



# **UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO**

---

## **División de Ciencias e Ingeniería**

### **Diseño de un Control PWM Senoidal para Inversor Interconectado a la Red Eléctrica**

Trabajo de Tesis  
para obtener el grado de  
Ingeniero en Redes

**PRESENTA**

**Nazario Martínez Paulino**

**Director de Tesis**

**Dr. Freddy Chan Puc**

**Asesores**

**M. E. S. Roberto Acosta Olea**

**Dr. Jorge Ovidio Aguilar Aguilar**

**Chetumal, Quintana Roo, México, Noviembre de 2011.**



# UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

---

## División de Ciencias e Ingeniería

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

### INGENIERO EN REDES

Comité de Trabajo de Tesis

A handwritten signature in black ink, appearing to be "Freddy Chan Puc", written over a horizontal line.

**Director:** **Dr. Freddy Chan Puc**

---

**Director de tesis**

**Asesor:** **M. E. S. Roberto Acosta Olea**

---

**Asesor**

**Asesor:** **Dr. Jorge Ovidio Aguilar Aguilar**

---

**Asesor**

Chetumal, Quintana Roo, México, Noviembre de 2011.

## **Agradecimientos**

Primero y antes que nada, gracias a Dios por estar conmigo en cada paso que doy, por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte, apoyo y compañía durante el estudio de la carrera de Ingeniería.

Agradecer hoy y siempre a mi familia, porque a pesar de no estar presentes físicamente durante mi estudio, sé que siempre me enviaron su mejor deseo y sus oraciones. A mi padre Juan Martínez Aguilar y a mi madre Estanislada Paulino Martínez, mi hermano menor Elías Martínez Paulino, porque a pesar de la distancia, el ánimo, apoyo y alegría que me brindan me da la fortaleza necesaria para seguir adelante.

A, la Sra. Paulina Medilla Colli y familia, personas que desde el primer momento me brindaron todo el apoyo, colaboración y cariño sin ningún interés, ellos han estado a mi lado cada día durante estos años.

De igual forma mi más sincero agradecimiento a mi director de Tesis, el Dr. Freddy Chan Puc, por brindarme todo su apoyo durante la realización de mi trabajo de titulación, por el conocimiento que me compartió.

A mis compañeros de la carrera, en especial a Juan Guillermo BuenfilMarin y Carlos SurielCohuo Aguayo, por ser unos hermanos para mí, a WilberthGutiérrez y Miguel Ángel Trejo Rojas, por su valiosa amistad, por confiar, tener paciencia, por su apoyo y su ánimo en cada etapa que se pasa y viene a lo largo de estos años de estudio.

En general quisiera agradecer a todas y cada una de las personas que han vivido conmigo la realización de esta tesis, con sus altos y bajos y que no necesito nombrar porque tanto ellas como yo sabemos que desde los más profundo de mi corazón les agradezco el haberme brindado todo el apoyo, colaboración, ánimo y sobre todo cariño y amistad.

## **Dedicatoria**

Con mucho cariño principalmente a mis padres que me dieron la vida y han estado conmigo todo momento.

Gracias por todo padre y madre por darme una carrera para mi futuro y por creer en mí, aunque hemos pasado momentos difíciles siempre han estado apoyándome y brindándome todo su apoyo, por todo esto les agradezco de todo corazón el que estén conmigo a mi lado.

A mis hermanos Duval Martínez Paulino y Elías Martínez Paulino por estar conmigo y apoyarme siempre, los quiero mucho y son muy especiales para mí.

## Resumen

El objetivo general es el diseño e implementación de un inversor con interconexión a la red eléctrica empleando un control de Modulación de Ancho de Pulsos (PWM) senoidal. La metodología se basará en dos etapas: primero el diseño y análisis de los elementos eléctricos y electrónicos que se utilizarán, involucra la simulación del control PWM senoidal. Seguido por la etapa experimental, implementación de circuitos de potencia, mediciones e interpretación de resultados.

El tradicional inversor de puente completo, considerado como un Inversor Reductor, actualmente se encuentra en muchas aplicaciones de alta potencia. Sin embargo, se continúa utilizando transformadores de baja frecuencia que resultan pesados y voluminosos, lo que trae como consecuencia directa altos costos y una baja eficiencia. Esto lleva a la búsqueda de topologías inversoras cuyas estructuras sean simples, con un número reducido de componentes y un diseño compacto.

La técnica más utilizada para generar un voltaje senoidal a la salida de un inversor es la modulación por ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés). 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 consiste en que el filtrado del voltaje de salida es más sencillo, ya que la frecuencia de portadora es generalmente elevada, y por lo tanto el tamaño del filtrado 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.

En el Capítulo 1 se muestra una introducción a los inversores, tipos y características de las variantes de ellos.

En el Capítulo 2 se presenta el diseño y armado de cada uno de los componentes que servirán para realizar la tesis, como son el inversor, los controladores de frecuencia (*drivers*) y el control PWM senoidal.

En el Capítulo 3 se observan los resultados de las simulaciones hechas al inversor y control PWM senoidal, así como las pruebas pertinentes que llevan la realización de la tesis.

Finalmente En el Capítulo 4 se analizaran los resultados experimentales, las conclusiones y aportaciones del trabajo de tesis que se realizó.

## Contenido

CAPÍTULO 1 CONVERTIDORES CD/CA (INVERSORES).....	11
1.1 Introducción.....	12
1.2 Inversor monofásico.....	16
1.2.1 Inversor de medio puente.....	17
1.3 Inversor de puente completo o puente H.....	19
1.4 Control de voltaje de los inversores monofásicos.....	21
1.4.1 Modulación de un solo ancho de pulso.....	21
1.4.2 Modulación de varios anchos de pulso.....	22
1.4.3 Modulación senoidal del ancho de pulso.....	24
1.4.4 Modulación senoidal modificada del ancho de pulso.....	24
1.4.5 Control por desplazamiento de fase.....	25
1.5 Convertidores multinivel.....	25
1.6 Controlador de Frecuencia.....	26
CAPÍTULO 2 DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN INVERSOR PUENTE COMPLETO .....	27
2.1 Introducción.....	28
2.2 Diseño de Inversor.....	28
2.2.1 Procedimiento para elaborar el circuito impreso del inversor.....	29
2.3 Diseño de los Controladores de Frecuencia ( <i>Drivers</i> ).....	30
2.3.1 Procedimiento para elaborar el circuito inversor.....	31
2.4 Diseño del control PWM senoidal.....	33
CAPÍTULO 3 RESULTADOS DE SIMULACIÓN .....	37
3.1 Introducción.....	38
3.2 Simulación del control.....	39
3.2.1 Tiempos de disparo de la señal generada en PSIM.....	40
3.3 Programación del PIC-16F84A.....	42

CAPÍTULO 4 RESULTADOS EXPERIMENTALES .....	43
4.1 Inversor de onda cuadrada. ....	44
4.2 Inversor PWM Senoidal. ....	46
CONCLUSIONES.....	49
BIBLIOGRAFÍA.....	51
GLOSARIO.....	52



## Índice de Figuras

### Capítulo 1

Figura 1.1. Imagen de la señal senoidal ideal de un inversor .....	15
Figura 1.2. Esquema del Inversor de Medio Puente (3).....	17
Figura 1.3. Señales de onda de un inversor medio puente con carga resistiva	18
Figura 1.4. Imagen de un Circuito Inversor de Puente Completo .....	19
Figura 1.5. Formas de onda un inversor de puente completo con carga resistiva .....	20
Figura 1.6. Señales de excitación y el voltaje de salida .....	22
Figura 1.7. Señal Generada por exaltación.....	23
Figura 1.8. Señal del índice de modulación que controla el voltaje de salida ...	23
Figura 1.9. Señal por Modulación senoidal de ancho de pulso.....	24
Figura 1.10. Señal por control por desplazamiento de fase .....	25

### Capítulo 2

Figura 2.1. Imagen de la impresión en hoja de transferencia .....	28
Figura 2.2. Imagen de la tableta una vez limpiada y estañada .....	29
Figura 2.3. Imagen del inversor terminado.....	30
Figura 2.4. Esquema del driver IR2110.....	31
Figura 2.5. Imagen de la los drivers impresos .....	31
Figura 2.6. Imagen de drivers una vez terminado el proceso de diseño .....	32
Figura 2.7. Solución analógica .....	33
Figura 2.8. Señal resultado de la solución analógica .....	34
Figura 2.9. Esquema del Microcontrolador (Solución Digital) .....	34
Figura 2.10. Señal de salida de la Solución Digital .....	35
Figura 2.11. Esquema del PIC16F84A.....	35
Figura 2.12. Diagrama a bloques de las etapas del prototipo. ....	36

### Capítulo 3

Figura 3.1. Imagen de la conexión del Inversor, Drivers y Control PWM senoidal .....	38
Figura 3.2. Imagen de la Simulación del Control PWM Senoidal.....	39
Figura 3.3. Grafica de la simulación del control PWM senoidal .....	40
Figura 3.4. Grafica de la Señal de referencia senoidal que genera los tiempos de conmutación.....	41

## Capítulo 4

Figura 4.1. Esquema del inversor de puente completo.....	44
Figura 4.2. Señales de control para cada rama del inversor de onda cuadrada.....	45
Figura 4.3. Señal de salida de un inversor de onda Cuadrada .....	45
Figura 4.4. Señal de contenido armónico del Inversor de Onda Cuadrada.....	46
Figura 4.5. Señales de control para cada rama del inversor PWM senoidal.....	47
Figura 4.6. Señales de control y de salida para el inversor PWM senoidal.....	48
Figura 4.7. Señal de contenido armónico del Inversor PWM senoidal.....	48

## Índice de Tablas

Tabla 3.1. Datos tomados de los resultados de las Mediciones de la simulación .....	41
---	----

**Capítulo 1**  
**Convertidores**  
**CD/CA**  
**(Inversores)**

## **1.1 Introducción.**

En el marco mundial, el consumo de energía eléctrica es realmente necesario para las actividades humanas. La energía está presente en las comunicaciones, transportes, suministros de alimentos, servicios, oficinas, industrias y en nuestros hogares. A medida que los países aumentan su nivel poblacional y se industrializan cada vez más, el consumo de energía eléctrica es requerido en una mayor cantidad a nivel mundial.

Dentro de esto, se ha empezado a resentir los primeros indicios de la escasez de recursos energéticos, principal el petróleo, que es la fuente de energía que más se consume mundialmente. A menudo vemos en las noticias sobre ataques a medio oriente, guerras, todo esto con un solo fin de apoderarse de los yacimientos de petróleo que ahí existe. De igual forma se pronostica que en un tiempo no muy mayor la producción bajara, mientras que la demanda no dejara de aumentar [1]. Esto es en gran medida porque el ser humano es excesivamente dependiente del petróleo, ya que sus derivados son muy utilizados, de igual forma porque no se han encontrado otra fuente de energía que sustituya al petróleo. No obstante los gobiernos no se han preocupado por hallar otras fuentes de energías alternativas que sean utilizadas para la vida cotidiana y que sean amigables al medio ambiente.

Prácticamente la producción de energía se basa en la quema de petróleo, gasolina y gas que son combustibles fósiles, estos al ser utilizados generan emisiones, que en su mayoría se tratan de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que en gran medida genera contaminación e intensifica el efecto invernadero a nivel mundial. El efecto invernadero es un fenómeno natural, el cual, sirve para la regulación de la temperatura del planeta Tierra. No obstante en los años recientes estamos presenciando el cambio climático debido a la explotación de algunos recursos no renovables, así como el incremento de los gases termo-

activos, los que hacen que el planeta incremente su temperatura constantemente.

En las últimas décadas se han empezado a realizar constantes trabajos e investigaciones para desarrollar nuevas formas de producir fuentes de energía que ayuden a no ser tan dependientes del petróleo, de igual forma se busca que no afecte a la capa de ozono y sobre todo que esta nueva forma de producir energía interactúe con las redes eléctricas que tenemos en nuestras casas. Entre las nuevas formas de producir energía se encuentran aquellas que se generan a partir del aire, la que se produce a base de la corriente de agua en presas con turbinas y la mayor fuente de energía que es la solar.

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 clientes.

La energía eléctrica que se produce en nuestro país tiene varias fuentes, hidroeléctricas, termoeléctricas, geo-termoeléctricas, carbo-eléctricas y una planta nucleoelectrica.

En los últimos tiempos el gobierno se ha encargado de enfatizar la importancia de generar fuentes de energía alternas que sean sustentables y amigables con el medio ambiente. Entre ellas existen fuentes como la Eólica, que se genera con las corrientes de viento, las que funcionan a través de la energía solar (sistemas foto-térmicos y sistemas fotovoltaicos).

Los sistemas de generación de energía, el convertidor de potencia (inversor) usualmente es la interface entre la fuente primaria de energía (modulo solar, banco de baterías, celdas de combustible, entre otros) y la carga monofásica o trifásica.

Las funciones de un convertidor de potencia de CD-CA o inversor se pueden resumir en 4 aspectos [2], [3]:

- A. Conversión de un voltaje de CD, variable o no, a un voltaje de CA, fijo o variable tanto en amplitud como en frecuencia.
- B. Asegura una señal de salida con una baja Distorsión Armónica Total (THD), baja desviación de frecuencia y voltaje.
- C. Protección a sistemas de generación de potencia eléctrica de valores anormales de voltaje, corriente, frecuencia y temperatura. Se puede incluir el aislamiento eléctrico de ser necesario.
- D. Obtener una alta frecuencia del sistema, lo cual se logra con un control óptimo del flujo de energía.

Las aplicaciones de los inversores son muy variadas, pero se pueden agrupar en las siguientes áreas:

- a. Control de motores, donde la frecuencia y la tensión de salida deben ser variables.
- b. Sistemas de alimentación ininterrumpibles, donde la frecuencia y la tensión de salida son fijas.
- c. Filtros activos, para reproducir distorsiones en la red eléctrica y mejorar la forma de onda de la tensión de línea.

Su importancia deriva de la amplia utilización de este tipo de convertidores, sin embargo, presentan limitaciones debido principalmente a los dispositivos semiconductores y las técnicas de modulación empleadas [4].

Los convertidores de CD a CA se conocen como inversores. La función de un inversor es cambiar un voltaje de entrada en CD a un voltaje simétrico de salida en CA, con la magnitud y frecuencia deseadas como se muestra en la figura 1.1.

