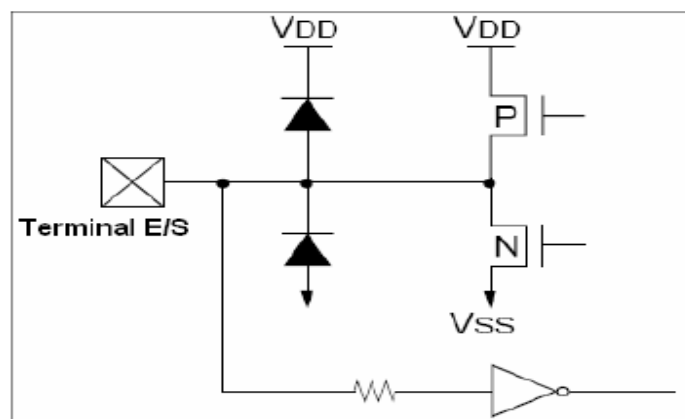


Figura 3.20.- Circuito de Protección

Los voltajes más altos en las entradas del PIC se pueden utilizar siempre y cuando su corriente sea limitada, esto se logra conectando una resistencia de 5Ω en serie al pin de entrada del PIC.

Para calcular la corriente utilizamos la ley de ohm que podemos observar en la Ecuación 3.1:

$$i = \frac{v}{r} \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

Resolviendo la Ecuación anterior obtenemos:

$$i = \frac{120}{5 * 10^6} = 24\mu\text{A} \quad (\text{Ecuación 3.2})$$

La corriente máxima que un PIC puede soportar cuando está recibiendo sobre voltaje en una de sus terminales es de $\pm 500\mu\text{A}$ y el resultado de la Ecuación anterior es de $24\mu\text{A}$, por lo tanto la resistencia elegida es de $5\text{M}\Omega$ que podemos apreciar cómo se conecta en la Figura 3.21 de un circuito detector por cero.

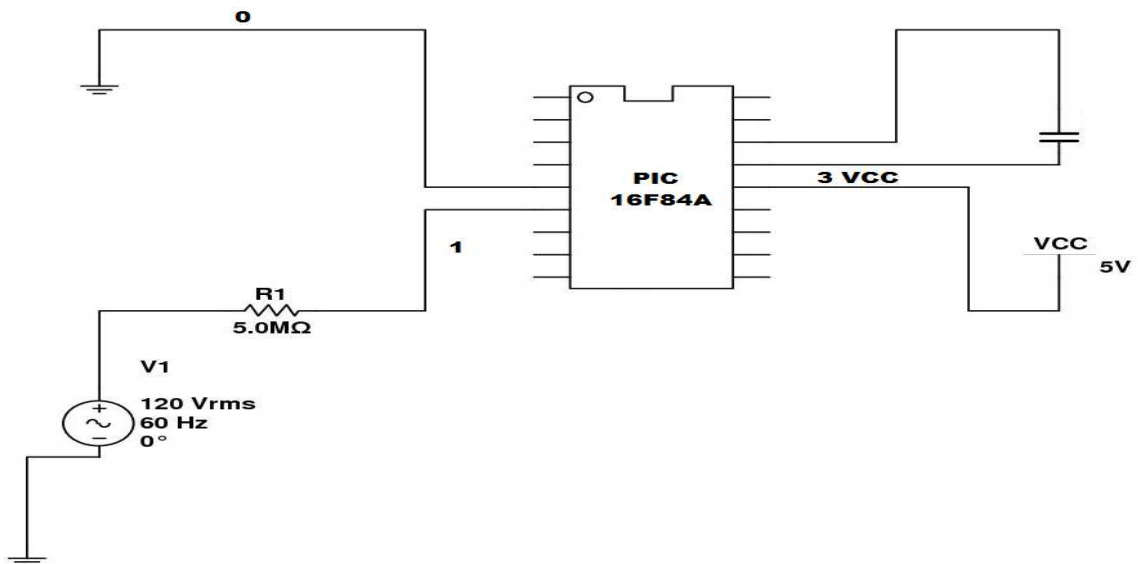


Figura 3.21.- Detector de Cruce por Cero.

CAPÍTULO IV
SIMULACIONES Y RESULTADOS
EXPERIMENTALES

En este capítulo se presentan los resultados de simulación y pruebas experimentales realizadas al inversor de corriente.

Se procedió a realizar el armado de cada una de las etapas para realizar las pruebas del control. Se conectan los drivers en cada una de las ramas del inversor (salidas). A su vez, los drivers son conectados a una fuente de alimentación independiente. El control es conectado a los drivers para que generen la señal PWM senoidal que inyecta a los transistores MOSFETs del Inversor.

4.1 Simulación del control

La etapa de simulación permite verificar las condiciones de diseño antes de implementar la construcción física. En este trabajo se realizó la simulación tanto de la etapa de control como de la etapa de potencia.

El control tiene como función principal reducir al máximo el número de armónicos generados por el inversor de cada tren de pulsos que se obtienen de las diversas ramas de los drivers, como resultado de esto se obtienen una señal senoidal.

El control para el caso de este trabajo, está basado en la comparación de dos señales, que genera como resultado un tren pulsos modulados (PWM). Para realizar la simulación del control se empleó el programa PSIM 6. (Figura 4.1).

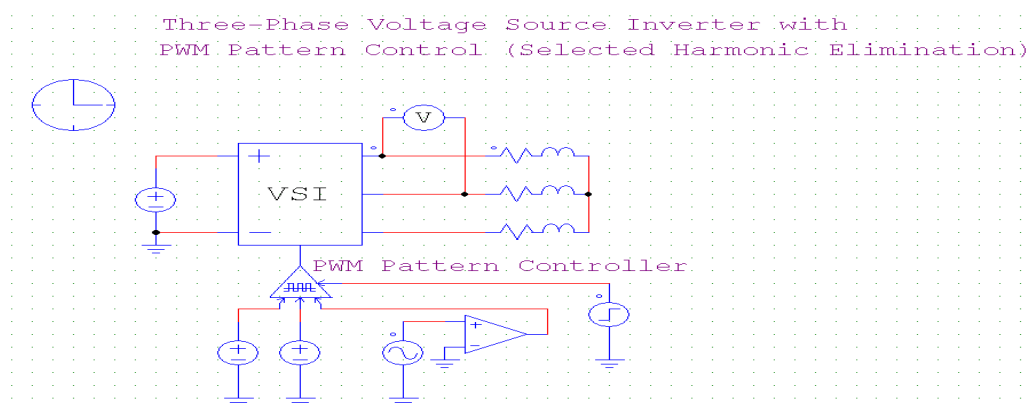


Figura 4.1 Imagen de la Simulación del Control PWM Programado.

Para la simulación del control se empleó el bloque “PWM Pattern Controller” que nos permite programar las conmutaciones de acuerdo a las ecuaciones descritas en la sección 2.12. Esto permite una eliminación selectiva de armónicas. La simulación nos permite visualizar el voltaje de salida generado por el inversor mediante una herramienta de gráficas (Figura 4.2).

Frecuencia	60Hz
Amplitud	30v
Resistencia	220Ω
Inductancia	0

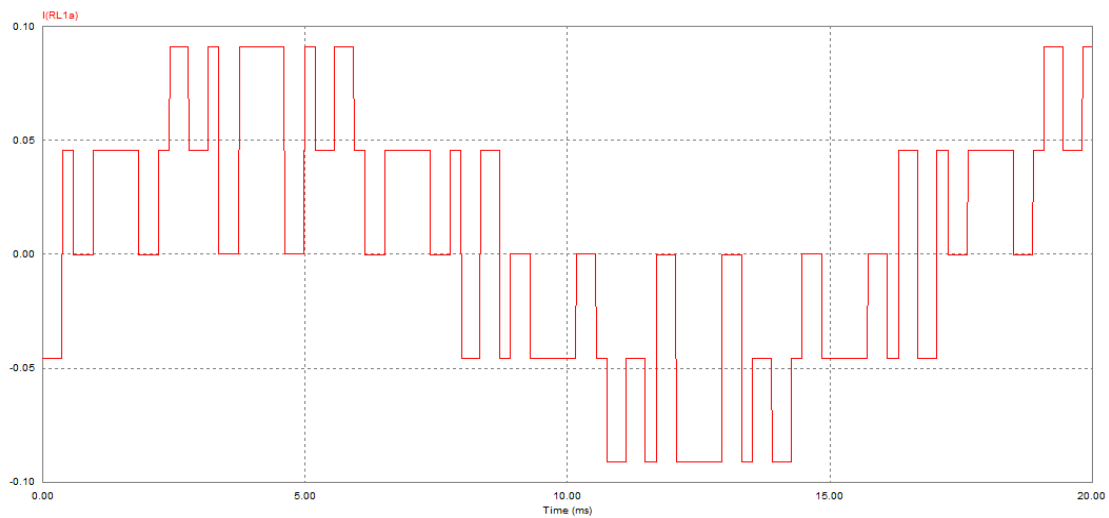


Figura 4.2.- Simulación de un control PWM programado.

