



Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Facultad de Ciencias

Posgrado en Ciencias Aplicadas



Utilización de la Energía Solar para el Funcionamiento de un Refrigerador de Corriente Alterna.

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS APLICADAS
PRESENTA**

ING. JOSE REYNALDO GUILLEN CASTILLO

SAN LUIS POTOSÍ, S.L.P. 17 de Marzo 2017.

Título:

Utilización de la energía solar para el funcionamiento de un refrigerador de corriente alterna.

Nombre del estudiante:

I.E. José Reynaldo Guillen Castillo.

Comité que acepta la Tesis:

Dr. Oscar F. Núñez Olvera (Asesor)

Dr. Raúl Balderas Navarro (Asesor)

Dr. Alfonso Lastras Martínez (Sinodal)

Dr. Isaac Campos Cantón (Sinodal)

M.I. Griselda Rodríguez P. (Sinodal)

San Luis Potosí 17 de Marzo del 2017.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, y al Instituto de Investigación en Comunicación Óptica por permitirme realizar mis estudios de maestría.

Al consejo nacional de ciencia y tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para este fin.

A los Doctores del IICO por sus enseñanzas y apoyo para mi formación profesional.

A Lupita, Liliana, Karla Marely, y todo el personal del IICO que ayudan para que nuestra estancia en el instituto sea lo mejor posible.

A mi familia mis padres Reynaldo Guillen Bear, María Santos Castillo, mis hermanos Víctor Hugo, Gustavo Andrés, Oscar Iván, por su apoyo incondicional.

A mis compañeros y amigos, muchas gracias por su ayuda.

Resumen

En la actualidad se ha incrementado el interés por el uso y desarrollo de sistemas de energía alternativas; sobre todo las relacionadas con energía solar basadas en paneles fotovoltaicos. En particular, el poder integrar diversos equipos existentes, que funcionan con corriente alterna de la red eléctrica convencional, a una instalación eléctrica fotovoltaica es atractivo desde el punto de vista económico.

En las instalaciones del Instituto de Investigación en Comunicación Óptica se está desarrollando equipamiento para el control, distribución y aprovechamiento de energía eléctrica generada por un arreglo de paneles fotovoltaicos comerciales localizados en la parte superior de unos de 2 edificios que conforman el complejo de cogeneración del instituto, lo cual es atractivo para el consumo y requerimientos de dichas instalaciones.

En este trabajo de tesis se presenta la primera parte del diseño y simulación de un sistema autónomo para el funcionamiento de un refrigerador comercial que utilice, ya sea la red del mismo instituto o un sistema autónomo de menores dimensiones (*i.e.*, 8 paneles de 235 Watts cada uno), que sea capaz de poder integrarse por un conjunto de casas habitación, pequeños negocios y en zonas rurales. La contribución significativa de este trabajo es que, el pico de arranque en corriente de un refrigerador convencional (18 Amp@500mseg), se podría disminuir a 8 Amperes como máximo y 4 paneles, pero a un tiempo de arranque más prolongado (8 Amp@3seg). Todo el sistema electrónico está basado en el dspic 33EP512Mu810.

INDICE

1.- Introducción.....	9
1.1.- Generación energía Eléctrica.....	9
1.2.-Antecedentes.....	10
1.3.- Energía solar fotovoltaica.....	13
1.4.-Objetivos.....	14
1.5.- Justificación.....	14
1.6.- Síntesis del proyecto a desarrollar.....	15
2.- Marco teórico.....	15
2.1.- Paneles fotovoltaicos.....	16
2.2.- Inversor.....	17
2.3.- Topologías de inversores.....	17
2.3.1.- Topología push pull.....	17
2.3.2 Topología medio puente.....	18
2.3.3 Topología puente completo.....	19
2.4.- El concepto de tiempo muerto.....	21
2.5.- Técnicas de modulación.....	22
2.5.1.- Modulación de un solo ancho de pulso.....	23
2.5.2.- Modulación de varios anchos de pulso.....	23
2.5.3.- Modulación senoidal del ancho de pulso.....	24
2.5.4.- Modulación senoidal modificada del ancho de pulso.....	25
2.5.5.- Control por desplazamiento de fase.....	25
2.6.- Control PWM del inversor.....	26

2.7.- Inversor monofásico con control PWM y salida de tensión unipolar.....	27
2.8.- Inversor monofásico con control PWM y salida de tensión bipolar.....	30
2.9.- Modulación senoidal del ancho de pulso.....	31
3.- Desarrollo del proyecto.....	32
3.1.- MPPT.....	33
3.2.- Sensor de voltaje.....	34
3.3.- Sensor de corriente.....	35
4.- Implementación digital del control SPWM.....	37
4.1.- Proceso de control digital.....	41
4.2.-Análisis de SPWM con MatLab.....	44
4.3.-Especificaciones compresor.....	49
4.4.-Discusión y Conclusiones.....	53
4.5.- Trabajos a futuro.....	63
Bibliografía.....	64
Referencias.....	65

Índice de figuras:

Figura 2.1.- Esquema de control.....	15
Figura 2.2.- Seguimiento punto máxima potencia.....	16
Figura 2.3.- Topología Push-Pull.....	18
Figura 2.4.- Topología Medio Puente.....	19
Figura 2.5.- Topología puente completo.....	20
Figura 2.6.- Tiempos muertos.....	21
Figura 2.7.- Control PWM.....	22
Figura 2.8.- Modulación de un solo ancho de pulso.....	23
Figura 2.9.- Modulación de varios anchos de pulso.....	23
Figura 2.10.- Modulación senoidal del ancho de pulso.....	24
Figura 2.11.- Control por desplazamiento de fase.....	25
Figura 2.12.- Inversor monofásico con PWM unipolar.....	28
Figura 2.13.- Modulación PWM Unipolar.....	29
Figura 2.14.- Modulación bipolar.....	30
Figura 2.15.- Modulación PWM bipolar.....	30
Figura 2.16.- Modulación Senoidal de Anchura del Pulso.....	32
Figura 3.1.- Esquema de control proyecto.....	33
Figura 3.2.- Algoritmo voltaje Constante.....	34
Figura 3.3.- Sensor de voltaje.....	35
Figura 3.4.- Esquema sensor corriente.....	36
Figura 3.5.- Sensor de corriente.....	36
Figura 3.6.- Sensores voltaje y corriente.....	37
Figura 4.1.- Modulación SPWM.....	40
Figura 4.2.- Comparacion triangular senoidal.....	41
Figura 4.3.- Medio ciclo senoidal con anchos de pulso.....	43

Figura 4.4.- SPWM con 13 pulsos por medio ciclo.....	45
Figura 4.5.- Modulación ancho de pulso.....	45
Figura 4.6.- Diferentes ciclos de trabajo PWM.....	45
Figura 4.7.- Esquema de conmutación puente H.....	46
Figura 4.8.- Señal modulada con ancho de pulso sinusoidal.....	47
Figura 4.9.- Señal SPWM y su equivalente senoidal.....	47
Figura 4.10.- Modulación inversor en MatLab.....	48
Figura 4.11.-Velocidad nominal con par de arranque.....	49
Figura 4.12.-Arranque directo y arranque suave.....	50
Figura 4.13.-Voltaje efectivo control de fas.....	50
Figura 4.14.-Paneles a plena carga compresor.....	51
Figura 4.15.-Arreglo paneles arranque suave.....	52
Figura 4.16.- Técnica modulación senoidal por ancho de pulso a 30 Hz.....	53
Figura 4.17.- Pulsos de disparo de inversor a 30 Hz.....	54
Figura 4.18.- Corriente y voltaje 30Hz ciclo negativo.....	54
Figura 4.19.- Corriente y voltaje 30Hz ciclo positivo.....	55
Figura 4.20.- Técnica modulación senoidal por ancho de pulso a 40 Hz.....	55
Figura 4.21.- Pulsos de disparo de inversor a 40 Hz	56
Figura 4.22.- Corriente y voltaje 40Hz ciclo negativo	56
Figura 4.23.- Corriente y voltaje 30Hz ciclo positivo	57
Figura 4.24.- Técnica modulación senoidal por ancho de pulso a 50 Hz.....	57
Figura 4.25.- Pulsos de disparo de inversor a 50 Hz	58
Figura 4.26.- Corriente y voltaje 40Hz ciclo negativo	58
Figura 4.27.- Corriente y voltaje 30Hz ciclo positivo	59
Figura 4.28.- Técnica modulación senoidal por ancho de pulso a 60 Hz	59
Figura 4.29.- Pulsos de disparo de inversor a 60 Hz	60
Figura 4.30.-Corriente y voltaje 40Hz ciclo negativo.....	60
Figura 4.31.- Corriente y voltaje 30Hz ciclo positivo	61
Figura 4.32.- SPWM con 13 pulsos por medio ciclo.....	61

1.- INTRODUCCION

1.1.- Generación de energía eléctrica

El consumo mundial de la electricidad en las últimas décadas está fuertemente relacionado con el desarrollo de la industria, del transporte y de los medios de comunicación. Hoy en día, gran parte de la electricidad se produce a partir de recursos no renovables como el carbón, el gas natural, el petróleo y el uranio. La velocidad de regeneración es muy lenta, esto da lugar a un riesgo de agotamiento de estos recursos a corto plazo.

Además la demanda está creciendo, siendo superior a la oferta, lo que resulta en una alta fluctuación de los precios mundiales del petróleo. Por otra parte, este tipo de consumo de energía influye sobre el impacto ambiental. Por ejemplo, para el petróleo y el carbón, las importantes emisiones del gas de efecto invernadero se generan diariamente jugando un rol en el cambio climático y el aumento de la contaminación.

Estos análisis llevan a buscar las soluciones más innovadoras de abordar el déficit de energía y limitar el impacto negativo sobre el medio ambiente. Así pues, el desarrollo de las fuentes limpias y no contaminantes basadas en energías renovables son cada vez más solicitadas por los productores de energía y el gobierno. Sin embargo, la solución para reducir el consumo de energías fósiles es la generación de energía eléctrica a partir de energías renovables, la energía renovable tiene que ser regenerada naturalmente e indefinidamente en el tiempo.

La energía del sol responde a estos criterios en su abundancia en la tierra y su regeneración prácticamente infinita. Se puede utilizar directamente como térmica o convertida en energía eléctrica por efecto fotovoltaico, Esta última, aunque conocida por muchos años, como una fuente que puede producir energía desde milliwatts a mégawatts, se ha situado durante muchos años, en una etapa anecdótica y no se desarrolla aún en grandes proporciones, sobre todo debido a los costos demasiados altos de los paneles solares.

Estos hallazgos han motivado diversos trabajos de investigación para desarrollar fuentes fotovoltaicas sostenibles, mejorar el rendimiento de las células y la reducción de los costos.

1.2.- Antecedentes

Historia de los Paneles Solares [1] (El uso de la energía solar ha sido utilizada desde hace muchos años con diferentes objetivos como: en la agricultura, hornos solares o para generar vapor para maquinaria, calefacción, entre muchos otros ejemplos. Pero el científico francés **Alexandre Edmon Becquerel**, Sus estudios sobre el espectro solar, magnetismo, electricidad y óptica son el pilar científico de la energía fotovoltaica. Ya que experimentando con una pila electrolítica sumergida en una sustancia de las mismas propiedades, observo que después al exponerla a la luz generaba más electricidad, así fue que descubrió el "**efecto fotovoltaico**" en 1839 que consiste en la conversión de la luz del sol en energía eléctrica.

En 1885 el profesor **W. Grylls Adams** experimentó con el selenio (elemento semiconductor) como reaccionaba con la luz y descubrió que se generaba un flujo de electricidad conocida como "fotoeléctrica".

El norteamericano **Charles Fritts** en 1893, fue quien inventó la primera **célula solar**, conformada de láminas de revestimiento de selenio con una fina capa de oro, estas células se utilizaron para sensores de luz en la exposición de cámaras fotográficas.

Albert Einstein investigó más a fondo sobre el efecto fotoeléctrico y descubrió que al iluminar con luz violeta (que es de alta frecuencia) los fotones pueden arrancar los electrones de un metal y producir corriente eléctrica. Esta investigación le permitió ganar el Premio Nobel de Física en 1921.

El inventor estadounidense **Russel Ohl**, creó y patentó las primeras células solares de silicio en 1946, pero **Gerald Pearson** de Laboratorios Bells, por accidente, experimentando en la electrónica creó una célula fotovoltaica más eficiente con silicio , gracias a esto Daryl Chaplin y Calvin Fuller mejoraron estas células solares para un uso más práctico.

Empezaron la primera producción de paneles solares en 1954, que se utilizaron en su mayoría en satélites espaciales. En los 70's el primer uso general para el público, de los paneles solares fue con calculadoras que se siguen utilizando actualmente.

Historia de la energía solar fotovoltaica [2]

La Energía Solar como una alternativa energética para un Desarrollo sostenible significa la protección del planeta.

El sol es una fuente inagotable y limpia para la generación eléctrica. Plantas de generación aisladas (no conectadas a la red eléctrica) para autoconsumo o plantas conectadas a la red son el futuro para un desarrollo sostenible.

El desarrollo de la energía solar Fotovoltaica en el siglo XXI está teniendo un acelerado avance tecnológico y económico. La energía es el motor de los avances económicos en este siglo.

La primera utilización práctica de la generación de energía con celdas fotovoltaicas fue en los dos primeros satélites geoestacionarios de URSS y USA.

Los avances logrados con la celda de silicio en 1954 contribuyeron a la producción comercial, lográndose una eficiencia del 6%.

La URSS lanzó su primer satélite espacial en el año 1957, y los EEUU un año después el 1 de Febrero de 1958. En el diseño de este se usaron células solares creadas por Peter Iles en un esfuerzo encabezado por la compañía Hoffman Electronics.

La primera nave espacial que usó paneles solares fue el satélite norteamericano Explorer 1, lanzado en Febrero del año 1958. Este evento generó un gran interés en la producción y lanzamiento de satélites geoestacionarios para el desarrollo de las comunicaciones, en los que la energía provendría de un dispositivo de captación de la luz solar.

Fue un desarrollo de gran importancia que estimuló la investigación buscando paneles cada vez más eficientes y motivó a la industria de tecnología. El primer mercado de los paneles fotovoltaicos fue entonces dirigido al sector aeroespacial. Los resultados positivos de la misión Explorer 1 marcaron una pauta en el desarrollo de las comunicaciones y los paneles fotovoltaicos.

La celda de Silicio entra en el escenario de la industria y empieza el desarrollo de tecnologías en la producción. El primer paso fue y aún lo es, buscar paneles más eficientes.

Esto se logró en 1970, la primera célula solar con heteroestructura de arseniuro de galio (GaAs) y altamente eficiente se desarrolló en la Unión Soviética por Zhore Alferov y su equipo de investigación.

El caso más representativo hoy día del uso de los paneles fotovoltaicos en el sector aeroespacial está en la Estación Espacial Internacional. La energía utilizada viene de 16 estructuras de 72 metros de envergadura por 12 metros de ancho, 864 metros cuadrados de paneles solares en cada una de ellas. No hay información oficial de la producción de cada una de las estructuras, la única información es que los módulos fotovoltaicos son de alta eficiencia.

Los módulos de alta eficiencia para uso aeroespacial es del orden del 20% de eficiencia. Esto es en referencia a la radiación solar sobre la superficie terrestre, al vacío la eficiencia es mucho mayor. Con este dato, cada una de las estructuras proporcionaría alrededor de 170 Kw/h y la generación de las 16 estructuras estaría en alrededor de 2,7 megavatios/hora. Esto si los módulos fotovoltaicos estuvieran sobre la superficie terrestre.

Actualmente en México, no se han desarrollado plantas fotovoltaicas, su mayor capacidad de generación de energía proviene de las plantas hidroeléctricas y termoeléctricas instaladas en el país y una pequeña parte generada por los generadores eólicos, actualmente la CFE controla la generación y suministro de energía eléctrica en el país.

Energía Solar Fotovoltaica en la actualidad

El siglo XXI nace con una premisa para el desarrollo sostenible medio-ambiental. El creciente desarrollo industrial y de consumo trae como consecuencia un deterioro del medio ambiente a través de las emisiones de CO₂ y otros gases que además de destruir la capa de Ozono afectan la salud del hombre.

La protección del medio ambiente es compromiso de todos, gobiernos, personas e industrias. Hoy día vemos un gran crecimiento, tanto en la producción de paneles solares cada vez más económicos como en la implementación de grandes plantas solares conectadas a la red eléctrica.

1.3.-Energía solar fotovoltaica

Las energías renovables son inagotables, limpias, se pueden utilizar de forma auto gestionada y tienen la ventaja adicional de complementarse favoreciendo la integración entre ellas. La energía solar fotovoltaica ofrece una alternativa muy prometedora, es una de las nuevas formas de energía “limpia”. Está teniendo un amplio desarrollo, favorecido por la concientización de los gobiernos y otras organizaciones para preservar el medio en el que vivimos, razón por la que cada vez se dan más ayudas y subvenciones para potenciar este tipo de instalaciones.

En el pasado la energía solar fotovoltaica se ha utilizado como fuente de alimentación solamente para algunas cargas, tales como satélites o zonas alejadas de las fuentes de la energía convencional. Actualmente, de la preocupación medioambiental de la sociedad, surgió el interés por las energías renovables o limpias como solar y eólica, presentándose como la solución energética de la sociedad actual y futura.

Aunque la utilización de energías renovables como fuentes primarias está limitada por su costo, hay un reconocimiento cada vez mayor que la energía solar puede jugar en la reducción de la contaminación, particularmente en la estabilización de los niveles del bióxido de carbono y preservar el medio en el que vivimos.

Esta energía puede ser una solución para la producción de electricidad para muchas aplicaciones en países en vías de desarrollo, donde una gran parte de la población vive sin acceso a la electricidad.

La energía solar fotovoltaica es la de mayor potencial de utilización en forma dispersa y diversificada. Por su carácter modular, puede aprovecharse en el campo y en la ciudad, en lugares poblados y despoblados, en pequeños y grandes emplazamientos.

En la actualidad, los gobiernos de distintos países Europeos, Japón y EE.UU, entre otros, están promoviendo incentivos económicos a las energías renovables para intentar contener el cambio climático.

Para generar la electricidad solar fotovoltaica se necesita un generador fotovoltaico, es decir, un conjunto de paneles solares conectados entre ellos, para transformar la corriente continua CC producida por un generador solar fotovoltaico en corriente alterna "CA" con las mismas características que la de la red convencional (corriente alterna a 120V y frecuencia de 60Hz) se necesita un inversor.

1.4.- Objetivos.

General

El principal objetivo es aprovechar la instalación de una red de paneles fotovoltaicos existente para el funcionamiento de un sistema que funcione con corriente alterna.

Específicos

- a) Generador de energía eléctrica a través de paneles fotovoltaicos.
- b) Desarrollo del control del sistema para funcionamiento de refrigerador domestico convencional.

1.5.- Justificación

Debido a que el refrigerador necesita una corriente de arranque alta de 5 a 10 veces su corriente nominal, se necesitan varios paneles fotovoltaicos para esa demanda de energía.

Minimización del número de paneles existentes con el fin de abaratar costos, con el subsecuente efecto de generar un arranque suave pero con menor corriente de pico.