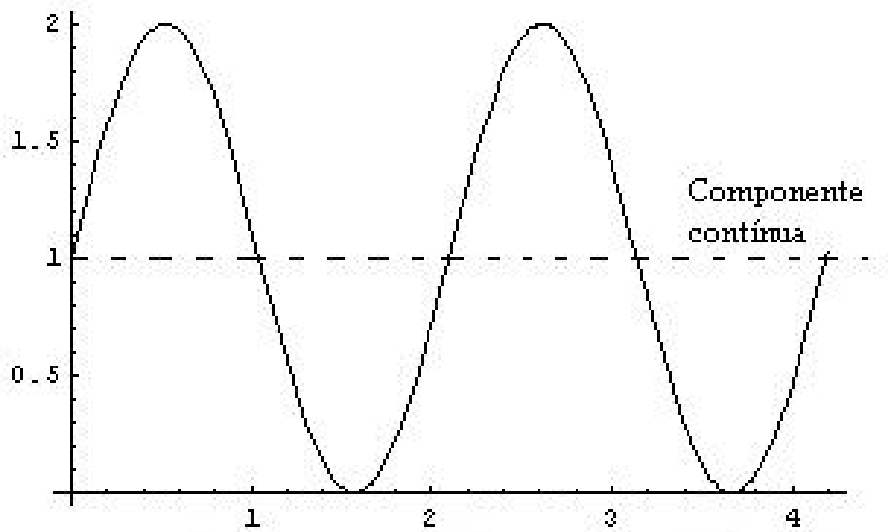


Figura 1.1. Imagen de la señal senoidal ideal de un inversor

Tanto el voltaje de salida como la frecuencia pueden ser fijos o variables. Si se modifica el voltaje de entrada de CD y la ganancia del inversor se mantienen constantes, es posible obtener un voltaje variable de salida. Por otra parte, si el voltaje de entrada CD es fijo y no es controlable, se puede obtener un voltaje de salida variable si se varía la ganancia del inversor; esto es por lo general se hace controlando la modulación del ancho de pulso (PWM) dentro del inversor. La ganancia del inversor se puede definir como la relación entre el voltaje de salida en CA y el voltaje de entrada en CD.

Un inversor ideal como se hace mención, debe generar una señal senoidal. Sin embargo, en los inversores reales no son senoidales y contienen ciertas armonías. Para aplicaciones de mediana y baja potencia, se pueden aceptar los voltajes de onda cuadrada o casi cuadrada; para aplicaciones de alta potencia, son necesarias las formas de onda senoidales de baja distorsión. Dada la disponibilidad de los dispositivos semiconductores de potencia de alta velocidad, es posible minimizar o reducir significativamente el contenido armónico del voltaje de salida mediante las técnicas de conmutación [5].

El uso de los inversores es muy común en aplicaciones industriales tales como la propulsión de motores de CA de velocidad variable, la calefacción por inducción, las fuentes de respaldo y las de poder, alimentaciones ininterrumpibles de potencia. La entrada puede ser una batería, una celda de combustible, una celda solar u otra fuente de CD [6].

Los inversores se pueden calificar básicamente en dos tipos: (i) inversores monofásicos y (ii) inversores trifásicos. Cada tipo puede utilizar dispositivos con activación y desactivación controlada (es decir, BJT, MOSFET, IGBT, MCT, SIT, GTO) o tiristores de conmutación forzada, según la aplicación. Estos inversores utilizan por lo general señales de control PWM, para producir un voltaje de salida en CA. Un inversor alimentado por voltaje (VFI) si el voltaje de entrada se conserva constante; inversor alimentado por corriente (CFI) si la corriente de entrada se conserva constante; e inversor de enlazado en CD variable si el voltaje de entrada es controlable [7].

## **1.2 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 [8].



### 1.2.1 Inversor de medio puente.

La configuración más simple de un inversor monofásico es el inversor de medio puente, figura 1.2.

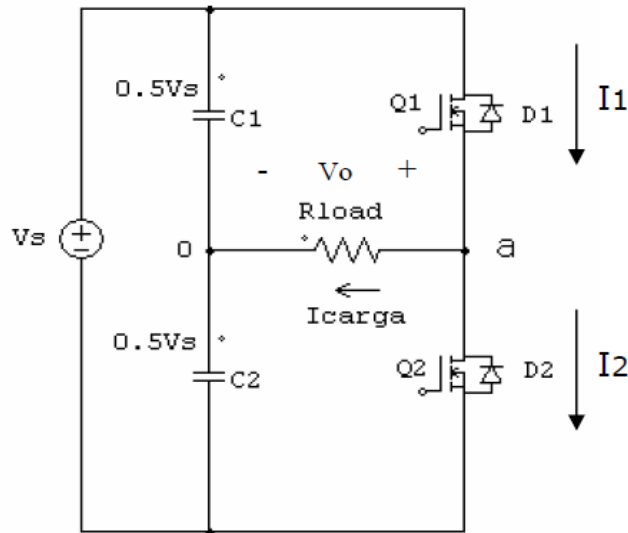


Figura 1.2. Esquema del Inversor de Medio Puente (3)

El circuito consiste en un par de dispositivos de conmutación  $Q_1$  y  $Q_2$  conectados en serie a través de una fuente de voltaje de corriente directa  $V_s$  y una carga conectada entre el punto  $a$  y el punto central  $0$  en la unión de los dos capacitores  $C_1$  y  $C_2$ , lo cual dividen el voltaje de la entrada  $V_s$ . Los dispositivos  $Q_1$  y  $Q_2$  conmutan en forma alterna en un ángulo  $\pi$  para generar el voltaje de salida. Mediante la figura 1.2 se puede explicar el principio de funcionamiento del inversor de medio puente.

Inicialmente, se activa el transistor  $Q_1$  durante un tiempo  $T_0/2$ , el voltaje instantáneo a través de la carga  $V_0$  será  $V_s/2$ . Después, el transistor  $Q_2$  es activo por lo tanto  $Q_1$  se desactiva durante un tiempo  $T_0/2$ . El voltaje  $-V_s/2$  aparece en la carga.

En la figura 1.3 se pueden observar las formas de onda de voltaje y la corriente en los dispositivos de conmutación de inversor de medio puente con la carga resistiva. En realidad, una pequeña brecha ( $T_d$ ) o banda muerta es conservada entre conmutaciones como se indica en la figura 1.3 para prevenir un corto circuito en la estructura.

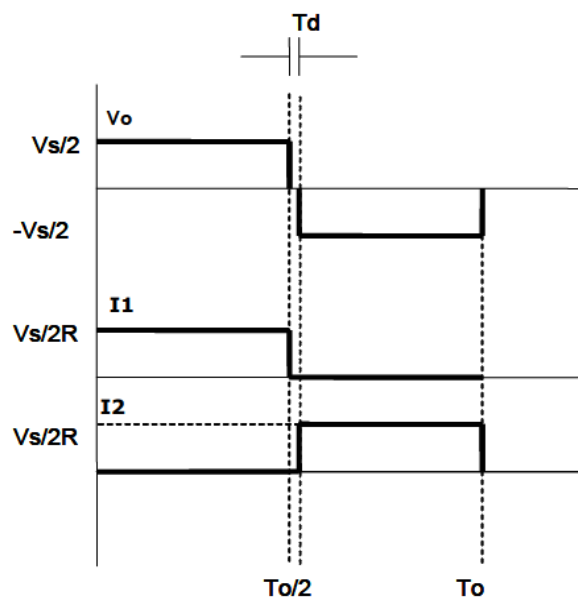


Figura 1.3. Señales de onda de un inversor medio puente con carga resistiva

El voltaje rms de salida  $V_0$  se puede encontrar a partir de la ecuación 1.1.

$$V_0 = \left( \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0/2} \frac{V_s^2}{4} dt \right)^{1/2} = \frac{V_s}{2} \quad (1.1)$$

El voltaje instantáneo de salida  $V_0$  puede expresarse en una serie de Fourier como:

$$V_0 = \sum_{n=1,2,3,\dots}^a \frac{2V_s}{n\pi} \text{Sen}(n\omega t) \quad (1.2)$$

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:

$$V_1 = \frac{2V}{\sqrt{2\pi}} = 0.45 V_s \quad (1.3)$$

### 1.3 Inversor de puente completo o puente H.

Dos inversores de medio puente pueden ser conectados para formar un inversor de puente completo, o puente H, como el de la figura 1.4.

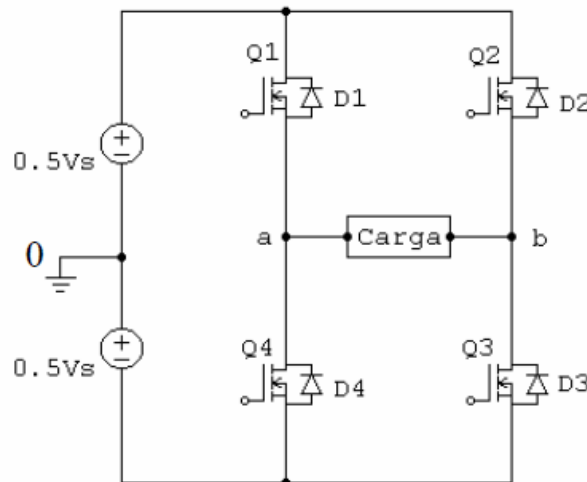


Figura 1.4. Imagen de un Circuito Inversor de Puente Completo

La ausencia de los capacitores es notoria y no se utilizan en este caso. La carga conectada entre los puntos a y b. en el modo de operación de señal de onda cuadrada, la cual es mostrada en la figura 1.5, el par de dispositivos  $Q_1$ - $Q_2$  y  $Q_2$ - $Q_4$  conmutan en forma alterna para generar la señal de voltaje de salida de onda cuadrada de amplitud  $V_s$ .

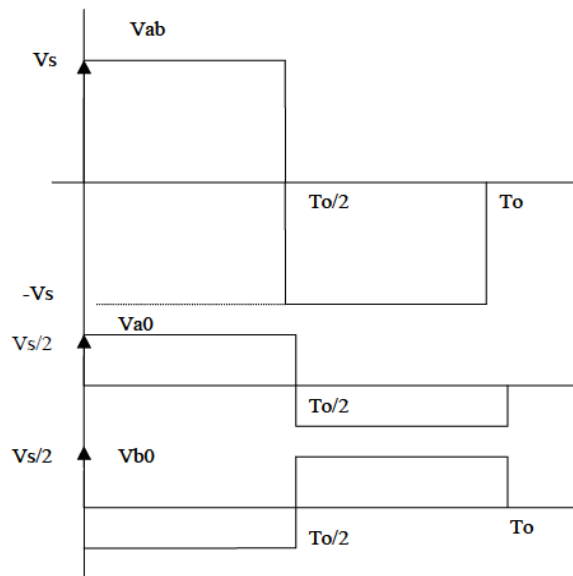


Figura 1.5. Formas de onda un inversor de puente completo con carga resistiva

Para esta estructura tanto los diodos y los MOSFET están dimensionados para soportar el voltaje de la fuente  $V_s$  cuando estos se encuentran polarizados inversamente y en corte respectivamente. La corriente pico que deberán conducir los MOSFET es  $I_m$  y la corriente que conducirán los diodos  $I_m \text{sen}\varphi$ .

El voltaje rms de salida se puede determinar a partir de la ecuación (1.4):

$$V_0 = \left( \frac{2}{T_0} \int_0^{T_0/2} V_s^2 dt \right)^{\frac{1}{2}} = V_s \quad (1.4)$$

El voltaje instantáneo de salida determina a partir de la ecuación (1.5):

$$V_0 = \sum_{n=1,2,3,\dots}^{\infty} \frac{4V_s}{n\pi} \text{sen}(n\omega t) \quad (1.5)$$

Y para  $n=1$ , la ecuación proporciona el valor rms de la componente fundamental como se muestra en la ecuación (1.6):

$$V_1 = \frac{4V_s}{\sqrt{2\pi}} = 0.9 V_s \quad (1.6)$$

## **1.4 Control de voltaje de los inversores monofásicos.**

En muchas aplicaciones industriales, a menudo es necesario controlar el voltaje de salida de los inversores, para: (i) hacer frente a las variaciones de entrada de CD, (ii) regulación del voltaje de los inversores y (iii) para los requisitos de control constante del voltaje y la frecuencia. Existen varias técnicas para modificar la ganancia del inversor, el método más eficiente de controlar la ganancia (y el voltaje de salida) es incorporar en los inversores el control de modulación del ancho de pulso (PWM). Las técnicas comúnmente utilizadas son [9]:

- a. Modulación de un solo ancho de pulso.
- b. Modulación de varios anchos de pulso.
- c. Modulación senoidal del ancho de pulso.
- d. Modulación senoidal modificada del ancho de pulso.
- e. Control por desplazamiento de fase.

### **1.4.1 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, ver figura 1.6.

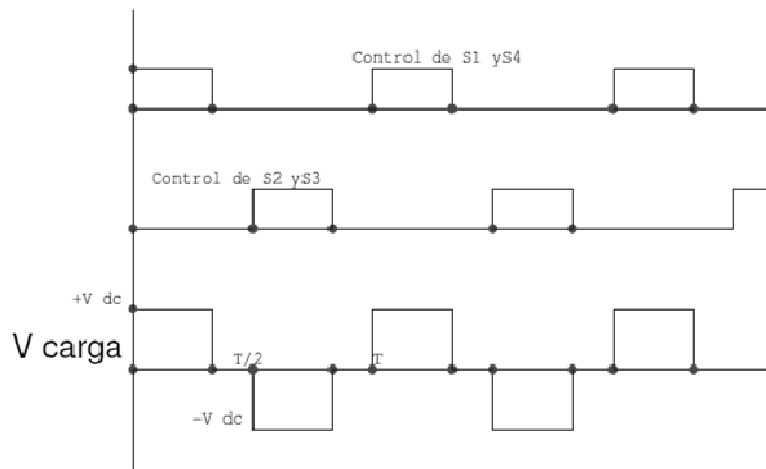


Figura 1.6. Señales de excitación y el voltaje de salida

#### 1.4.2 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 1.7. 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 1.8 se muestra el voltaje de salida, teniendo en cuenta que los pulsos positivos se generan debido a la excitación simultánea de  $S_1$  y  $S_4$  y los negativos con la de  $S_2$  y  $S_3$ .

