

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN



INFORME FINAL DE INVESTIGACIÓN

**“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN CONVERTIDOR DC/AC
(INVERSOR) MONOFÁSICO DE 220V CONTROLADO POR
ANCHO DE PULSO CON MODULACIÓN SINUSOIDAL (SPWM)
DE BAJA POTENCIA”**

AUTOR: RUSSELL CÓRDOVA RUIZ

(Periodo de ejecución: del 01 de junio 2019 al 31 de mayo de 2020)

(Resolución de aprobación N° 595-2019-R)

Callao, 2020

PERÚ

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'R. Cordova Ruiz', is located in the bottom right corner of the page.



DEDICATORIA

A mis padres, In memoriam , por su constante presencia espiritual quienes, por su temprana partida, nunca pudieron ver mi objetivo alcanzado.



AGRADECIMIENTO

Mi profundo agradecimiento a la Universidad Nacional del Callao, a toda la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, por ser la casa donde pude lograr mi objetivo



ÍNDICE

ÍNDICE	1
TABLA DE CONTENIDO	3
TABLA DE FIGURAS	4
RESUMEN	6
ABSTRACT	7
INTRODUCCIÓN	8
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
1.1 Descripción de la realidad problemática.....	9
1.2 Formulación del problema	9
1.2.1 Problema general.....	9
1.2.2 Problema específicos.....	9
1.3 Objetivos	10
1.3.1 Objetivo general	10
1.3.2 Objetivos específicos	10
1.4 Limitantes de la investigación.....	10
II. MARCO TEÓRICO	11
2.1 Antecedentes: (Internacional y nacional).....	11
2.2 Bases teóricas:.....	14
2.2.1 Teórico	14
2.2.2 Conceptual.....	41
2.3 Definición de términos básicos:.....	42
III. HIPÓTESIS Y VARIABLES	43
3.1 Hipótesis.....	43
3.1.1 Hipótesis general	43
3.1.2 Hipótesis específicas	43
3.2 Definición conceptual de variables	43
3.3 Operacionalización de variables.....	43
IV. DISEÑO METODOLÓGICO	44
4.1 Tipo y diseño de investigación	44
4.2 Método de investigación.....	44



4.3 Población y muestra.....	44
4.4 Lugar de estudio y periodo desarrollado	44
4.5 Técnicas e instrumentos para la recolección de la información	44
4.6 Análisis y procesamiento de datos.....	45
4.6.1 Investigación bibliográfica:	45
4.6.2 Diseño:.....	45
4.6.3 Simulación:.....	45
4.6.4 Rediseño y simulación:	46
V. RESULTADOS	47
5.1 Resultados descriptivos.....	47
VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	52
6.1 Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados	52
6.2 Contrastación de los resultados con otros estudios similares	52
6.3 Responsabilidad ética	52
CONCLUSIONES	53
RECOMENDACIONES	54
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55
ANEXOS:.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
Anexo A: Matriz De Consistencia.....	57



TABLA DE CONTENIDO

Tabla 1. <i>Coeficientes de Fourier normalizados para SPWM Bipolar</i>	34
Tabla 2. <i>Coeficientes de Fourier normalizados para SPWM Unipolar</i>	36
Tabla 3. <i>Valores obtenidos mediante la técnica de Modulación SPWM</i>	51



TABLA DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Relación entre la señal moduladora y la portadora.....	15
<i>Figura 2.</i> Estructura general del convertidor DC – AC	16
<i>Figura 3.</i> Esquema de un inversor monofásico.....	18
<i>Figura 4.</i> Secuencia de disparo y tensión obtenida en la carga.....	19
<i>Figura 5.</i> Inversor monofásico puente completo	22
<i>Figura 6.</i> Modulación de un solo ancho de pulso	26
<i>Figura 7.:</i> Perfil armónico de la modulación.....	26
<i>Figura 8.</i> Modulación en ancho de varios pulsos	28
<i>Figura 9.</i> Perfil de armónicos para modulación de ancho de varios pulsos	28
<i>Figura 10.</i> Modulación senoidal de ancho de pulso (SPWM).....	29
<i>Figura 11.</i> Señales de control y tensiones para SPWM.....	30
<i>Figura 12.</i> Perfil armónico para esta modulación	30
<i>Figura 13.</i> Esquema de generación SPWM	31
<i>Figura 14.</i> Formas de onda SPWM Bipolar.....	33
<i>Figura 15.</i> Serie de Fourier de la salida SPWM Bipolar	33
<i>Figura 16.</i> Formas de onda SPWM Unipolar.....	35
<i>Figura 17.</i> Serie de Fourier de la salida SPWM Unipolar.....	35
<i>Figura 18.</i> Oscilador sinusoidal.....	37
<i>Figura 19.</i> Circuito inversor	38
<i>Figura 20.</i> Circuito comparador.....	39
<i>Figura 21.</i> Efecto de la relación de amplitudes entre la sinusoidal y la triangular	40
<i>Figura 22.</i> Circuito restador.....	40
<i>Figura 23.</i> Señal SPWM.....	41
<i>Figura 24.</i> Circuito desfasador de 180 grados y salida vista en el osciloscopio, respectivamente.....	47
<i>Figura 25.</i> Circuito de salida del oscilador vista en el osciloscopio.....	48
<i>Figura 26.</i> Circuito PWM y salida vista en el osciloscopio, respectivamente. ...	48
<i>Figura 27.</i> Circuito desfasador de 180 grados y generador de la señal triangular (señal portadora).....	49



Figura 28. Circuito SPWM y salida vista en el osciloscopio.49

Figura 29. Etapa de salida SPWM50

Figura 30. Etapa de acoplamiento entre el circuito generador SPWM y el
convertidor DC/AC se realiza mediante optoacopladores.....50

Figura 31. Convertidor DC/AC controlado por ancho de pulso con modulación
sinusoidal SPWM.....51



RESUMEN

La operación del inversor como fuente de voltaje regulada, trae como ventaja adicional, de que puede ser visto como un “generador controlable” que no posee inercia. Esta particularidad ocasiona muy bajos tiempos de respuesta, ante los cambios en los ajustes del mismo.

Esta característica permite la aplicación de esta tecnología para el control estático y dinámico de la operación de los sistemas eléctricos de potencia; en este sentido, el presente trabajo de investigación, describe el Diseño y simulación de un convertidor DC/AC (Inversor) monofásico de 220V controlado por ancho de pulso con modulación sinusoidal (SPWM) de baja potencia, que sea de fabricación sencilla y de bajo costo. El generador de SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation) se compone de cinco bloques: oscilador sinusoidal, desfasador de 180 grados, generador de señal portadora triangular, comparador de dos canales y restador y la etapa de potencia.

Luego de realizar el diseño de cada una de las etapas, se procedió a hacer la simulación con el software electrónico Proteus, donde se observó que hay una cierta aproximación entre el diseño realizado y la simulación efectuada.