Establecer un sistema de desarrollo, basado en procesamiento digital de señales (utilizando un DSPIC y el entorno de MatLab) para la enseñanza de nuevos esquemas de modulación utilizados en la cogeneración de la energía eléctrica.

1.6.- Síntesis del proyecto a desarrollar

Se alimentará un refrigerador de corriente alterna, con la energía del sol, por medio de paneles solares que recibirán la radiación solar, estos paneles nos entregarán una corriente continua CC y por medio de un sistema de control obtendremos energía eléctrica alterna CA compatible con la del refrigerador.

2.- MARCO TEÓRICO

Dentro del sistema de control que se planteó, como lo muestra la siguiente figura 2.1,

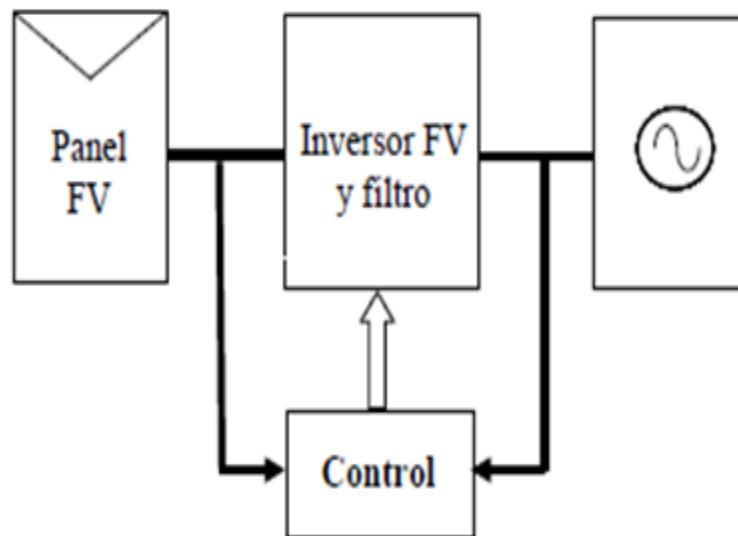


Figura 2.1: Esquema de control propuesto en este trabajo

2.1.-Paneles fotovoltaicos

Para optimizar el grado de aprovechamiento de los paneles fotovoltaicos, los inversores deben seguir el punto de máxima potencia. Además deben trabajar con el máximo rendimiento, generando energía con una determinada calidad.

De hecho, el generador fotovoltaico (conjunto de módulos fotovoltaicos) tiene una curva característica IV no lineal, como se observa en la figura 2.1:

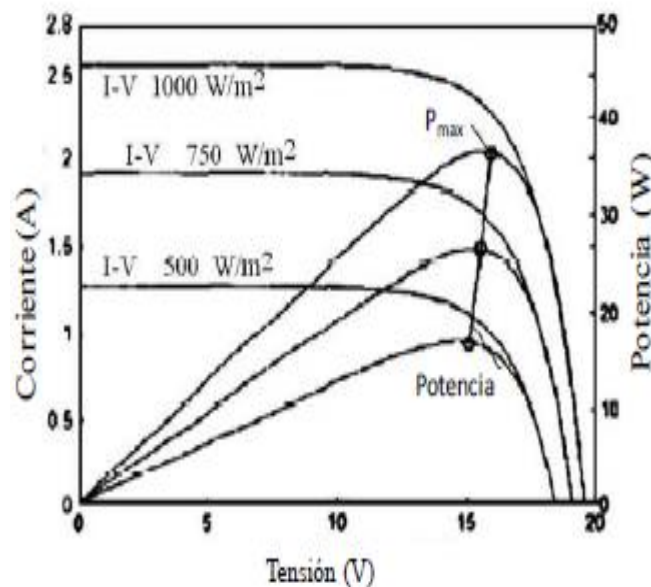


Figura 2.2: Seguimiento del punto de máxima potencia.

Para una irradiancia y una temperatura determinadas, la tensión del circuito abierto es casi constante (similar a una fuente de tensión), mientras que en cortocircuito, la corriente es casi constante (fuente de corriente).

La tensión del circuito abierto es sensible a la temperatura y disminuye cuando la temperatura aumenta, mientras que la corriente de corto-circuito a su vez es proporcional a la irradiancia y aumenta cuando la irradiancia aumenta.

Los paneles fotovoltaicos (PFV) extraen la energía de la radiación solar, la energía es entregada al inversor, pero los PFV pueden sufrir variaciones de entrega de potencia debido a diversos factores climáticos que se presenten o por la posición del sol.

La energía que entra al inversor es medida y calculada en el módulo MPPT, para la extracción de la máxima potencia disponible en los paneles.

2.2.- Inversor

El objetivo de un inversor es generar tensión alterna a partir de tensión continua. Además, en este caso, como se mencionó antes, se requiere poder variar la tensión eficaz y la frecuencia de la tensión alterna generada.

2.3.- Topologías de inversores.

Los inversores se pueden clasificar según su número de fases entre monofásicos y trifásicos. Según la fuente de energía se pueden diferenciar entre inversores en fuente de tensión (VSI) e inversores en fuente de corriente (CSI).

Existen diferentes topologías, estas son la configuración Push-Pull, Medio Puente y Puente Completo. Cada una de ellas presenta ventajas e inconvenientes respecto a las otras, ya sea en cuanto a simplicidad de componentes o a facilidades de control.

2.3.1.- Topología Push-Pull.

La topología “push-pull” se basa en el empleo de un transformador con toma intermedia como se observa en la figura 2.3 de manera que con únicamente dos interruptores se consigue aplicar a la carga tensiones desde el valor positivo del bus de continua hasta el mismo valor de polaridad contraria

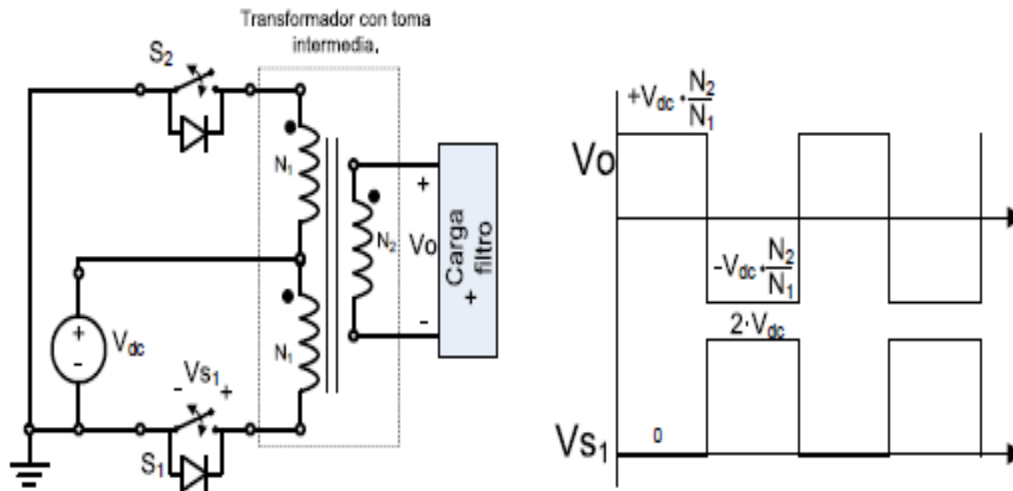


Figura 2.3: Topología Push-Pull

Ventajas:

- Solo se emplean dos interruptores de potencia.
- Elementos de conmutación referidos a masa, por lo que su disparo resulta sencillo.

Desventajas:

- Los interruptores deben soportar el doble de la tensión del bus de continua.
- Se generan sobretensiones debido a la inductancia de dispersión del

transformador. $P < 1\text{KW}$

2.3.2 Topología Medio Punteo.

En esta topología de Medio Punteo Half Bridge se basan en generar una tensión Intermedia a través de un par de condensadores como se muestra en la figura 2.4.

Esta topología aplicará a la carga una tensión máxima de la mitad del valor de tensión del bus DC. Los interruptores deben soportar la tensión total, es decir, la suma de ambas fuentes.

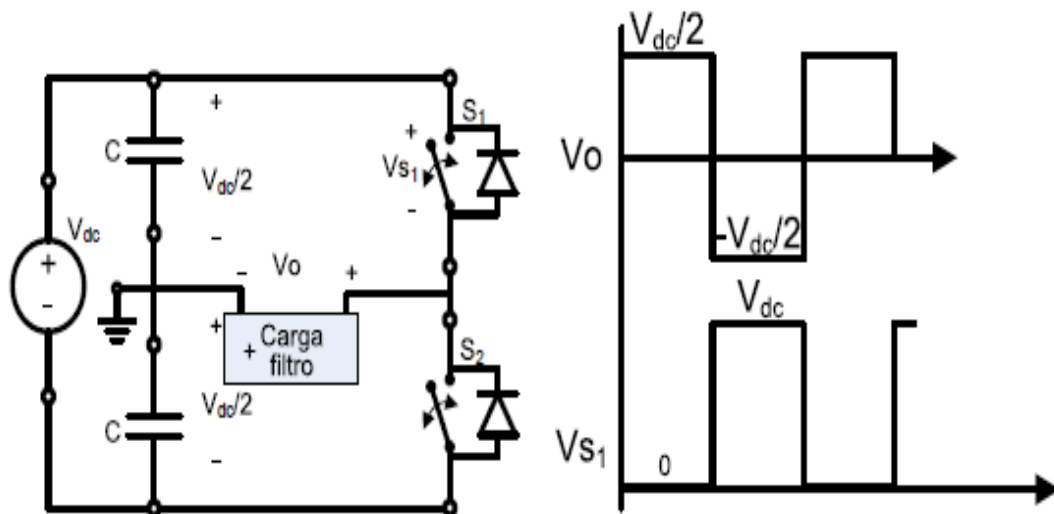


Figura 2.4: Topología Medio Punte

Ventajas:

- Cuenta con 2 interruptores de potencia.

Desventajas:

- Los interruptores deben soportar el doble de la tensión aplicada a la carga.
- No está referido a masa por lo que es necesario emplear algún tipo de circuito de disparo que permita aplicar una tensión flotante.
- Mala utilización del bus DC, ya que la tensión de salida máxima es la mitad de la tensión del bus DC.

2.3.3 Topología Punte Completo.

La topología Punte completo emplea cuatro interruptores como se observa en la figura 2.5.

De esta forma, con una sola fuente de corriente continua, se pueden aplicar a la carga tanto tensiones positivas como negativas o cero con un simple cambio de los interruptores que conducen en cada momento. Esta topología incorpora ventajas e inconvenientes de las dos topologías anteriores.

No cabe duda que el principal inconveniente es la complejidad, pero al trabajar con altas potencias, las ventajas cobran mayor importancia que los inconvenientes. Por tanto esta es la topología empleada para altas potencias.

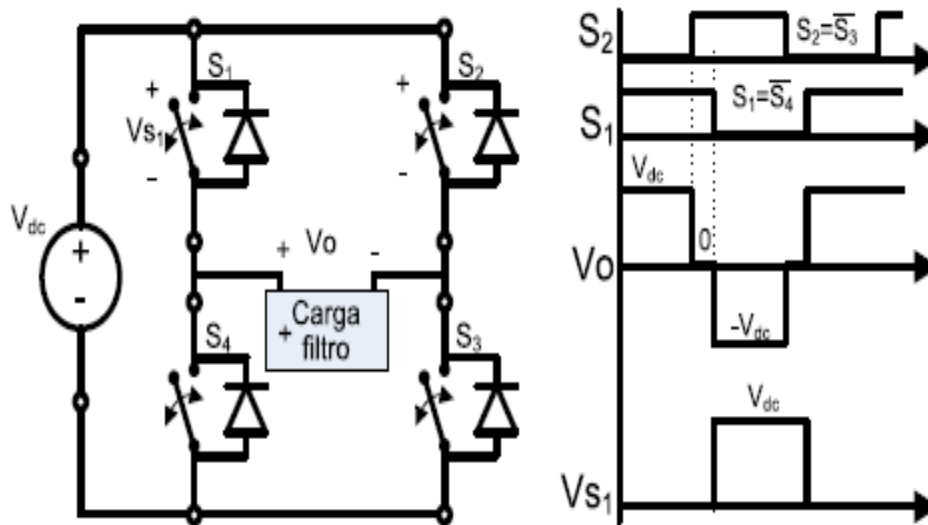


Figura 2.5: Topología puente completo

Ventajas:

- La tensión aplicada a carga es la tensión de la fuente de corriente continua (Salvo polaridad).
- Se puede aplicar a la carga $+V_{dc}$, V_{dc} y 0. Mejor utilización del bus DC. Ya que la tensión máxima de salida es la tensión del bus DC.
- La tensión que deben soportar los interruptores es el valor de la fuente de continua.

Desventajas:

- Se duplica el número de interruptores con respecto a topologías anteriores
- Dos de los interruptores no están referidos a masa, por lo que serán necesarios circuitos de disparo que permitan aplicar una tensión flotante.

2.4.- El concepto de “Tiempo muerto”.

En una conmutación ideal, los dos interruptores de una rama del puente conmutan en el mismo instante, es decir, en el momento en que uno empieza a conducir, el otro deja de hacerlo.

Si no se tiene en cuenta este fenómeno de no instantaneidad en el cambio, podría darse la situación en que un transistor comience a conducir antes de que el otro transistor de la misma rama haya dejado de hacerlo totalmente, lo que daría lugar a un cortocircuito.

Las consecuencias de este cortocircuito dependerían de la capacidad de corriente instantánea de la fuente de tensión (Batería, pila de combustible...) pudiendo llegar a destruir los interruptores por sobre corriente. Este fenómeno y la forma de manejarlo se muestra en la figura 2.6

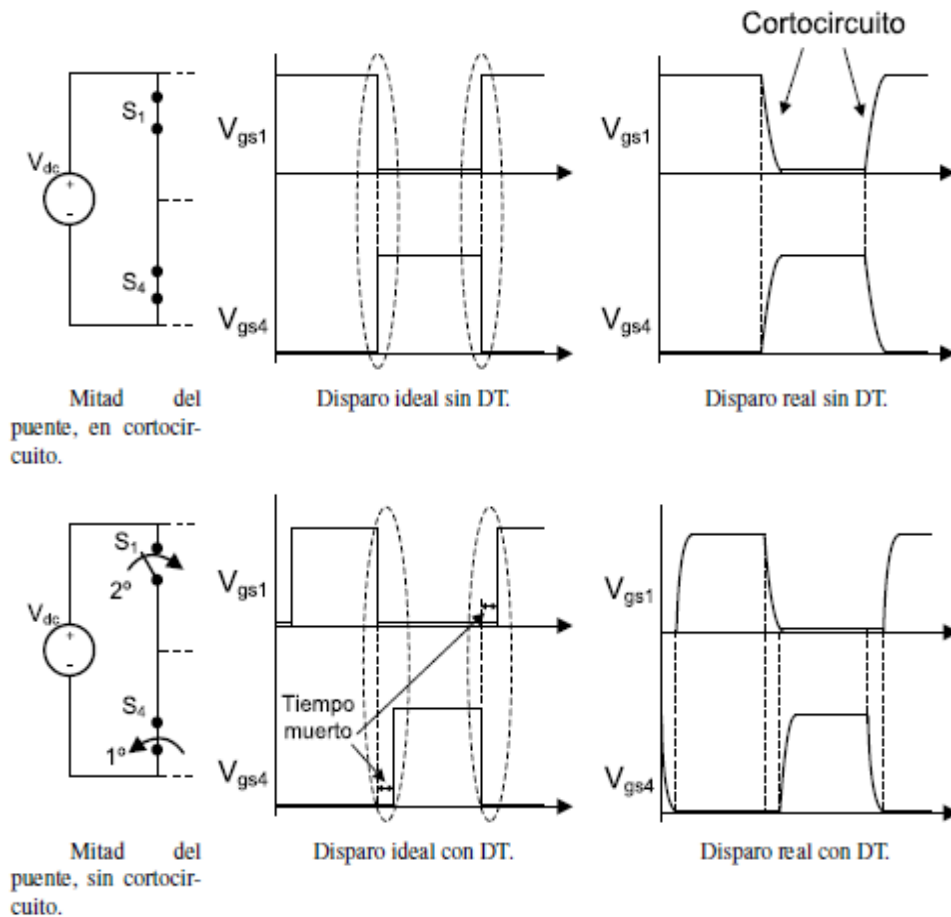


Figura 2.6: Tiempos muertos

2.5 Técnicas de modulación

En muchas aplicaciones industriales, a menudo es necesario controlar el voltaje de salida de los inversores para hacer frente a las variaciones de la entrada DC, o cumplir unos requisitos de voltaje y frecuencia en la salida. Existen varias técnicas para modificar el voltaje de salida de un inversor, como son la regulación de la entrada DC, o el control de la modulación por ancho de pulso. En la modulación por ancho de pulso, las técnicas más comúnmente utilizadas son:

- 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.

En la figura 2.7 se muestra el resultado de una modulación por ancho de pulso.

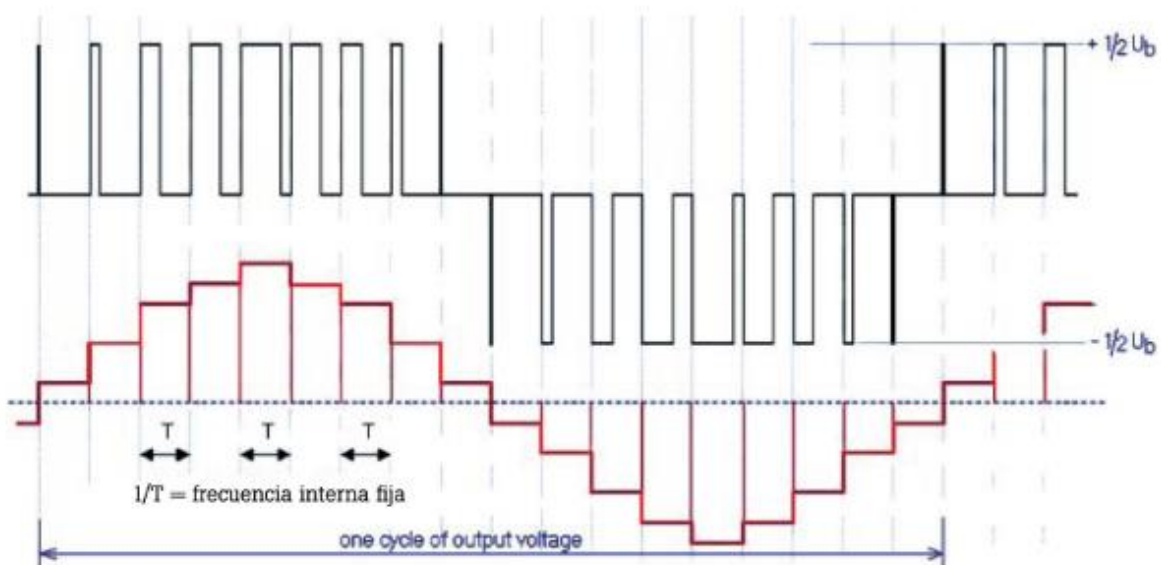


Figura 2.7.- Modulación por ancho de pulso

Un punto negativo del control PWM actual es la eficiencia, debido a las pérdidas por conmutación de los semiconductores por las altas frecuencias con las que operan.