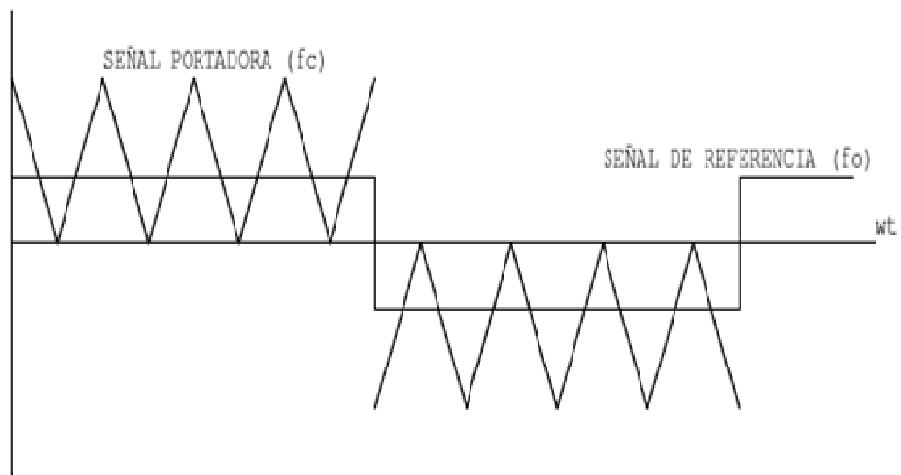


Figura 1.7. Señal Generada porexaltación

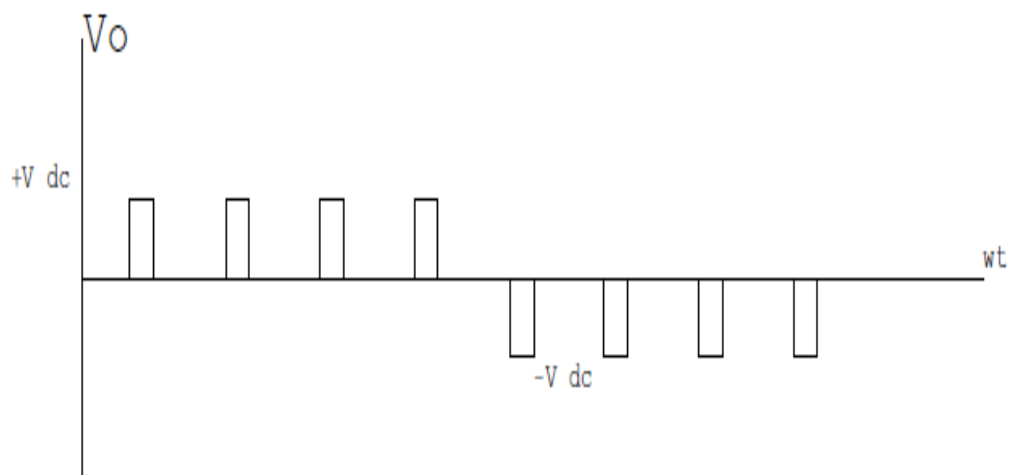


Figura 1.8. Señal del índice de modulación que controla el voltaje de salida

### 1.4.3 Modulación senoidal del ancho de pulso.

En vez de mantener igual el ancho de todos los pulsos, en la modulación senoidal 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 1.9. 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.

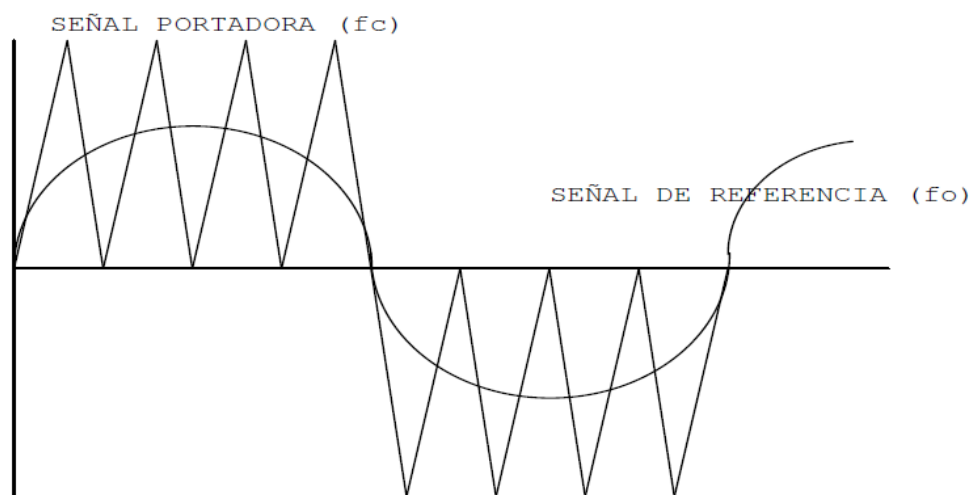


Figura 1.9. Señal por Modulación senoidal de ancho de pulso

### 1.4.4 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.

#### 1.4.5 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, como se muestra en la figura 1.10, controlando mediante esto el voltaje RMS de salida.

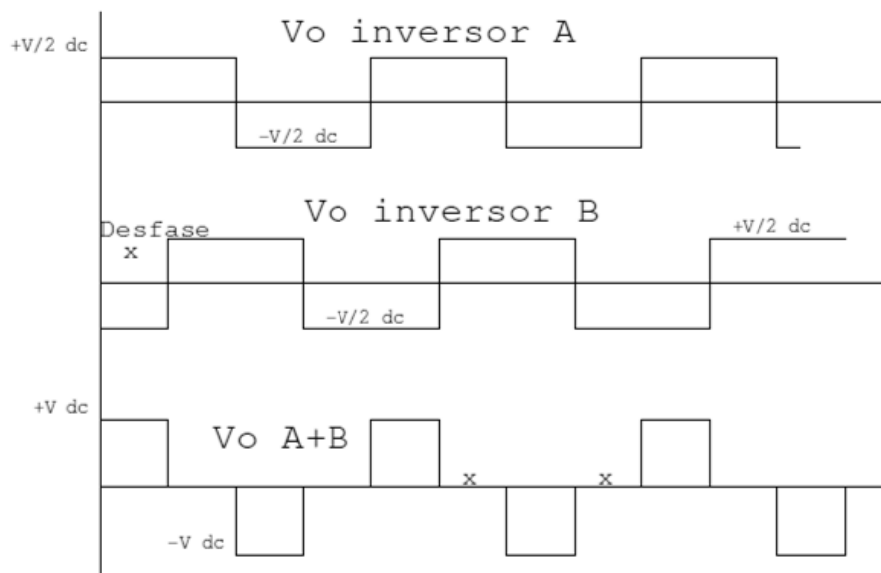


Figura 1.10. Señal por control por desplazamiento de fase

#### 1.5 Convertidores multinivel.

Al realizar un análisis más detallado a los inversores de medio y puente completo, es notorio que al incrementarse el voltaje de entrada de CD el voltaje que deben bloquear los dispositivos de conmutación aumenta. Por lo tanto, dispositivos de conmutación con mayores capacidades son necesarios para aplicaciones de alto voltaje.

Existen ciertas limitaciones tecnológicas que restringen el diseño de inversores de media y alta potencia para estas estructuras básicas. Además presentan una baja calidad espectral debido a la forma de onda cuadrada o casi-cuadrada del voltaje de salida[7], [3].

Para solucionar dichos problemas existen varias topologías clasificadas como multinivel o convertidores multinivel. Su finalidad es sintetizar una señal de CA a través de varios niveles de voltaje de CD obtenidos normalmente con capacitores. Por lo tanto, al incrementarse los niveles de voltaje se puede generar una señal escalonada la cual se aproxima a una señal senoidal con una mínima distorsión armónica.

También, el incremento en el número de niveles de voltaje significa que mayores voltajes de entrada pueden ser utilizados a través de la utilización de dispositivos de conmutación conectados en serie. Desafortunadamente, el número de niveles de voltaje de salida está limitado por problemas de desbalance del voltaje en algunas topologías[2].

## **1.6 Controlador de Frecuencia.**

Las señales de control de disparo de los MOSFETS que entregan los opto-acopladores van a la entrada de los controladores de frecuencia, estos encargan de convertirlas en voltajes fuente de puerta 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.

# **Capítulo**

## **2 Desarrollo e Implementación de un inversor puente completo**

## 2.1 Introducción.

El capítulo se presenta el diseño en primera instancia del inversor de corriente seguido por su armado en placa fenólica. A continuación se procede el diseño de los controladores de corriente (drivers) y su respectivo armado en circuito. Por último el diseño y armado del control PWM senoidal.

## 2.2 Diseño de Inversor.

Antes de empezar el diseño del inversor de corriente alterna a continua se hace un enlistado de material a utilizar para el armado del circuito. Se cuenta con una placa fenólica, cuatro MOSFET IRF640, cuatro disipadores de calor, cuatro resistencias de  $220\ \Omega$ , cable de alta tensión y terminales. Además cautín, estaño y malla para desoldar.

A continuación se diseña el circuito en el programa Utilboard, el acomodo de las piezas serán manual, la pistas serán engrosadas y se siguen las especificaciones de datos IRF640. Una vez terminado el circuito, se procede a la impresión en hoja de transferencia como se muestra en la figura 2.1.

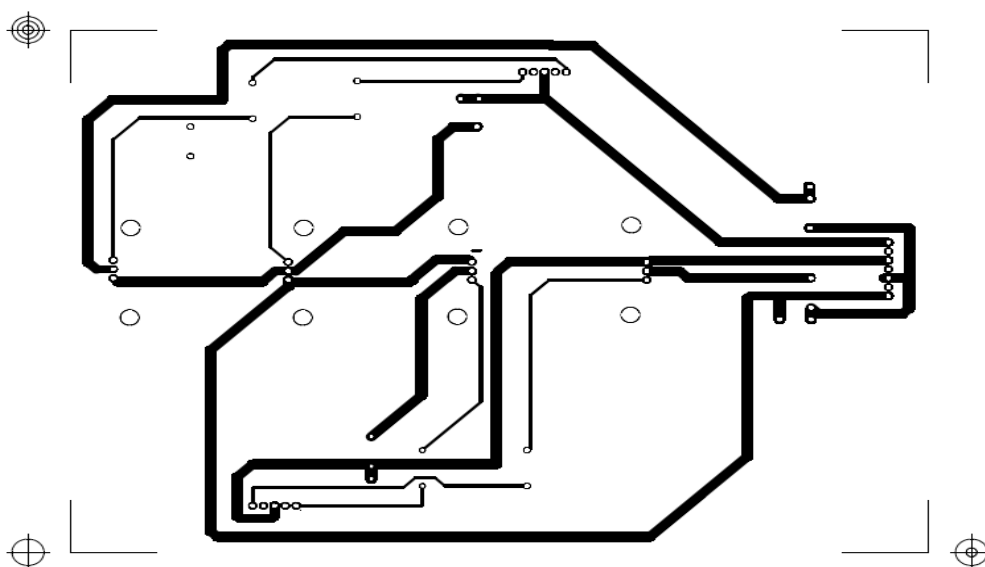


Figura 2.1. Imagen de la impresión en hoja de transferencia

### 2.2.1 Procedimiento para elaborar el circuito impreso del inversor.

1.- Se limpia la placa fenólica con jabón, se deja secar y a continuación se transpone la hoja de transferencia. Se procede a planchar el circuito para que las líneas de la impresión de la hoja de transferencia queden marcadas. El planchado es de 10 minutos, y otros 10 minutos para que se enfríe la placa fenólica, después de ese tiempo se quita la hoja de transferencia con agua y se hacen los agujeros para los componentes.

2.- En una mezcla de ácido clorhídrico y agua se sumerge la placa fenólica para quitar el cobre, solo el que está debajo de las líneas. Se realiza un nuevo lavado para quitar la mezcla de ácido y agua, con una toalla se seca la placa fenólica. Ver figura 2.2.

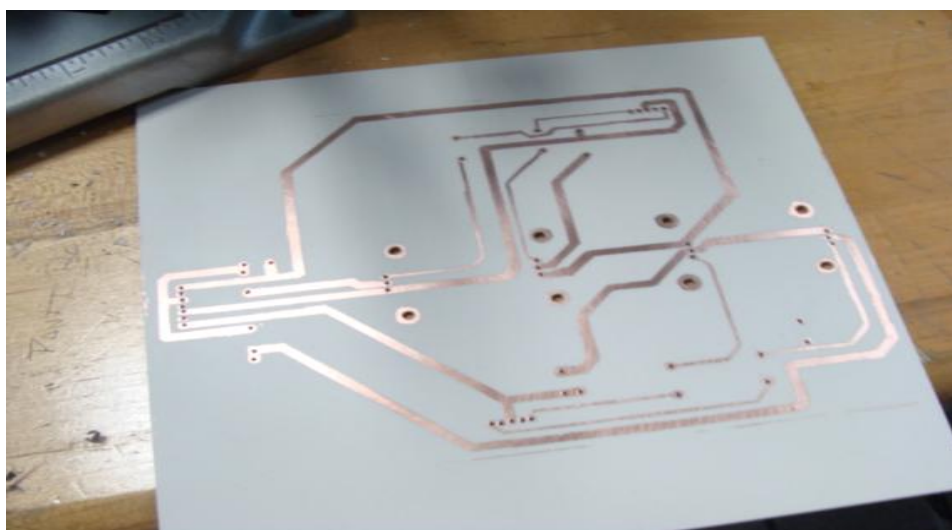


Figura 2.2. Imagen de la tableta una vez limpiada y estañada

3.-Después del proceso de quemado y una pequeña limpieza, el inversor está listo para integrar los componentes del circuito inversor. Primero se integran los MOSFET, luego sus correspondientes disipadores, resistencias, terminales y cables de alta tensión como se muestra en la figura 2.3.