Se observa una señal con conmutaciones programadas que tienen como función la eliminación de armónicos. La Figura 4.3 presenta el espectro en frecuencia de la salida generada por el Inversor. Como se observa aún existe una cantidad de armónicos en la señal, lo que significa que es necesario aplicar filtros pasivos que permitan obtener una forma de onda senoidal a la salida del inversor.

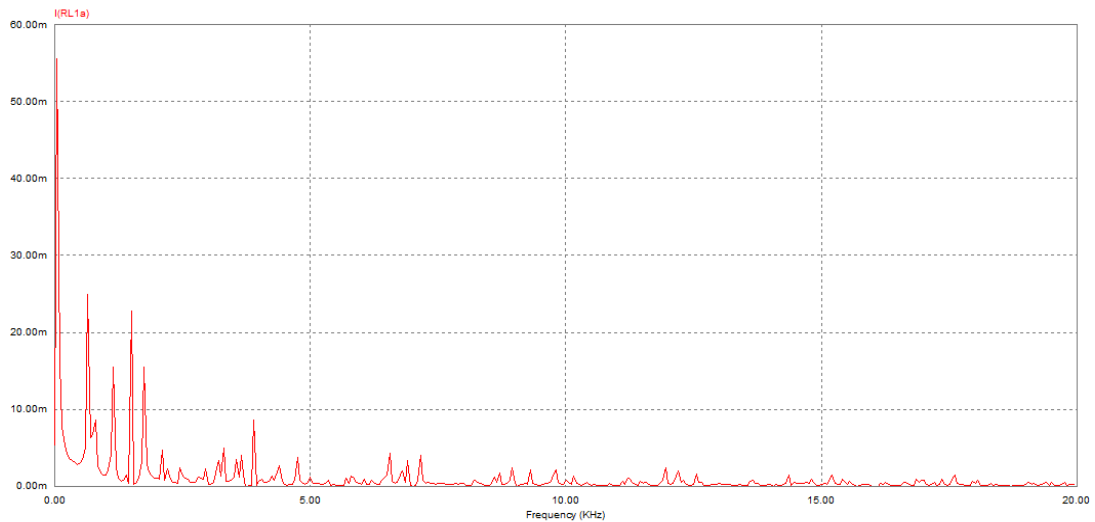


Figura 4.3.- Espectro en frecuencia del PWM programado.

4.2 Obtención de la Señal Senoidal

Como el inversor solo manda una señal cuadrada y unos de los objetivos es obtener una señal senoidal, se requiere filtrarla, esto se logra a través de filtros pasivos (LC). A continuación se muestra la optimización empleando filtros LC a la salida del inversor. La figura 4.4 muestra la salida del inversor y su contenido armónico al incrementar el valor de la inductancia de salida. Se nota una mejor forma de onda (tendencia senoidal) con una reducción del espectro (Fig. 4.5).

Frecuencia	60Hz
Amplitud	30v
Resistencia	220 Ω
Inductancia	100m

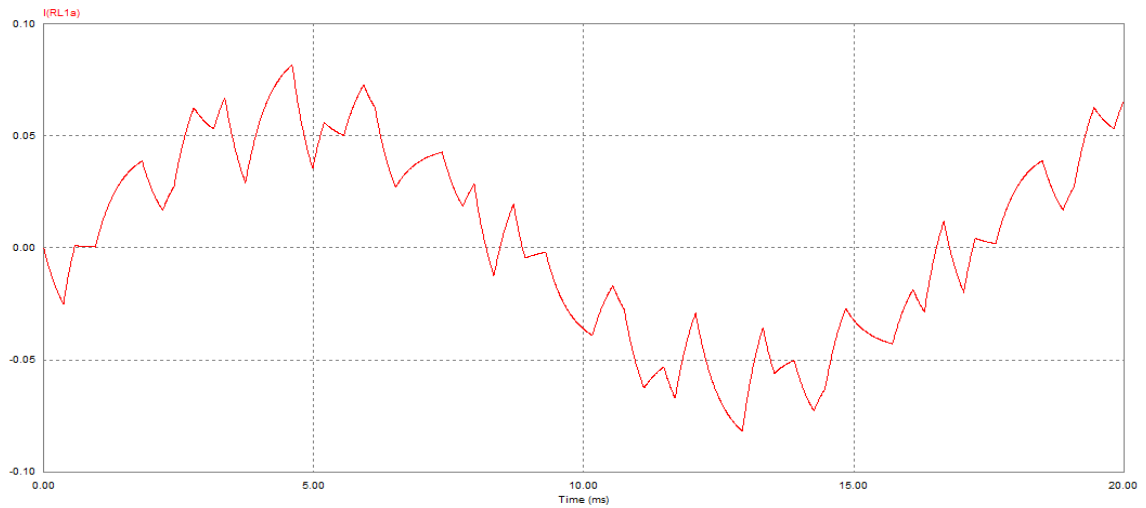


Figura 4.4.- Salida del inversor mejorada con filtro RL.

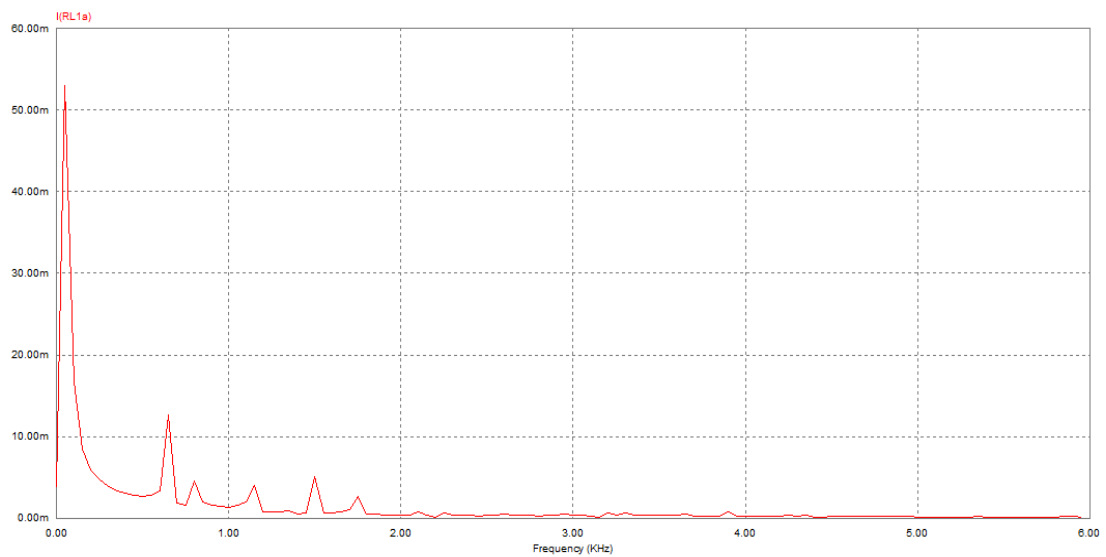


Figura 4.5.- Espectro en frecuencia del PWM programado con filtro RL.

La figura 4.6 Muestra el voltaje de salida del inversor al optimizar el filtro RL. Se nota una forma de onda ya senoidal con un mínimo contenido armónico (Fig. 4.7).

Frecuencia	60Hz
Amplitud	30v
Resistencia	220Ω
Inductancia	1H

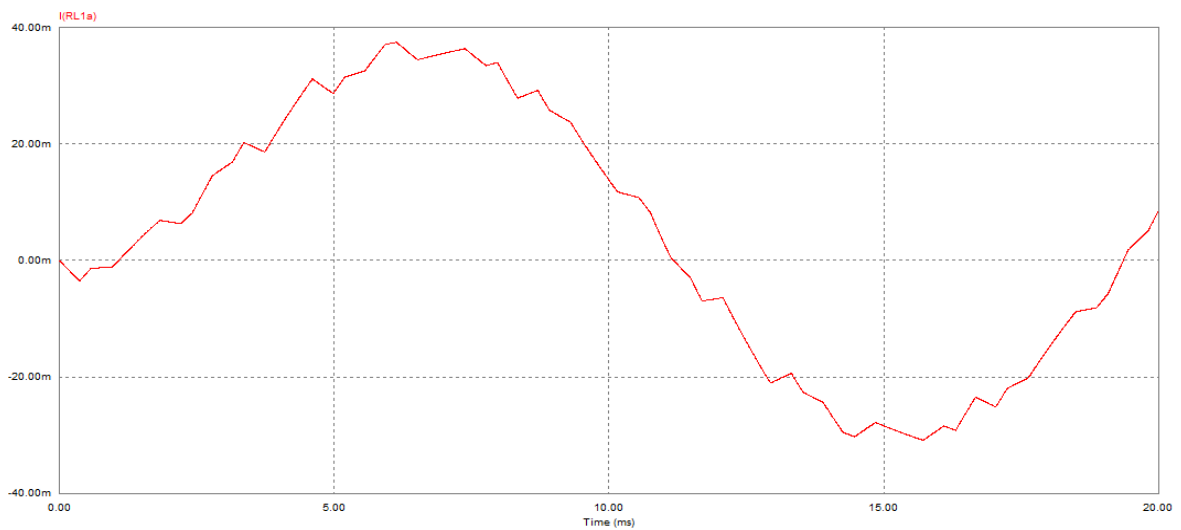


Figura 4.6.- Salida del inversor con filtro RL optimizado.