2.5.1.- Modulación de un solo ancho de pulso

En 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, con el objetivo de controlar la tensión de salida del inversor, sin prestar atención alguna al contenido armónico. El resultado es una onda cuadrada difícil de filtrar para obtener una onda senoidal pura. La salida de este tipo de modulación se muestra en la Figura 2.8

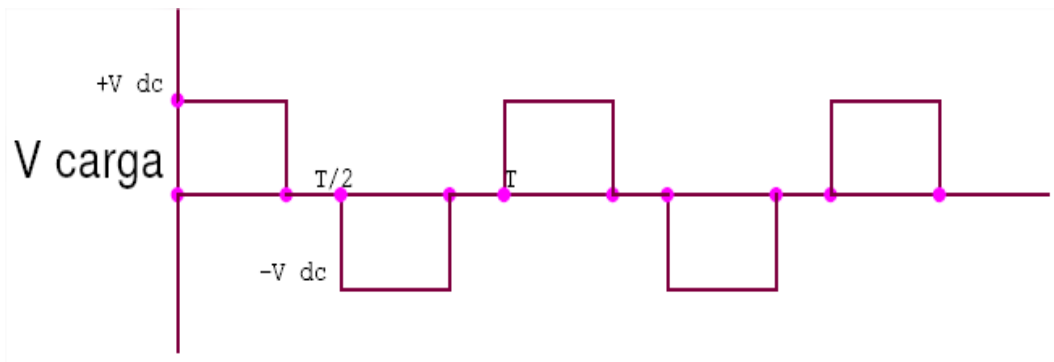


Figura 2.8: Modulación de un solo ancho de pulso

2.5.2 Modulación de varios anchos de pulso

En esta técnica de modulación, se utilizan varios pulsos en cada semiciclo de voltaje de salida. La idea básica es trocear la forma de onda a alta frecuencia en vez de hacer conmutaciones a baja frecuencia. Mediante la comparación de una señal de referencia con una señal portadora triangular, se generan los pulsos de disparo. La frecuencia de la señal de referencia establece la frecuencia de la señal de salida, y la frecuencia de la portadora, determina el número de pulsos por cada ciclo, como se muestra en la Figura 2.9:

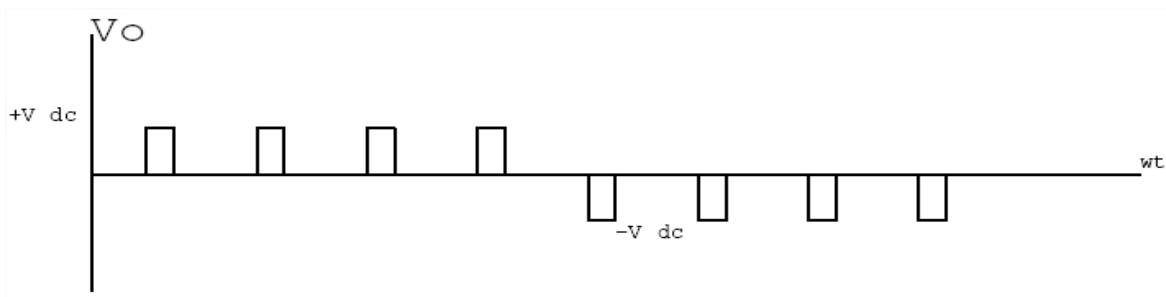


Figura 2.9: Modulación de varios anchos de pulso

2.5.3 Modulación senoidal del ancho de pulso

En la modulación senoidal la señal de referencia es una onda senoidal, por lo que el ancho de pulso varía en función de la amplitud de la onda evaluada en el centro del mismo pulso. Las señales de compuerta se generan al comparar la señal senoidal de referencia con una onda portadora triangular, como se muestra en la Figura 2.10. La frecuencia de la señal de referencia determina la frecuencia de la salida del inversor, y su amplitud de pico es controlada por el índice de modulación en amplitud. Modulando el ancho del pulso senoidalmente se obtiene una forma de onda muy parecida a la senoidal.

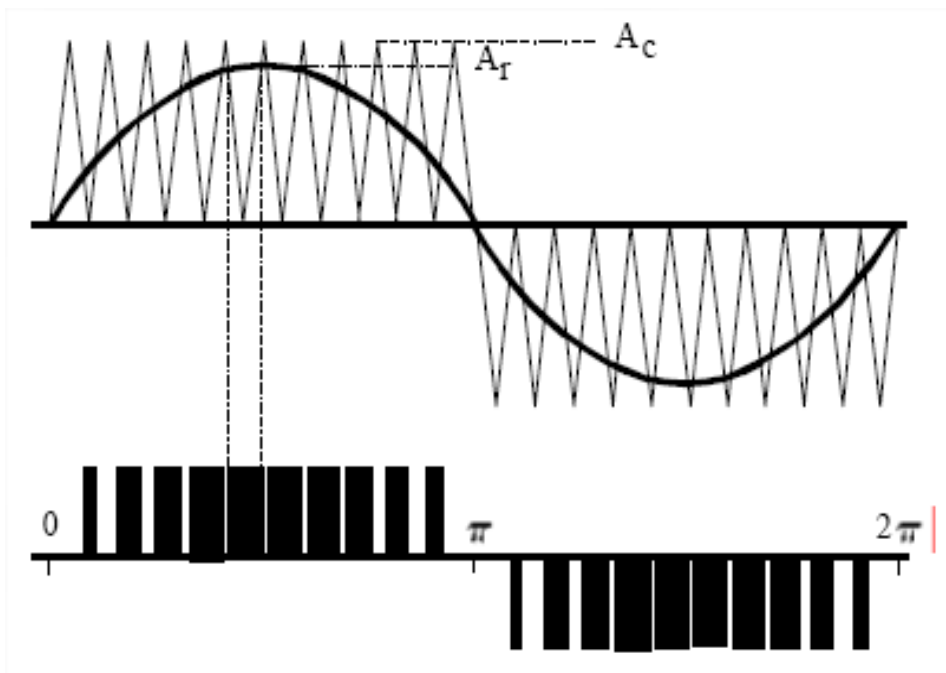


Figura 2.10: Modulación senoidal del ancho de pulso

En los inversores modulados se busca que la frecuencia de conmutación de los interruptores de potencia sea mucho mayor que la frecuencia de salida, para facilitar así el filtrado y desplazar armónicos a altas frecuencias, donde son fácilmente filtrables.

2.5.4 Modulación senoidal modificada del ancho de pulso

En la modulación senoidal modificada del ancho de pulso, los anchos de los pulsos más cercanos al pico de la onda senoidal no cambian considerablemente, esto es, durante los sesenta 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.

2.5.5 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 descanso en cero de la onda rectangular de salida, y en consecuencia el voltaje de salida, disminuyendo de esta forma la variación brusca en la salida. Esto se muestra en la Figura 2.11

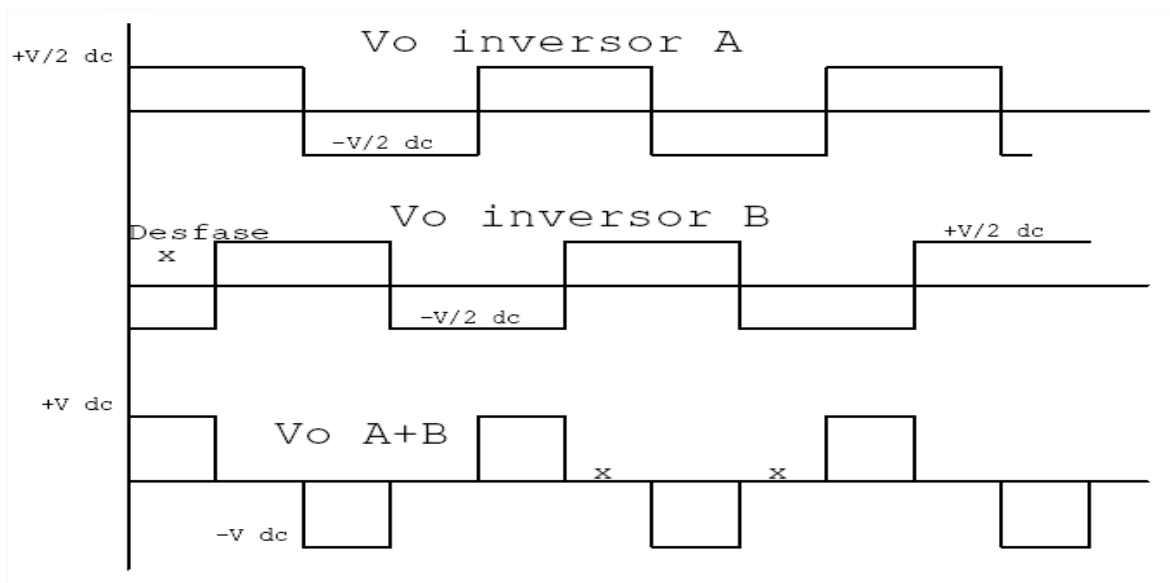


Figura 2.11: Control por desplazamiento de fase

2.6 CONTROL SPWM DEL INVERSOR

En un inversor monofásico se obtienen las señales de control mediante la comparación de una señal sinusoidal que actúa como señal de referencia (V_{ref}) y una señal triangular, V_{tri} .

La frecuencia de la señal de referencia determina la frecuencia de la tensión de la salida y la frecuencia de la señal de la triangular determina el número de pulsos.

Antes de proceder al desarrollo de las dos técnicas principales de conmutación PWM sinusoidal, se explican unos conceptos importantes para describir el modo de operación del control.

Existen dos índices de modulación que consideran las frecuencias y las amplitudes de la señal triangular y la de referencia.

Uno de ellos es el índice de modulación de amplitud (m_a) y se define de la siguiente manera:

$$m_a = \frac{V_{ref}}{V_{tri}}, \text{ Se muestra la relación entre la amplitud máxima de la onda triangular y de la onda de referencia o de control.}$$

El otro es el índice de modulación de frecuencia (m_f) y su definición es:

$$m_f = \frac{f_{tri}}{f_{ref}}, \text{ indica la relación entre las frecuencias fundamentales de ambas señales}$$

A partir de ambos índices podemos controlar la tensión de salida del inversor tanto en magnitud como en frecuencia. Variando el valor de m_f (por lo general, mediante la frecuencia de la onda triangular), variará con el número de conmutaciones en cada semiciclo. De igual forma, si modificamos el valor de la amplitud de la señal triangular, estaremos variando el ancho de los pulsos.

Estos dos parámetros explicados son de gran importancia a la hora de controlar la calidad en cuanto al contenido de armónicos de la onda resultante a la salida del inversor.

El valor de m_f , y por consiguiente de la frecuencia de conmutación de los interruptores del puente, puede estar limitado por las pérdidas de conmutación de los mismos. Hay que encontrar un valor óptimo, ya que un valor excesivamente reducido, puede suponer la aparición de componentes armónicas próximas al fundamental.

2.7.- INVERSOR MONOFÁSICO CON CONTROL PWM Y SALIDA DE TENSIÓN UNIPOLAR

En los inversores de modulación PWM, la salida del inversor no será una señal sinusoidal perfecta y contendrá componentes armónicas que pueden obtenerse realizando el desarrollo en serie de Fourier de la tensión de salida. Para poder obtener una señal de salida sinusoidal de la frecuencia deseada, con la modulación SPWM, se realiza la comparación de dos señales:

- Una señal de control V_{ref} de tipo sinusoidal de frecuencia igual a la frecuencia de la componente armónica fundamental que se desea obtener a la salida del inversor. La señal se utiliza para variar el ancho de pulso es decir el ciclo de trabajo.
- Una señal triangular V_{tri} de frecuencia superior a la sinusoidal y que es la que establecerá la frecuencia de conmutación de los semiconductores de potencia. La amplitud de la señal triangular es constante.

En este tipo de control los interruptores de las ramas del puente completo no se disparan simultáneamente. Cada rama del puente es controlada por separado comparando una señal triangular, V_{tri} , con una señal de control, V_{ref} y su opuesta $-V_{ref}$. Las señales V_{tri} y V_{ref} se muestran en la Figura 2.12.

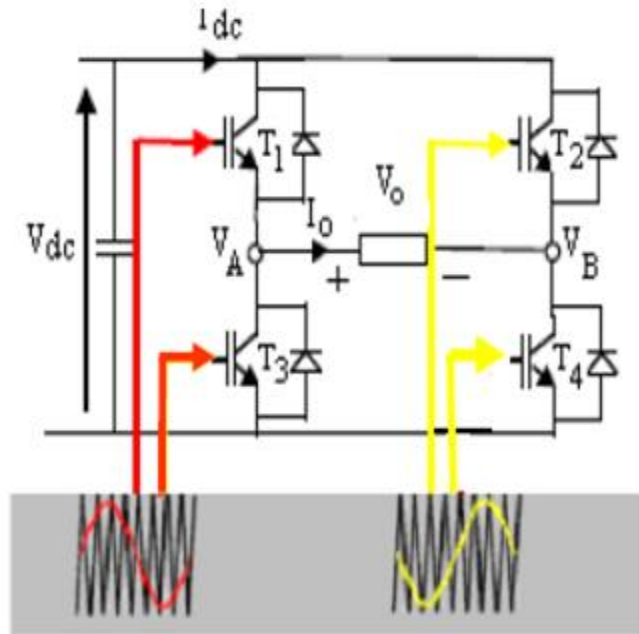


Figura 2.12: Inversor monofásico con pwm unipolar

Las formas de onda mostradas indican que hay cuatro combinaciones posibles de interruptores en estado de conducción. Las posibles combinaciones de interruptores en conducción y la tensión que se obtiene a la salida son:

- T1, T4 en ON $\Rightarrow V_A = V_{dc}$ y $V_B = 0 \Rightarrow V_o = + V_{dc}$
- T2, T3 en ON $\Rightarrow V_A = 0$ y $V_B = V_{dc} \Rightarrow V_o = - V_{dc}$
- T1, T2 en ON $\Rightarrow V_A = V_{dc}$ y $V_B = V_{dc} \Rightarrow V_o = 0$
- T3, T4 en ON $\Rightarrow V_A = 0$ y $V_B = 0 \Rightarrow V_o = 0$

En este tipo de control cuando los interruptores (IGBTs) conmutan, la tensión de la salida cambia entre $+ V_{dc}$ y $- V_{dc}$. Tiene la ventaja de doblar la frecuencia de conmutación, donde las componentes armónicas aparecen como múltiplos del doble de la frecuencia de conmutación.

La forma de onda de V_o se muestra en la Figura 2.13.

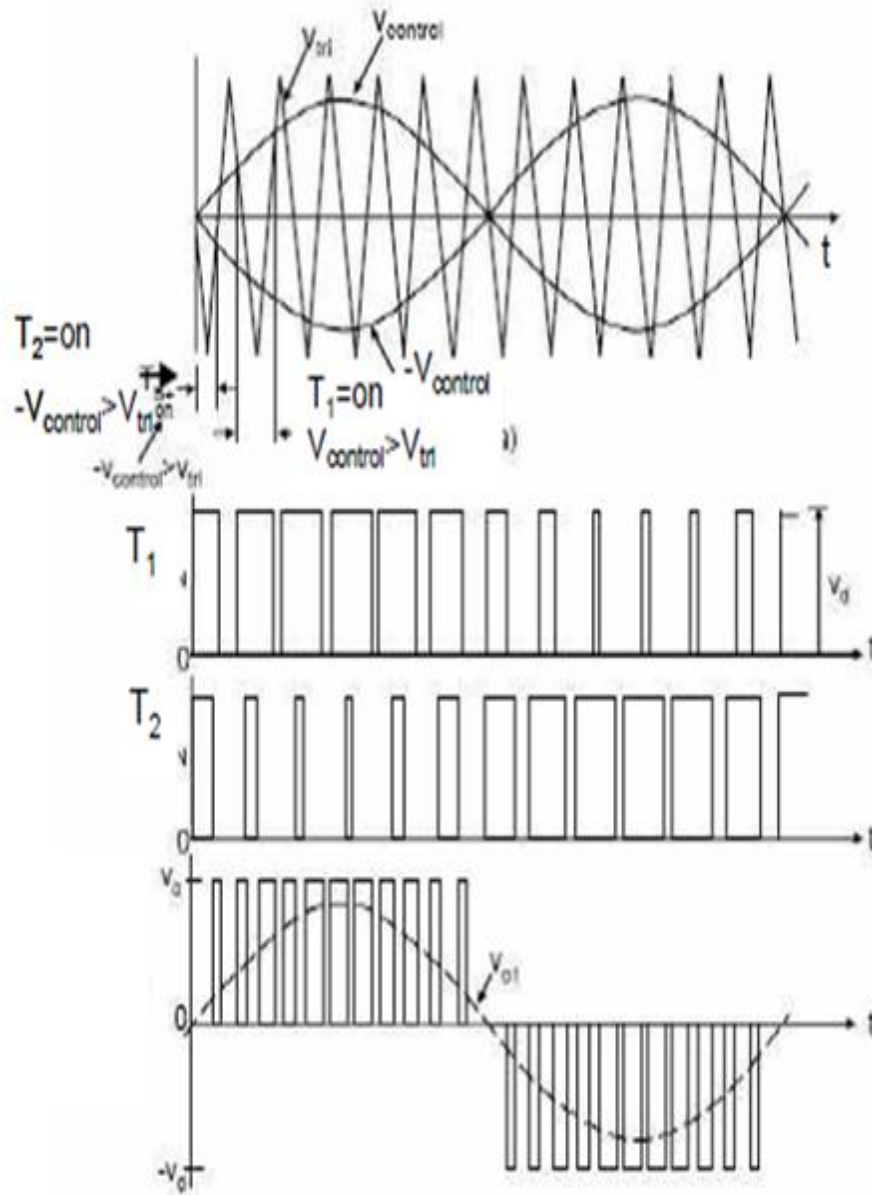


Figura 2.13: Modulación PWM Unipolar

2.8.- INVERSOR MONOFÁSICO CON CONTROL PWM Y SALIDA DE TENSIÓN BIPOLAR

En la Figura 2.14 y figura 2.15 se muestra un inversor con control PWM bipolar.

En este método de control por conmutación de tensión bipolar, los interruptores en diagonales opuestas de las dos ramas del puente inversor (T1, T4 y T2, T3) conmutan.