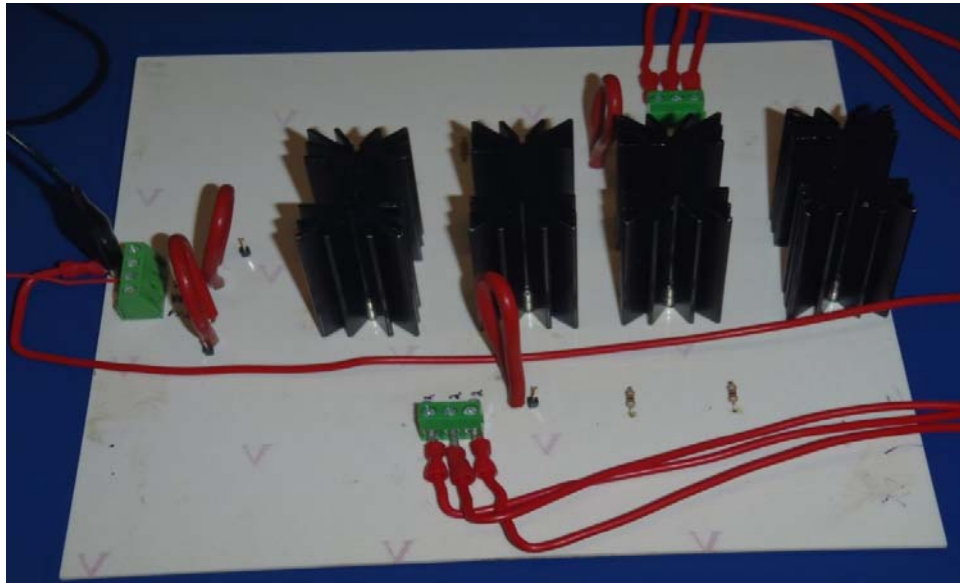


Figura 2.3. Imagen del inversor terminado

### 2.3 Diseño de los Controladores de Frecuencia (*Drivers*).

Para los controladores de frecuencia, los componentes necesarios son los siguientes: una placa fenólica, dos circuitos integrados (IR2110), cuatro capacitores electrolíticos (25v 220 $\mu$ f), dos bases para circuitos integrados, dos diodos rectificadores (1N4007), dos capacitores cerámicos y terminales. Los rectificadores manejan valores de corriente elevados, proporcionan seguridad en los picos de corrientes variadas mayor que su corriente nominal máxima de funcionamiento y trabajar con tensiones inversas de algunas centenas de voltios. La figura 2.4 muestra a detalle los datos de las características del driver (IR2110), que es la base para diseñar y armar los controladores de frecuencia.

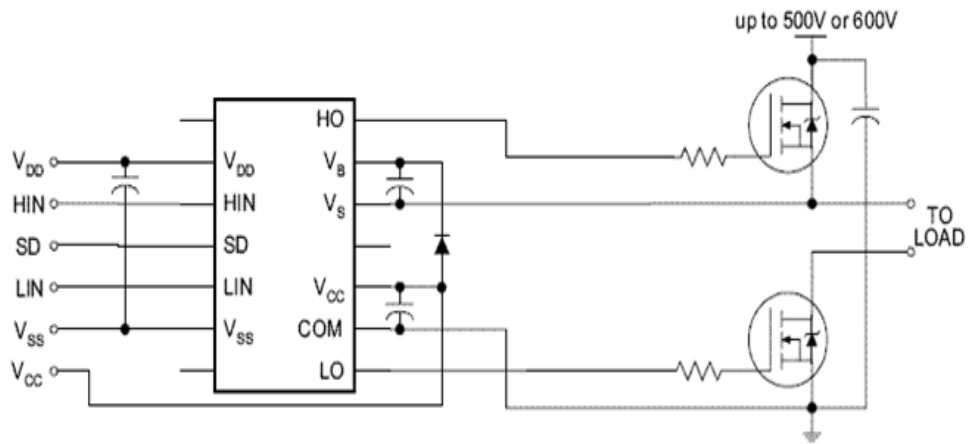


Figura 2.4. Esquema del driver IR2110

Con ayuda de la herramienta Ultiboard se diseña el driver, siguiendo la especificación típica de datos del componente electrónico. En una misma hoja se plasma los dos drivers.

### 2.3.1 Procedimiento para elaborar el circuito inversor.

Una vez terminado se procede a imprimir el diseño en hoja de transferencia. A continuación en la figura 2.5 muestra la impresión.

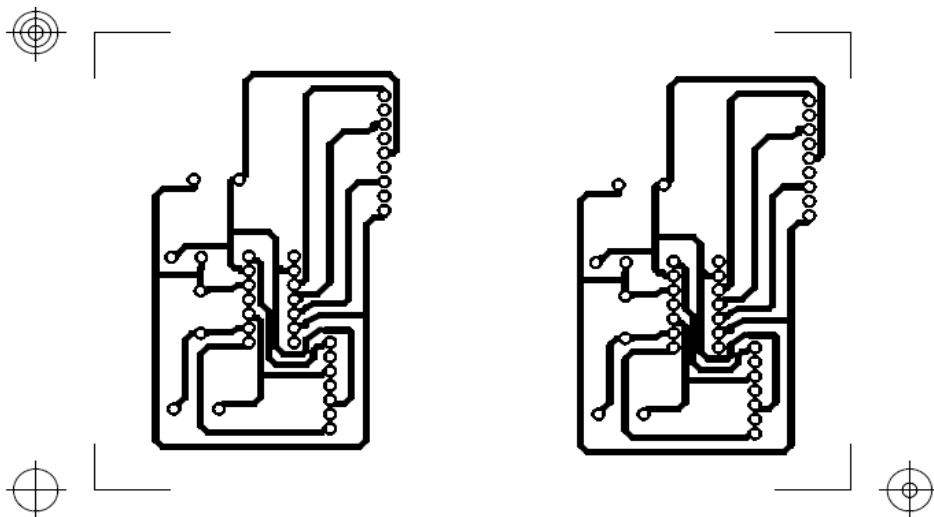


Figura 2.5. Imagen de los drivers impresos

1.- Se limpia la placa fenólica, a continuación se coloca la hoja de transferencia de los inversores, se plancha por 10 minutos hasta que la tinta de impregne, y se deja 10 minutos para que enfrié la placa fenólicas y pueda seguir trabajando en ella. Posteriormente con ayuda de un mini-taladro se hacen los huecos. Con un plumón corregir las pistas que no han sido impregnadas con la hoja de transferencia.

2.-Continua en solución de ácido clorhídrico con agua para quitar el cobre y obtener el circuito para integrar los componentes que forman el driver. Se estaña las líneas del circuito y con una toalla se limpia.

3.- Paso último, se integra cada componte para formar el circuito driver como se observa en la figura 2.6.



Figura 2.6. Imagen de drivers una vez terminado el proceso de diseño



## 2.4 Diseño del control PWM senoidal.

El control PWM senoidal se encargará de controlar las señales de entrada de los drivers. Para ello se cuenta con dos soluciones posibles, una solución analógica y otra una solución digital.

Una forma de implementar un control PWM senoidal es a través de un circuito rectificador y comparadores (solución analógica), tal como se muestra en la figura 2.7.

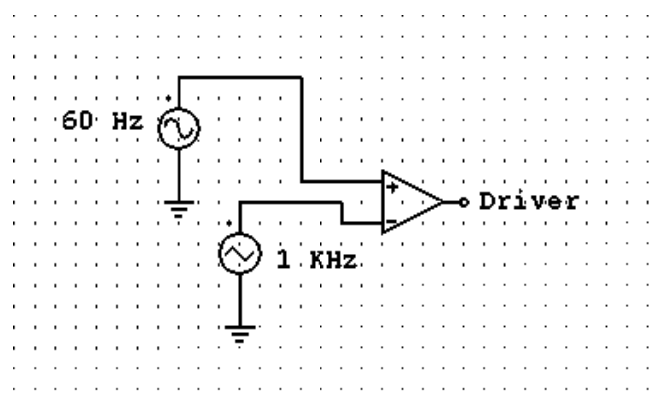


Figura 2.7. Solución analógica

El resultado a la salida del comparador analógico, se puede observar en la figura 2.8 que la línea curvada o senoide corresponde exactamente a la componente de la señal cuadrada. Esto es usando una solución analógica, al comparar una señal de onda senoidal de 60 Hz y otra triangular de 1KHz, llamada tren de pulsos, se obtiene en la salida la misma señal senoidal y sobrepuesta una onda cuadrada.

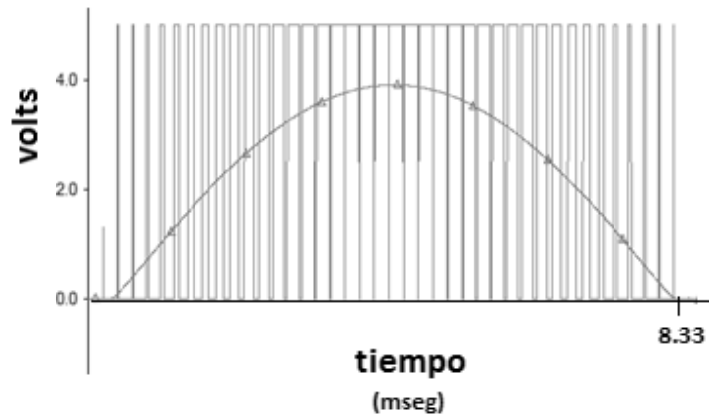


Figura 2.8. Señal resultado de la solución analógica

Sin embargo, dado que actualmente se cuentan con simuladores de circuitos electrónicos, permiten calcular tiempos de conmutación y programarlos en microcontrolador (solución digital), teniendo como resultado un circuito de control simple y con un número reducido de componentes. (Ver figura 2.9).

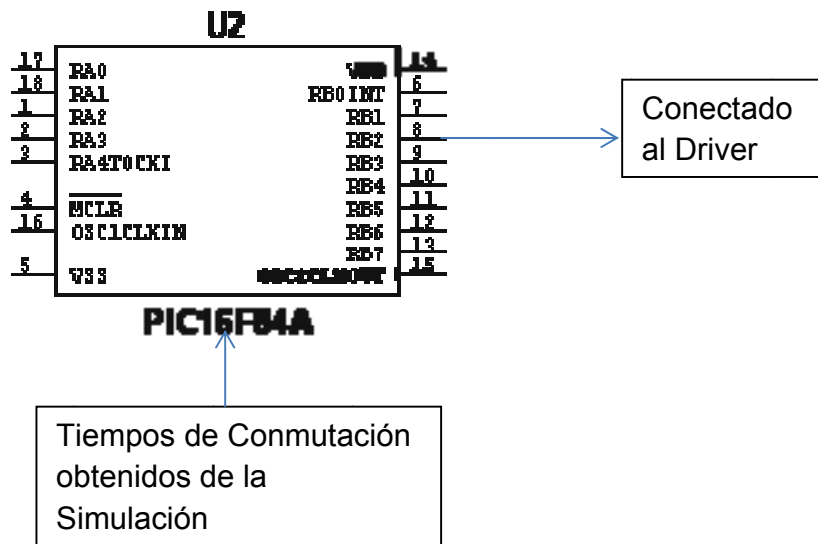


Figura 2.9. Esquema del Microcontrolador (Solución Digital)

El PIC16F84A permite generar pulsos en la salida del puerto seleccionado, mediante una pequeña rutina programada en Ensamblador, el cual permite tiempos de disparo de señal en microsegundos, lo cual es necesario para obtener la señal en forma cuadrada (figura 2.10). En la figura 2.11 se describe el microcontrolador 16F84A.

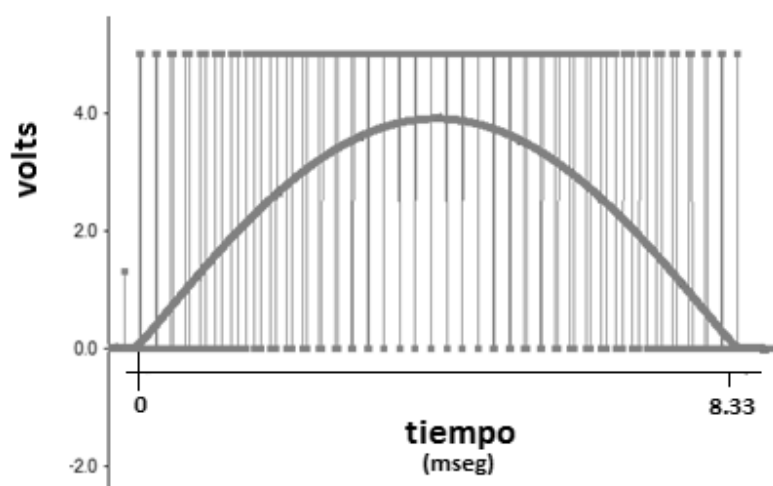


Figura 2.10. Señal de salida de la Solución Digital

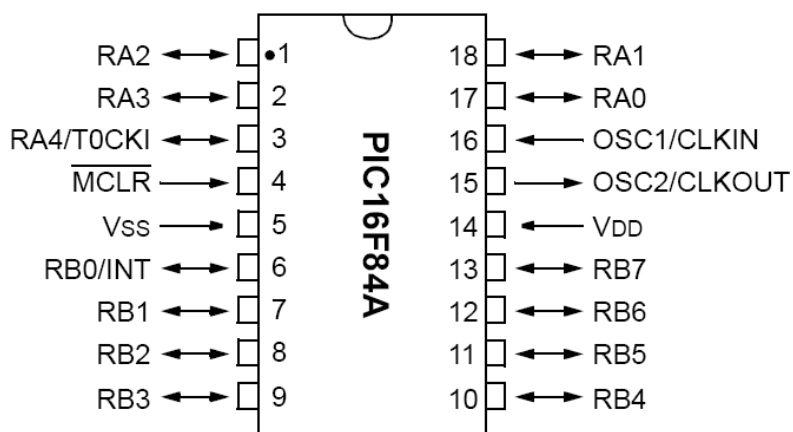


Figura 2.11. Esquema del PIC16F84A

El microcontrolador se alimenta con un máximo de 5 volts, que se obtiene de una toma de corriente. Se toman las compuertas RA0 y RA1, se toman lecturas mediante el osciloscopio de la marca FLUKE para monitorear los pulsos.

Una vez terminado el control, se procede a interconectar cada una de las etapas, los cuales son inversor de corriente, los *drivers* y en control. Al igual contaremos con dos fuentes queproporcione energía, una para el inversor de corriente, uno más para los *drivers* y el control como se muestra en la figura 2.12.