ABSTRACT

The operation of the inverter as a regulated voltage source brings as an additional advantage that it can be seen as a "controllable generator" that does not have inertia. This particularity causes very low response times, in the face of changes in its settings.

This feature allows the application of this technology for the static and dynamic control of the operation of electrical power systems; In this sense, the present research work describes the Design and simulation of a low power sinusoidal modulation (SPWM) pulse width controlled 220V single phase DC / AC converter (Inverter). The SPWM (Sine Pulse Pulse Modulation) generator consists of five blocks: sine oscillator, 180 degree phase shifter, triangular carrier signal generator, two channel comparator and subtractor and power stage.

After carrying out the design of each of the stages, carry out the procedure to simulate with the electronic Proteus software, where you will see that there is a certain approximation between the design carried out and the simulation carried out.



INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación, trata sobre el diseño de un Inversor DC/AC utilizando la Técnica de Modulación de Ancho de Pulso Senoidal, esta técnica hace que el control de la tensión de salida se efectúe mediante la variación del ancho de varios pulsos por semiperiodo con una separación variable entre los pulsos.

El diseño consiste en una investigación bibliográfica de las topologías de inversores más simples, seguida por una investigación de la teoría de transistores de potencia y el método adecuado de control. El diseño se realizó con un controlador analógico PWM, tomando en cuenta la disponibilidad de componentes en el mercado, así como sus respectivos modelos de Proteus, que son esenciales para sustentar el diseño, de no existir algún modelo en Proteus, se buscará un equivalente en bloques para realizar la simulación.

Las simulaciones se realizaron mediante Matlab / Proteus, que demostró que el sistema de control es válido y cumple con las condiciones de diseño, impuestas: se realizaron pruebas con cargas resistivas, inductivas y capacitivas, para los casos en que el voltaje de entrada disminuya con respecto al tiempo y en el caso en que se tuvieran cambios en la carga.



I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción de la realidad problemática

Los convertidores DC/AC, facilitan la comprensión y el funcionamiento de los dispositivos electrónicos de potencia, así como la parte experimental de la conversión de la corriente continua en alterna y de esta forma sustituir la falta del suministro eléctrico permitiendo así el funcionamiento de los equipos de corriente alterna.

En la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional del Callao (UNAC), se dictan los siguientes cursos de especialidad:

Electrónica de Potencia I, Electrónica de Potencia II, Electrónica Industrial y de Potencia, Instrumentación y Control de Procesos. Los laboratorios de los cursos mencionados, no cuentan con estos equipos debido a su alto costo en el mercado nacional, ante la inexistencia de estos, hace que el aprendizaje de los alumnos, sea lento, redundando negativamente en su formación profesional como futuros ingenieros, ante ello se plantea la siguiente interrogante.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general

¿Cómo es el diseño y simulación de un convertidor DC/AC (Inversor) monofásico de 220V controlado por ancho de pulso con modulación sinusoidal (Spwm) de baja potencia?

1.2.2 Problema específicos

¿Cómo influye el índice de modulación en el diseño y simulación de un convertidor DC/AC (Inversor) monofásico de 220V controlado por ancho de pulso con modulación sinusoidal (Spwm) de baja potencia?

¿Cómo influye la técnica de modulación por ancho de pulso sinusoidal en el diseño y simulación de un convertidor DC/AC (Inversor) monofásico de 220V controlado por ancho de pulso con modulación sinusoidal (Spwm) de baja potencia?



1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Diseñar y simular un convertidor DC/AC (Inversor) monofásico de 220V controlado por ancho de pulso con modulación sinusoidal (SPWM) de baja potencia.

1.3.2 Objetivos específicos

Comprender como influye el índice de modulación en el diseño y simulación de un convertidor DC/AC (Inversor) monofásico de 220V controlado por ancho de pulso con modulación sinusoidal (Spwm) de baja potencia

Comprender cómo influye la técnica de modulación por ancho de pulso sinusoidal en el diseño y simulación de un convertidor DC/AC (Inversor) monofásico de 220V controlado por ancho de pulso con modulación sinusoidal (Spwm) de baja potencia

1.4 Limitantes de la investigación

Limitante teórica. - Debido a que no se cuenta con fuentes de información suficiente que traten el tema presentadas en el desarrollo del proyecto.

Limitante temporal. - La investigación se llevó a cabo en un periodo de 12 meses, el cual estará comprendido del mes de junio del año 2019 al mes de mayo de 2020.

Limitante espacial. - La presente investigación se llevó a cabo en la Universidad Nacional del Callao, en la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.



II. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes: (Internacional y nacional)

Edgardo Alberto, Portugal Fernández (2006), en su tesis “Diseño de un inversor multinivel en cascada monofásico de bajo contenido armónico para cargas resistivas”, para obtener su título profesional de Ingeniero Electrónico, de la Pontificia Universidad Católica del Perú, en el Capítulo 2, Estado del arte, menciona:

De acuerdo a Mario Rosato (ROSATO 1991) existen dos clases de inversores: los inversores mecánicos y los inversores estáticos. Dentro de los inversores mecánicos, Rosato describe a los inversores rotativos y los de conmutación.

El inversor rotativo está basado en un motor de corriente continua que acciona un generador de corriente alterna. Este inversor casi está en desuso debido a su bajo rendimiento global (menor al 60%).

Los inversores de conmutación están basados en relés accionados por una llave rotativa, la cual está conectada a un motor auxiliar. A pesar de tener mejor rendimiento que el inversor rotativo y ser de menor costo, este inversor tiene las desventajas de ser extremadamente ruidoso, producir interferencias con los sistemas de comunicación y tener una menor vida útil.

Respecto a los inversores estáticos, Rosato destaca su alto rendimiento (entre 80% y 90%), el cual es mayor debido a que utiliza dispositivos electrónicos de potencia como elementos de conmutación. El rendimiento de estos inversores será mayor mientras opere más cerca de su máxima carga. Rosato resalta que no es conveniente operar un inversor con baja carga o nula y recomienda el uso de inversores para cada carga en vez del uso de un inversor central.

Otra forma, señalada por Rosato, de obtener una tensión de corriente alterna a partir de una tensión de corriente continua está basada en el uso de



osciladores sinusoidales. Estos permiten obtener una salida sinusoidal casi perfecta, sin embargo, su aplicación está limitada debido a que para que el amplificador realimentado se encuentre en el límite de estabilidad debe estar polarizado en su zona activa de trabajo, lo cual determina un bajo rendimiento (entre 30 % a 50 %).

Muhammad Rashid (RASHID 2004) desarrolla en su obra tres tipos de inversores electrónicos, los inversores de pulso resonante, los inversores modulados por ancho de pulso y los inversores multinivel.