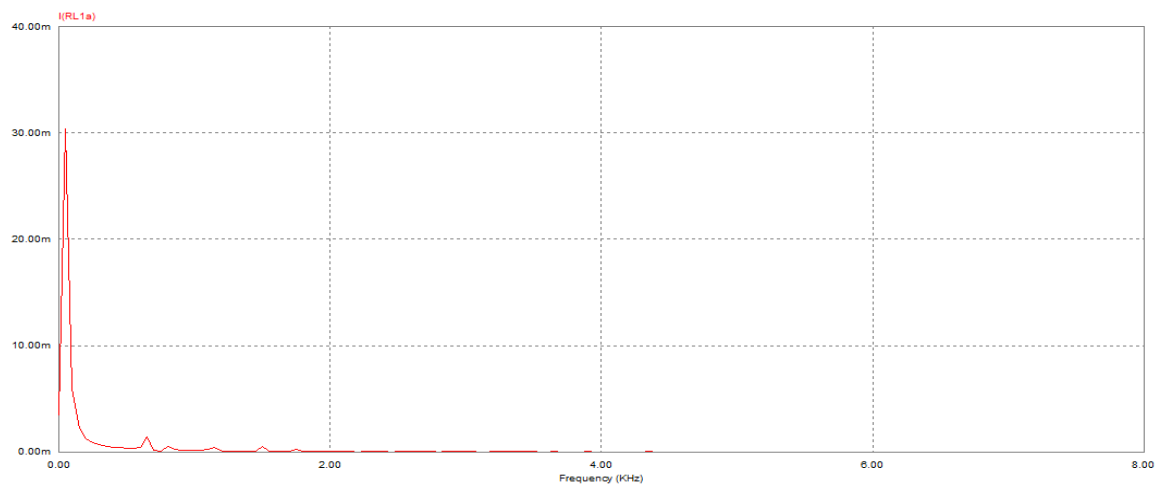


Figura 4.7.- Espectro en frecuencia del PWM programado con filtro RL Optimizado.

4.3 Resultados de Pruebas Experimentales

Se toman las señales de salida del inversor con la ayuda de un osciloscopio digital para verificar las señales generadas. La figura 4.8 muestra las señales de control para un inversor de onda cuadrada. Se aprecia que hay que generar una señal para cada rama de manera alterna para evitar cortocircuito en alguna rama del inversor. Este inversor tiene la característica de solo generar la CA (cuadrada) tal como se muestra en la figura 4.9, sin atender el contenido armónico (4.10).

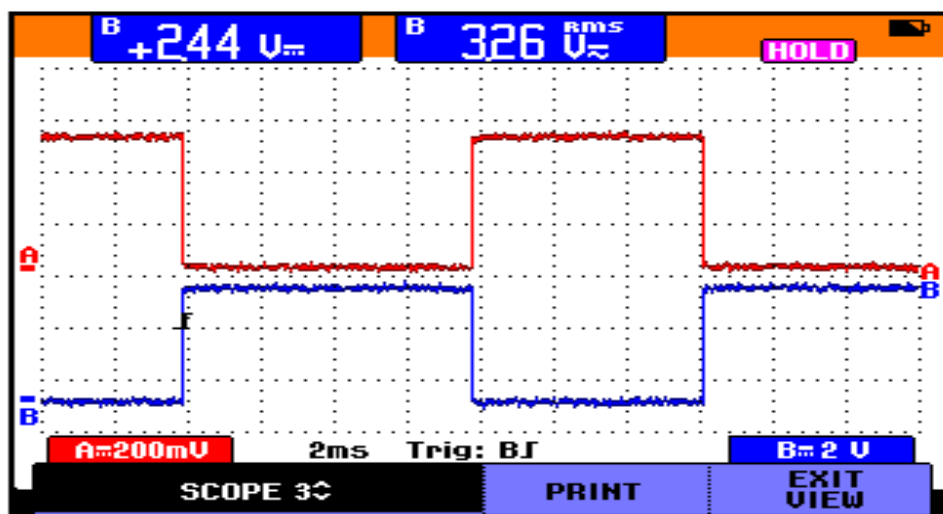


Figura 4.8.- Señales de control para cada rama del inversor.

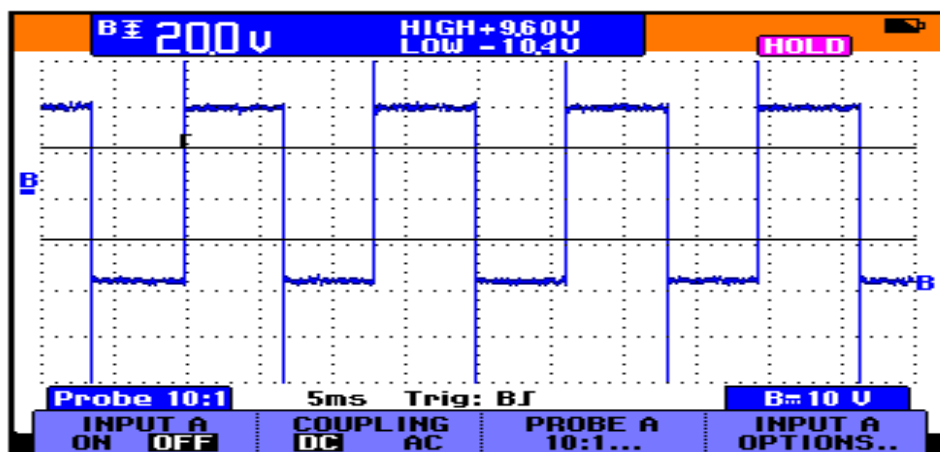


Figura 4.9.- Voltaje de salida de un inversor de onda Cuadrada.

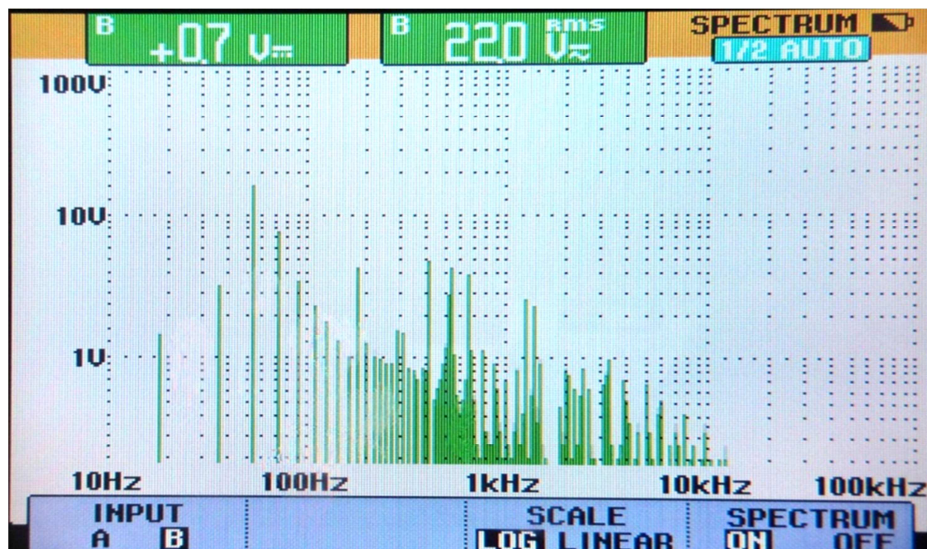


Figura 4.10.- Contenido armónico del Inversor de Onda Cuadrada.

Al implementar un control de PWM programado las señales de control incluyen conmutaciones programadas que permiten la eliminación de armónicos. La Figura 4.11 muestra las señales de control de cada rama. De igual manera se deben evitar las conmutaciones simultáneas entre la señal de cada rama.

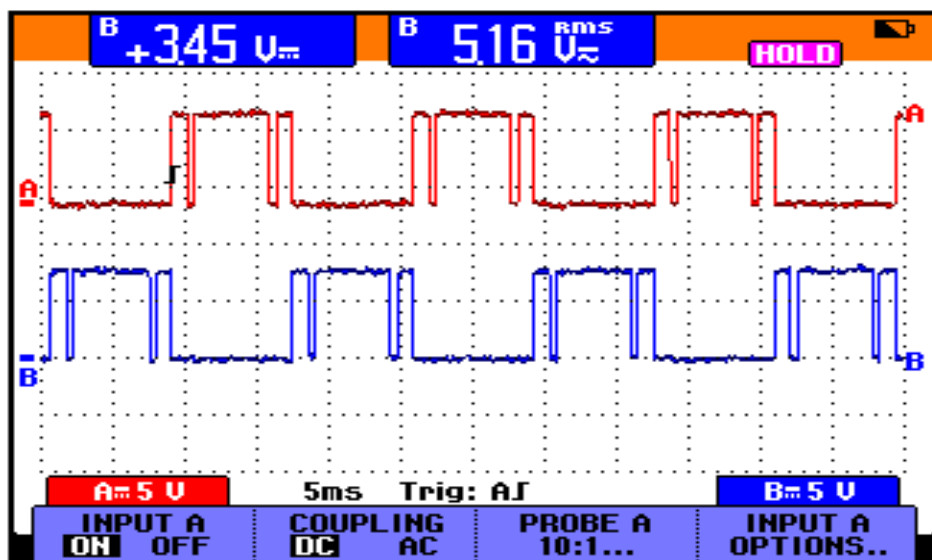


Figura 4.11.- Señales de control para PWM programado.