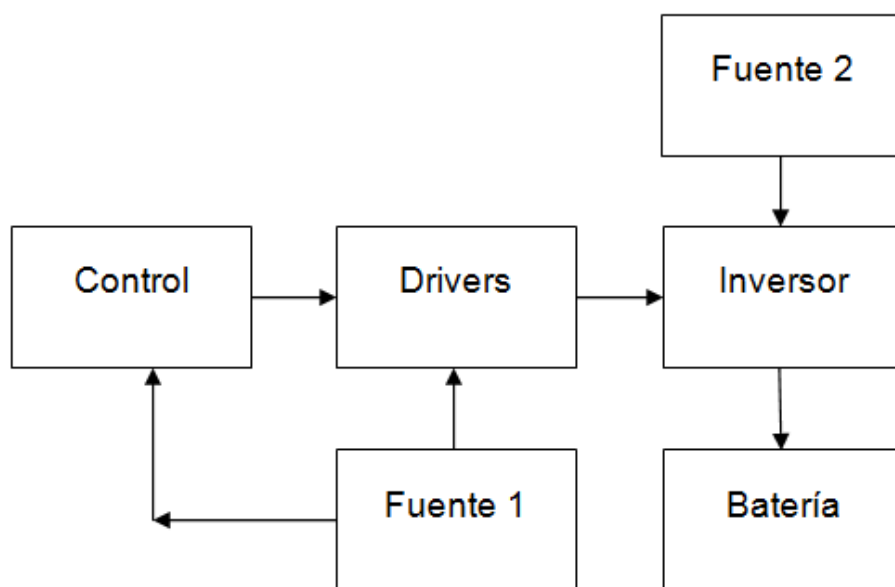


Figura 2.12. Diagrama a bloques de las etapas del prototipo.

# **Capítulo**

## **3 Resultados de**

### **Simulación**

### 3.1 Introducción.

En este capítulo se presentan la simulación y resultados experimentales, tanto de la etapa de control como de la etapa de potencia.

En la figura 3.1 se muestran las conexiones de los circuitos, el inversor, drivers y control. Se conectan los drivers en cada una de las salidas (ramas) del inversor, a su vez los drivers son conectados a una fuente de alimentación diferente a la que el inversor utiliza. El control es conectado a los drivers para que mediante las señales PWM senoidal controlen las conmutaciones en los transistores.

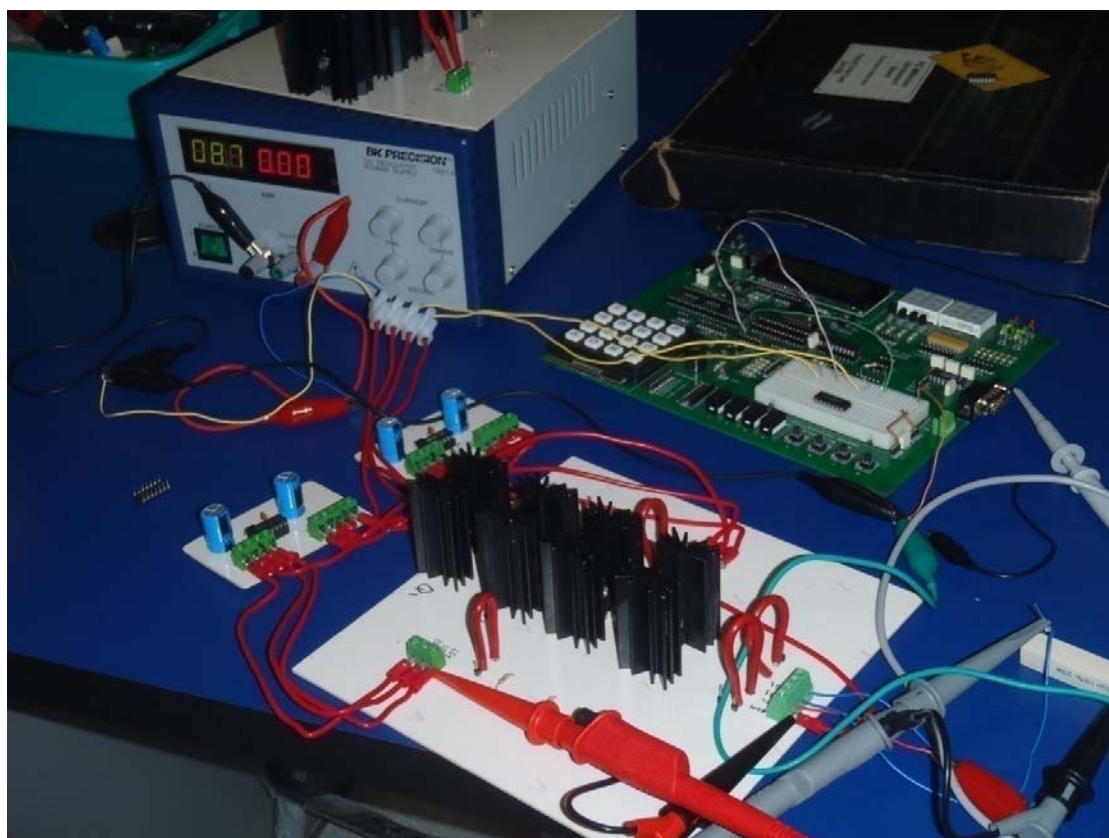


Figura 3.1. Imagen de la conexión del Inversor, Drivers y Control PWM senoidal

### 3.2 Simulación del control.

El control está basado en la comparación de dos señales (una rampa y una senoidal), y como resultado generar un tren pulsos PWM, en el cual, está incluida la información de la senoidal. A esta técnica se le conoce como PWM senoidal. La figura 3.2 muestra el circuito de control simulado utilizando el programa PSIM 6. Se genera una señal triangula de alta frecuencia (1 KHz. o más) comparada con una señal senoidal de 60 Hz (patrón).

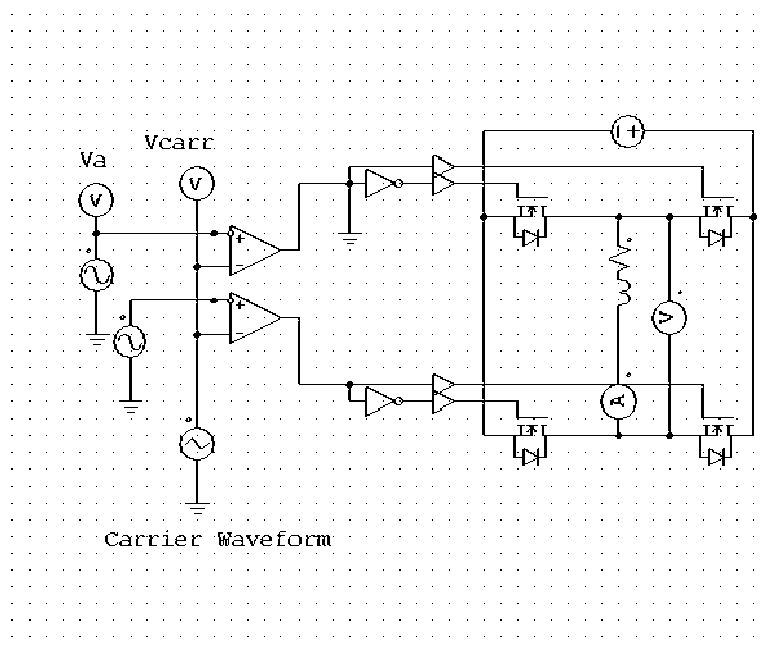


Figura 3.2. Imagen de la Simulación del Control PWM Senoidal

Una vez implementado el circuito, se ejecuta la simulación. Por medio de un instrumento virtual tomamos la muestra en el comparador. Como se observa en la figura 3.3, el control formado por la comparación de las señales tanto senoidal como la triangular, actúan sobre el inversor de corriente y generan un tren de pulsos de señal cuadrada (PWM Senoidal).

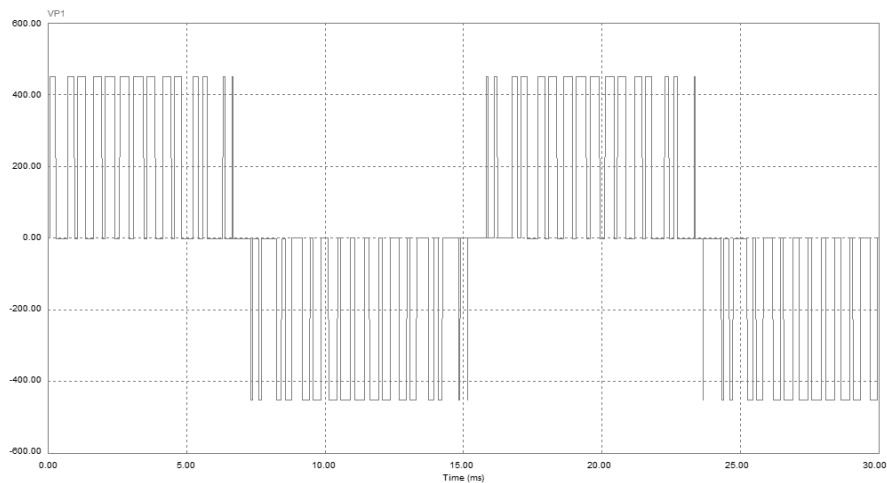


Figura 3.3. Grafica de la simulación del control PWM senoidal

El siguiente paso es realizar una programación en el microcontrolador para generar los pulsos de la señal cuadrada. Para ello se necesitó del software **Micro-codeEstudio**. Cabe mencionar que para generar estos pulsos, fue necesario realizar la medición pertinente de la duración de cada uno de los pulsos que generó el comparador virtual realizado en el **PSIM** (ver figura 3.4).

### 3.2.1 Tiempos de disparo de la señal generada en PSIM.

Una vez obtenida la señal de salida en el simulador, se obtienen de dicha gráfica los tiempos de encendido y apagado. La tabla 3.1 muestran los periodos de conmutación obtenidos.

Una vez obtenidos los tiempos de conmutación, se realizó un redondeo para manejar números enteros y poderlos programar. También se realizó un ajuste (división entre 28 y redondeo) para programar valores permitidos en los temporizadores del microcontrolador.



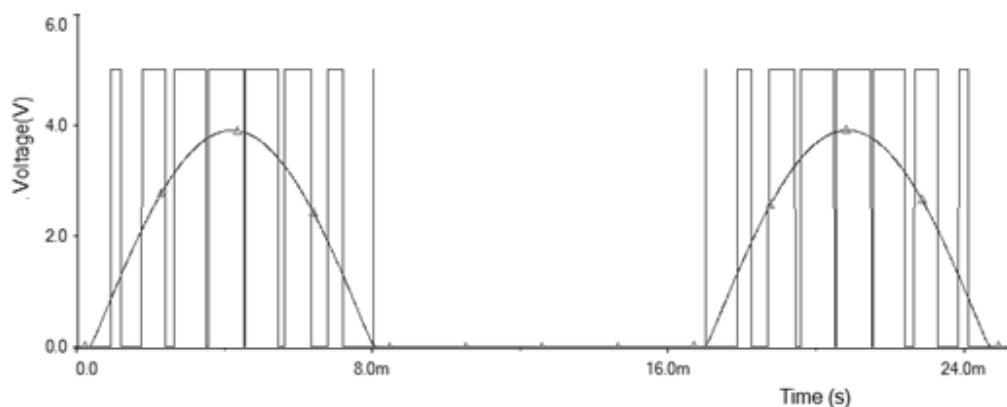


Figura 3.4. Grafica de la Señal de referencia senoidal que genera los tiempos de conmutación

Tabla 3.1. Datos tomados de los resultados de las Mediciones de la simulación

	Tiempos obtenidos	Primer redondeo de tiempos	División entre 28.0	Segundo redondeo de tiempos
	885.4956	886	30.7638889	31
<b>Encendido</b>	279.9905	280	9.72222222	10
<b>Apagado</b>	560.3882	560	19.4444444	19
<b>Encendido</b>	639.8759	640	22.2222222	22
<b>Apagado</b>	240.8076	241	8.36805556	8
<b>Encendido</b>	869.9031	870	30.2083333	30
<b>Apagado</b>	50.3422	50	1.73611111	2
<b>Encendido</b>	960.4762	960	33.3333333	33
<b>Apagado</b>	30.821	31	1.07638889	1
<b>Encendido</b>	919.4076	919	31.9097222	32
<b>Apagado</b>	149.841	150	5.20833333	5
<b>Encendido</b>	729.7019	730	25.3472222	25
<b>Apagado</b>	441.1567	441	15.3125	15
<b>Encendido</b>	410.6864	411	14.2708333	14
<b>apagado</b>	837.203	837	29.0625	29

### **3.3 Programación del PIC-16F84A.**

Para realizar la programación del Microcontrolador 16F84A se utilizó el programador **PIC-600** con puerto USB, que conecta directamente a la PC.

Se realiza una pequeña rutina con el software **PICBasic** para el microcontrolador 16F84A. Esta rutina genera en determinado tiempo una señal de disparo, conforme a los tiempos de medición obtenidos en el PSIM. Las mediciones preliminares del control empleando el lenguaje **PIC-Basic** reflejan tiempos de retardo considerables por lo que se optó por el lenguaje **ensamblador**, que básicamente permite manejar grandes velocidades para cada uno de los tiempos de disparo (Anexo G).

# **Capítulo**

# **4 Resultados**

# **experimentales**

#### 4.1 Inversor de onda cuadrada.

Se implementó un inversor de puente completo (figura 4.1) y con control de onda cuadrada (Anexo H) para realizar una comparación entre dos diferentes técnicas de control. La figura 4.2 muestra las señales de control para un inversor de onda cuadrada.

Nótese la alternancia de las señales para evitar corto circuito en las ramas del inversor, es decir, no se pueden activar simultáneamente  $Q_1$  y  $Q_4$ , ya que produce un cortocircuito en la rama 1. De igual manera no se deben activar simultáneamente  $Q_2$  y  $Q_3$  ya que se produce un corto en el rama 2.

La señal A (superior) de la figura 4.2, corresponde al control aplicado sobre  $Q_1$  y  $Q_3$ , de igual manera la señal B (inferior) corresponde al control aplicado sobre  $Q_2$  y  $Q_4$ .