Respecto a los inversores de pulso resonantes, tanto Rashid como José Alonso (ALONSO1999) coinciden en que se utilizan en aplicaciones de alta frecuencia, entre ellas la alimentación de lámparas de descarga, el calentamiento por inducción, la soldadura por arco eléctrico, procesos electrostáticos, reguladores conmutados de corriente continua y la alimentación de cargas ultrasónicas.

Rashid y Rosato describen tres tipos de topologías utilizadas en el diseño de inversores modulados por ancho de pulso, el inversor de puente completo, el inversor de medio puente y el inversor push-pull.

De acuerdo a Rashid (RASHID 1993) el inversor de puente completo requiere del doble de transistores y diodos usados en la configuración del inversor de medio puente. El uso de un mayor número de transistores por rama permite que estos soporten una menor tensión inversa y se pueda elevar la tensión a la entrada del inversor para entregar una mayor potencia a la carga.

Por otro lado, Rosato señala que el inversor push-pull combina las ventajas del inversor puente completo y medio puente, sin embargo, requiere de un transformador en su configuración para funcionar.

Para estas topologías, Rashid, Rosato y Benavent (BENAVENT et al. 2001) presentan varias técnicas de modulación basadas en el control de ancho de



pulsos, que permiten reducir el contenido armónico a la salida del inversor. Entre estas técnicas se encuentran la UPWM (modulación por ancho de pulso múltiple), la SPWM (modulación por ancho de pulso sinusoidal), la MSPWM (modulación por ancho de pulso sinusoidal modificada), la modulación por escalera, la modulación por inyección de armónica y la modulación delta. Rashid destaca a la modulación SPWM (modulación por ancho de pulso sinusoidal) como la más eficaz en la reducción de armónicas de orden inferior.

Respecto al tipo de semiconductores usados en la fabricación de inversores, Rashid señala que, debido al desarrollo de semiconductores de potencia de conmutación rápida, como el GTO, el IGBT y el MOSFET, el uso de tiristores en conmutación forzada ha quedado limitado a inversores de muy alta potencia.

Rashid indica, además, que las técnicas de eliminación de armónicos basadas en el control de ancho de pulsos, aumentan el orden de las armónicas y reducen el tamaño de los filtros de salida a costa de una mayor pérdida por conmutación de los dispositivos de potencia y mayores pérdidas magnéticas en el transformador del filtro, estas últimas debidas a las mayores frecuencias armónicas (RASHID 2004).

Rosato, señala que con el fin de atenuar las armónicas de alto orden a la salida del inversor se puede colocar un filtro pasa bajos, como por ejemplo un condensador en paralelo con la carga. Un filtro que atenúe considerablemente las armónicas de menor orden es muy voluminoso, pesado y costoso (grandes inductancias, núcleos de hierro y condensadores), por ello solo es usado para suprimir las armónicas de alta frecuencia (ROSATO 1991).

Felipe Ríos (RIOS 2003) y Alberto Brentón, (BRETÓN 2003) destacan las ventajas que ofrecen los inversores multinivel respecto a las topologías descritas para los inversores modulados por ancho de pulso. Rashid coincide con ellos, indicando además que los inversores multinivel presentan propiedades para compensación de potencia reactiva, posibilitan la fabricación de inversores de alta tensión sin someter a los semiconductores a las mismas tensiones inversas



y permiten obtener tensiones de bajo contenido armónico sin el uso de transformadores.

Rashid y Ríos presentan tres clases de inversores multiniveles: el inversor multinivel con diodo fijador, inversor multinivel con condensadores volantes y el inversor multinivel en cascada.

Debido a la menor cantidad de componentes que se requieren en un inversor multinivel en cascada en comparación de los otros dos tipos de inversores multiniveles además de la posibilidad de maximizar el número de niveles en la tensión generada, Elgueta (ELGUETA 2005), Brentón y Ríos desarrollan un inversor multinivel en cascada de 81 niveles logrando una onda de tensión muy aproximada a una onda sinusoidal.

2.2 Bases teóricas:

2.2.1 Teórico

Martin D., R. (2012), en su Proyecto Fin de Carrera, Ingeniería Industrial de la Universidad Carlos III de la Escuela Politécnica Superior, describe los conceptos básicos de la modulación en ancho de pulso.

El modulador es el elemento encargado de generar las señales PWM de disparo de cada uno de los interruptores a partir de la señal de control. Según se realice la conmutación de los interruptores se puede hablar de modulación bipolar, modulación unipolar y modulación rama lenta - rama rápida.

El principio básico de estas modulaciones consiste en comparar la señal de control (moduladora) con una señal triangular (portadora), generando así una modulación en ancho de pulso. Dependiendo de que combinaciones de estas señales, se apliquen a cada interruptor se obtiene uno u otro tipo de modulación.

Es interesante conocer dos definiciones, que relacionan la señal moduladora y la portadora en su amplitud y frecuencia. Índice de modulación en amplitud e índice de modulación en frecuencia.



Índice de modulación en amplitud: La ecuación $m_a = V_{señm} / V_{triP}$ (1. 1)

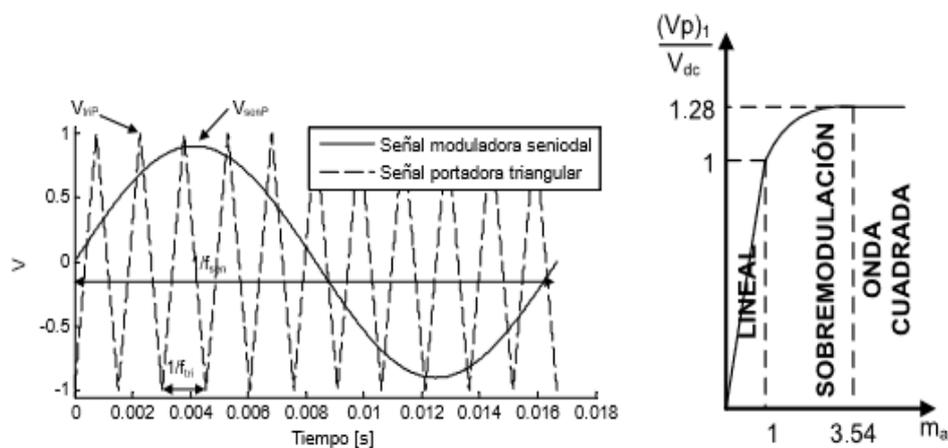
define m_a , es la relación entre la amplitud de la señal moduladora y la amplitud de la señal portadora. La figura 1 muestra el valor de pico del primer armónico de tensión de salida (V_p)1 normalizado a la tensión del bus DC V_{dc} , en relación con el índice de modulación en amplitud m_a para una topología de puente completo, según el valor de m_a se pueden distinguir tres zonas de modulación $0 < m_a \leq 1$ zona lineal en la que el ancho de los pulsos aumenta a medida que lo hace la tensión de referencia, $1 < m_a < 3,54$. Sobremodulación en la que dos o más pulsos se unen formando un único pulso y $m_a \geq 3,54$. Onda cuadrada en la que únicamente hay un pulso por semiciclo.