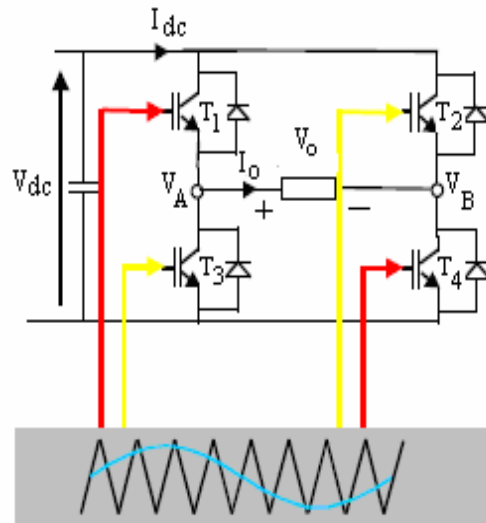


Figura 2.14: Modulación bipolar

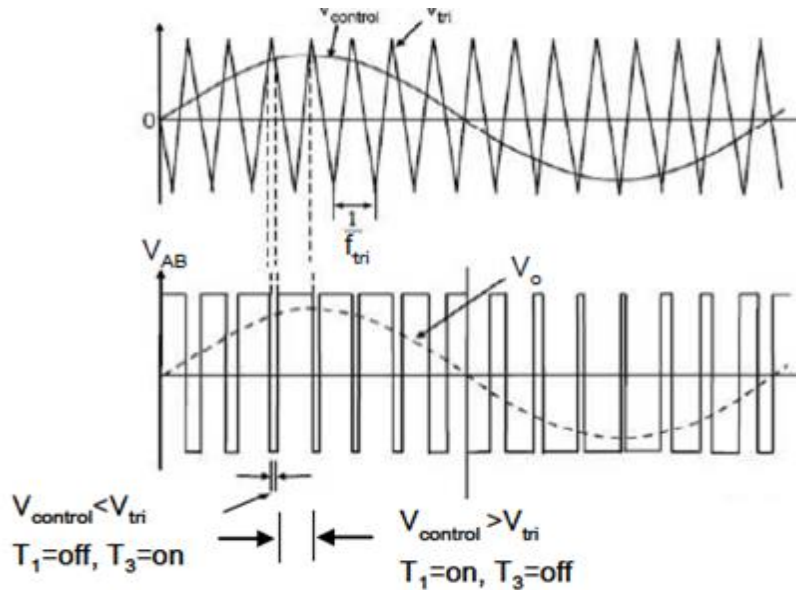


Figura 2.15: Modulación pwm bipolar

Recomendaciones para los valores m_a y m_f .

En este apartado nos centraremos en los criterios para seleccionar el valor de los parámetros normalizados m_a y m_f , tomando en cuenta los criterios expuestos, es necesario trabajar con valores de m_f lo más altos posible, ya que los armónicos aparecerán a frecuencias elevadas, lo cual facilita el filtrado de las mismas; sin embargo, no se debe dejar de lado que las pérdidas en conmutación aumentan al elevar la frecuencia.

Para valores altos de m_f , la utilización del modo PWM asíncrono es más usual, ya que las amplitudes de los subarmónicos son más pequeñas. Por tanto, si el valor de m_f es elevado, se puede fijar la frecuencia de la señal triangular y variar la frecuencia de la señal sinusoidal.

Para el índice de modulación de amplitud, m_a , se ha considerado que es siempre menor o igual que la unidad, correspondiente a la denominada zona lineal del control PWM sinusoidal. En esta zona la amplitud de la componente fundamental obtenida a la salida del inversor es linealmente dependiente del valor de m_a .

2.9. Modulación Senoidal de Anchura del Pulso (SPWM)

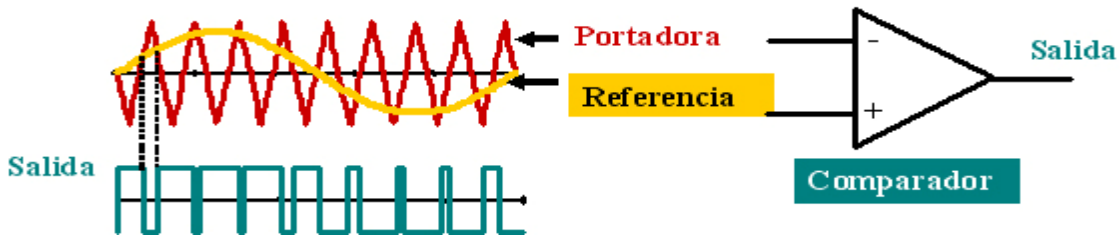
Un método de controlar el voltaje dentro del inversor involucra el uso de las técnicas de modulación de ancho de pulso (PWM). Con esta técnica el voltaje de salida del inversor es controlado por la variación de la duración de los pulsos de voltaje de salida.

La técnica SPWM se basa en emplear una modulación múltiple (varios pulsos de disparo en cada medio ciclo de voltaje de salida), el ancho de cada pulso varía en proporción con la amplitud de una onda senoidal evaluada en el centro del mismo pulso.

Como se muestra en la Figura 2.16, para generar las señales de control de los interruptores de forma que se consigan formas de onda de este tipo son necesarias dos señales:

Una señal de referencia: es la forma de onda que se pretende conseguir a la salida. En caso de los inversores suele ser una senoide.

Una señal portadora: es la que establece la frecuencia de conmutación. Se utiliza una señal triangular.



Formula 2.16: Modulación Senoidal de Anchura del Pulso

3.- DESAROLLLO DEL PROYECTO

Para el desarrollo del proyecto nos basamos en el esquema de la figura 3.1, en donde se observa en primera instancia que tenemos los paneles fotovoltaicos, los cuales nos entregaran la energía eléctrica en corriente continua CC, en esta parte tendremos un censado de tensión que nos ayuda a conocer sobre el punto de máxima potencia de los paneles fotovoltaicos.

Teniendo esta energía voltaje de CC, transformamos la energía a corriente alterna CA a través de un Inversor con el método de la modulación de ancho de pulso senoidal SPWM, a la salida del inversor tendremos un control de lazo cerrado de corriente que nos permitirá regular el control sobre la modulación SPWM

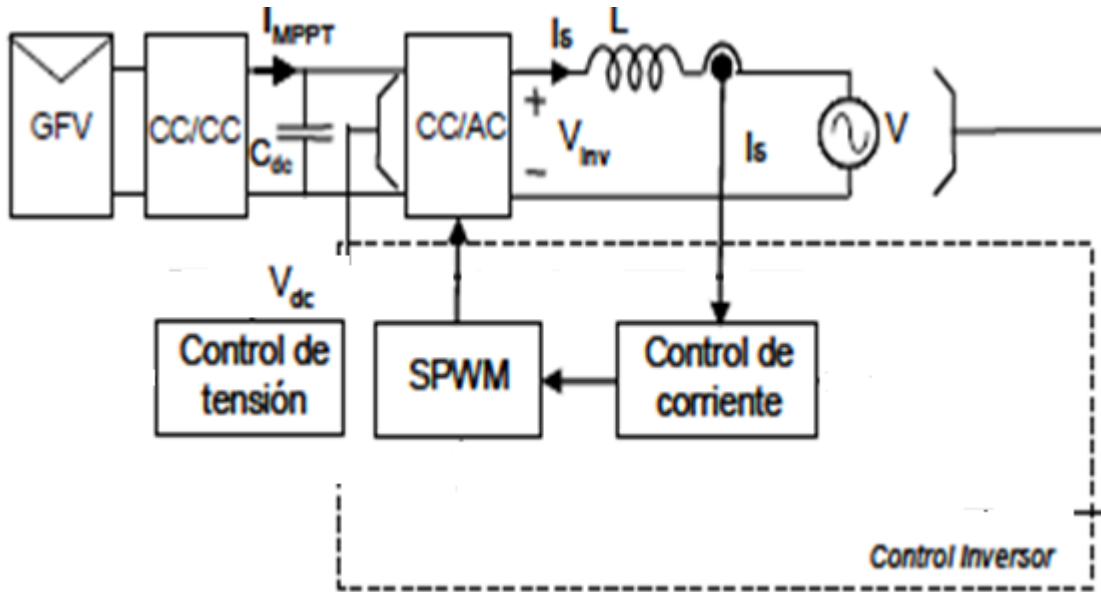


Figura 3.1: Esquema de control proyecto.

3.1 CONTROL DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA MPPT

Como está indicado en las características I-V del panel fotovoltaico, la máxima potencia del panel depende del nivel de irradiación y la temperatura, para cada uno de ellos el panel entregará una determinada potencia y en un punto, para las mismas condiciones de irradiación y temperatura, entrega la máxima potencia. Este punto recibe el nombre de MPP (Máximo punto de potencia).

SEGUIDORES DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA MPPT

Los seguidores del punto de máxima potencia, MPPT (Maximum Power Point Trakers) son dispositivos electrónicos capaces de hacer operar a los módulos fotovoltaicos alrededor del punto de trabajo donde se genera la máxima potencia capaz de obtenerse para las condiciones de irradiación y temperatura de ese momento.

Los sistemas de seguimiento del tipo MPPT, se basan en un control de las variables eléctricas del panel (tensión y corriente), aunque también es posible controlar las variables eléctricas de salida del convertidor (tensión y corriente), debido a que están relacionadas

con las del panel por medio de una variable también conocida que es el ciclo de trabajo (D). Con el conocimiento de estos datos, se define el punto de trabajo del generador, con el fin de aproximarlos, en cada instante, con el punto de máxima potencia (MPP), y así aumentar la eficiencia de todo el sistema.

Existen diversas técnicas de cálculo del MPPT. Una de las más sencillas de implementar y que se eligió fue la MPPT Vconst, o voltaje de referencia constante (ver figura 3.2). Este algoritmo es simple de programar, se asume que el MPPT está alrededor de $0.8 \cdot V_{oc}$, o 76% - 78 %, y se aproxima a la capacidad máxima de los paneles. Así se aumenta la cantidad de corriente disponible $I(K)$ hasta cuando el voltaje esté al 76% - 78 %.



Figura 3.2: Algoritmo voltaje Constante

3.2.- Sensor de voltaje

El sensor de voltaje en la entrada utiliza un divisor de voltaje, formado por un arreglo de resistencias (ver la figura 3.3) para disminuir el voltaje hasta 200mv, la señal que se obtiene es colocada en el opto amplificador HCPL-7800, el cual permite una amplificación de 8 veces y aísla las señales, después por medio de amplificadores de ultra bajo ruido OP27Z se acondiciona la señal de salida que será colocada en el microcontrolador.

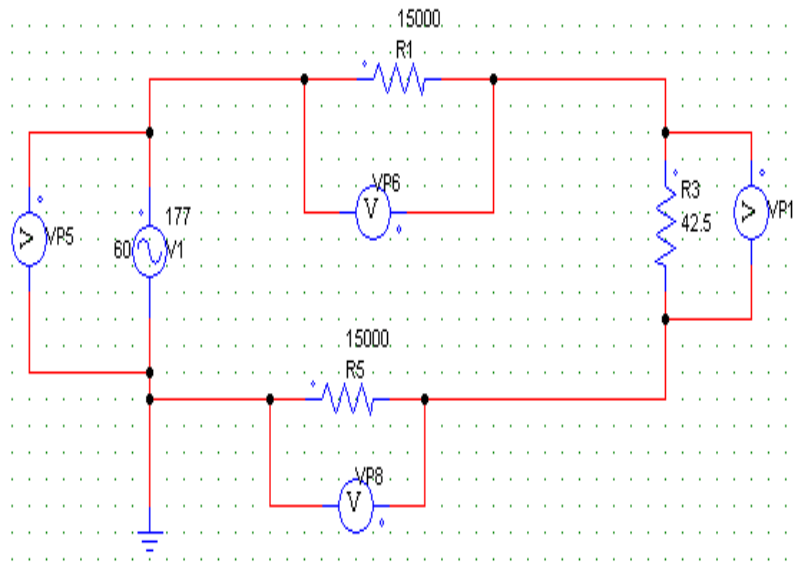


Figura 3.3.- Esquema sensor voltaje

3.3 Sensor de corriente

El sensor de corriente cumple con las siguientes características: aislar las señales permitiendo un manejo seguro de las mismas en el DSP, tener un censado de hasta 20A, permitir un manejo de la señal de salida en el rango de 0v – 3v, usar amplificadores de bajo ruido, obtener un funcionamiento tanto para señales de CA como de CD, y una señal de offset de 1.5v a la salida para indicar una señal de entrada de 0A. Para el censado de corriente se utiliza CSLA1CD, el cual es un sensor de efecto hall tipo dona para censar la corriente que atraviesa un conductor, la señal que es obtenida es acondicionada a través de

los amplificadores operacionales OP27Z de bajo ruido.

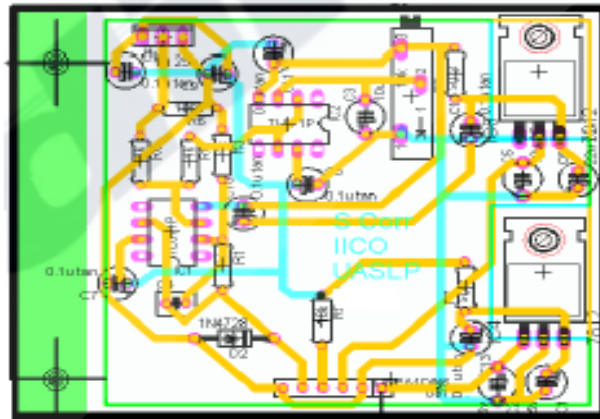


Figura 3.4: Sensor de corriente

En la figura 3.5 se observa el amplificador de aislamiento se utiliza ampliamente en la detección de corriente de fase del motor.

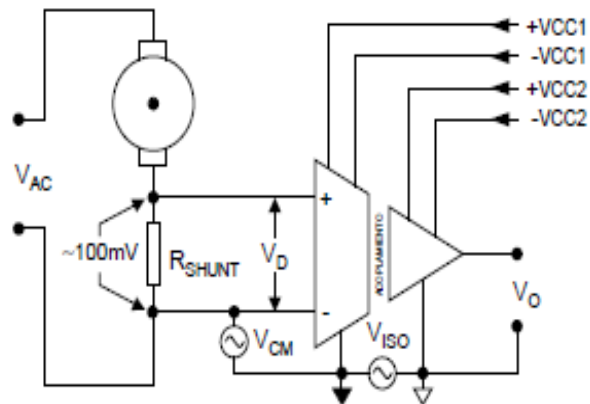


Figura 3.5.- Sensor de corriente

En la figura 3.6 se muestran los sensores de voltaje y corriente

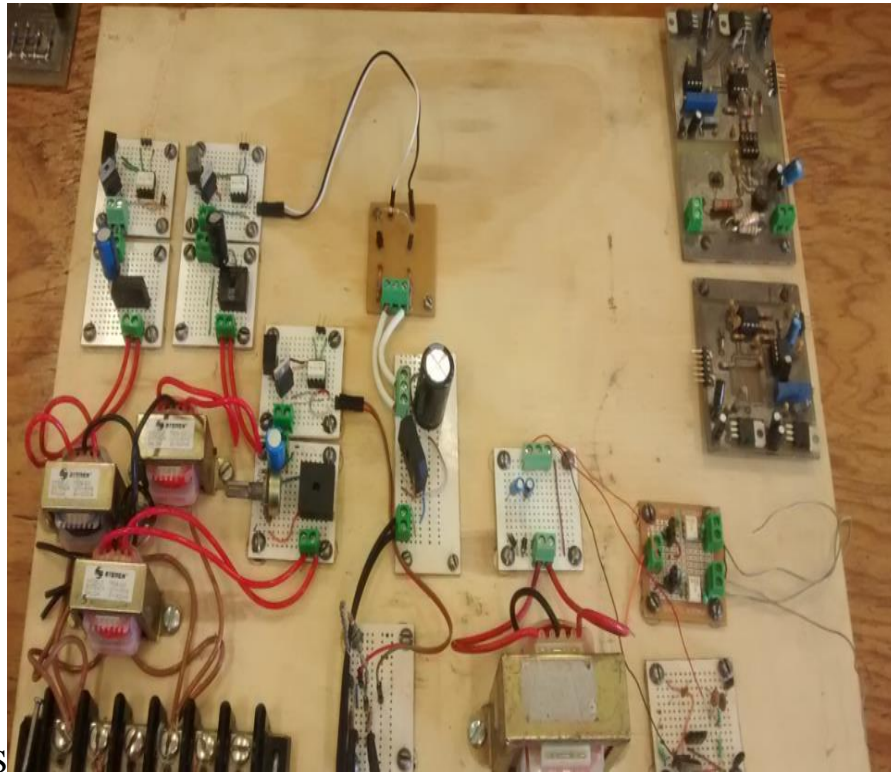


Figura 3.6: Sensores voltaje y corriente

4.-Implementacion digital del control inversor SPWM

En los últimos años, se han observado los sistemas de conversión de la energía usando el control analógico para alcanzar funcionamientos requeridos. Estos sistemas aunque sencillos y conocidos son difíciles de modificar. Así pues, hoy, las industrias electrónicas y los investigadores intentan desarrollar el control digital para el sistema de conversión de la energía (convertidores) usando los nuevos procesadores de datos, microcontroladores de nueva generación (DSP).

El interés en el control digital es cada vez mayor, debido a su consumo de baja potencia y alta inmunidad al ruido (cambios de temperatura, componentes que envejecen, etc.).

Por otra parte los sistemas digitales son los más convenientes a los esquemas del control y a los circuitos de interconexión sofisticada.

En cuanto a la forma de implementar el control digital, los más usados son los de tipo microprocesador (microcontroladores y DSP), permite superar una serie de inconvenientes que dificultan la transición al control digital, como el retardo por tiempo de cálculo o la generación precisa de las señales de control (DPWM). Entre las varias ventajas de la implementación digital.

- Capacidad de reprogramación del control, buena parte de los dispositivos, digitales, como microprocesadores, DSP son reprogramables. Esta característica permite cambiar el algoritmo de control sin necesidad de efectuar ningún cambio sobre el hardware, con lo que se dota al control digital de gran flexibilidad.
- Capacidad de monitorización. Usando un control digital, éste puede conectarse a otros sistemas (típicamente un PC) encargados de la vigilancia general del sistema y ayuda en la fase de pruebas del control, pues permite depurar el control mediante más medios que la simple observación de señales accesibles al osciloscopio.
- Disminución del tiempo de diseño. El diseño de un control digital requiere menos tiempo que el de un control analógico, al menos cuando el control a desarrollar es nuevo. Esto se debe a la facilidad de realizar cambios durante el prototipo.
- Atenuación de la sensibilidad al ruido. Una señal digital sólo admite dos valores, por lo que es muy difícil que el ruido llegue a variar su valor efectivo. Por el contrario, las señales analógicas se ven mucho más influidas por el ruido, ya que ligeros cambios en el valor de una tensión, por ejemplo, pueden suponer cambios en la actuación del control. Por tanto, la parte digital del lazo de control es mucho menos sensible al ruido y sólo la parte analógica, es decir, la anterior a los CAD (Convertidores Analógicos Digitales), presenta problemas de ruido. Es en esta parte del lazo de control, la de muestreo y conversión a formato digital, en la que hay que poner el mayor cuidado durante el diseño en lo que se refiere a efectos o problemas de ruido.

Los inconvenientes del control digital son:

- Necesidad de utilizar convertidores analógicos/digitales (CAD). El hecho de controlar variables analógicas, como la tensión o la corriente de un convertidor conmutado, a través de medios digitales obliga a la conversión de las variables observadas a formato digital. Esta conversión se realiza, en general, mediante CAD.
- Limitación de la resolución de medida y cálculo. Los datos digitales están representados por un número finito de bits, por lo que la resolución del valor representado queda truncada.
- Limitación de la resolución de la señal de control. En caso de generarse la señal de control del convertidor mediante medios digitales (*Digital Pulse Width Modulation* o DPWM), hay que tener en cuenta la limitación en la resolución del ciclo de trabajo que impone el dispositivo digital.
- Introducción de retardos en el control. Dos factores generan retardos en un control digital. Uno es el retardo en la conversión del CAD que sirve los datos al control, el cual se debe al tiempo de conversión.