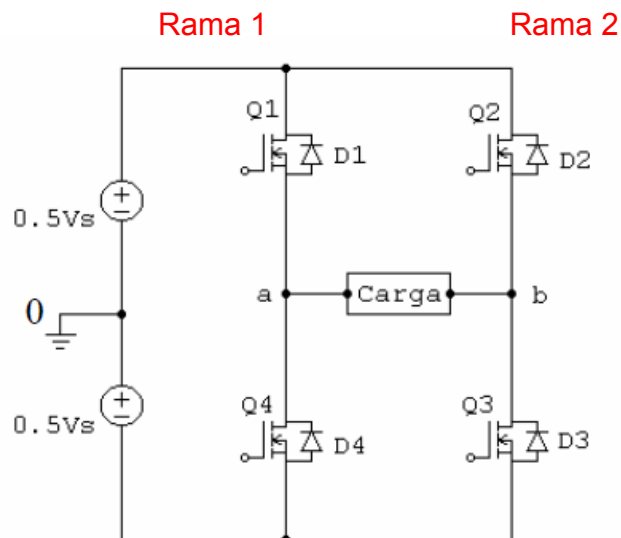


Figura 4.1. Esquema del inversor de puente completo

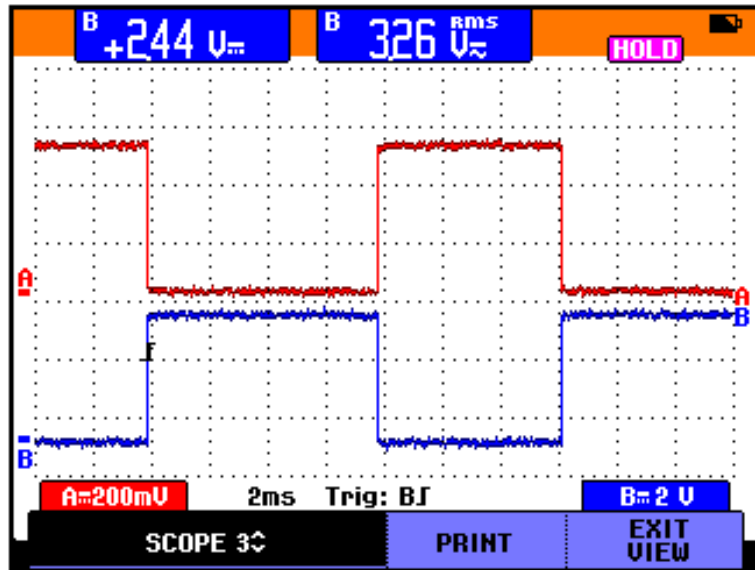


Figura 4.2. Señales de control para cada rama del inversor de onda cuadrada

Este inversor tiene la característica de solo generar una señal cuadrada, tal como se muestra en la figura 4.3, con un alto contenido armónico (Fig. 4.4).

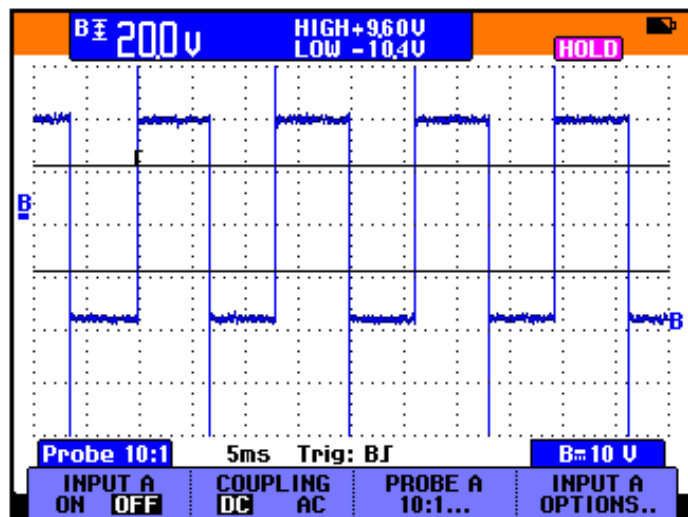


Figura 4.3. Señal de salida de un inversor de onda Cuadrada

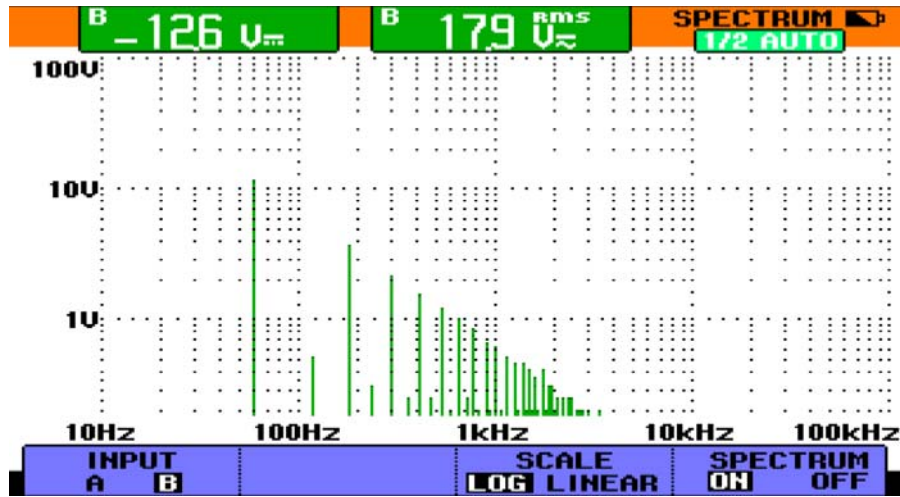


Figura 4.4. Señal de contenido armónico del Inversor de Onda Cuadrada

Con esto se concluyen las pruebas realizadas específicamente al inversor de onda cuadrada, debido a que es la base para seguir con el diseño del control PWM senoidal.

#### 4.2 Inversor PWM Senoidal.

La siguiente etapa de experimentación consistió en implementar un control PWM senoidal y aplicarlo al mismo inversor de puente completo. En la figura 4.5 se muestra las señales de control para cada rama del inversor, como se ha mencionado con anterioridad, se debe procurar que las señales de control de cada rama estén presentes de forma alternada para evitar una condición de cortocircuito.

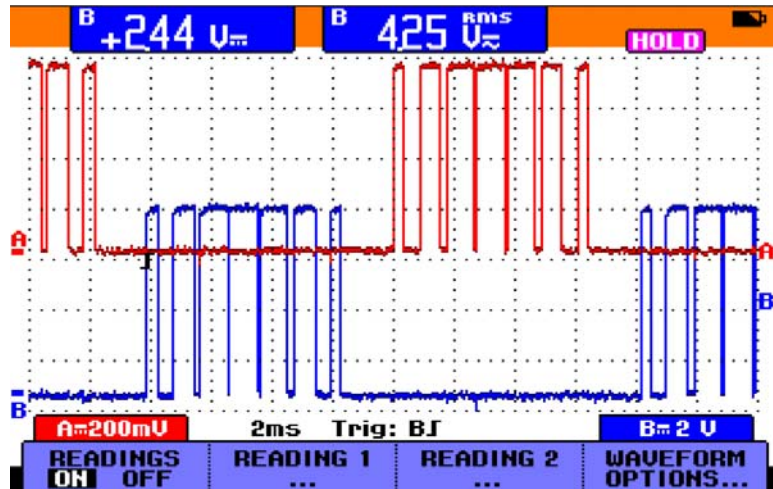


Figura 4.5. Señales de control para cada rama del inversor PWM senoidal

La figura 4.6 muestra los resultados al implementar un control PWM senoidal al inversor puente completo. La entrada A, (superior), corresponde a la señal de control que incluye la información de la senoidal de 60 Hz en las conmutaciones. La señal B, en (inferior) corresponde a la salida del inversor (corriente alterna multinivel). La señal tiende a formar un senoidal, pero la forma de onda senoidal se logra conseguir en la corriente, no tanto así en el voltaje que mantiene una forma alterna multinivel. Por medio de filtros implementado a la salida de la señal, es posible reducir al máximo los armónicos hasta lograr obtener la forma senoidal deseada.

La figura 4.7 muestra el contenido armónico y se puede apreciar una reducción respecto al caso de inversor de onda cuadrada. El objetivo de esta técnica de control es la de reducir los armónicos para obtener una forma de onda en la corriente cuasi senoidal.

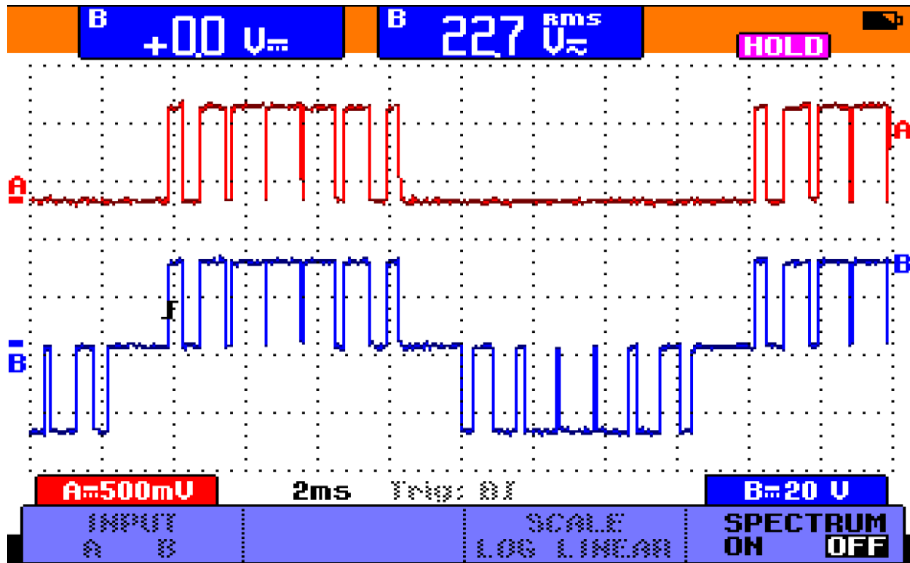


Figura 4.6. Señales de control y de salida para el inversor PWM senoidal

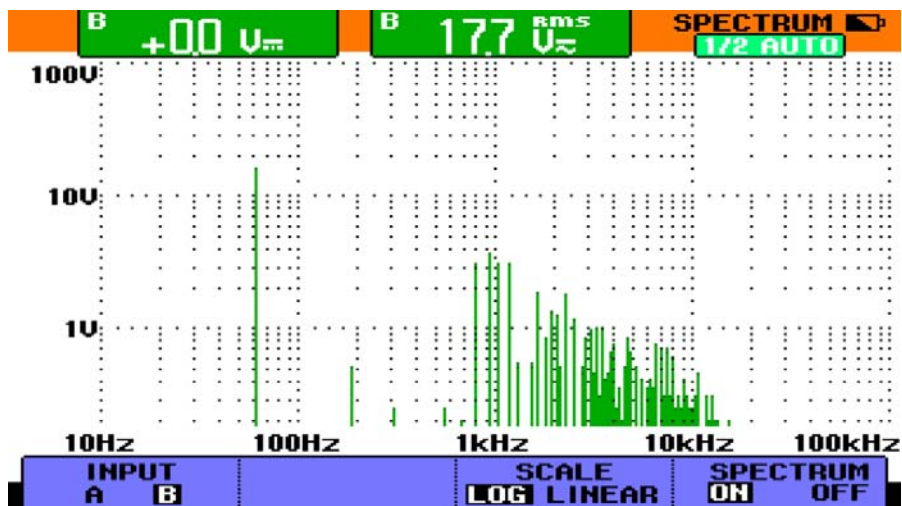


Figura 4.7. Señal de contenido armónico del Inversor PWM senoidal



## **Conclusiones.**

Este trabajo nos ha permitido aplicar los conocimientos de diversas áreas de nuestra formación como Ingenieros en Redes. Temáticas como electrónica, micro-controladores, instrumentación, circuitos eléctricos, etc. se ven entrelazadas en este proyecto.

Una vez analizado los resultados obtenidos de la implementación del inversor de corriente en conjunto con los drivers y utilizando el control PWM senoidal, se pueden llegar a las siguientes conclusiones:

- Tradicionalmente el control PWM senoidal se realiza de manera analógica, con comparadores, amplificadores, temporizadores y generadores de señal.
- En este trabajo se presenta una versión de control PWM senoidal implementado en forma digital.
- Fue posible la implementación del control PWM senoidal, utilizando un micro-controlador PIC, usando el lenguaje de programación ensamblador, permitiendo con ello altas velocidades en la generación de los pulsos de control.
- Uno de los problemas es la posibilidad de que exista interferencia generada por la radiofrecuencia. Para ello es aconsejable ubicar cerca el control respecto a la carga y aplicando filtros capacitivos a la fuente de la alimentación.
- Se requiere de un transformador de baja frecuencia a la salida para acoplar a la red o de un arreglo FV de entrada con tensión elevada.

- Utilizando el control PWM se puede obtener en la salida del inversor una onda casi senoidal. Aplicando filtros se reducen considerablemente los armónicos y se obtiene la componente fundamental.

Este trabajo forma parte de un proyecto en el que se están analizando y comparando diversas estrategias de control sobre los inversores fotovoltaicos con interconexión a la red eléctrica.

Existen algunos aspectos que pueden continuarse de este trabajo, dentro de estos destacan:

- Diseño óptimo del transformador de línea
- Pruebas de conexión y desconexión de la red
- Cuantificación de la energía que se inyecte a la red
- Robustez ante los transitorios de la red

## **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.**Revista de ingeniería eléctrica, electrónica y computación, Diciembre 2009, Vol. 7.
- [3]. **Dr. Rodolfo Echavarría Solís, MC. Sinuhé Ramírez Guerrero.**Análisis y desarrollo de un inversor multinivel. *Tesis.* Cuernavaca, morelos : s.n., 2002.
- [4]. **Horenstein, Mark N.***Microelectrónica: Circuitos y Dispositivos.* Prentice Hall Hispanoamerica, 1997.
- [5]. **Gottlieb, Irving M.***Power Supplies, Switching Regulators, Inverters, and Converters.* United States of America, McGram-Hill, 1994.
- [6]. **Tarter, Ralph E.***Principles of Solid-State Power Conversion.* United States of America : Howard W. Sams and Co., Inc.
- [7]. **Bose, B. K.***Power Electronics and AC Drives.* s.l. : New Jersey, United States of America, 1986.
- [8]. **Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins.***Power Electronics, Converters, Applications and Design.* United States of America : John Wiley and Sons.
- [9]. **Rashid, Muhammad H.***Electrónica de Potencia: Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones.* Prentice Hall Hispanoamerica, S. A., 1995.