La figura 4.12 muestra el voltaje de salida en un inversor con control PWM programado. Difiere del inversor anterior al incluir conmutaciones adicionales en cada semiciclo.

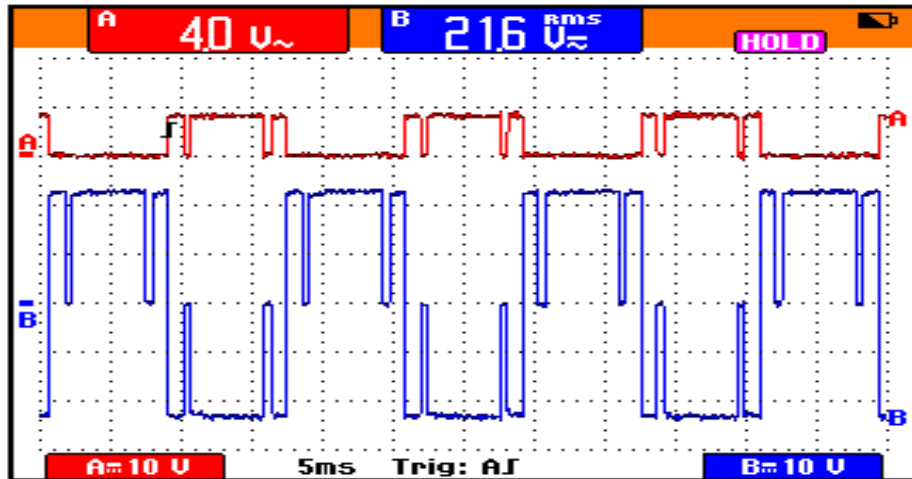


Figura 4.12.- Voltaje de salida de un inversor con control PWM programado.

La figura 4.13 muestra el contenido armónico del inversor con control PWM programado, es notable la reducción de los armónicos en este inversor. Cabe señalar que a medida que logremos una mejor calidad de la energía (forma senoidal) los efectos negativos por distorsión armónica se reducirían en nuestra red

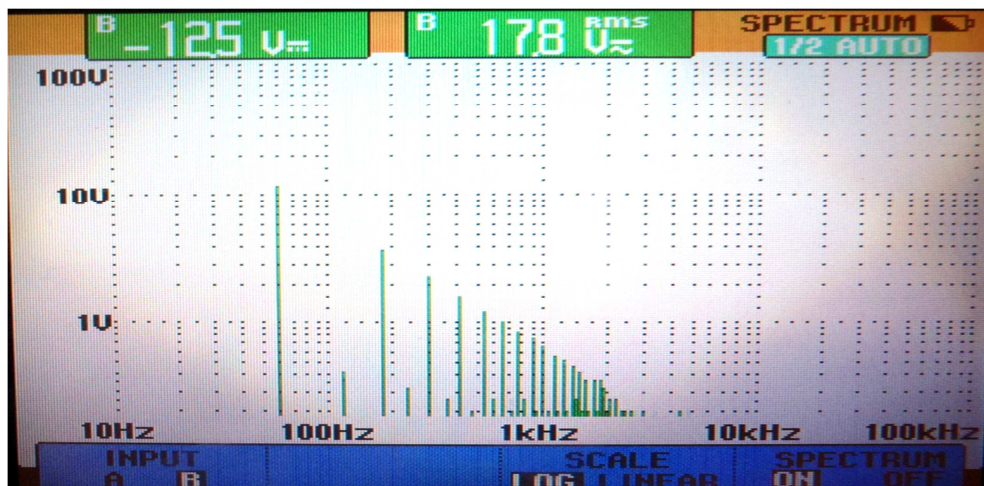


Figura 4.13.- Contenido armónico del Inversor con control PWM programado.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

Se puede decir que en la conversión de energía CD-CD Y CD-CA utilizando sistemas de captación fotovoltaicos y dada la baja eficiencia de las celdas solares que actualmente se encuentran a nivel comercial y que varía entre un 15 y 35%, no es recomendable tener en el sistema de conversión de energía, convertidores que consuman demasiada energía en la etapa de potencia como los convertidores tradicionales (puente H, etc.), puesto que en aplicaciones de alta potencia y alto voltaje los inversores de dos niveles tienen limitaciones para operar a altas frecuencias, principalmente a causa de las pérdidas por conmutación y limitaciones de las especificaciones nominales de los dispositivos de potencia. También se puede decir, que la energía que diariamente se recibe en nuestro país proveniente del Sol, es un recurso gratuito, inagotable, que debe ser aprovechado ya que no contamina y no depende de ningún recurso terrestre.

En este trabajo se analizó la conversión de CD-CA para la frecuencia comercial de 60 Hertz utilizando la topología puente completo. Se implementó en primera instancia un inversor de onda cuadrada para comparar con el inversor de PWM programado.

Se verificó la técnica de control PWM programado, usando un micro controlador de la familia PIC. Se empleó el lenguaje ensamblador al requerir de tiempos más pequeños de conmutación (en el orden de micros segundos). De igual manera se empleó simuladores para verificar el funcionamiento previo a la implementación.

Se puede concluir que el empleo de modernas técnicas de control para inversores nos permite mejorar la calidad de la energía eléctrica generada. Se verificó con dos técnicas de control (PWM programada y onda cuadrada) en la misma etapa de potencia. Es notable el mejoramiento de la distorsión armónica con el control PWM programado.

En el prototipo se pudo observar que los dispositivos de potencia, están sometidos a menor estrés, debido a que se utilizó disminución de armónicos, la frecuencia de conmutación se incrementó y no hubo variación en la forma de onda del voltaje en la carga.

Los resultados de las pruebas fueron satisfactorios en todo sentido. El inversor funcionó correctamente y eficientemente, entregando señales de ondas cuadradas y los drivers junto con el control PWM programado logró entregar la salida de la señal para su correcta sincronización con la corriente realizando la implementación digital de las técnicas de control del PWM programado.

Más importante aún fue que se obtuvo una onda de voltaje similar a las simulaciones propuestas en anteriormente, con mínima distorsión armónica, tanto para el voltaje como para la corriente del inversor.

Se puede concluir que se lograron todos los objetivos planteados para el desarrollo de prototipo de inversor, en cuanto a tamaño, potencia y operación. Por otro lado, los resultados experimentales obtenidos muestran un excelente comportamiento.

Parte de lo que no se consideró dentro del alcance de la tesis y que se queda propuesto como trabajo a realizar en el futuro es:

- Algunos aspectos por seguir estudiando son la interconexión con la red, la optimización del transformador de salida y las pruebas de confiabilidad
- Explorar a fondo otras aplicaciones de los inversores multinivel, tales como control de motores y la aplicación en UPS.
- Realizar la construcción de un filtro activo utilizando el inversor multinivel.
- Miniaturizar el diseño actual para volverlo lo más portátil posible.

BIBLIOGRAFÍA

1. **Centro Mario Molina.** *Balance Nacional de Energía 2004 - 2005.* Mexico : INEGI, 2005.

2. *Tendencias Actuales en el Diseño de Convertidores.* **Chan-Puc Freddy, Calleja G. Hugo, Sánchez H. Víctor, Acosta O. Roberto, Torres M. Emmanuel.** 2, s.l. : REVISTA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y COMPUTACIÓN, Diciembre 2009, Vol. 7.

3. **DR. RODOLFO ECHAVARRÍA SOLÍS, M.C. SINUHÉ RAMÍREZ GUERRERO.** ANÁLISIS Y DESARROLLO DE UN INVERSOR MULTINIVEL. *TESIS.* CUERNAVACA, MORELOS : s.n., 2002.

4. **CONTRERAS, ING. JAVIER AGUIRRE.** INVERSORES SU USO Y APLICACIÓN. *TESIS.* SAN NICOLAS DE LAS GARZA : s.n., 2000.

5. **ALBERTO ANDRES BRETÓN SCHUWIRTH.** PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE. [En línea] [Citado el: 12 de FEBRERO de 2011.] <http://web.ing.puc.cl/~power/paperspdf/dixon/tesis/Breton.pdf>.

6. **RASHID, MUHAMMAD H.** *ELECTRONICA DE POTENCIA.* SEGUNDA EDICION. MEXICO : LITOGRAFIA INGRAMEX , 1995.

GLOSARIO

Antiparalelo.- Se entiende por antiparalelo o circuito antiparalelo, a aquél que está formado por dos dispositivos conectados en paralelo, pero con una polaridad invertida. Las conexiones en antiparalelo más comunes se dan en dispositivos como triacs y diodos. Seguidamente se muestran algunos ejemplos.