El otro es el retardo de cálculo en el propio control. Desde que llega el nuevo dato del convertidor hasta que se genera el nuevo ciclo de trabajo pasa un pequeño tiempo que puede no ser despreciable.

Los retardos influyen en la respuesta dinámica del control y pueden afectar incluso a la estabilidad del sistema. Por tanto, es necesario tener en cuenta estos retardos en el diseño del control.

- Limitación en el ancho de banda del control. Esto se debe al retardo inherente al control digital que se produce, en la conversión analógica/digital, el tiempo de cálculo y la actuación desde que se calcula un ciclo de trabajo hasta que se impone de manera efectiva. Estos retardos degradan la actuación del control.

De aquí que la implementación digital haya encontrado su espacio en el diseño de nuevas soluciones topológicas para solucionar las limitaciones principalmente de los convertidores A/D y de moduladores DPWM.

Dentro de esta línea de investigación y para llevar a cabo el control digital del inversor, se ha realizado, en primer lugar, la implementación de la técnica de modulación sinusoidal del ancho del pulso SPWM “*Sinusoidal Pulse Width Modulation*”, La figura 4.1 muestra el esquema de una modulación SPWM, se utiliza el método de modulación en forma digital.

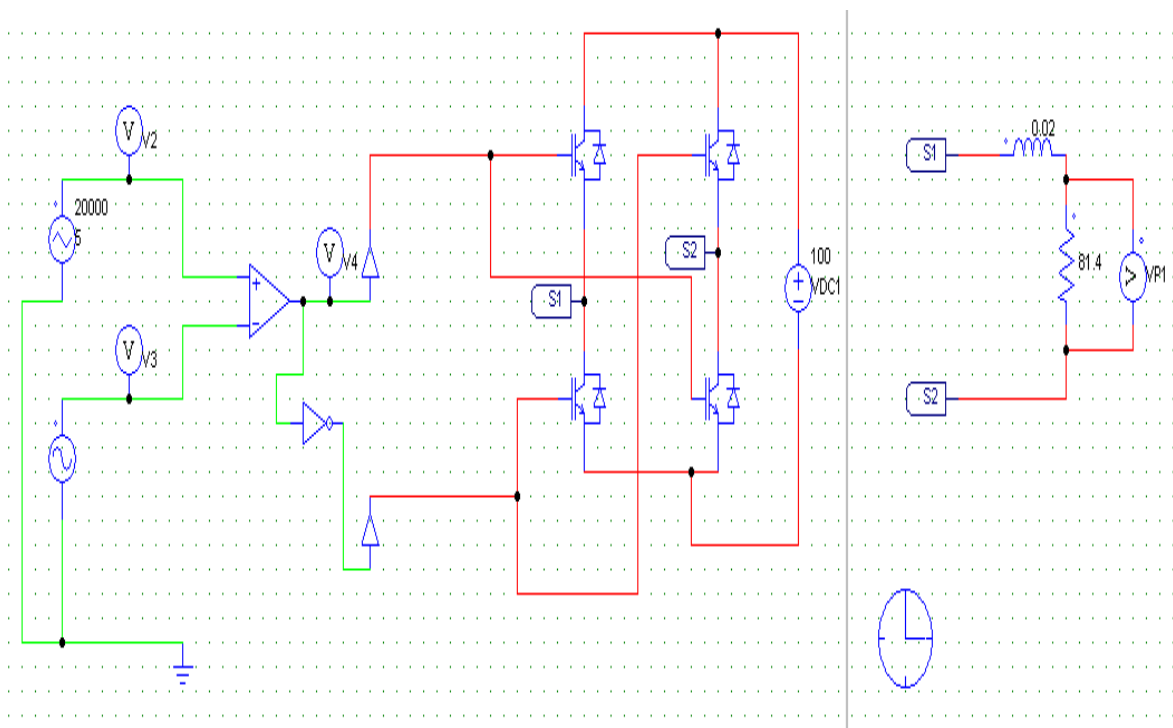


Figura 4.1: Modulación SPWM

4.1.- PROCESO DE CONTROL DIGITAL

A continuación se presenta la descripción de cómo utilizar microcontrolador para generar la modulación de ancho de pulso sinusoidal que sirve como señales de disparo a IGBTs de puente H para obtener una salida de onda sinusoidal limpia y ordenada.

La técnica SPWM digital básicamente genera la media onda sinusoidal en un pequeño número de impulsos, cada pulso con diferente ancho de trabajo.

Esta técnica de modulación de ancho de pulso sinusoidal produce una onda pulsante en la que la anchura de pulsos cambiará de acuerdo con la amplitud de voltaje de onda sinusoidal. Por ejemplo, en amplitud de la onda sinusoidal de la tensión el mínimo en el inicio de la onda es el de la función seno a 0 grados y después de su inicio aumenta hasta 90 grados y alcanza la amplitud de pico sinusoidal a 90 grados. Después la amplitud empieza disminuir de nuevo de manera inversa, ya que se decrementa de 90 grados a 0 grados en el primer ciclo de la señal senoidal.

En la técnica SPWM se sigue el mismo procedimiento para hacer pulsante la señal de onda en la que la anchura de cada impulso varía en función de la misma manera que el seguimiento de la magnitud de onda sinusoidal. Por ejemplo: { } 1,2,3,4,5,6,5,4,3,2,1.

Los datos anteriores muestran el ciclo de trabajo máximo o anchura de pulso es de 6 y luego disminuyendo su inicio a la inversa, ya que se incrementa y decrementa el ancho de pulso como lo muestra la siguiente figura 4.2.

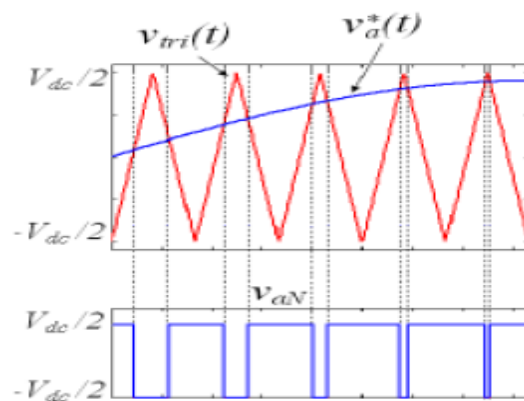


Figura 4.2: Comparación triangular senoidal

En la implementación del SPWM, con un microcontrolador el objetivo es obtener una señal de frecuencia alterna. 60 Hz significa período de tiempo de onda sinusoidal es de 16.6 ms. Por lo que el período de tiempo de medio ciclo es de 8.3 ms, sólo generan la mitad del ciclo y es el uso tanto para el ciclo positivo y negativo. SPWM de media onda contiene muchos pulsos y el ancho de cada pulso varía en función de la amplitud de la onda sinusoidal. Sin embargo, el tiempo total de todos los impulsos debe ser igual a 8.3 ms (período de tiempo de medio ciclo de la onda sinusoidal).

El número de impulsos en cada medio ciclo de la onda senoidal dependerá de la resolución del microcontrolador.

Sabemos que la mitad del ciclo de onda sinusoidal consiste de 180 grados. Por ejemplo, se trabaja con 10 pulsos. Dividimos 180 grados en 10 partes iguales. Para dividir 180 grados en 10 partes iguales, el valor de cada paso es $180/10 = 18$ grados.

$$Y = \text{sen}(18) = 0,3090$$

$$Y = \text{sen}(36) = 0,5877$$

$$Y = \text{sen}(54) = 0,8090$$

$$Y = \text{sen}(72) = 0,9511$$

$$Y = \text{sen}(90) = 1$$

$$Y = \text{sen}(90) = 1$$

$$Y = \text{sen}(72) = 0,9511$$

$$Y = \text{sen}(54) = 0,8090$$

$$Y = \text{sen}(36) = 0,5877$$

$$Y = \text{sen}(18) = 0,3090$$

Para convertir los valores anteriores en el ciclo de trabajo en el microcontrolador, se toma en cuenta el ciclo de trabajo. En un ciclo de trabajo cambia de 0-255 es decir, 0 significa el ciclo de trabajo 0% y 255 significa que el ciclo de trabajo del 100%. Se recomienda que se multiplique por un valor inferior a 255

$$Y' = \text{sen}(18) = 0,3090 * 250 = 77$$

$$Y' = \text{sen}(36) = 0,5877 * 250 = 147$$

$$Y' = \text{sen}(54) = 0,8090 * 250 = 202$$

$$Y' = \text{sen}(72) = 0,9511 * 250 = 238$$

$$Y' = \text{sen}(90) = 1 * 250 = 250$$

$$Y' = \text{sen}(90) = 1 * 250 = 250$$

$$Y' = \text{sen}(72) = 0,9511 * 250 = 238$$

$$Y' = \text{sen}(54) = 0,8090 * 250 = 202$$

$$Y' = \text{sen}(36) = 0,5877 * 250 = 147$$

$$Y' = \text{sen}(18) = 0,3090 * 250 = 77$$

De ahí que el ciclo de trabajo o la anchura de cada impulso es {77, 147, 202, 238, 250, 250, 238, 202, 147, 77}. Del mismo modo se puede calcular el ciclo de trabajo o el ancho de pulso de 20, 30, 100 o cualquier número de pulsos que desea utilizar en su SPWM según el microcontrolador. En la figura 4.3 se observa la generación medio ciclo de la onda senoidal



Figura 4.3: Medio ciclo senoidal con anchos de pulso

En la figura 4.4 modulación senoidal por ancho de pulso, con 13 pulsos por medio ciclo.

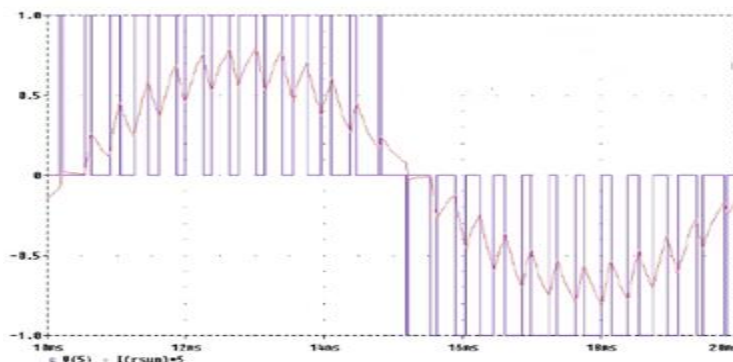


Figura 4.4: SPWM con 13 pulsos por medio ciclo.

4.2.- Análisis de PWM sinusoidal (SPWM) utilizando Matlab para generar el código de conmutación digital.

En Matlab, se almacenan los valores de las variables obtenidas del SPWM y cada una de las conmutaciones de los IGBTs, las que se utilizan como una variable o arreglo de una dimensión, para generar el código de conmutación para un sistema digital o un microcontrolador, con el que se puede variar la frecuencia de las señales de conmutación.

Se analiza la modulación de ancho de pulso sinusoidal (SPWM), la cual se obtiene al comparar una señal senoidal de control que es de la misma frecuencia que la frecuencia de la tensión de salida deseada, contra una señal triangular de frecuencia mayor, de tal forma que se obtiene una señal digital con un valor eficaz equivalente a la señal senoidal deseada.

DESARROLLO

La modulación por ancho de pulsos (también conocida como PWM, por sus siglas en inglés de Pulse-Width Modulación) de una señal o fuente de energía, es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica (una señal senoidal o cuadrada, por ejemplo), ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga. El valor promedio del voltaje o la corriente, medidos en la carga pueden ser controlados al cerrar y abrir el circuito de fuente de alimentación y la carga, a una determinada velocidad de conmutación o frecuencia.

La ventaja principal de PWM es la baja pérdida en los dispositivos de conmutación de potencia. Cuando el circuito o dispositivo electrónico para interrumpir la fuente de voltaje está apagado, prácticamente no hay circulación de corriente y cuando esté encendido casi no existe voltaje entre sus terminales, como se muestra en la figura 4.5. Siendo que la potencia es el producto del voltaje por la corriente, en ambos casos la pérdida de potencia por conmutación es casi cero. El término ciclo de trabajo (duty cycle), describe la proporción del tiempo de encendido respecto al periodo de la señal, normalmente expresado en decimales o en porcentaje, siendo 100% completamente encendido y 0% completamente apagado.

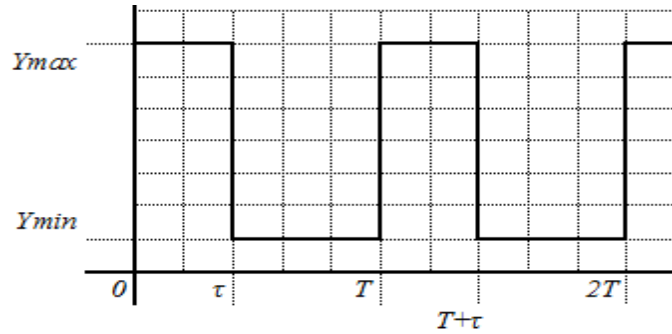


Figura 4.5: Modulación Ancho de pulso

El ciclo de trabajo de una señal periódica es el ancho de pulso relativo de su parte positiva o tiempo alto, en relación con el período de la señal, expresado matemáticamente:

$$D = \frac{\tau}{T}$$

De donde:

D: es el ciclo de trabajo (Duty cycle)

τ : es el tiempo en que la función se mantiene en estado alto o con circuito cerrado (ancho del pulso)

T: es el período de la función.

En la figura 4.6 se muestra diferentes ciclos de trabajo de la modulación de ancho de pulso.

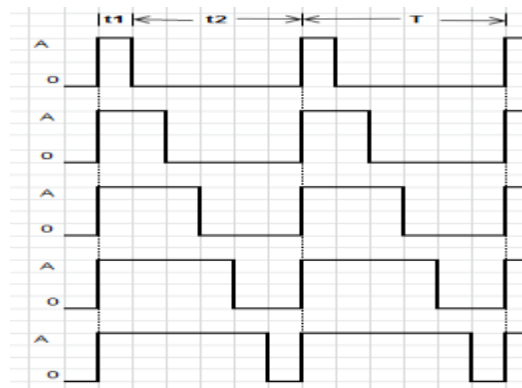


Figura 4.6: Diferentes ciclos de trabajo PWM.

Para obtener una señal senoidal por métodos digitales de una frecuencia deseada con un reducido contenido de armónicos se utiliza la técnica de SPWM; la cual consiste en la comparación de una señal senoidal de control, con la misma frecuencia de la señal de salida deseada con una señal triangular de frecuencia mayor, la frecuencia de la señal triangular determina la conmutación de los dispositivos de conmutación, como interruptores de potencia controlados digitalmente, por ejemplo MOSFETs o IGBTs. Manteniendo la señal de salida, la frecuencia de la señal de control y la amplitud constante.

Se ha definido el índice o la razón de modulación de

Amplitud como:

$$ma = \frac{V_{ctrl}}{V_{tri}}$$

y el índice o la razón modulación de frecuencia como:

$$mf = \frac{F_{tri}}{F_{ctrl}}$$

en donde la señal senoidal de control es de amplitud V_{ctrl} con frecuencia F_{ctrl} y la señal triangular tiene amplitud V_{tri} con frecuencia F_{tri} .

Para este análisis se considera el esquema de conmutación mostrado en la figura 4.7

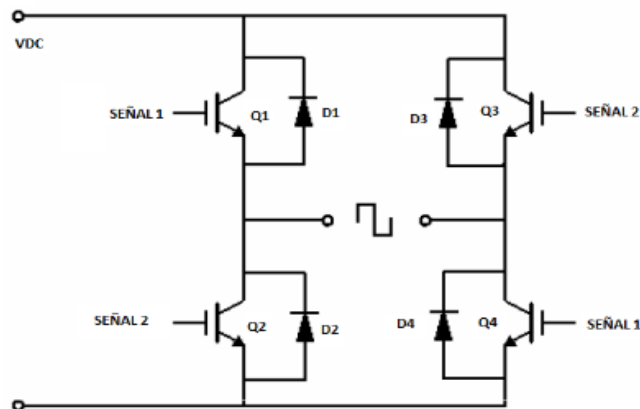


Figura 4.7: Esquema de conmutación puente H

La señal senoidal de control, que se ha de comparar contra la triangular.

En la figura 4.8 se muestra el resultado de la comparación de la señal senoidal con la triangular con frecuencia de 60Hz.

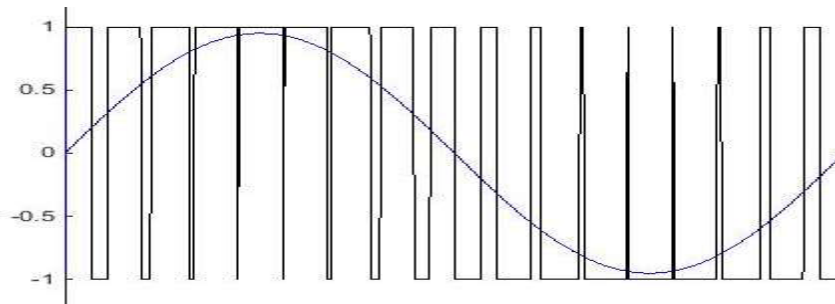


Figura 4.8: Señal SPWM

Para obtener el SPWM, utilizando Matlab, se genera una señal triangular simétrica que es la portadora, así como una señal senoidal que es la moduladora, comparando estas dos señales se obtiene la señal SPWM, como se muestra en la figura 4.9.

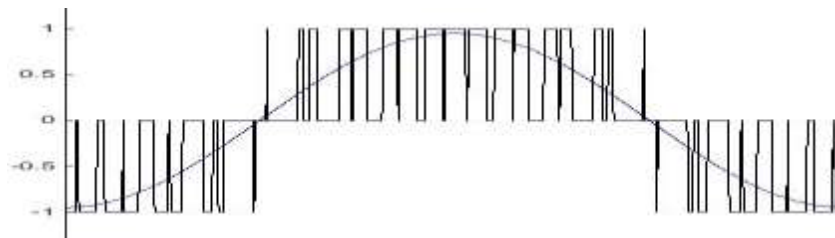


Figura 4.9: Señal SPWM y su equivalente senoidal.

En la figura 4.10 se muestra la simulación del inversor SPWM en el entorno de Matlab, simulink.