Índice demodulación en frecuencia: La ecuación $m_f = F_{tri} / F_{señm}$ (1. 2)

define m_f , que es la relación entre la frecuencia de la señal portadora y la frecuencia de la señal moduladora. Si $m_f < 21$ se dice que un inversor está muy poco modulado, mientras que si $m_f > 21$ se dice que está muy modulado.

$$m_a = V_{señm} / V_{triP} \quad (1. 1)$$

$$m_f = F_{tri} / F_{señm} \quad (1. 2)$$



(a) Relación entre la señal portadora (triangular) y la señal moduladora (senoidal). (b) Relación entre el primer armónico de tensión de salida y m_a para $m_f = 11$ en puente completo[27][25].

Figura 1. Relación entre la señal moduladora y la portadora
Fuente: Martín Delgado, Raúl. (2012) "Diseño e implementación experimental de un inversor monofásico operando en modo isla".



La función de los inversores es cambiar un voltaje de entrada de corriente continua (C.C) a un voltaje de salida de corriente alterna (C.A) simétrico, con amplitud y frecuencia deseada. Si se modifica el voltaje de entrada manteniendo fija la ganancia, es posible obtener un voltaje variable a la salida. Por otro lado, si se mantiene constante la entrada y se varía la ganancia se puede obtener un voltaje de salida variable. Esto se hace controlando la modulación del ancho del pulso, dentro del inversor. Las ondas de los inversores no son exactamente senoidales, siendo necesarias ondas con muy baja distorsión armónica; para aplicaciones de potencia. El control del voltaje de salida será obtenido mediante algunas técnicas entre las que se destaca la modulación por anchura de pulsos P.W.M (Pulse Width Modulation).

Unas de las aplicaciones más importantes de los inversores son las siguientes:

1. Fuentes de alimentación de emergencia.
2. Fuentes de alimentación ininterrumpida (U.P.S).
3. Variadores de velocidad para motores C.A.
4. Calentamiento por inducción.
5. Líneas de transmisión C.C (extremo receptor).
6. Dispositivos FACTS (Sistemas flexibles en corriente alterna)

Un convertidor DC – AC, está conformado por un inversor, un sistema de control, un filtro de salida y una fuente de alimentación, la figura 2 se muestra la estructura general de este.

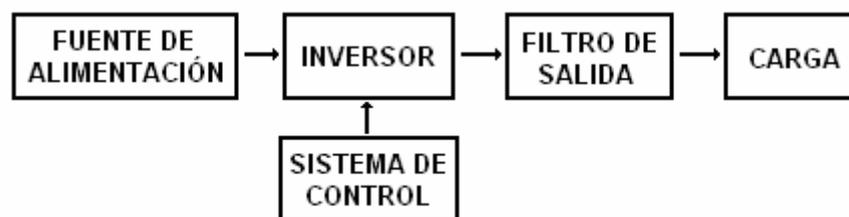


Figura 2. Estructura general del convertidor DC – AC
Fuente: (UNAC 2020); elaboración propia

El circuito de control, es el encargado de suministrar los pulsos de encendido y apagado de los dispositivos que lo conforman, para que de esta manera se obtenga la forma de onda deseada en la carga. Otra función del circuito de



control es la de monitorear el estado a la salida del inversor, en cuanto a sobrecargas o cortocircuitos en la carga o dentro de él, de tal manera que prohíba la conducción de los dispositivos cuando esto se presente.

La fuente de alimentación, suministra la tensión continua a la entrada del inversor, y dependiendo del tipo de control, que se esté realizando, para obtener la onda en la carga, puede estar conformada por una o varias etapas que a su vez pueden ser o no manejadas por el circuito de control.

Son muchos los puntos de vista, en los cuales se pueden clasificar los inversores, una posible clasificación es, según el tipo de semiconductor, con que se implementen los interruptores: tiristores o transistores. Los primeros se pueden subdividir a su vez en inversores de bloqueo natural o forzado (con fuente inversa de tensión o de corriente); los segundos es posible a su vez subdividirlos en autoexcitados o con excitación independiente. Es posible establecer otra clasificación en función de las características de salida, configuraciones en medio puente, puente completo monofásico y puente completo trifásico o en sus características de entrada: inversor alimentado en tensión o en corriente, según de que tipo sea la fuente primaria de entrada. Para el caso de los inversores con transistores, se puede establecer otra clasificación basándose en el método de excitación de la base de los transistores que configuran la topología de potencia de esta forma tenemos los inversores de onda cuadrada, P.W.M (Pulse Width Modulation) de alta frecuencia, con control de desplazamiento de fase, etc.

Principio de Operación de los inversores:

Para su principio de operación se considera una sola rama es decir inversor monofásico en configuración de medio puente ver figura 3. Los condensadores deben de tener el valor adecuado para que la tensión pueda ser considerada constante. Los diodos en antiparalelo se colocan para permitir el paso de corriente en sentido contrario, ya que la carga no va a ser resistiva, por lo que existirá un desfase entre la tensión y la corriente de esta forma, cuando T esté



saturado, la corriente circulará por el mismo o a través de su diodo en antiparalelo, según sea el sentido de la corriente. Por otro lado, la corriente se divide en valores iguales por los dos condensadores de filtro; podemos considerar que ambos condensadores están conectados en paralelo y en serie con la carga; por tanto, en régimen permanente, no existe componente de continua en la corriente que circula por la carga, con lo que se evitan los problemas de corriente continua en los devanados de un motor, saturación de los transformadores (si se utiliza transformador).

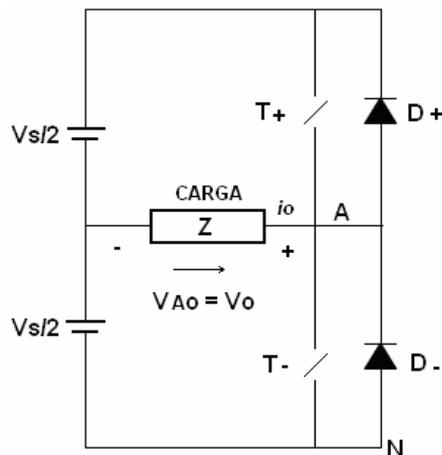


Figura 3. Esquema de un inversor monofásico
Fuente: (UNAC 2020); elaboración propia