## **Glosario.**

**Armónico:** Son distorsiones de las ondas sinusoidales de tensión y/o corriente de los sistemas eléctricos, debido al uso de cargas con impedancia no lineal, a materiales ferromagnéticos, y en general al uso de equipos que necesiten realizar conmutaciones en su operación normal.

**Atenuación:** Es la reducción de nivel de una señal, cuando pasa a través de un elemento de un circuito, o la reducción en nivel de la energía de vibración, cuando pasa a través de una estructura.

**Banco de baterías:** Conjunto de pilas conectada en serie, en paralelo o en serie-paralelo para formar una batería.

**Banda muerta:** Son aquellas zonas donde la sensibilidad es nula lo que hace que no cambie su indicación y señal de salida; o rango dentro del cual puede variarse una entrada, sin causar un efecto en la señal de salida.

**Capacitor electrolítico:** Es un elemento polarizado, por lo que sus terminales no pueden ser invertidas. Generalmente el signo de polaridad viene indicado en el cuerpo del capacitor.

**Carga resistiva:** Es la resistencia al paso de la corriente eléctrica que ofrecen los materiales, cuanto más baja es la resistencia se dice que la carga es más alta.

**Ciclo:** Se denomina ciclo a cada patrón repetitivo de una onda.

**Circuito:** Es una red eléctrica (interconexión de dos o más componentes, tales como resistencias, inductores, condensadores, fuentes, interruptores y semiconductores) que contiene al menos una trayectoria cerrada.

**Circuito rectificador:** Es un elemento que permite convertir la corriente alterna en corriente continua. Esto se realiza utilizando diodos rectificadores.

**Comparador:** Es un circuito electrónico, ya sea analógico o digital, capaz de comparar dos señales de entrada y variar la salida en función de cuál es mayor.

**Componente fundamental:** Es la frecuencia más baja de espectro de frecuencias tal que las frecuencias dominantes pueden expresarse como múltiplos de esta frecuencia fundamental.

**Condensador:** Se llama condensador a un dispositivo que almacena carga eléctrica. El condensador está formado por dos conductores próximos uno a otro, separados por un aislante, de tal modo que puedan estar cargados con el mismo valor, pero con signos contrarios.

**Conmutación:** Al establecimiento, por parte de una red de comunicaciones, de una vía dedicada exclusiva y temporalmente (o "circuito") a la transmisión de extremo a extremo entre dos puntos, un emisor y un receptor.

**Convertidores (Inversor):** Es un circuito utilizado para convertir corriente continua en corriente alterna.

**Corriente:** Es el flujo de carga por unidad de tiempo que recorre un material. Se debe a un movimiento de los electrones en el interior del material

**Corriente alterna:** Se comporta como su nombre lo indica. Los electrones del circuito se desplazan primero en una dirección y luego en sentido opuesto, con un movimiento de vaivén en torno a posiciones relativamente fijas. Esto se consigue alternando la polaridad del voltaje del generador o de otra fuente.

**Corriente directa:** Es el flujo continuo de electrones a través de un conductor entre dos puntos de distinto potencial. A diferencia de la corriente alterna, en la corriente continua las cargas eléctricas circulan siempre en la misma dirección.

**Cruce por cero:** Es el punto en la cual una onda o señal cambia de polaridad o signo. El objetivo principal es transmitir los datos tan cerca del punto de cruce por cero como sea posible

**Diodo rectificador:** El nombre diodo rectificador procede de su aplicación, la cual consiste en separar los ciclos positivos de una señal de corriente alterna.

**Disipador de calor:** Son componentes metálicos que utilizan para evitar que algunos elementos electrónicos como los transistores bipolares, algunos diodos, SCR, TRIACs, MOSFETS, se calienten demasiado y se dañen.

**Driver:** Es un circuito que hace las funciones "intermedias" entre dos circuitos o dicho de otra manera el que adapta niveles de tensión, señal y/o entre dos circuitos.

**Espectro de frecuencia:** Un fenómeno ondulatorio (sonoro, luminoso o electromagnético), superposición de ondas de varias frecuencias, es una medida de la distribución de amplitudes de cada frecuencia.

**Filtrado:** Como el nombre lo indica es un filtro, que permite eliminar el ruido que hay en un sistema, por lo general las de alta frecuencia.

**Frecuencia:** Es una magnitud que mide el número de repeticiones por unidad de tiempo cualquier fenómeno o suceso periódico.

**Fuente de poder:** Es un dispositivo que convierte la tensión alterna de la red de suministro, en una o varias tensiones, prácticamente continuas, que alimentan los distintos circuitos del aparato electrónico que se conecta.

**Ganancia:** En señales eléctricas es una magnitud que expresa la relación entre la amplitud de una señal de salida respecto a la señal de entrada. La ganancia es una magnitud adimensional que se mide en unidades como el belio (B) o múltiplos de éste como el decibelio (dB).

**Microcontrolador:** Es un circuito que incluye en su interior las tres unidades funcionales de una computadora: unidad central de procesamiento, memoria y periféricos de entrada y salida. Llevan a cabo tareas o trabajos específicos mediante programación.

**Modulación:** Es un conjunto de técnicas que se aplican en el transporte de información sobre una onda portadora. El proceso de modulación consiste en variar un parámetro de la onda portadora en función de las alteraciones de la señal moduladora. La modulación contribuye a proteger la señal de interferencias y ruidos.

**Mosfet:** Consiste en un sustrato de material semiconductor dopado en el que, mediante técnicas de difusión de dopantes. Realizan conmutaciones a velocidades altas, se utilizan en aplicaciones en los convertidores de alta frecuencia y baja potencia.

**Onda cuadrada:** Se conoce a la onda de corriente alterna, que alterna su valor entre dos valores extremos sin pasar por los valores intermedios (al contrario de lo que sucede con la onda senoidal y la onda triangular)

**Onda de senoidal:** Se trata de una señal analógica, puesto que existen infinitos valores entre dos puntos cualesquiera del dominio. Esta onda es la gráfica de la función matemática seno.

**Onda triangular:** Es un tipo de señal periódica que representa unas velocidades de subida y bajada constantes. Lo más habitual es que sea simétrica, es decir que, los tiempos de subida y bajada son iguales.

**Optoacopladores:** También llamado optoaislador o aislador acoplado ópticamente, es un dispositivo de emisión y recepción que funciona como un interruptor excitado mediante la luz emitida por un diodo Led que satura un componente optoelectrónico, normalmente en forma de fototransistor o fototriac.

**Osciloscopio:** Es un instrumento de medición electrónico para la representación gráfica de señales eléctricas que pueden variar en el tiempo. Es muy usado en electrónica de señal, frecuentemente junto a un analizador de espectro.

**Panel solar:** Es un módulo que aprovecha la energía de la radiación solar. El término comprende a los colectores solares y a los paneles fotovoltaicos utilizados para generar energía.

**Potencia eléctrica:** Es la relación de un paso de energía de un flujo por unidad de tiempo; es decir, la cantidad de energía entregada o absorbida por un elemento en un tiempo. La unidad en el Sistema Internacional de Unidades es el vatio o watt, que es lo mismo.

**Radian:** Es la unidad de ángulo plano en el Sistema Internacional de Unidades. Representan al ángulo central en una circunferencia que se subtende un arco cuya longitud es igual a la del radio.

**Semiconductor:** Es una sustancia que se comporta como conductor o como aislante dependiendo de los diversos factores, como por ejemplo el campo eléctrico o magnético, la presión, la radiación que le incide, o la temperatura del ambiente en el que se encuentre.

**Señal portadora:** Es una forma de onda, generalmente sinusoidal, que es modulada por una señal que se quiere transmitir. Esta onda portadora es de una frecuencia mucho más alta que la señal moduladora (la señal que contiene la información a transmitir).

**Tiristor:** Es un componente electrónico constituido por elementos semiconductores que utiliza realimentación interna para producir una conmutación. Son dispositivos unidireccionales porque solamente transmiten la corriente en un único sentido.

**Transformador:** Se denomina a un dispositivo eléctrico que permite aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna, manteniendo la frecuencia.

**Transistor:** Es un dispositivo electrónico semiconductor que cumple funciones de amplificadora, oscilador, conmutador o rectificador.

**Tren de pulsos:** Es un evento sonoro que comprende uno o varios flujos continuos de pulsos. Los pulsos con señales cuadradas.

**Voltaje:** Es la presión que ejerce una fuente de suministro de energía eléctrica o fuerza electromotriz sobre las cargas eléctricas o electrones en un circuito eléctrico cerrado, para que establezca el flujo de una corriente eléctrica.

## Abreviaturas

BJT. Transistor de Unión Bipolar  
CA. Corriente Alterna  
CD. Corriente Directa  
CFE. Comisión Federal de Electricidad  
CFI. Inversor Alimentado por Corriente  
FV. Foto Voltaico  
GTO. Tiristor Bloqueable por Puerta  
IGBT. Transistor Bipolar de Puerta Aislada  
MCT. Tiristor Controlado por MOS  
MOSFET. Transistor de Efecto de Campo MOS  
MSPWM. Modulación Senoidal Modificada  
PIC. Controlador de Interfaz Periférico  
PSIM. Simulación de Circuitos Electrónicos  
PWM. Modulación por Ancho de Pulsos  
RMS. Valor Eficaz de una Corriente Sinusoidal  
SIT. Transistor de Inducción Estática  
THD: Distorsión Armónica Total  
TRT. Terminal Alejado Gemelo de Improx  
UPWM. Modulación Uniforme de Ancho de Pulso  
USB. Bus Universal en Serie  
VFI. Inversor Alimentado por Voltaje

## Tabla de Símbolos

$\mu$ . Microsegundos  
a. Punto de carga  
b. Punto de carga  
C. Capacitor  
CO<sub>2</sub>: Dióxido de Carbono



D. Diodo  
dt. Derivada de tiempo  
f. Frecuencia  
fc. Señal portadora  
fo. Señal de referencia  
fr. Frecuencia de la señal de referencia  
Ho. Señal de salida del inversor  
Hz. Hertz  
I. Carga o Corriente  
KHz. Kilo Hertz  
Im. Corriente pico  
Lo. Señal de salida del inversor  
M. Modulación  
MCLR. Borra la memoria del microcontrolador  
n. Número infinito de componentes de la señal  
OSC1/CLKIN. Reloj de entrada del microcontrolador  
OSC2/CLKOUT. Rejos de salida del microcontrolador  
Q. Dispositivo donde se realiza la conmutación  
R. Resistencia  
RA. Compuertas lógicas del microcontrolador  
RA4/T0CKI. Resistencia del microcontrolador  
RB. Compuertas lógicas del microcontrolador  
RB0/INT. Resistencia de entra del microcontrolador  
S. Señal  
Sen. Seno  
T. Tiempo  
Td. Banda Muerta  
Va. Voltaje de entrada de la simulación  
Vcarr. Tren de pulsos  
Vdc. Voltaje pico

$V_{DD}$ . Voltaje entrada del microcontrolador

$V_O$ . Voltaje de Salida

$V_S$ . Voltaje de entrada

$V_{SS}$ . Voltaje entra del microcontrolador

x. Desfase de la señal

$\pi$ . Numero transcendental que expresa la relación entre la longitud de la circunferencia y su diámetro

$\square$  = Ángulo donde se genera el voltaje de salida

$\Sigma$ . Sumatoria

$\square$ . Angulo de la corriente

$\omega$ . Frecuencia del voltaje de salida

$\omega t$ . Línea de tiempo para medir una señal

# 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 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

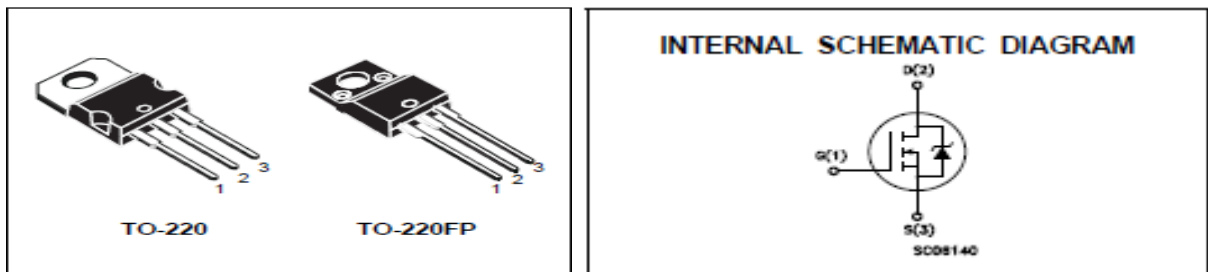


## IRF640FP

## IRF640

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	$\pm 20$		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	-65 to 150		$^\circ\text{C}$
$T_j$	Max. Operating Junction Temperature	150		$^\circ\text{C}$

( $\bullet$ ) Pulse width limited by safe operating area

(1)  $I_D \leq 18\text{A}$ ,  $dv/dt \leq 300\text{ A}/\mu\text{s}$ ,  $V_{DD} \leq V_{(DR)DSS}$ ,  $T_j \leq T_{j,MAX}$

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



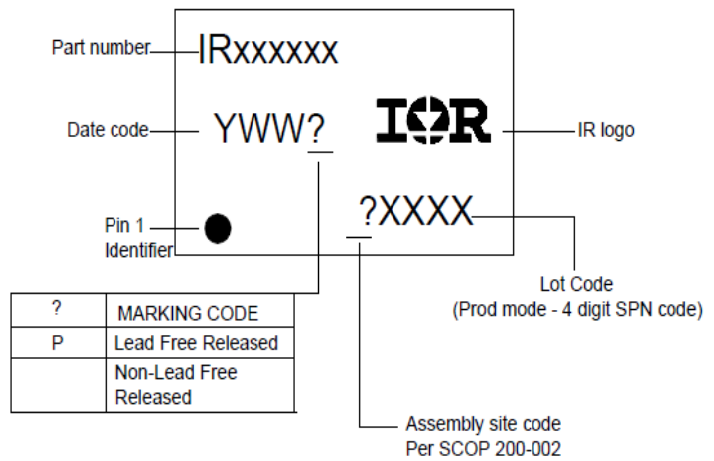
## IR2110(S)/IR2113(S)&(PbF)

### HIGH AND LOW SIDE DRIVER

#### Product Summary

V <sub>OFFSET</sub> (IR2110)	500V max.
(IR2113)	600V max.
I <sub>O+/-</sub>	2A / 2A
V <sub>OUT</sub>	10 - 20V
t <sub>on/off</sub> (typ.)	120 & 94 ns
Delay Matching (IR2110)	10 ns max.
(IR2113)	20ns max.