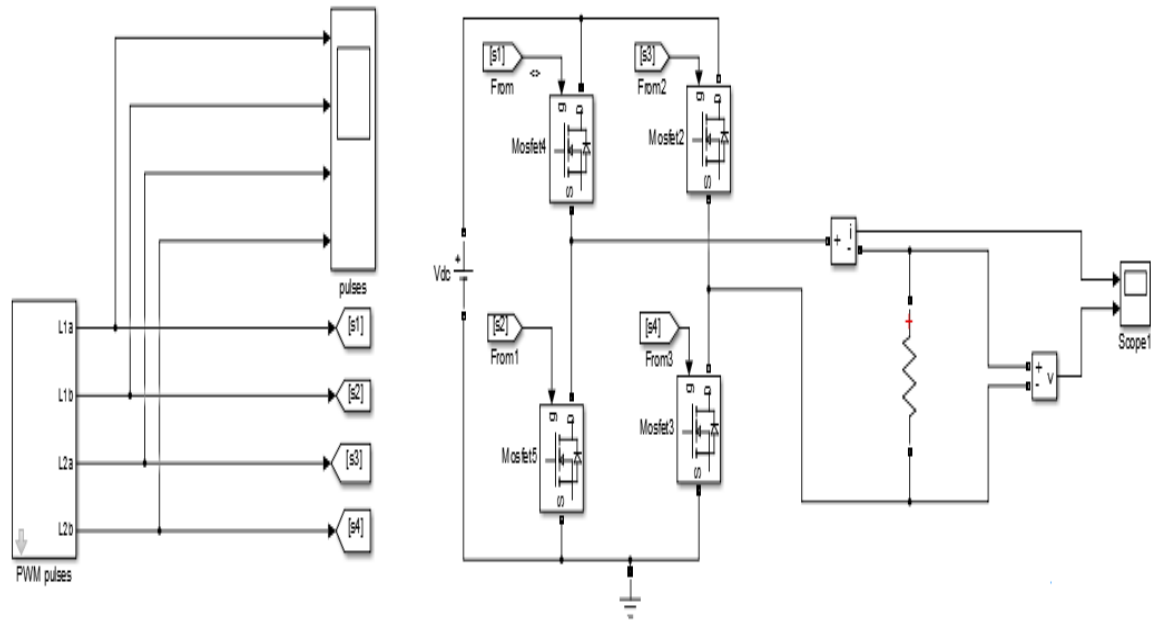


Figura 4.10: Modulación Inversor SPWM en MatLab

Los valores obtenidos de esta señal SPWM resultante, se almacenan en un arreglo de una dimensión, el cual pudiera ser parte del código de programa de un microcontrolador, obteniendo así SPWM, de una o de tres fases, que al variar el tiempo de salida de cada valor del arreglo a un sistema de conmutación electrónico se varía la frecuencia del SPWM resultante, manteniendo la misma amplitud eficaz.

Lo que se realizó en MatLab fue modificar la frecuencia de la señal senoidal y se observó que al comparar la señal triangular con diferentes frecuencias de la senoidal se modifica el índice de modulación dando así diferentes disparos de accionamiento para los drivers igbts de un inversor. [5]

Por lo cual se modifica la corriente para realizar un arranque suave del compresor, de esta manera evitar el pico de corriente.

Por lo tanto se puedan trasportar a un dispositivo electrónico micro programable para manejar un variador de frecuencia de potencia, a su vez para manejar motores o inversores de CD a CA

4.3 Especificaciones del compresor del refrigerador

Los problemas generados en el arranque de motores eléctricos de C. A., se resumen en tres aspectos: Gran consumo de corriente, alto torque y sobre calentamiento del motor.

Cuando partimos un motor de inducción de C. A., a tensión nominal, en primer lugar absorben la corriente de bloqueo del rotor (LRC) y crean un par de bloqueo de rotor (LRT).

Según acelera el motor, la corriente disminuye y el par aumenta hasta su punto de ruptura antes de caer a niveles de velocidad nominal (ver figura).

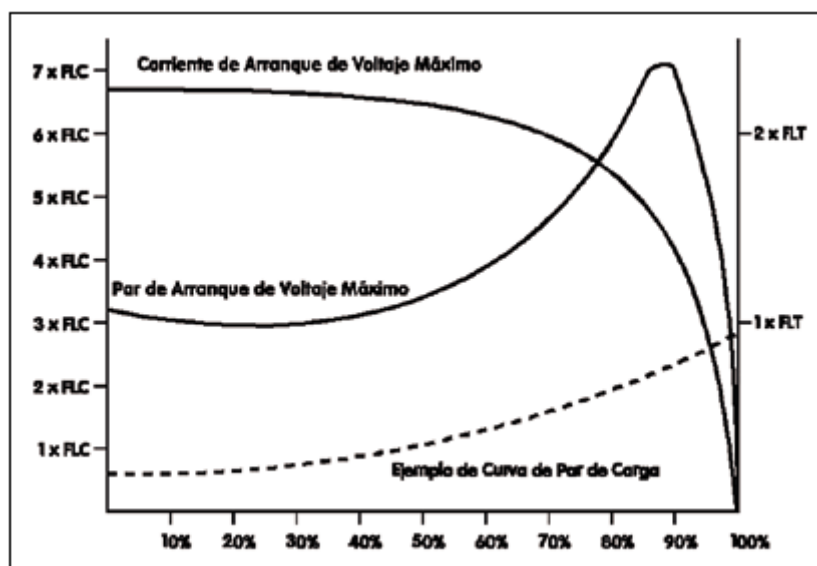


Figura 4.11: relación de velocidad nominal con par de arranque

Los arrancadores suaves se utilizan para proteger y limitar la intensidad de arranque de los compresores monofásicos en aplicaciones de bombas de calor, refrigeración y aire acondicionado.

Este tipo de arrancadores son el equipo más moderno en la actualidad en el control de motores eléctricos, se encargan de disminuir los picos de corriente durante el arranque de motores eléctricos y el par mecánico de arranque.

En la Figura se muestra la diferencia existente entre el arranque directo de un motor y el arranque suave.

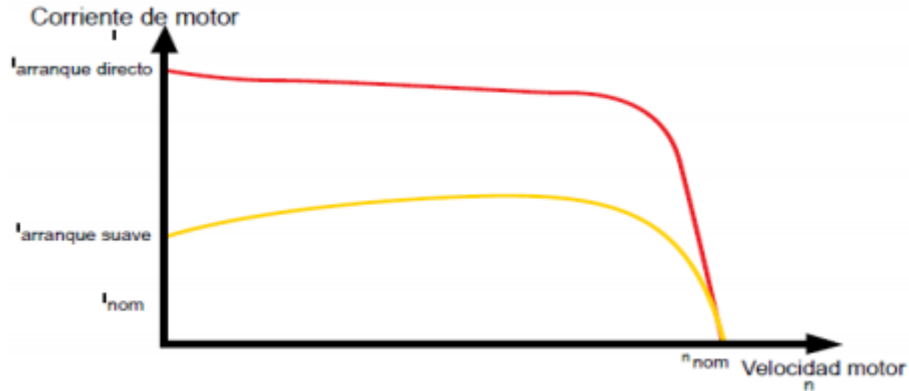


Figura 4.12: Grafica de relación entre el arranque directo y el arranque suave

Se utiliza un control de fase para reducir el voltaje y éste se incrementará suavemente hasta el voltaje de línea, claro está que se debe predeterminar un tiempo en el cual debe alcanzarse el voltaje a plenitud mediante el uso de arranque y frenado de esta forma se hace un menor esfuerzo de la maquinaria y se alarga su vida útil.

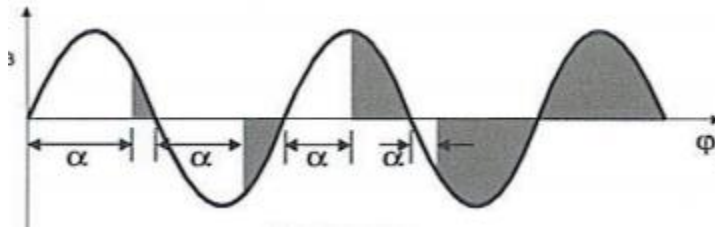


Figura 4.13: Voltaje efectivo aplicado en el motor para lograr el arranque gradual.

Este tipo de arrancadores son ideales cuando se requiere un arranque suave y lento, puesto que en lugar de operar a plena tensión se utiliza elementos de control para ir aumentando gradualmente el voltaje como se mencionó anteriormente esto se realiza mediante el ángulo de disparo.

Experimentalmente nuestro compresor arranco en 8 amperes en un tiempo de 3 segundos, venciendo el torque del motor y comenzando a trabajar el compresor [4].

Datos obtenidos del compresor:

Revoluciones por minuto = 3600

Caballos de fuerza = 1 HP Corriente nominal = 1.5 Amp

Potencia = 180 watts. Frecuencia de trabajo = 60 Hz

Pico de arranque a plena carga = 18Amp

[3]

$$T_n = \frac{P_n}{W_n}$$

T_n = par nominal del motor P_n = Potencia nominal del motor
 W_n = Velocidad angular nominal.

$$T = \left(\frac{HP \cdot 5252}{RPM} \right)$$

T =Torque a plena carga HP = caballos de fuerza
 RPM = revoluciones por minuto

$$N_s = \frac{120 \cdot f}{P}$$

N_s = Velocidad de rotación sincrónica f = Frecuencia

De esta manera nos permitirá tener el siguiente arreglo de paneles fotovoltaicos:
Arreglo de paneles a plena carga

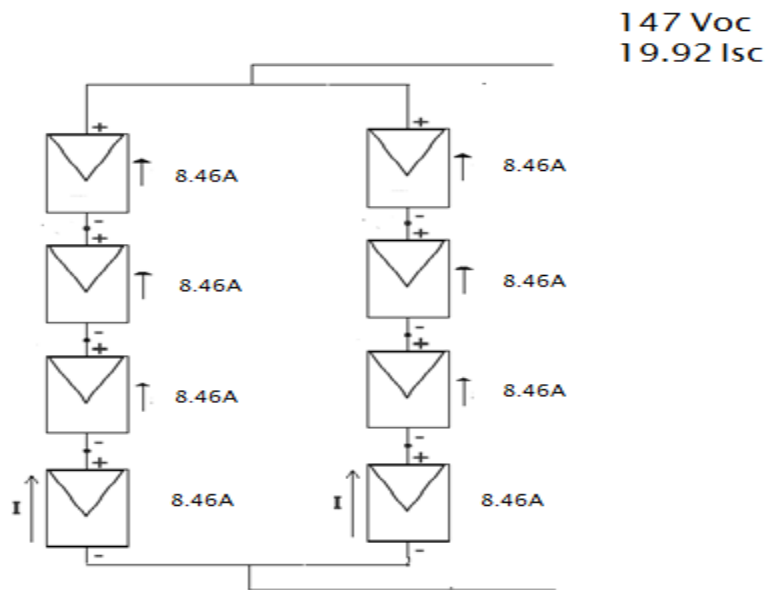


Figura 4.14: arreglo de paneles a plena carga

Arreglo de paneles reduciendo la corriente con arranque suave figura 4.15:

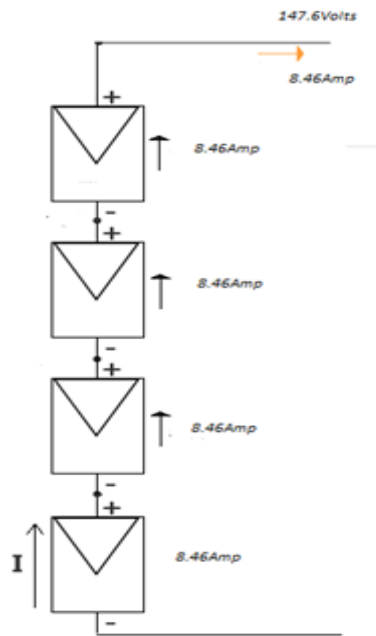


Figura 4.15: Arreglo paneles implementando arranque suave

Paneles de la marca Canadian solar

235 Watts 36.9Voc 8.6Isc

4.4.- Discusión y Conclusiones

Como se sabe que se tiene un pico nominal de 18 Amp a 500 milisegundos en un refrigerador convencional, esto demandaría un número mayor de paneles, los cuales solamente serían requeridos en el preciso momento del arranque. En nuestro caso, se propuso disminuir el número de paneles y por consiguiente la cantidad máxima de corriente del arranque se verá disminuida; sin embargo esto podría traer serias consecuencias al motor del refrigerador. Este problema lo consideramos como sigue:

La mayoría de los refrigeradores establece una corriente mínima de arranque de pico de 4 Amperes; en nuestro caso la limitamos a diez Amperes (aunque nuestro sistema permite caracterizar esta corriente en tiempo real) e incrementando el tiempo en el cual se logra dicha corriente. Se simularon 4 frecuencias distintas utilizadas en el evento de arranque (60Hz, 50 Hz, 40Hz, 30Hz).El resultado de dichas simulaciones se muestran en las figuras siguientes:

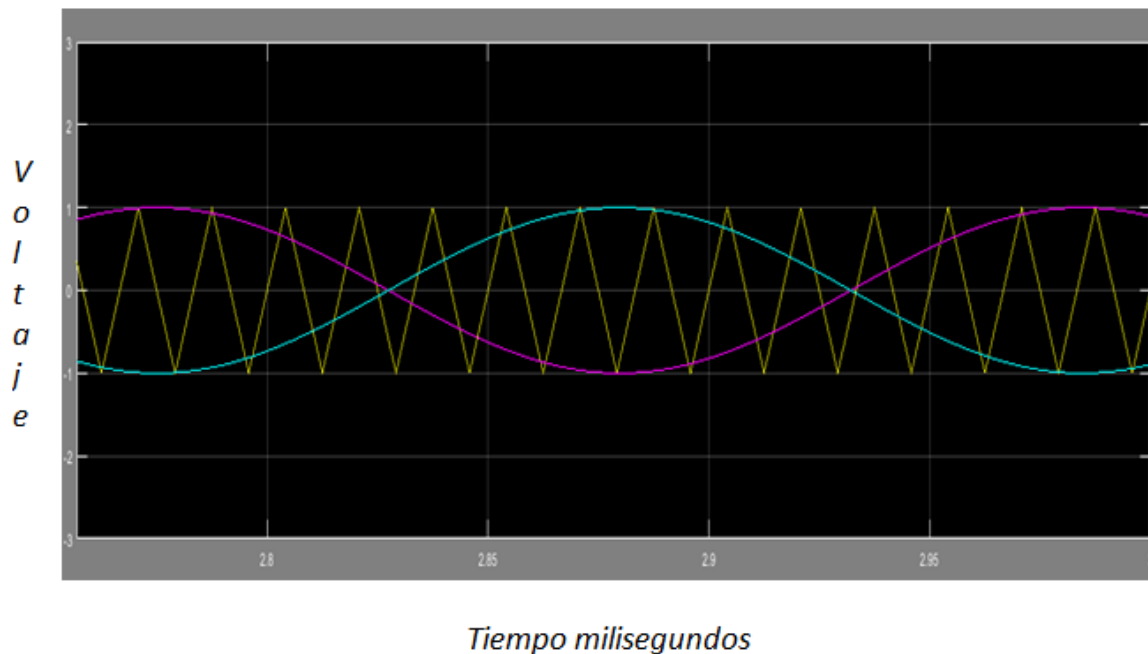


Figura 4.16: Técnica de modulación senoidal por ancho de pulso a 30 Hz

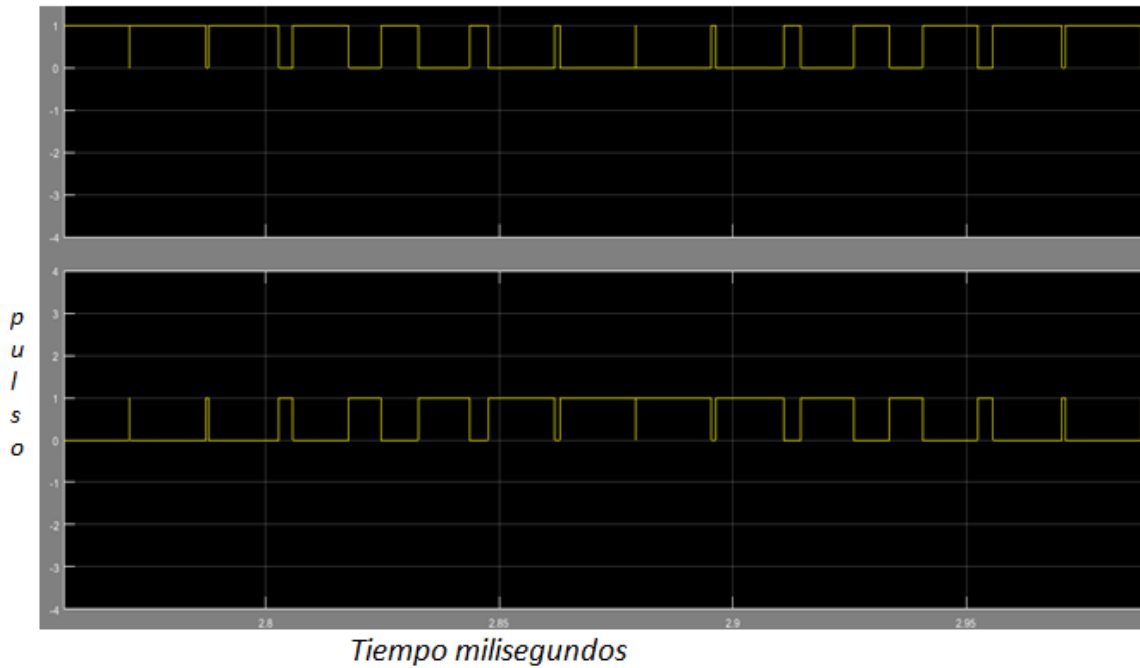


Figura 4.17: Pulsos de disparo igbt correspondientes a 30 Hz

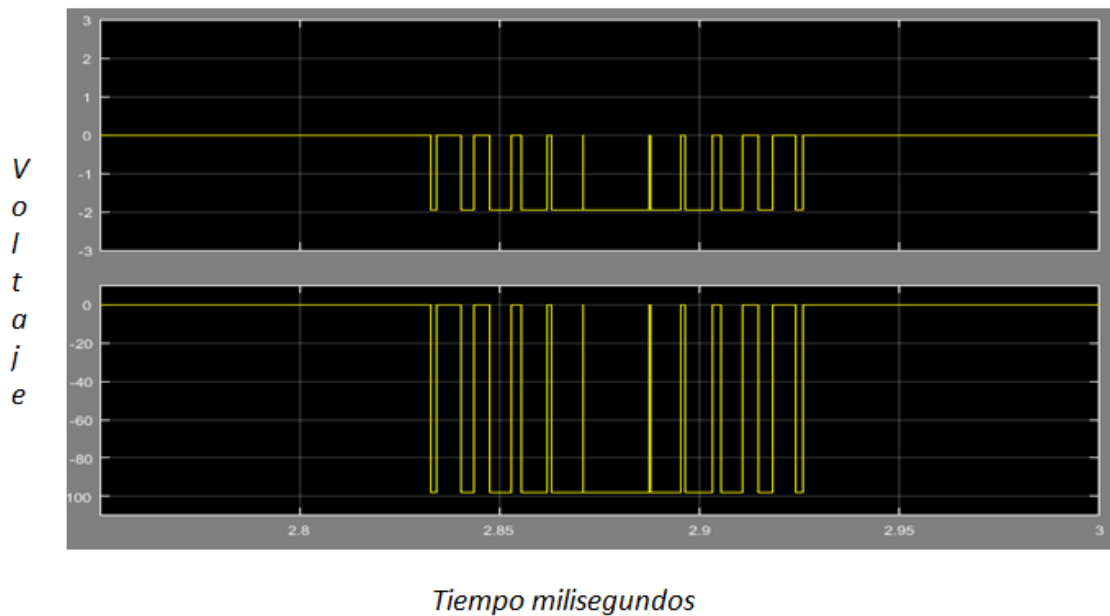


Figura 4.18: Resultados de la simulación durante el control de arranque utilizando la modulación SPWM a una frecuencia de 30 Hz eje horizontal indica tiempo en milisegundos, mientras que el eje vertical la corriente y el voltaje respectivamente de la señal, ambas señales son la parte negativa de la señal.