Armónicos.- En sistemas eléctricos de corriente alterna los armónicos son, igual que en acústica, frecuencias múltiplos de la frecuencia fundamental de trabajo del sistema y cuya amplitud va decreciendo conforme aumenta el múltiplo. En el caso de sistemas alimentados por la red de 50 Hz, pueden aparecer armónicos de 100, 150, 200Hz.

Los componentes armónicos se definen como un componente de orden superior a 1 de la serie de Fourier de una cantidad periódica.

Cuando se habla de los armónicos en las instalaciones de energía, son los armónicos de corriente los más preocupantes, puesto que son corrientes que generan efectos negativos. Es corriente trabajar únicamente con valores correspondientes a la distorsión armónica total.

Conmutación.- En electricidad y electrónica, las leyes del álgebra de Boole y de la lógica binaria, pueden estudiarse mediante circuitos de conmutación. Un circuito de conmutación estará compuesto por una serie de contactos que representarán las variables lógicas de entrada y una o varias cargas que representarán las variables lógicas o funciones de salida.

Los contactos pueden ser normalmente abiertos o normalmente cerrados. Los primeros permanecerán abiertos mientras no se actúe sobre ellos (por ejemplo al pulsar sobre interruptor, saturar un transistor, etc.). Los contactos normalmente cerrados funcionarán justamente al contrario. Esto significa que si se actúa sobre un contacto normalmente abierto se cerrará y si se hace sobre uno normalmente cerrado se abrirá.

Convertidor Push-Pull.- es un tipo de convertidor DC a DC que utiliza un transformador para cambiar el voltaje de una fuente de alimentación de CC. Las principales ventajas de los convertidores de push-pull son su simplicidad y capacidad de escalar hasta un rendimiento de alta potencia, ganando a un lugar en los usos industriales de alimentación de CC.

Datasheet.- Un Datasheet es un documento que resume el funcionamiento y otras características de un componente con el suficiente detalle para ser utilizado por un ingeniero de diseño y diseñar el componente en un sistema.

Comienza típicamente con una página introductoria que describe el resto del documento, seguido por los listados de componentes específicos, con la información adicional sobre la conectividad de los dispositivos. En caso de que haya código fuente relevante a incluir se une cerca del extremo del documento o se separa generalmente en otro archivo.

Diodos.- Es un componente electrónico de dos terminales que permite la circulación de la corriente eléctrica a través de él en un único sentido; en el sentido contrario no lo permite.

Dremel.- La herramienta giratoria dremel es ligera, compacta y se adapta a múltiples tareas, por lo cual resulta fácil de usar. Funciona de manera distinta a las otras herramientas que haya podido tener. Gracias a sus más de 150 accesorios, la podrá utilizar para cortar, lijar, contornear, perforar, pulir, bruñir, alisar, rebajar, decapar, limpiar y más cosas. Encontraras cientos de usos para esta herramienta en su casa, taller, industria. Las herramientas rotatorias no funcionan como las demás herramientas que se basan en la fuerza bruta para hacer su trabajo. Las herramientas rotatorias dremel (fresadoras) usan la velocidad. ¡Muy alta velocidad!. De hecho gira a velocidades de hasta 35.000 rpm. A esta velocidad la herramienta rotatoria dremel con una broca cortadora para alta velocidad puede realizar la increíble cantidad de 4.000 cortes por segundo. Esto es lo que llamamos la ventaja de la velocidad. La velocidad es la que hace el trabajo, usted sólo guía la herramienta.

Filtro LC.- En un circuito serie con una resistencia R, una bobina L y un condensador C.

Fotón.- es la partícula elemental responsable de las manifestaciones cuánticas del fenómeno electromagnético, siendo la partícula portadora de todas las formas de radiación electromagnética, incluyendo a los rayos gamma, los rayos X, la luz ultravioleta, la luz visible (espectro electromagnético), la luz infrarroja, las microondas, y las ondas de radio.

Gj.- El gigajulios (Símbolo GJ) es igual a mil millones julios. Seis gigajulios es sobre la cantidad de potencial de energía química en un barril de petróleo, su combustión.

Inversor.- Es un dispositivo eléctrico que convierte la corriente directa (DC) a corriente alterna (CA), la CA puede ser convertida en cualquier tensión y la frecuencia con el uso apropiado de los transformadores, la distribución, y los circuitos de control. Inversores de estado sólido no tienen partes móviles y se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, desde pequeñas fuentes de alimentación conmutadas en los ordenadores, a los grandes servicios públicos eléctricos de alto voltaje de corriente directa aplicaciones de transporte de energía mayor que. Los inversores se utilizan comúnmente para la fuente de alimentación de CA con fuentes de corriente, tales como módulos solares o baterías.

Irradiancia.- Es la magnitud utilizada para describir la potencia incidente por unidad de superficie de todo tipo de radiación electromagnética. En unidades del sistema internacional se mide en W/m^2 .

Kj.- El kilojoule (símbolo kj) es una unidad de medida de calor y energía que se utiliza para cuantificar grandes cantidades de energía equivalente a 1.000 julios.

kW.- El kilovatio (símbolo kW), igual a mil vatios, se usa habitualmente para expresar la potencia de motores, y la potencia de herramientas y máquinas.

KWh.- El kilovatio hora (símbolo kWh), es una unidad de energía. Equivale a la energía desarrollada por una potencia de un kilovatio durante una hora, equivalente a 3,6 millones de julios, El kilovatio/hora se usa generalmente para la facturación de energía eléctrica, dado que es más fácil de utilizar que la unidad de energía del Sistema Internacional de Unidades que es el julio la cual corresponde a un vatio por cada segundo (W/s).

M2.- El metro cuadrado (Símbolo m²), es el área encerrada en un cuadrado cuyos lados miden un metro de largo y es utilizado para construcción o delimitar áreas. Es la unidad básica de superficie en el Sistema Internacional de Unidades.

Membrana de intercambio.- Una membrana polimérica (hidrógeno/oxígeno de una celda de combustible) conductora de protones (el electrolito), separa el lado del ánodo del lado del cátodo.

En el lado del ánodo, el hidrógeno que llega al ánodo catalizador se disocia en protones y electrones. Los protones son conducidos a través de la membrana al cátodo, pero los electrones están forzados a viajar por un circuito externo (produciendo energía) ya que la membrana está aislada eléctricamente. En el catalizador del cátodo, las moléculas del oxígeno reaccionan con los electrones.

Microcode Studio Plus.- El MicroCode Studio es una interface en el cual escribes el código del programa, te corrige errores de sintaxis, te ordena visualmente las subrutinas... El Microcode queda enlazado con el PICBASIC y el IC-PROG, de manera que una vez que terminas el programas, compilas y generas el archivo *.HEX, los programas los guardas en formato Picbasic *.BAS.

Modulación.- Es la onda generada por el oscilador se hace variar la frecuencia de acuerdo con las variaciones de la corriente de audiofrecuencia, en este caso la amplitud se mantiene estándar. En el caso de la amplitud modulada, realmente es una combinación de modulación de frecuencia, aunque en mínima parte, la amplitud es la que sufre cambios muy marcados

Monofásico.- Un sistema de corriente monofásico es aquel que consta de una única corriente alterna o fase y por lo tanto todo el voltaje varía de la misma forma.

MPLAB.- Es un software que contiene un editor, un ensamblador, un emulador y un simulador, todos ellos integrados en el mismo ambiente.

Muecas de Voltaje.- Son un cambio en dirección positiva o negativa en la forma de onda de tensión alterna que se repite en ciclos sucesivos. Se visualiza al desplegar la forma de onda de tensión alterna en la pantalla de un osciloscopio o en una representación gráfica en función del tiempo.

Mw.- El Megavatio (símbolo Mw), Unidad de potencia en el Sistema Internacional equivalente a un millón de vatios. Se emplea para medir potencias muy grandes, donde las cifras del orden de los cientos de miles no resultan significativas. Como es múltiplo del vatio adquiere en forma lineal sus equivalencias.

MWh.- El Megavatio hora (símbolo MWh) es una medida de energía eléctrica equivalente a la energía suministrada por un megavatio en una hora. Mega es el prefijo métrico para un millón, en este caso se trataría de un millón de vatios o de mil kilovatios suministrados en una hora.

El MWh se utiliza para medir el consumo de grandes industrias o conglomerados urbanos. También se utiliza para conocer el índice de producción de una central eléctrica, aunque para estos casos también se utiliza el concepto de megavatio año que equivale a la energía suministrada por una central eléctrica durante un año.

Onda Causi-Cuadrada.- es la una señal cuadrada inyectada a través de transformador obteniendo esta señal del otro lado aumentada o disminuida dependiendo del sentido en que utilices el transformador.

Onda Senoidal.- Es la corriente alterna (como su nombre lo indica) circula por durante un tiempo en un sentido y después en sentido opuesto, volviéndose a repetir el mismo proceso en forma constante y nos da una forma de onda llamada: onda senoidal. Este tipo de corriente es la que nos llega a nuestras casas y la usamos para alimentar la TV, el equipo de sonido, la lavadora, la refrigeradora, etc.