Los transistores usados permiten tanto el encendido como el apagado por el terminal de control (base). Por simplicidad se asume que cada transistor conduce durante el tiempo que exista el pulso en la base y permanece apagado cuando desaparece. La secuencia de disparo y la tensión obtenida en la carga son mostradas en la figura 4, donde la frecuencia angular de salida está dada por la ecuación $\omega = 2\pi / T$ (1. 3):

$$\omega = 2\pi / T \quad (1. 3)$$



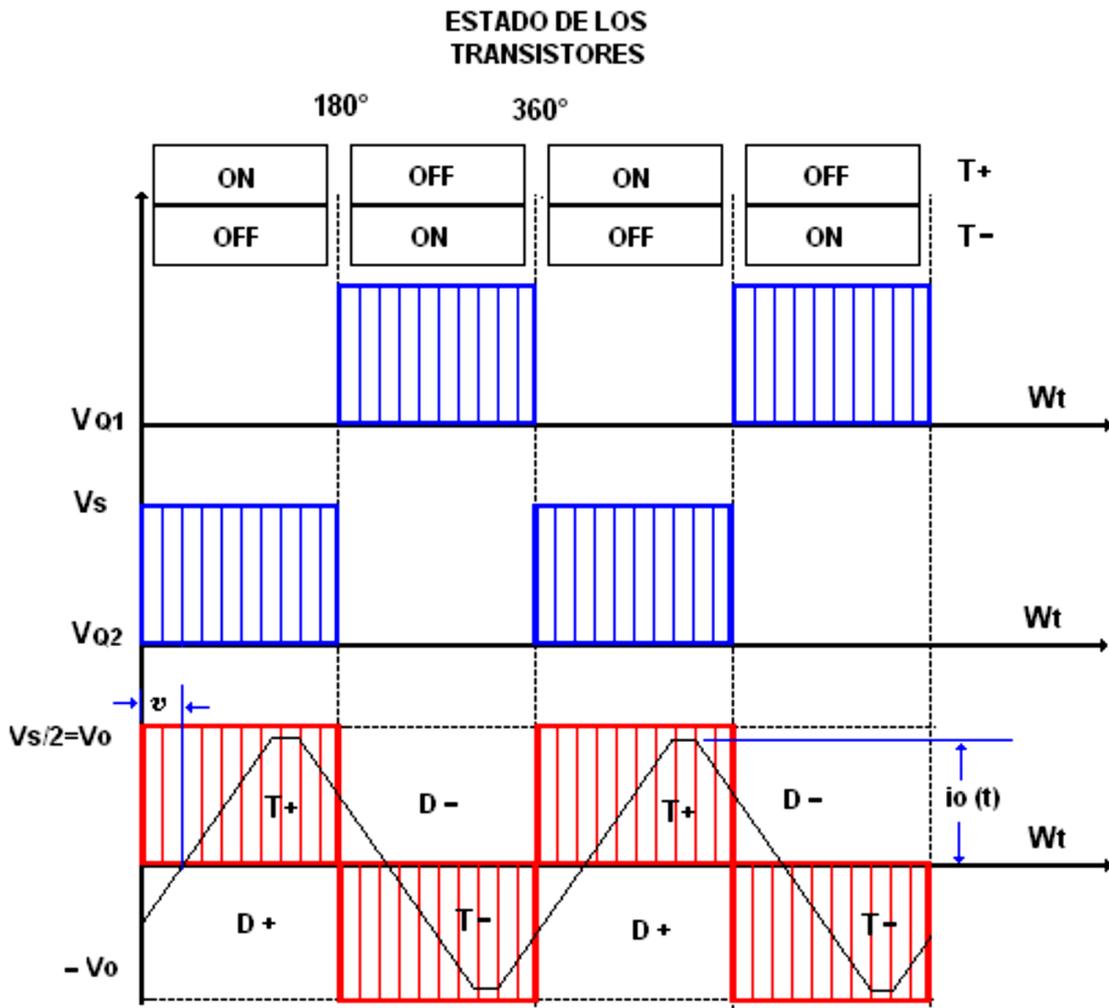


Figura 4. Secuencia de disparo y tensión obtenida en la carga
Fuente: (UNAC 2020); elaboración propia

En el intervalo $0 < t < T/2$ conduce $T+$ y la carga es sometida a la tensión $V_s/2$. En $t = T/2$, $T+$ es apagado y el $T-$ encendido. En el intervalo $T/2 < t < T$ conduce $T-$ y la carga es sometida a la tensión $-V_s/2$. Por tanto, la forma de onda en la carga es una tensión alterna rectangular de frecuencia $1/T$. Variando el periodo T se puede controlar la frecuencia de salida del inversor. Si la carga es resistiva pura, el circuito con solamente los transistores es necesario; pero la carga puede ser inductiva o capacitiva; o siendo más exactos, una carga resistiva contiene algo de capacitancia o de inductancia, entonces para cualquier tipo de carga, la corriente i_o no tiene que invertirse necesariamente en el mismo instante que el voltaje. Los diodos $D+$ $D-$ y de corriente circulatoria, conectados en antiparalelo con cada interruptor, permiten la operación con cualquier



tipo de carga. Una desventaja de éste circuito es que necesita alimentación continua de tres hilos, por lo que se utiliza mejor una configuración del tipo puente. El inversor tipo puente monofásico es utilizado cuando se desea obtener A.C. Monofásica en la carga a partir de una fuente de tensión continua única.

La tensión eficaz (V_{rms}) de salida del inversor Medio puente está dada por

la ecuación
$$V_0 = \left(\frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} \frac{v_s}{4} dt \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.4):$$

$$V_0 = \left(\frac{2}{T_0} \int_0^{T_0} \frac{v_s}{4} dt \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.4)$$

Parámetros de calidad

En la conversión DC/AC se utilizan los parámetros de eficiencia, a efectos de saber elegir el inversor para una aplicación determinada.

El inversor ideal debería entregar una onda de tensión senoidal, es decir sin contenido armónico, como lo es la tensión de red. Por tanto, mejor prestación y rendimiento tendrá aquel inversor cuya salida tenga menor cantidad de armónicos.

Los parámetros de eficiencia, muestran cómo se comporta cada circuito y se definen de la siguiente manera:

Factor armónico de cada componente o de la enésima potencia HF_n

Representa la contribución de una armónica de orden n cuyo valor eficaz es V_n respecto a la fundamental V_1

$$HF_n = V_n / V_1 \quad (1.5)$$



V_n es el valor *rms* de la n -ésima armónica.

V_1 es el valor *rms* de la componente fundamental.

Distorsión armónica total (THD) DAT

Es una medida de la similitud entre la forma de onda y su componente fundamental.

Toma en cuenta el valor eficaz de todas las armónicas presentes, respecto de la fundamental.

$$THD = \frac{1}{V} \left(\sum_{n=2,3,\dots}^{\infty} V_n^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.6)$$

Si la tensión de salida tiene un valor eficaz total V y la fundamental es V_1 , el valor eficaz resultante de todas las armónicas presentes se pueden calcular fácilmente como:

$$V_n = (V^2 - V_1^2)^{1/2}$$

Factor de distorsión (DF)

Proporciona el contenido armónico total de la señal, pero no indica el nivel de cada uno de sus componentes. Indica la cantidad de distorsión armónica que queda en una forma de onda triangular después de que los armónicos de esa forma de onda hayan sido sujetos a una atenuación de segundo orden (es decir divididas por n^2).