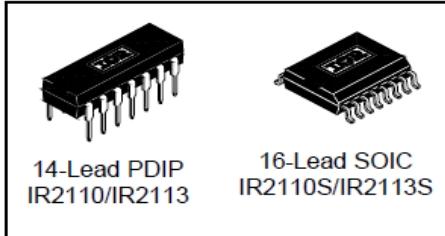
#### LEADFREE PART MARKING INFORMATION



# Anexo D. Datasheet 1N4007

**1N4001, 1N4002, 1N4003,**

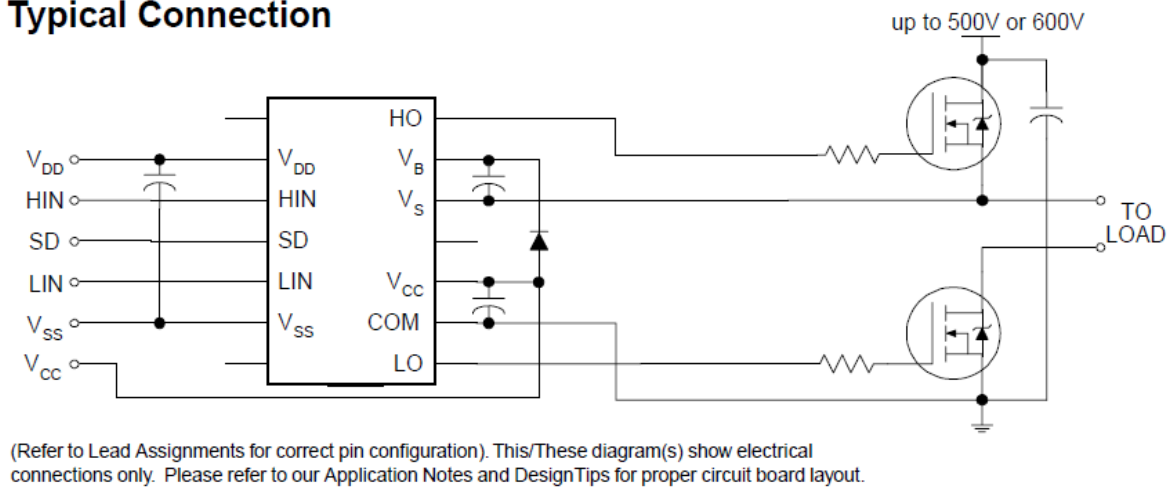
## Packages



ON Semiconductor®

**1N4004,  
1N4005,  
1N4006,  
1N4007**

## Typical Connection

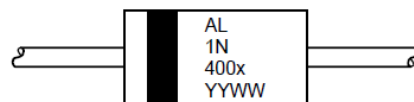


## Axial Lead Standard Recovery Rectifiers

### 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

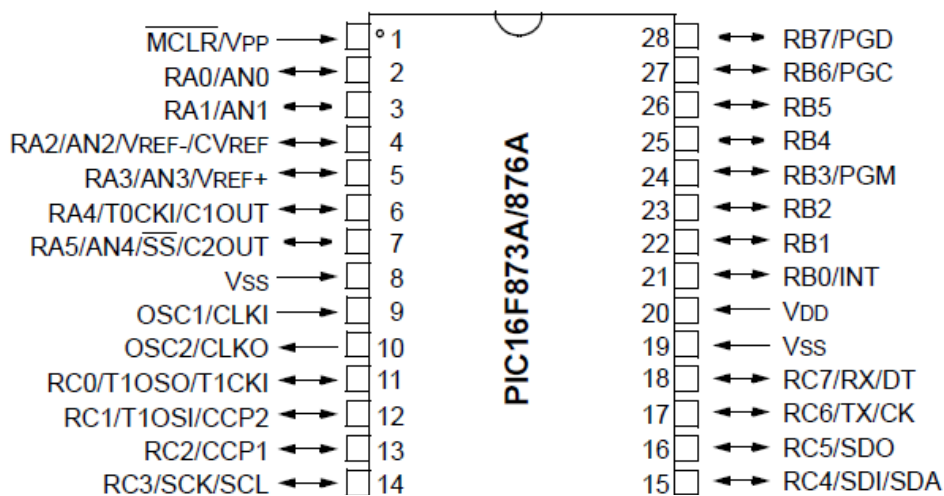
Rating	Symbol	1N4001	1N4002	1N4003	1N4004	1N4005	1N4006	1N4007	Unit
*Peak Repetitive Reverse Voltage Working Peak Reverse Voltage DC Blocking Voltage	$V_{RRM}$ $V_{RWM}$ $V_R$	50	100	200	400	600	800	1000	V
*Non-Repetitive Peak Reverse Voltage (halfwave, single phase, 60 Hz)	$V_{RSM}$	60	120	240	480	720	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



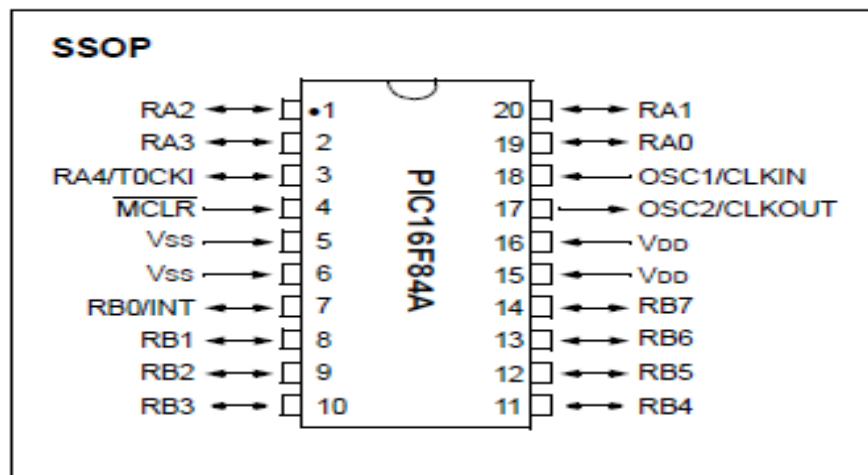
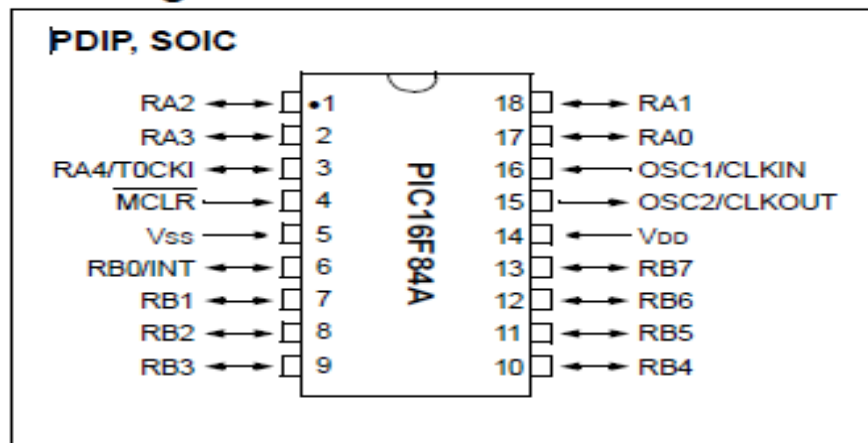
Device	Program Memory		Data SRAM (Bytes)	EEPROM (Bytes)	I/O	10-bit A/D (ch)	CCP (PWM)	MSSP		USART	Timers 8/16-bit	Comparators
	Bytes	# Single Word Instructions						SPI	Master I <sup>2</sup> C			
PIC16F873A	7.2K	4096	192	128	22	5	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2
PIC16F874A	7.2K	4096	192	128	33	8	2	Yes	Yes	Yes	2/1	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. Código PWM Senoidal

```
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 -----
INTEG 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,0XD3; 1101 0011 activa flanco ascendente y el TMR0 a 16us
;-----
pulse
    BCF PORTA, 0 ; prende el puerto A.0
```

CALL pausa53	; llama pausa
BSF PORTA, 0	; apaga puerto A.0
CALL pausa21	; llama pausa
BCF PORTA, 0	; prende el puerto A.0
CALL pausa31	; llama pausa
BSF PORTA, 0	; apaga puerto A.0
CALL pausa43	; llama pausa
BCF PORTA, 0	; prende el puerto A.0
CALL pausa12	; llama pausa
BSF PORTA, 0	; apaga puerto A.0
CALL pausa55	; llama pausa
BCF PORTA, 0	; prende el puerto A.0
CALL pausa3	; llama pausa
BSF PORTA, 0	; apaga puerto A.0
CALL pausa60	; llama pausa
BCF PORTA, 0	; prende el puerto A.0
CALL pausa3	; llama pausa
BSF PORTA, 0	; apaga puerto A.0
CALL pausa55	; llama pausa
BCF PORTA, 0	; prende el puerto A.0
CALL pausa12	; llama pausa
BSF PORTA, 0	; apaga puerto A.0
CALL pausa43	; llama pausa
BCF PORTA, 0	; prende el puerto A.0
CALL pausa31	; llama pausa
BSF PORTA, 0	; apaga puerto A.0
CALL pausa21	; llama pausa
BCF PORTA, 0	; prende el puerto A.0
CALL pausa53	; llama pausa
BCF PORTA, 1	; prende el puerto A.0
CALL pausa53	; llama pausa
BSF PORTA, 1	; apaga puerto A.0
CALL pausa21	; llama pausa
BCF PORTA, 1	; prende el puerto A.0
CALL pausa31	; llama pausa
BSF PORTA, 1	; apaga puerto A.0
CALL pausa43	; llama pausa
BCF PORTA, 1	; prende el puerto A.0
CALL pausa12	; llama pausa
BSF PORTA, 1	; apaga puerto A.0
CALL pausa55	; llama pausa
BCF PORTA, 1	; prende el puerto A.0
CALL pausa3	; llama pausa
BSF PORTA, 1	; apaga puerto A.0
CALL pausa60	; llama pausa
BCF PORTA, 1	; prende el puerto A.0
CALL pausa3	; llama pausa
BSF PORTA, 1	; apaga puerto A.0
CALL pausa55	; llama pausa
BCF PORTA, 1	; prende el puerto A.0
CALL pausa12	; llama pausa
BSF PORTA, 1	; apaga puerto A.0
CALL pausa43	; llama pausa

```

BCF PORTA, 1          ; prende el puerto A.0
CALL pausa31         ; llama pausa
BSF PORTA, 1          ; apaga puerto A.0
CALL pausa21         ; llama pausa
BCF PORTA, 1          ; prende el puerto A.0
CALL pausa53         ; llama pausa

```

```
goto pulse
```

```

;-----
pausa53
    CLRF TMR0          ; reinicia el contador TMR0
chechar53
    MOVF TMR0, W       ; carga el valor del timer a w
    SUBLW d'53'        ; resta w-7
    BTFSS STATUS, Z   ; verifica si se llega al límite del timer
    GOTO checar53
    RETURN
;-----
pausa21
    CLRF TMR0          ; reinicia el contador TMR0
chechar21
    MOVF TMR0, W       ; carga el valor del timer a w
    SUBLW d'21'        ; resta w-7
    BTFSS STATUS, Z   ; verifica si se llega al límite del timer
    GOTO checar21
    RETURN
;-----
pausa31
    CLRF TMR0          ; reinicia el contador TMR0
chechar31
    MOVF TMR0, W       ; carga el valor del timer a w
    SUBLW d'31'        ; resta w-7
    BTFSS STATUS, Z   ; verifica si se llega al límite del timer
    GOTO checar31
    RETURN
;-----
pausa43
    CLRF TMR0          ; reinicia el contador TMR0
chechar43
    MOVF TMR0, W       ; carga el valor del timer a w
    SUBLW d'43'        ; resta w-7
    BTFSS STATUS, Z   ; verifica si se llega al límite del timer
    GOTO checar43
    RETURN
;-----
pausa12
    CLRF TMR0          ; reinicia el contador TMR0
chechar12
    MOVF TMR0, W       ; carga el valor del timer a w
    SUBLW d'12'        ; resta w-7

```

```

    BTFSS     STATUS, Z    ; verifica si se llega al límite del timer
    GOTO checar12
    RETURN

;-----
pausa55
    CLRF     TMR0          ; reinicia el contador TMR0
checar55
    MOVF     TMR0, W       ; carga el valor del timer a w
    SUBLW    d'55'         ; resta w-7
    BTFSS     STATUS, Z    ; verifica si se llega al límite del timer
    GOTO checar55
    RETURN

;-----
pausa3
    CLRF     TMR0          ; reinicia el contador TMR0
checar3
    MOVF     TMR0, W       ; carga el valor del timer a w
    SUBLW    d'3'          ; resta w-7
    BTFSS     STATUS, Z    ; verifica si se llega al límite del timer
    GOTO checar3
    RETURN

;-----
pausa60
    CLRF     TMR0          ; reinicia el contador TMR0
checar60
    MOVF     TMR0, W       ; carga el valor del timer a w
    SUBLW    d'60'         ; resta w-7
    BTFSS     STATUS, Z    ; verifica si se llega al límite del timer
    GOTO checar60
    RETURN
END

```

## Anexo H. Código Señal Cuadrada

---

```
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 0011 activa flanco ascendente y el TMR0 a 64us
;-----
pulse
    BSF PORTA, 0      ; prende el puerto A.0
    CALL pausa        ; llama pausa
    BCF PORTA,0       ; apaga puerto A.0
    CALL pausa2       ; llama pausa
    BSF PORTA,1       ; prende el puerto A.0
    CALL pausa        ; llama pausa
    BCF PORTA,1       ; apaga puerto A.0
    CALL pausa2       ; llama pausa

    goto pulse

;-----
pausa
    CLR F TMR0        ; reinicia el contador TMR0
chechar
    MOV F TMR0,W      ; carga el valor del timer a w
    SUBLW d'130'      ; resta w-7
    BTFSS STATUS,Z   ; verifica si se llega al límite del timer
    GOTO chechar
    RETURN

;-----
pausa2
    CLR F TMR0        ; reinicia el contador TMR0
chechar2
    MOV F TMR0,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 chechar2
    RETURN
END

```