Pj.- El petajulio (símbolo Pj) es una unidad de medida de calor y energía que se utiliza para cuantificar grandes cantidades de energía.

Protocolo de Kioto.- El Protocolo de Kyoto es un acuerdo internacional asumido en 1997 en el ámbito de Naciones Unidas que trata de frenar el cambio climático. Uno de sus objetivos es contener las emisiones de los gases que aceleran el calentamiento global, y hasta la fecha ha sido ratificada por 163 países. Este acuerdo impone para 39 países que se consideran desarrollados en la contención o reducción de sus emisiones de gases de efecto invernadero.

Serie de Fourier.- es una serie infinita que converge puntualmente a una función periódica y continua a trozos(o por partes). Las series de Fourier constituyen la herramienta matemática básica del análisis de Fourier empleado para analizar funciones periódicas a través de la descomposición de dicha función en una suma infinita de funciones senoidales mucho más simples (como combinación de senos y cosenos con frecuencias enteras).

Trifásico.- Es un sistema de producción, distribución y consumo de energía eléctrica formado por tres corrientes alternas monofásicas de igual frecuencia y amplitud (y por consiguiente, valor eficaz) que presentan una cierta diferencia de fase entre ellas, en torno a 120° , y están dadas en un orden determinado. Cada una de las corrientes monofásicas que forman el sistema se designa con el nombre de fase.

Unión PN.- Es un dispositivo electrónico formado al unir un material de tipo P con uno de tipo N y cuenta con un par de terminales óhmicas que le permiten ser conectado a un circuito. La sección de material P es el ánodo del diodo, mientras que la sección tipo N es el cátodo. Es un dispositivo no lineal. Se dice que un diodo se encuentra polarizado directamente cuando la diferencia de potencial aplicada entre el ánodo y el cátodo es positiva. Si ésta es negativa, entonces el diodo se encontrará polarizado en inversa.

Ultiboard.- Ultiboard ofrece una plataforma fácil e intuitiva para diseñar tarjetas de circuito impreso (PCBs). El flexible entorno de diseño de Ultiboard ofrece funcionalidad automatizada para técnicas rápidas y manuales para control preciso. Con integración completa con Multisim, Ultiboard le ayuda a optimizar el diseño de PCB. Genere prototipos rápidamente para diseños profesionales o investigación académica.

- Herramientas intuitivas y sencillas de manejar para diseño y enrutado para definir PCBs fácilmente
- Entorno flexible optimizado para precisar o colocar rápidamente piezas y pistas de cobre
- Integración perfecta con Multisim para asegurar una fácil transferencia de las iteraciones de diseño
- Fácil exportación a formatos Gerber o DXF estándares en la industria para generar prototipos y fabricación

Us- Burn.- Es un programa, que analiza un archivo HEX-y las transferencias de la contiene los datos a través de USB al programador Brenner8 PIC o Brenner9.

Valor Rms.- El valor RMS es el valor del voltaje o corriente en C.A. que produce el mismo efecto de disipación de calor.

W.- El Vatio (símbolo W), Es el equivalente a 1 julio sobre segundo (1 J/s) y es una de las unidades derivadas. Expresado en unidades utilizadas en electricidad, un vatio es la potencia eléctrica producida por una diferencia de potencial de 1 voltio y una corriente eléctrica de 1 amperio (1 Voltio-Amperio) y la potencia eléctrica de los aparatos eléctricos se expresa en vatios si son de poca potencia.

ABREVIATURAS

Abreviatura o Acrónimo	Significado
BM	Banco Mundial
CA	Corriente Alterna
CD	Corriente Directa
CD- CA	Corriente Directa – Corriente Alterna
CFE	Comisión Federal De Electricidad
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático
CO2	Dióxido de Carbono
CRE	Comisión Reguladora de Energía
cSi	Cristal de Silicio
DATASHEET	Hoja de Especificaciones Técnicas
EMC	Disminución del acoplamiento magnético por sus siglas en inglés “Electronic magnetically coupled”
EMP	Protección contra Pulsos Electromagnéticos por sus siglas en inglés “Electronic magnetically Pulse”
ER	Energía Renovable
GEF	Fondo Mundial para el Medio Ambiente
Gj	Gigajulios
GTZ	Cooperación Técnica Alemana
GWH	Gigawatt/hora
Hz	Hertz
KG/PIB	Kilogramo / Producto Interno Bruto
Kj	KiloJulios
KW	Kilowatts
KWH/M2	Kilowatts / Metros Cuadrados
LCD	Pantalla de Cristal Liquido por sus siglas en ingles “liquid crystal display”
M ²	Metros Cuadrados
MOSFETS	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
MSPWM	modulación senoidal modificada PWM

Abreviatura o Acrónimo	Significado
MW	Megavatio
MWH	Megavatio / Hora
Pj	Petalulio
PJ/PIB	Petajulio / Producto Interno Bruto
PMB	PIC MILENIUM BOARD
PND	Plan Nacional de Desarrollo
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
PSE	Programa Sectorial de Energía
PSGE	Pequeño Sistema de Generación de Energía
PSGE	Pequeño sistema de generación de energía
pSi	Policristalinas de Silicio
PWM	Modulación por ancho de pulsos por sus siglas en inglés "Pulse-width modulation"
PYMES	Pequeña y Mediana Empresa
SENER	Secretaría de Energía
Si	Silicio
SiO	Monóxido de silicio
UPS	Fuente de alimentación ininterrumpida por sus siglas en inglés "uninterruptible power supply"
UPWM	modulación uniforme de ancho de pulso
USD	Dolar
USD/ M2	Dólar / Metro Cuadrado
V	Voltaje
VCD	Disposición del voltaje de entrada en múltiples
W	Vatio

ANEXOS

Anexo A.- Lista de Componentes y Herramientas

CANTIDAD	DESCRIPCIÓN
1	Batería
1 ½	Cable De Cobre
1	Cautín Tipo Lápiz De 35 Watts con Accesorios
1	Carrete de Estaño
1	Cloruro Férrico 220ml
20	Conectores para Cable
1	Juego De 5 Brocas Para Minitaladro
1	Juego de Desarmadores Miniatura
1	Marcador Con Tinta Indeleble
1	Malla para Desoldar
1	Minitaladro (DREMEL)
1	Módulo Cargador/Programador USB de Microcontroladores
2	Paquete de Hojas de Transferencia
2	Pasta Térmica
4	Placa Fenólica una Cara, De 20 X 20 cm
2	Base Para Circuito Integrado De 14 Patas
2	Base Para Circuito Integrado De 18 Patas
4	Capacitores Cerámicos Mod.103
8	Capacitores Electrolíticos 25v 2200µf
4	Cristal de Cuarzo 4Hz.
4	Diodos 1N4007
5	Disipadores De Calor de calor de 38mm mod. TO-220
4	LED Gigante de 10 Mm de Diferentes Colores
6	Mosfet IR640
4	Pic 16F84A
4	Pic 16F877A
2	Pic IR2110
5	Resistencia 220 Ω
12	Terminales de 2 Tornillos TRT-02
12	Terminales de 3 Tornillos TRT-03

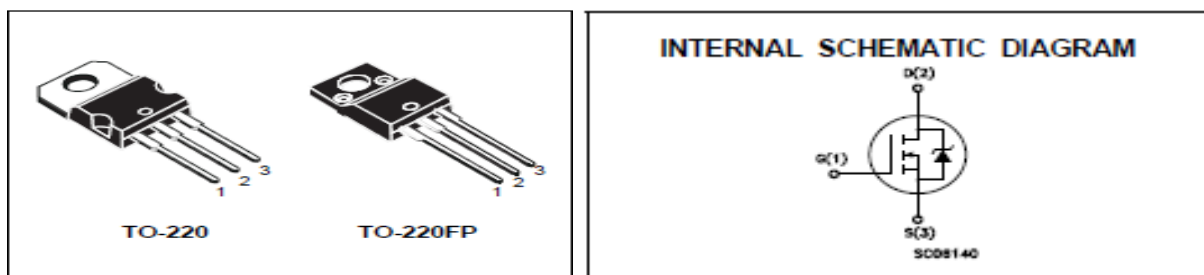
Anexo B.- Datasheet IRF640



**IRF640
IRF640FP**

N - CHANNEL 200V - 0.150- 18A TO-220/TO-220FP

MESH OVERLAY MOSFET



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value		Unit
		IRF640	IRF640FP	
V_{DS}	Drain-source Voltage ($V_{GS} = 0$)	200		V
V_{DGR}	Drain- gate Voltage ($R_{GS} = 20 \text{ k}\Omega$)	200		V
V_{GS}	Gate-source Voltage	± 20		V
I_D	Drain Current (continuous) at $T_c = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	18	18(**)	A
I_D	Drain Current (continuous) at $T_c = 100 \text{ }^\circ\text{C}$	11	11(**)	A
$I_{DM}(\bullet)$	Drain Current (pulsed)	72	72	A
P_{tot}	Total Dissipation at $T_c = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	125	40	W
	Derating Factor	1.0	0.32	$\text{W}/^\circ\text{C}$
$dv/dt(1)$	Peak Diode Recovery voltage slope	5	5	V/ns
V_{ISO}	Insulation Withstand Voltage (DC)	—	2000	V
T_{stg}	Storage Temperature	-85 to 150		$^\circ\text{C}$
T_J	Max. Operating Junction Temperature	150		$^\circ\text{C}$