Por lo tanto, DF es una medida de la eficacia en la reducción de las componentes armónicas no deseadas y se define como:

$$THD = \frac{1}{V_1} \left(\sum_{n=2,3,\dots}^{\infty} \left(\frac{V_n}{n^2} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.7)$$

El factor de distorsión de una componente armónica individual (o de orden n), se define como:

$$DF_n = V_n / V_1 \cdot n^2 \quad (1.8)$$



Armónica de menor orden (LOH):

Es la armónica cuya frecuencia es la más cercana a la fundamental y su amplitud es mayor o igual al 3% de la amplitud de la fundamental.

Esto toma importancia en los inversores comerciales, para conocer a partir de que armónica comienza la existencia de estas.

Inversor monofásico en puente completo

En la figura 5 se muestra un inversor monofásico en configuración de puente completo, esta configuración se utiliza con potencias mayores que las de un inversor monofásico de medio puente. Para la misma tensión de entrada, la tensión máxima de salida que se puede obtener, es el doble que en el caso del medio puente; por tanto, para una misma potencia, la corriente por cada interruptor es la mitad. Si se trabaja con altas potencias de salida, dado que la corriente a manejar es menor, esto significa una notable ventaja, ya que se podrá poner menos interruptores en paralelo.

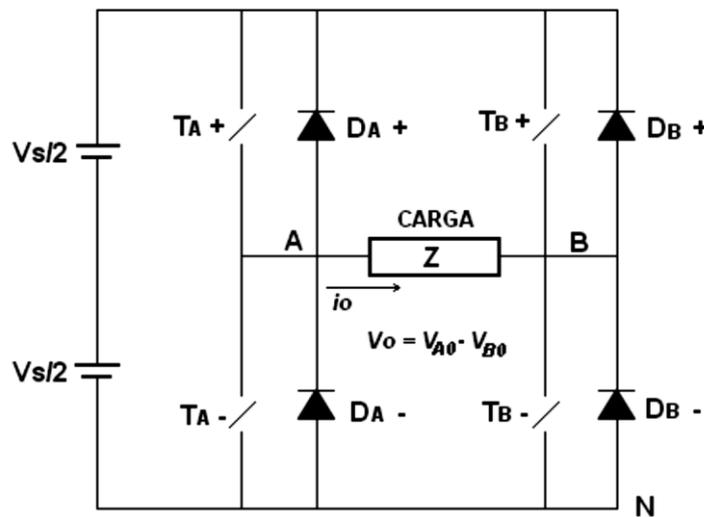


Figura 5. Inversor monofásico puente completo

Fuente: (UNAC 2020); elaboración propia

Para esta topología, podemos distinguir dos esquemas básicos de funcionamiento: bipolar o unipolar; por estos términos, se entenderá como varía la tensión aplicada al conjunto rectificador-carga: para el caso bipolar, la tensión



oscilará entre el valor máximo de la tensión de entrada y el mismo valor negativo (+Vs, -Vs), a la frecuencia de conmutación.

Para conseguir que la forma de onda varíe entre +Vs y -Vs es necesario que los Interruptores de puente conmuten de forma cruzada, es decir, que T_{A+} y T_{B-} estén saturados al mismo tiempo, y de igual forma para los otros dos interruptores respectivamente.

De esta forma, el control de los interruptores se realiza de la misma forma que en el caso de un medio puente; la única diferencia es que se envía la señal de mando a dos interruptores. La forma de onda obtenida en el conjunto filtro + carga es exactamente la misma que para el caso del medio puente, salvo en la amplitud: para el caso del puente completo, ésta es doble; por tanto, el análisis de los armónicos que aparecen en la tensión de salida, es exactamente el mismo.

Para el caso unipolar, en cada ciclo de conmutación, la tensión variará entre el valor +Vs y 0 o bien entre -Vs y 0, dependiendo, en que semiciclo de la onda moduladora nos encontremos.

En este caso, los interruptores de las ramas no conmutan en el mismo instante de tiempo como en el caso anterior. La forma de controlar ambas ramas es independiente, realizando para el control dos comparaciones distintas: por un lado, para controlar una de las ramas se sigue la misma filosofía anterior:

$$V_{sen} > V_{tri} : T_{A+} ON ; V_{AN} = V_s$$

Y además:

$$V_{sen} < V_{tri} : T_{A-} ON ; V_{AN} = V_s$$

Para la otra rama, se emplea la siguiente comparación:

$$-V_{sen} > V_{tri} : T_{B-} ON ; V_{AN} = V_s$$

Y para el interruptor T_{B+} se obtiene:



$$-V_{sen} < V_{tri} : T_B - ON ; V_{AN} = V_s$$

$$V_{AB} = V_{AN} - V_{BN}$$

Debido a la presencia de los diodos en antiparalelo con los interruptores, las tensiones deducidas en las ecuaciones anteriores son independientes del sentido de la corriente.

Las combinaciones anteriormente establecidas suministran la siguiente secuencia para los interruptores:

$$T_A +, T_B - ON : V_{AN} = +V_s ; V_{BN} = 0 ; V_o = V_s$$

$$T_A -, T_B + ON : V_{AN} = 0 ; V_{BN} = +V_s ; V_o = -V_s$$

$$T_A +, T_B + ON : V_{AN} = +V_s ; V_{BN} = +V_s ; V_o = 0$$

$$T_A -, T_B - ON : V_{AN} = 0 ; V_{BN} = 0 ; V_o = 0$$

Una de las ventajas que supone la utilización del esquema unipolar es que la frecuencia de los armónicos es doble con respecto al caso bipolar; además, la excursión de la tensión en la carga se reduce a la mitad, como se deduce de las fórmulas presentadas anteriormente.

Control del voltaje de salida

En muchas aplicaciones industriales se hace necesario controlar el voltaje de salida de los inversores:

- Para hacer frente a las variaciones de entrada de C.C.
- Para la regulación de la tensión de los inversores.
- Para los requisitos de control constante de la tensión de salida y frecuencia.

Si se quiere mejorar aún más el contenido de armónicos en la salida de un inversor, es necesario utilizar lo que se conoce como modulación de anchura de pulsos P.W.M ("Pulse Width Modulation"). La idea básica es comparar una tensión de referencia senoidal de baja frecuencia, (que sea imagen de la



tensión de salida buscada), con una señal triangular simétrica de alta frecuencia cuya frecuencia determine la frecuencia de conmutación. La frecuencia de la onda triangular (llamada portadora) debe ser, como mínimo 20 veces superior a la máxima frecuencia de la onda de referencia, para que se obtenga una reproducción aceptable de la forma de onda sobre una carga, después de efectuado el filtraje.

La señal resultante de dicha comparación nos generará la lógica para abrir y cerrar los semiconductores de potencia. Las técnicas más 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.