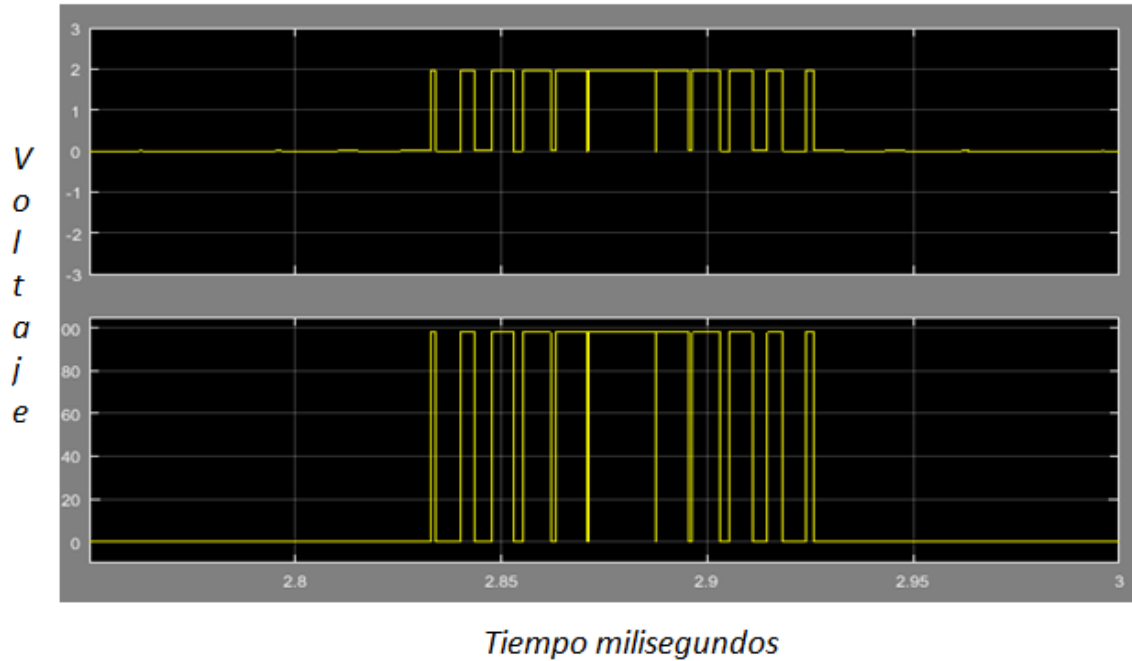


Figura 4.19: Resultados de la simulación durante el control de arranque utilizando la modulación SPWM a una frecuencia de 30 Hz eje horizontal indica tiempo en milisegundos, mientras que el eje vertical la corriente y el voltaje respectivamente de la señal, ambas señales son la parte positiva de la señal.

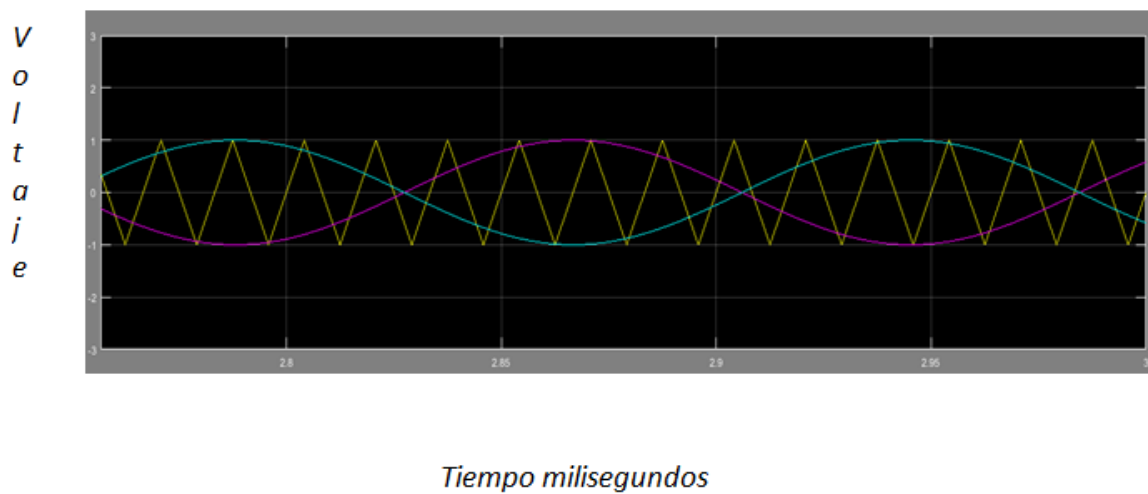


Figura 4.20: Técnica de modulación senoidal por ancho de pulso a 40 Hz

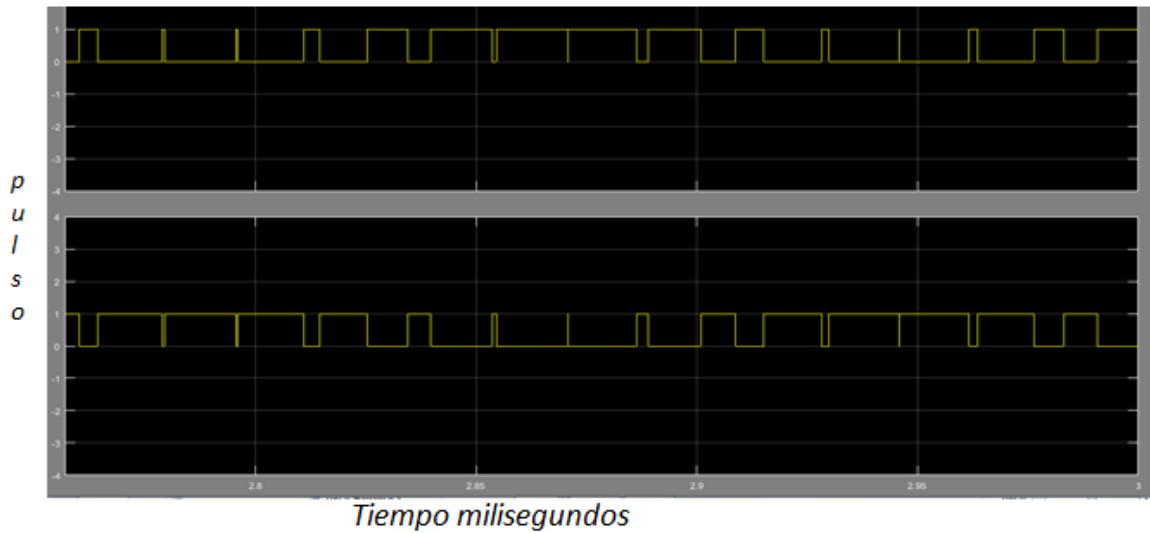


Figura 4.21: Pulsos de disparo igbt correspondientes a 40 Hz

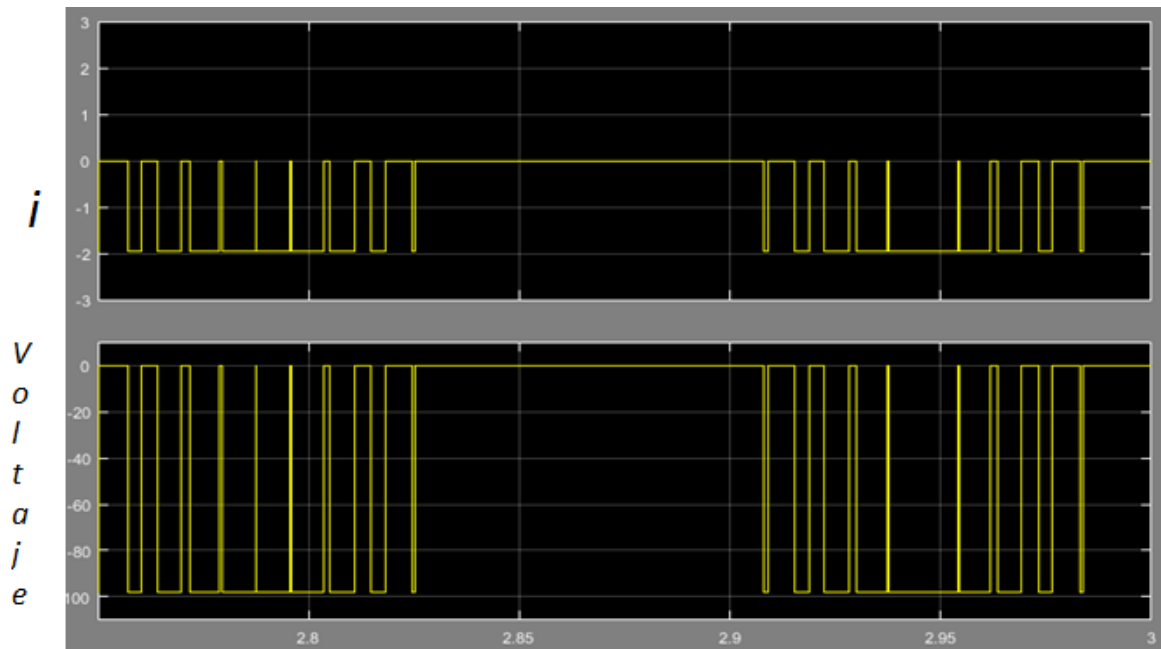


Figura 4.22: Resultados de la simulación durante el control de arranque utilizando la modulación SPWM a una frecuencia de 40 Hz eje horizontal indica tiempo en milisegundos, mientras que el eje vertical la corriente y el voltaje respectivamente de la señal, ambas señales son la parte negativa de la señal.

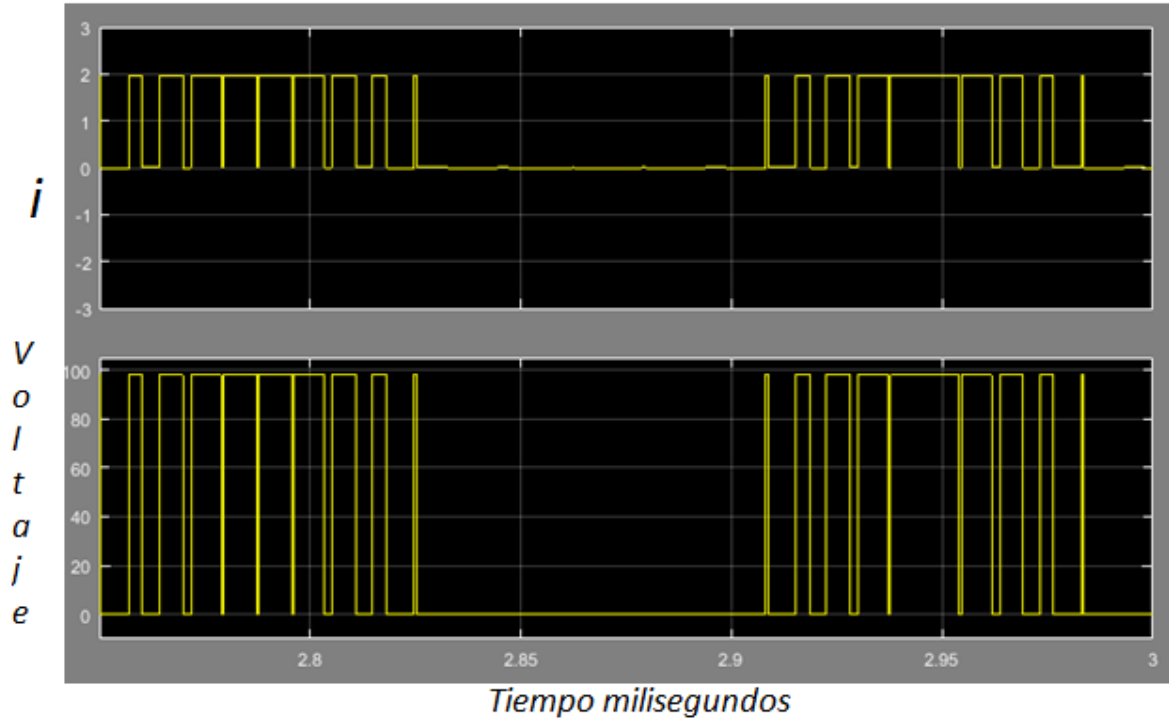


Figura 4.23: Resultados de la simulación durante el control de arranque utilizando la modulación SPWM a una frecuencia de 40 Hz eje horizontal indica tiempo en milisegundos, mientras que el eje vertical la corriente y el voltaje respectivamente de la señal, ambas señales son la parte positiva de la señal.

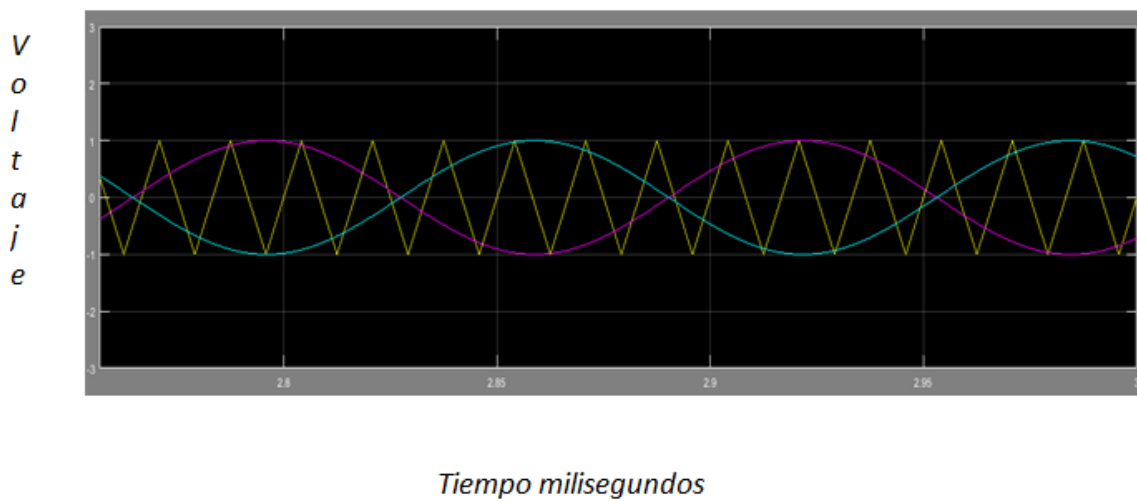


Figura 4.24: Técnica de modulación senoidal por ancho de pulso a 50 Hz

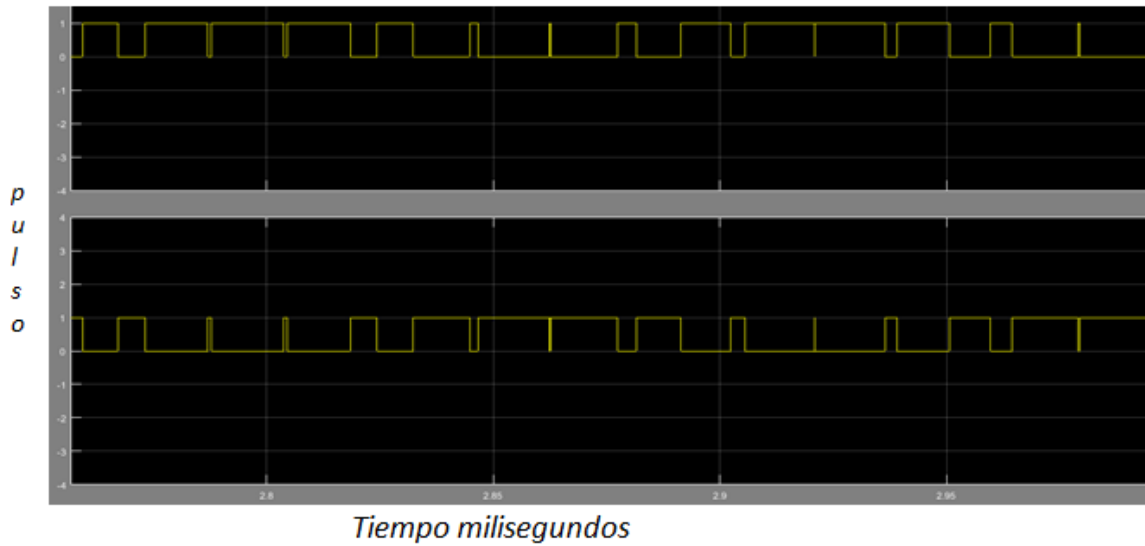


Figura 4.25: Pulsos de disparo igbt correspondientes a 50 Hz

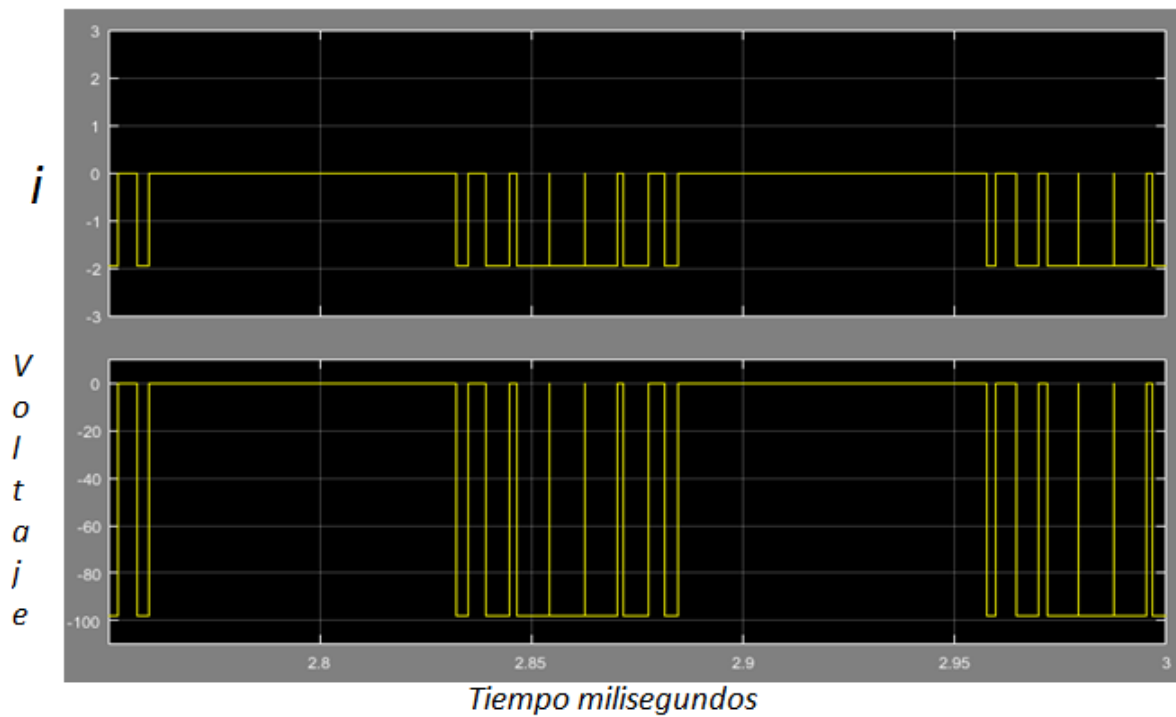


Figura 4.26: Resultados de la simulación durante el control de arranque utilizando la modulación SPWM a una frecuencia de 50 Hz eje horizontal indica tiempo en milisegundos, mientras que el eje vertical la corriente y el voltaje respectivamente de la señal, ambas señales son la parte negativa de la señal.