(\bullet) Pulse width limited by safe operating area (1) $I_{SD} \leq 18\text{A}$, $di/dt \leq 300 \text{ A}/\mu\text{s}$, $V_{DD} \leq V_{(BR)DSS}$, $T_J \leq T_{JMAX}$
First Digit of the Datecode Being Z or K Identifies Silicon Characterized in this Datasheet

(**) Limited only by Maximum Temperature Allowed

Anexo C.- Datasheet IR2110

International
IR Rectifier

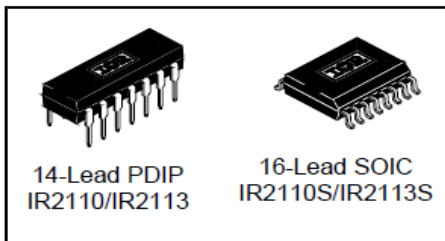
IR2110(S)/IR2113(S) & (PbF)

HIGH AND LOW SIDE DRIVER

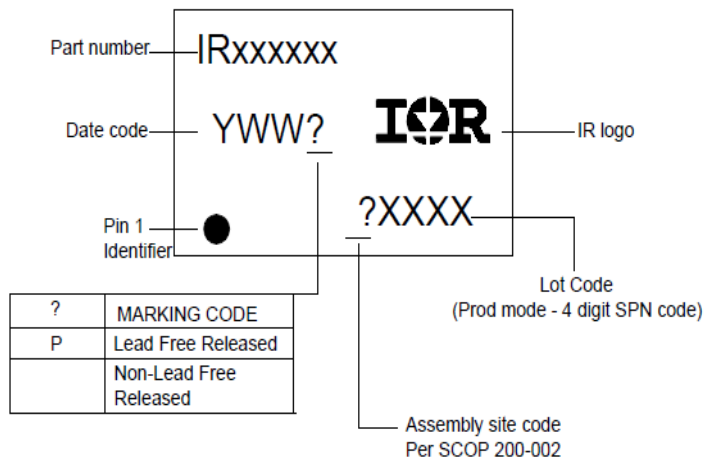
Product Summary

V_{OFFSET} (IR2110)	500V max.
(IR2113)	600V max.
$I_{\text{O+/-}}$	2A / 2A
V_{OUT}	10 - 20V
$t_{\text{on/off}}$ (typ.)	120 & 94 ns
Delay Matching (IR2110)	10 ns max.
(IR2113)	20ns max.

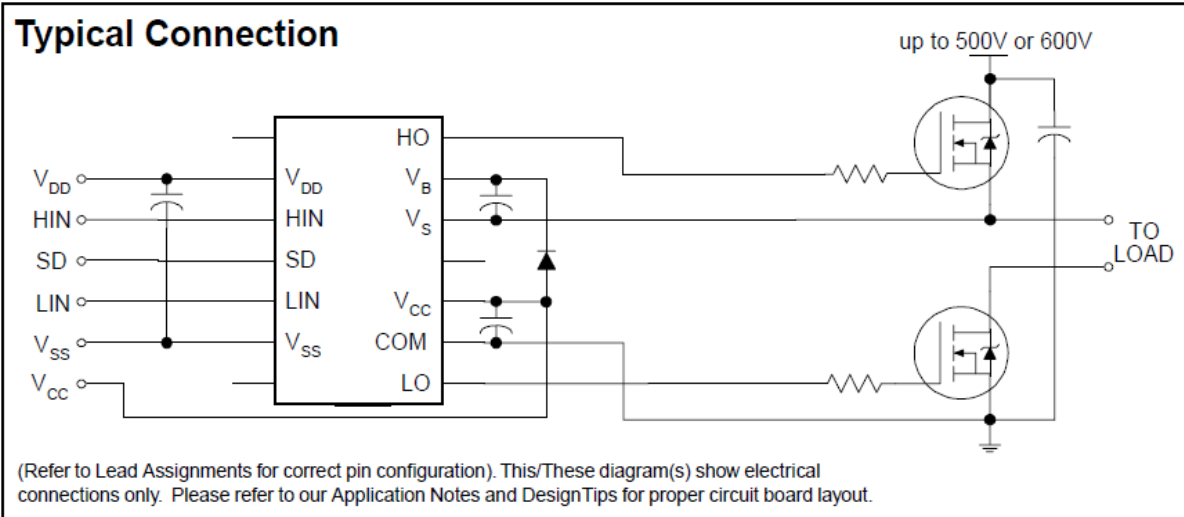
Packages



LEADFREE PART MARKING INFORMATION



Typical Connection



Anexo D.- Datasheet 1N4007



ON Semiconductor®

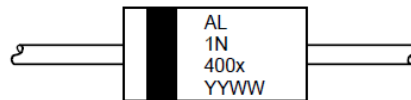
**1N4001, 1N4002, 1N4003,
1N4004, 1N4005, 1N4006,
1N4007**

Axial Lead Standard Recovery Rectifiers

MARKING DIAGRAM



**CASE 59-10
AXIAL LEAD
PLASTIC**



AL = Assembly Location
1N400x = Device Number
x = 1, 2, 3, 4, 5, 6 or 7
YY = Year
WW = Work Week

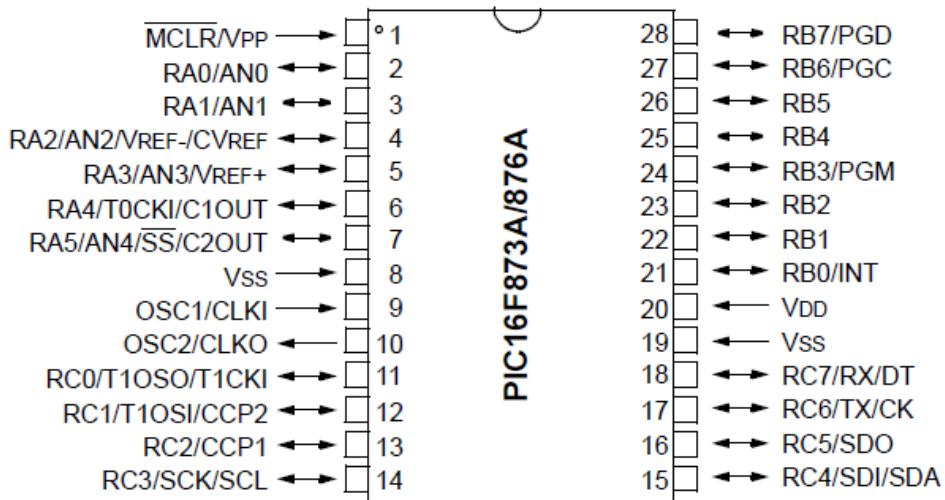
MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	1N4001	1N4002	1N4003	1N4004	1N4005	1N4006	1N4007	Unit
*Peak Repetitive Reverse Voltage Working Peak Reverse Voltage DC Blocking Voltage	V_{RRM} V_{RWM} V_R	50	100	200	400	600	800	1000	V
*Non-Repetitive Peak Reverse Voltage (halfwave, single phase, 60 Hz)	V_{RSM}	60	120	240	480	720	1000	1200	V
*RMS Reverse Voltage	$V_{R(RMS)}$	35	70	140	280	420	560	700	V
*Average Rectified Forward Current (single phase, resistive load, 60 Hz, $T_A = 75^\circ\text{C}$)	I_O	1.0							A
*Non-Repetitive Peak Surge Current (surge applied at rated load conditions)	I_{FSM}	30 (for 1 cycle)							A
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J T_{stg}	-65 to +175							$^\circ\text{C}$