Control del voltaje por 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 del pulso se hace variar, a fin de controlar el voltaje de salida del inversor. La *Figura 6*. Modulación de un solo ancho de pulso, muestra la generación de las señales de excitación y el voltaje de salida para los inversores monofásicos en puente completo.

Las señales de excitación se generan comparando una señal rectangular de referencia de amplitud, A_r , con una onda portadora triangular de amplitud A_c , la frecuencia de la señal de referencia determina la frecuencia fundamental del voltaje de salida. Si se varía A_r desde 0 a A , el ancho de pulso δ , puede modificarse desde 0 a 180°. La relación A_r , con A_c , es la variable de control y se define como el índice de modulación de la amplitud, o simplemente índice de modulación.

$$M = A_c / A_r \quad (1.9)$$



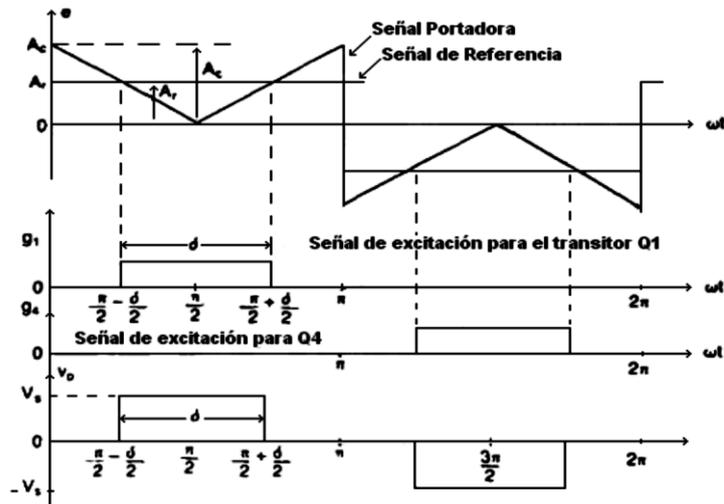


Figura 6. Modulación de un solo ancho de pulso
Fuente: (UNAC 2020); elaboración propia

La tensión de salida se puede determinar a partir de la ecuación

$$V_0 = \left(\frac{2}{2\pi} \int_{(\pi-\delta)/2}^{(\pi+\delta)/2} V_s^2 d(\omega t) \right)^{1/2} = V_s \sqrt{\frac{\delta}{\pi}} \quad (1.10):$$

$$V_0 = \left(\frac{2}{2\pi} \int_{(\pi-\delta)/2}^{(\pi+\delta)/2} V_s^2 d(\omega t) \right)^{1/2} = V_s \sqrt{\frac{\delta}{\pi}} \quad (1.10)$$

La figura 7 muestra el perfil de armónicos con la variación del índice de modulación, M . El armónico dominante es el tercero, y el factor de distorsión aumenta en forma significativa a un bajo voltaje de salida.

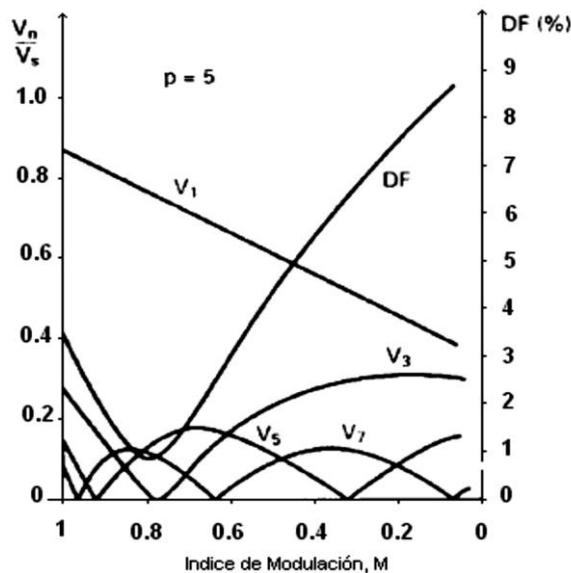


Figura 7.: Perfil armónico de la modulación

Fuente: BALLESTER R. PIQUE (2012). Electrónica de potencia, Principios Fundamentos y Estructuras Básicas.



Control del voltaje por modulación de varios anchos de pulso

Utilizando varios pulsos en cada medio ciclo de tensión de salida puede reducirse el contenido armónico. La generación de señales de excitación para activar y desactivar los transistores aparece en la figura 8(a), mediante la comparación de la señal de referencia con una onda portadora triangular. La frecuencia de la señal de referencia establece la frecuencia de salida, f_c , determina el número de pulsos por cada ciclo p . El índice de modulación controla el voltaje de salida. Este tipo de modulación también se conoce como modulación uniforme de ancho de pulso (U.P.W.M). El número de pulsos por medio ciclo se determina a partir de la ecuación $p = f_c / 2f_o = mf / 2$ (1. 11):

$$p = f_c / 2f_o = mf / 2 \quad (1. 11)$$

Donde $mf = f_c / f_o$ y se define como la relación de modulación de frecuencia. La variación del índice de modulación M desde 0 hasta 1 varía el ancho de pulso desde 0 hasta p / π , y el ancho del voltaje de salida desde 0 hasta V_s . La tensión de salida para los inversores monofásicos en puente aparece en la figura 8(b) para U.P.W.M.

Si δ es el ancho de cada pulso, el voltaje de salida se puede determinar a partir de la ecuación $p = f_c / 2f_o = mf / 2$ (1. 11):

$$V_0 = \left(\frac{2p}{2\pi} \int_{(\pi/p-\delta)/2}^{(\pi/p+\delta)/2} V_s^2 d(\omega t) \right)^{1/2} = V_s \sqrt{\frac{p\delta}{\pi}} \quad (1. 12)$$

La forma general de la serie de Fourier para el voltaje instantáneo de salida es:

$$V_0 = \sum_{n=1,2,3,\dots}^{\infty} B_n \text{sen} \omega t \quad (1. 13)$$

El coeficiente B_n de la ecuación $V_0 = \sum_{n=1,2,3,\dots}^{\infty} B_n \text{sen} \omega t$

(1. 13), puede determinarse considerando un par de pulsos, de tal forma que el pulso positivo de duración δ se inicie en $\omega t = a$, y el negativo del mismo ancho se inicie en $\omega t = \pi + a$. Esto se muestra en la *Figura 8*.



Se pueden combinar los efectos de todos los pulsos para obtener el voltaje efectivo de salida. En la *Figura 9*, se indica como es el perfil de armónicos para modulación de ancho de varios pulsos.