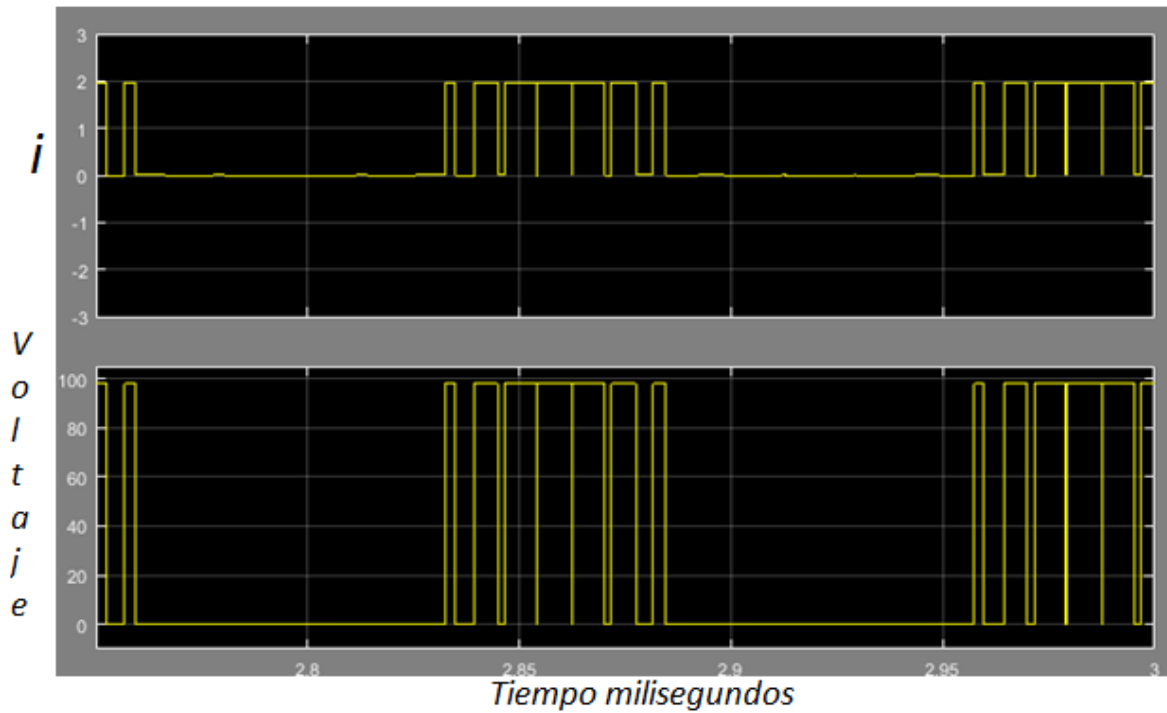


Figura 4.27: Resultados de la simulación durante el control de arranque utilizando la modulación SPWM a una frecuencia de 50 Hz eje horizontal indica tiempo en milisegundos, mientras que el eje vertical la corriente y el voltaje respectivamente de la señal, ambas señales son la parte positiva de la señal.

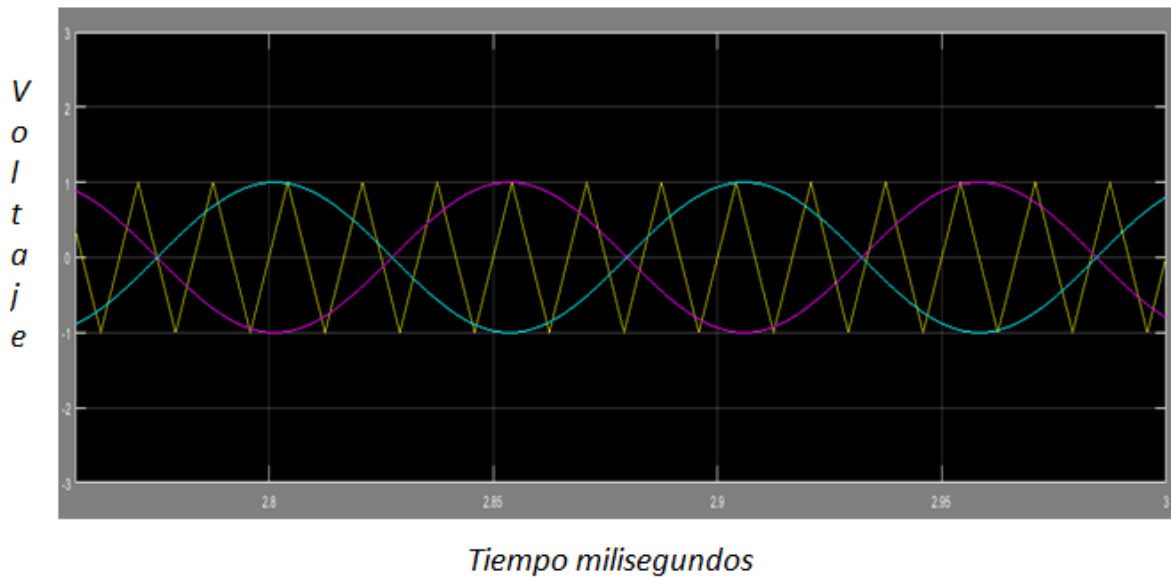


Figura 4.28: Técnica de modulación senoidal por ancho de pulso a 60 Hz

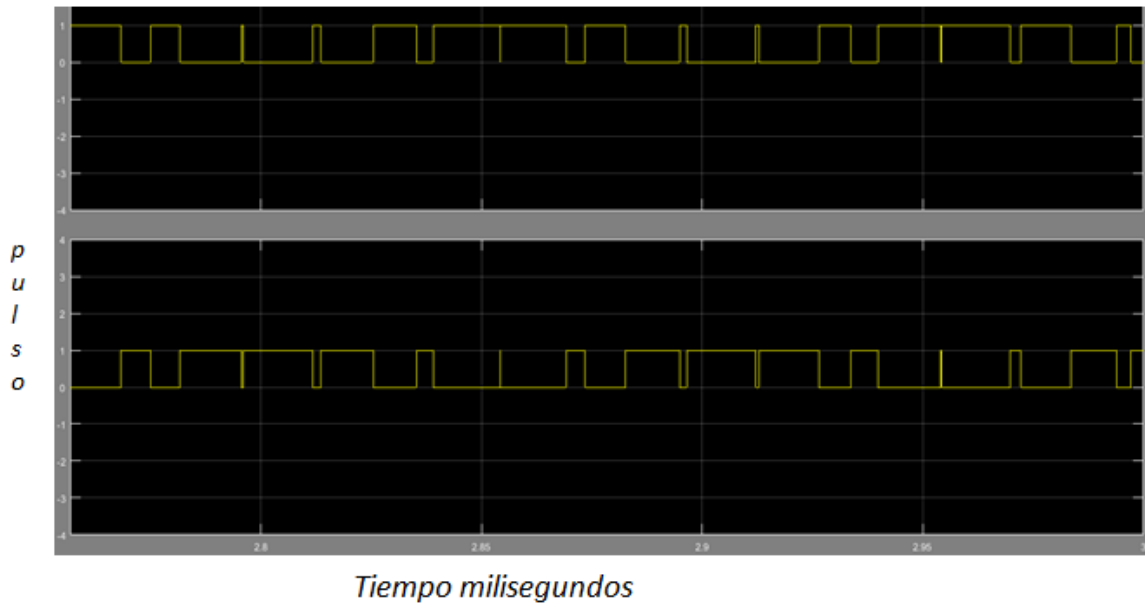


Figura 4.29: Pulsos de disparo igtb correspondientes a 60 Hz

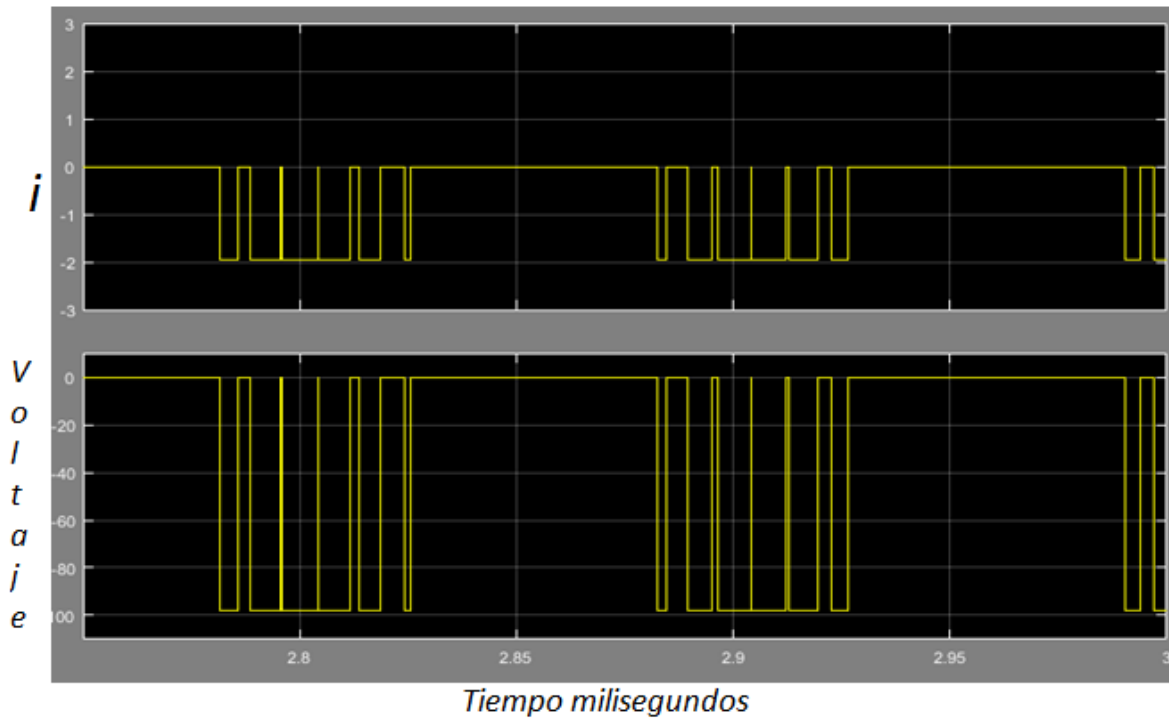


Figura 4.30: Resultados de la simulación durante el control de arranque utilizando la modulación SPWM a una frecuencia de 60 Hz eje horizontal indica tiempo en milisegundos, mientras que el eje vertical la corriente y el voltaje respectivamente de la señal, ambas señales son la parte negativa de la señal.

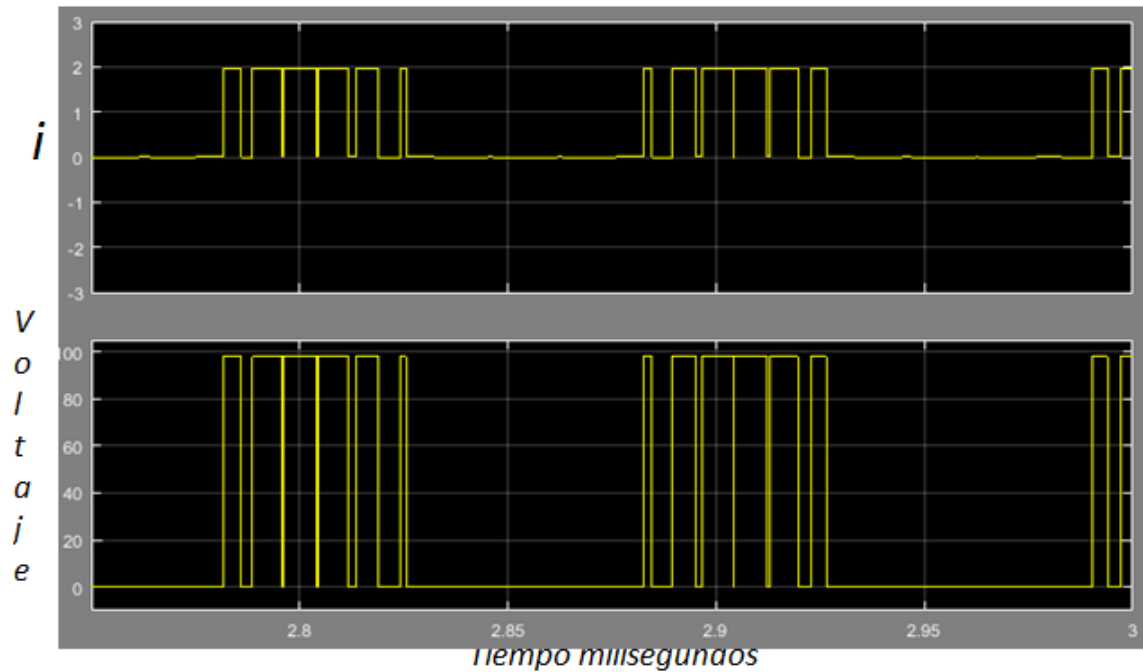


Figura 4.231: Resultados de la simulación durante el control de arranque utilizando la modulación SPWM a una frecuencia de 60 Hz eje horizontal indica tiempo en milisegundos, mientras que el eje vertical la corriente y el voltaje respectivamente de la señal, ambas señales son la parte positiva de la señal. Simulación de la técnica modulación ancho de pulso sinusoidal de 30, 40, 50 y 60 hertz.

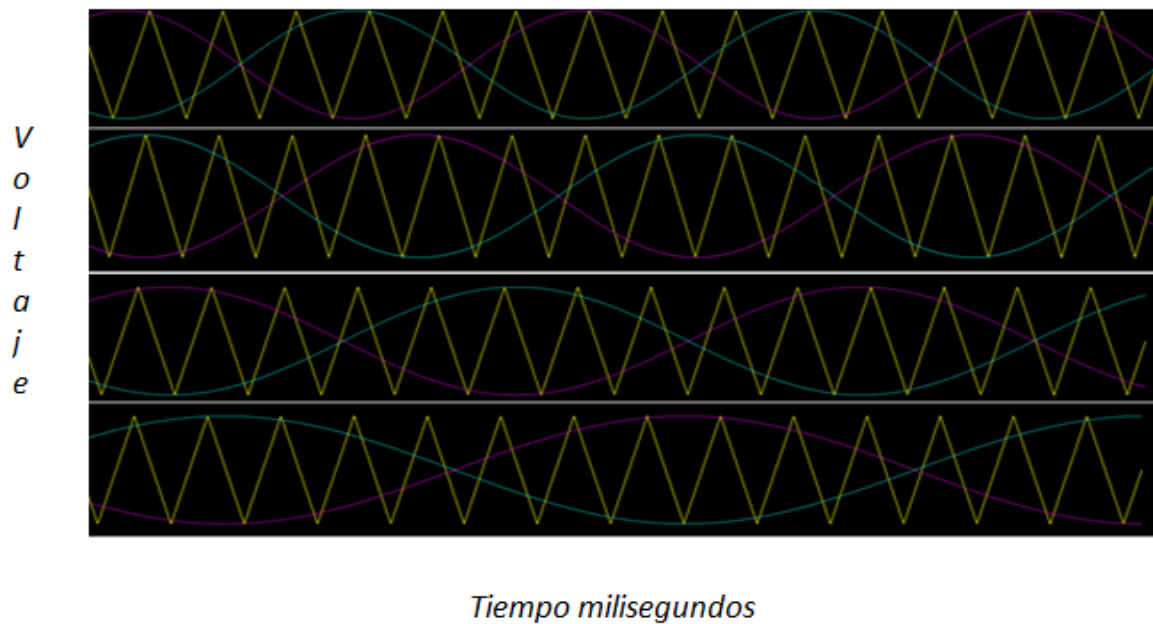


Figura 4.32: Diferentes frecuencias de la modulación de ancho de pulso sinusoidal.

A partir de las simulaciones obtenidas, se concluye que el proceso para la utilización de la energía solar para el funcionamiento de un refrigerador de corriente alterna es factible, ya que uno de los objetivos planteados fue el de construir un control para minimizar la cantidad de energía eléctrica de los paneles fotovoltaicos, que nos permita realizar un arranque suave para poner en marcha el refrigerador, y así requerir menos energía eléctrica y minimizar la cantidad de paneles fotovoltaicos.

Se demuestra la reducción de la corriente para poner en marcha al refrigerador con la técnica de modulación spwm.

Se concluye el impacto en el costo mediante el uso de menor cantidad de paneles solares.

Con el microcontrolador, además de la confiabilidad para el procesamiento de la información, se observó otra ventaja contra circuitos convencionales que redujo en gran medida la utilización de circuitería externa.

4.3.- Trabajo a futuro

Desarrollo de programación para diferentes tipos de refrigeradores.

La implementación física del control propuesto.

Su conexión a la red eléctrica, ya que al implementar la técnica de modulación SPWM nos permite tener menor cantidad de armónicos para el desarrollo del control CC-CA de forma digital lo cual nos permite mejores condiciones para desarrollar inversores conectados a la red.

Bibliografía:

Katsuhiko Ogata, “Ingeniería de Control Moderna”, 2a. Ed. Prentice Hall Hispanoamericana 1993.

Muhammad H. Rashid, “Electrónica de potencia circuitos, dispositivos y aplicaciones”, 2a.Ed. Pearson Education, 1995.

Rashid Muhammad H. Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones,.. Tercera edición. S.a

John G. Proakis, Dimitris G. Manolaskis “Digital Signal Processing. Principles, Algorithms, and Applications” 3a. ed. Prentice Hall 1996.

“IGBT/Intelligent Power Modules” Powerex Inc. Agosto 2000.

Datasheet “HCPL3120/J312” Avago Technologies www.avagotech.com, Julio 2008.

K.V. Kumar, P.A. Michael, J.P. John and S.S. Kumar July 2010,
“Simulation and Comparison of SPWM and SVPWM control for Three Phase Inverter,” Asian Research Publishing Network, Vol. 5, No. 7, pp. 61-74.

Vinay K. Ingle John G. Proakis “Digital Signal Processing using MATLAB” 2a. ed. Thomson 2007

www.microchip.com, Microchip Technology Inc. 2008-2009.

Referencias

[1].-(<http://econotecnia.com/historia-de-los-paneles-solares.html>)

[2].- (<http://www.energiza.org/solar-fotovoltaica/22-solar-fotovoltaica/624-historia-de-la-energia-solar-fotovoltaica>)

[3]<http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/33865/1/landadelgadoivan.pdf>

[4]<http://www.motoresygeneradores.com/index.php/motores/201-arranque-de-motores-electricos-de-ac>

[5]International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering (IJIRAE)
ISSN: 2349-2163 Volume 1 Issue 9 (October 2014)