Anexo E.- Datasheet 16F877A

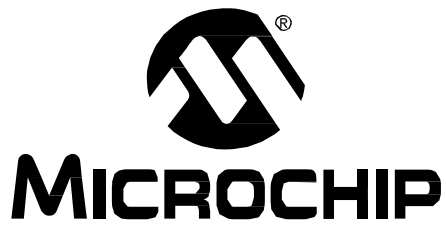


PIC16F87XA



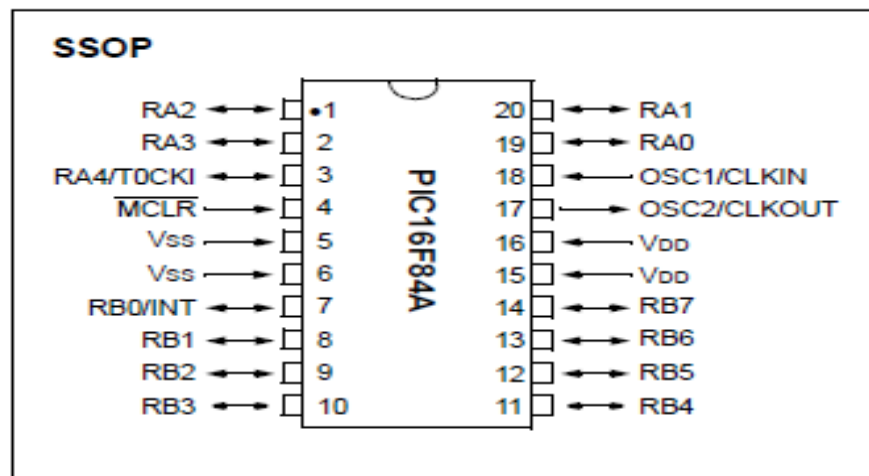
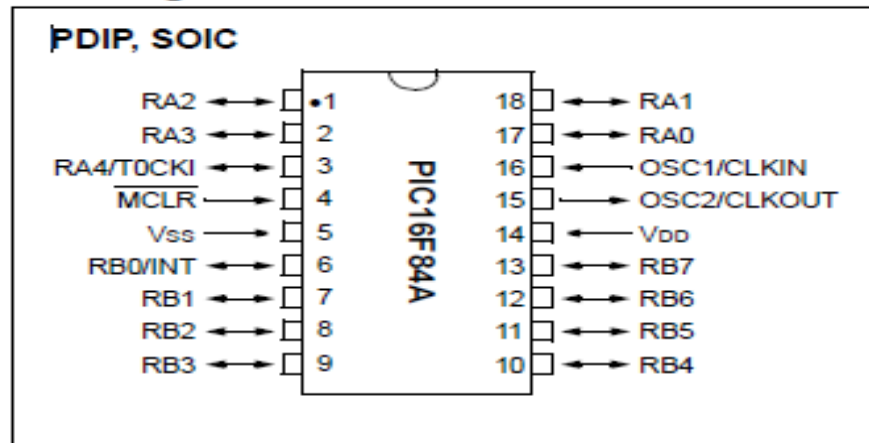
Device	Program Memory		Data SRAM (Bytes)	EEPROM (Bytes)	I/O	10-bit A/D (ch)	CCP (PWM)	MSSP		USART	Timers 8/16-bit	Comparators
	Bytes	# Single Word Instructions						SPI	Master I ² C			
PIC16F873A	7.2K	4096	192	128	22	5	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2
PIC16F874A	7.2K	4096	192	128	33	8	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2
PIC16F876A	14.3K	8192	368	256	22	5	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2
PIC16F877A	14.3K	8192	368	256	33	8	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2

Anexo F.- Datasheet 16F84A



PIC16F84A

Pin Diagrams



Anexo G.- Lista de Interconexión Interna del Inversor

Nombre de la Red	Dispositivo	PIN
COM	Conector 3	Pin 1
	Mosfet 2	Pin +OUT
	Mosfet 3	Pin +OUT
HO1	Resistencia 1	Pin 1
	Conector 1	Pin 5
HO1(2)	Resistencia 1	Pin 2
	Mosfet 1	Pin +IN
HO2	Resistencia 4	Pin 1
	Conector 2	Pin 5
HO2(2)	Resistencia 4	Pin 2
	Mosfet 2	Pin +IN
LO1	Resistencia 2	Pin 1
	Conector 1	Pin 1
LO1(2)	Resistencia 2	Pin 2
	Mosfet 2	Pin +IN

Nombre de la Red	Dispositivo	PIN
LO2	Resistencia 3	Pin 1
	Conector 2	Pin 1
LO2(2)	Resistencia 3	Pin 2
	Mosfet 3	Pin +IN
VCC	Mosfet 4	Pin REF
	Mosfet 1	Pin REF
	Conector 3	Pin 3
VS1	Conector 3	Pin 5
	Mosfet 1	Pin +OUT
	Mosfet 2	Pin REF
	Conector 1	Pin 3
VS2	Conector 3	Pin 7
	Mosfet 4	Pin +OUT
	Mosfet 3	Pin REF
	Conector 2	Pin 3

Anexo H.- Lista de Interconexión Interna del Driver

Nombre de la Red	Dispositivo	PIN
COM	Capacitor 1	Pin -
	Capacitor 3	Pin 1
	IR2110	Pin 13
	IR2110	Pin 2
	Conector 2	Pin 5
	Conector 1	Pin 5
HIN	IR2110	Pin 10
	Conector 2	Pin 7
HO	Conector 1	Pin 7
	IR2110	Pin 7
LIN	Conector 2	Pin 1
	IR2110	Pin 12
LO	Conector 1	Pin 1
	IR2110	Pin 1

Nombre de la Red	Dispositivo	PIN
SD	IR2110	Pin 11
	Conector 2	Pin 3
VB	Capacitor 2	Pin +
	Diodo 1	Pin C
	IR2110	Pin 6
VCC	Capacitor 1	Pin +
	Capacitor 3	Pin 2
	IR2110	Pin 9
	Diodo 1	Pin A
	IR2110	Pin 3
VS	Conector 2	Pin 9
	Capacitor 2	Pin -
	Conector 1	Pin 3
	IR2110	Pin 5

Anexo I.- Código PWM Programado

```
LIST P=16F84A ;Comando que indica el PIC usado
;=====
;=====
ETIQUETAS
;=====
;=====
W EQU 0X00
F EQU 0X01
;----- Register Files-----
TMR0 EQU 0X01
STATUS EQU 0X03
PORTA EQU 0X05
PORTB EQU 0X06
INTCON EQU 0X0B
OPTION_REG EQU 0X81
TRISA EQU 0X85
TRISB EQU 0X86
;----- INTCON Bits -----
INTF EQU 0x01
;----- OPTION Bits -----
INTEDG EQU 0x06

;----- STATUS Bits -----
RP0 EQU 0x05
Z EQU 0x02
;----- variable auxiliar -----
CONTA EQU 0X0C ;
;=====
;=====
MACROS
;=====
;=====
confport MACRO puerto, val1 ;macro para configurar un puerto
    bsf STATUS,RP0 ;se entra modo configuración
    movlw val1 ;W <-- val1 configura el Puerto como E/S
    movwf puerto ;W --> Puerto
    bcf STATUS,RP0 ;se sale modo configuración
endm
```

```

;=====
=====
ORG 0x00
GOTO inicio
;=====
=====
;CONFIGURACIÓN DE PUERTOS
;=====
=====
inicio
    confport TRISA,    0x00    ;configura puerto A como salida
    confport TRISB,    0x01    ;configura puerto B.0 como entrada
    confport OPTION_REG, 0XD5    ;1101 0101 activa flanco
ascendente y el TMR0 a 64us
;-----

pulse
    BSF PORTA,0          ;prende el puerto A.0
    CALL pausa1080      ;llama pausa
    BCF PORTA,0          ;apaga puerto A.0
    CALL pausa450       ;llama pausa
    BSF PORTA,0          ;prende el puerto A.0
    CALL pausa5240      ;llama pausa
    BCF PORTA,0          ;apaga puerto A.0
    CALL pausa450       ;llama pausa
    BSF PORTA,0          ;prende el puerto A.0
    CALL pausa1080      ;llama pausa
    BCF PORTA,0          ;apaga puerto A.0

    BSF PORTA,1          ;prende el puerto A.1
    CALL pausa1080      ;llama pausa
    BCF PORTA,1          ;apaga puerto A.1
    CALL pausa450       ;llama pausa
    BSF PORTA,1          ;prende el puerto A.1
    CALL pausa5240      ;llama pausa
    BCF PORTA,1          ;apaga puerto A.1
    CALL pausa450       ;llama pausa
    BSF PORTA,1          ;prende el puerto A.1
    CALL pausa1080      ;llama pausa
    BCF PORTA,1          ;apaga puerto A.1

goto pulse

```

```

;-----
pausa1080
    CLRFB TMR0          ;reinicia el contador TMR0
chechar1080
    MOVFBTMR0,W        ;carga el valor del timer a w
    SUBLW d'17'        ;resta w-7
    BTFSS STATUS,Z    ;verifica si se llega al límite del timer
    GOTO checar1080
    RETURN
;-----

pausa450
    CLRFB TMR0          ;reinicia el contador TMR0
chechar450
    MOVFBTMR0,W        ;carga el valor del timer a w
    SUBLW d'7'         ;resta w-7
    BTFSS STATUS,Z    ;verifica si se llega al límite del timer
    GOTO checar450
    RETURN
;-----

pausa5240
    CLRFB TMR0          ;reinicia el contador TMR0
chechar5240
    MOVFBTMR0,W        ;carga el valor del timer a w
    SUBLW d'82'        ;resta w-7
    BTFSS STATUS,Z    ;verifica si se llega al límite del timer
    GOTO checar5240
    RETURN
;-----

pausa2
    CLRFB TMR0          ;reinicia el contador TMR0
chechar2
    MOVFBTMR0,W        ;carga el valor del timer a w
    SUBLW d'1'         ;resta w-7
    BTFSS STATUS,Z    ;verifica si se llega al límite del timer
    GOTO checar2
    RETURN
END

```