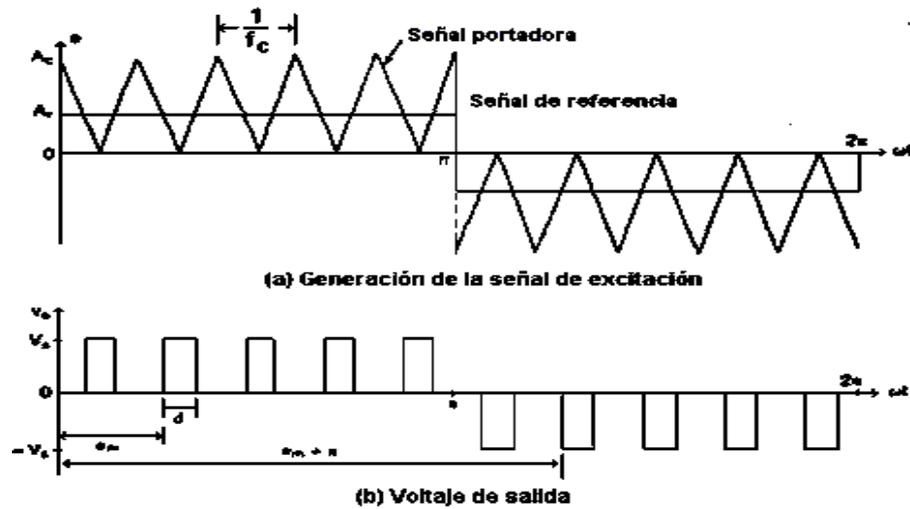


Figura 8. Modulación en ancho de varios pulsos
Fuente: (UNAC 2020); elaboración propia

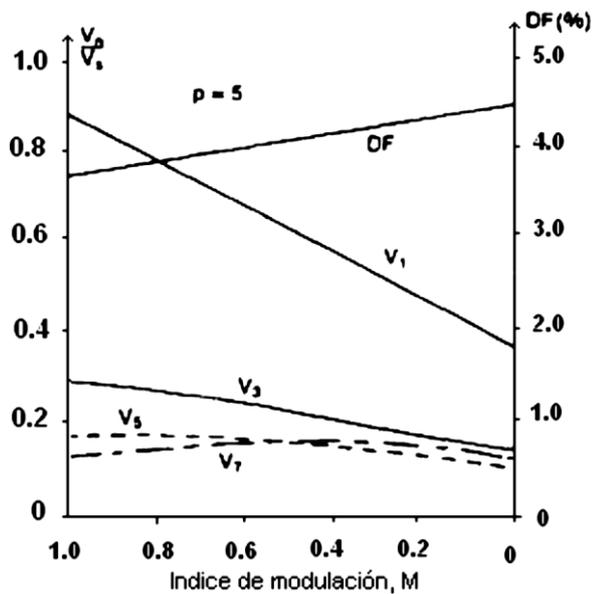


Figura 9. Perfil de armónicos para modulación de ancho de varios pulsos
Fuente: BALLESTER R. PIQUE (2012). Electrónica de potencia, Principios Fundamentos y Estructuras Básicas



Modulación senoidal del ancho de pulso (SPWM)

En vez de mantener igual el ancho de todos los pulsos, como es el caso de la modulación múltiple, el ancho de cada pulso varía en proporción con la amplitud de una onda senoidal evaluada en el centro del mismo pulso. El factor de distorsión y los armónicos de menor orden se reducen en forma significativa. Las señales de compuerta, según se muestra en la *Figura 11*, se generan al comparar una señal senoidal de referencia con una onda portadora triangular de frecuencia f_c . Este tipo de modulación se utiliza por lo general en aplicaciones industriales; se abrevia S.P.W.M. La frecuencia de la señal de referencia, f_r determina la frecuencia de salida del inversor, f_o , y su amplitud pico, A_r , controla el índice de modulación, M , y en consecuencia, la tensión de salida rms .

El número de pulsos por medio ciclo depende de la frecuencia portadora. $T A -$, conducirá cuando A deje de hacerlo y $T + B T -$ cuando $B T +$ no conduzca, de esta forma para determinar la tensión de la carga será $V_{a b} - V_c$. Las mismas señales de excitación se pueden generar utilizando una onda portadora triangular bidireccional tal y como se muestra en la *Figura 10*.

El voltaje rms de salida puede controlarse si se varía el índice de modulación M . Es fácil observar que el área de cada pulso corresponde aproximadamente al área bajo la onda senoidal entre los puntos medios adyacentes de los periodos inactivos de las señales de excitación. Si δm es el ancho de pulso de orden, la ecuación (1.12) se puede extender para el voltaje eficaz de salida.

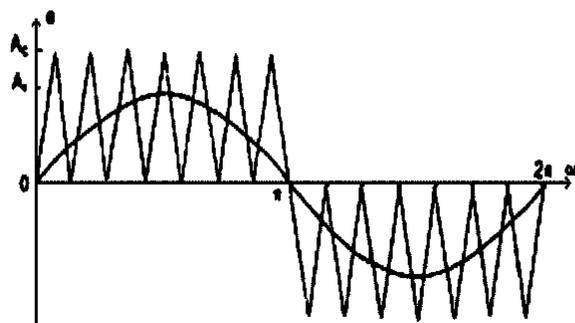


Figura 10. Modulación senoidal de ancho de pulso (SPWM)
Fuente: (UNAC 2020); elaboración propia



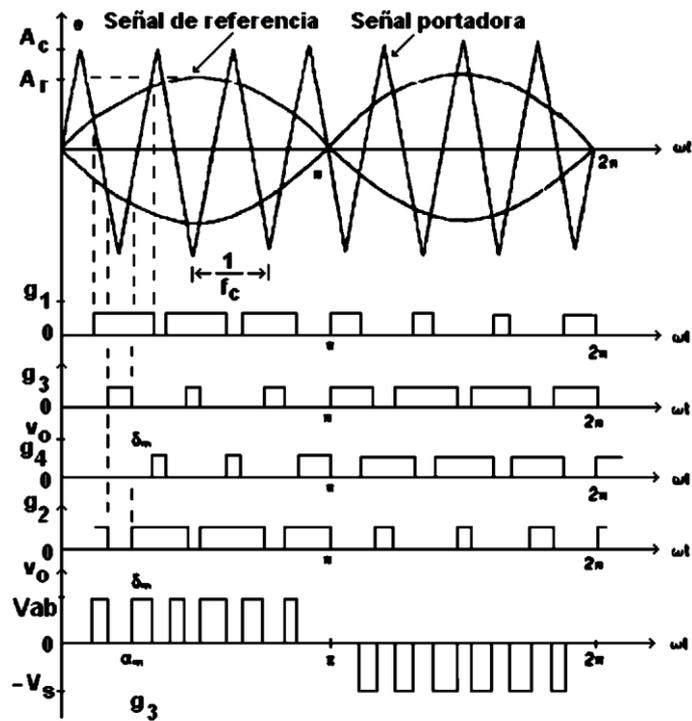


Figura 11. Señales de control y tensiones para SPWM.
Fuente: (UNAC 2020); elaboración propia

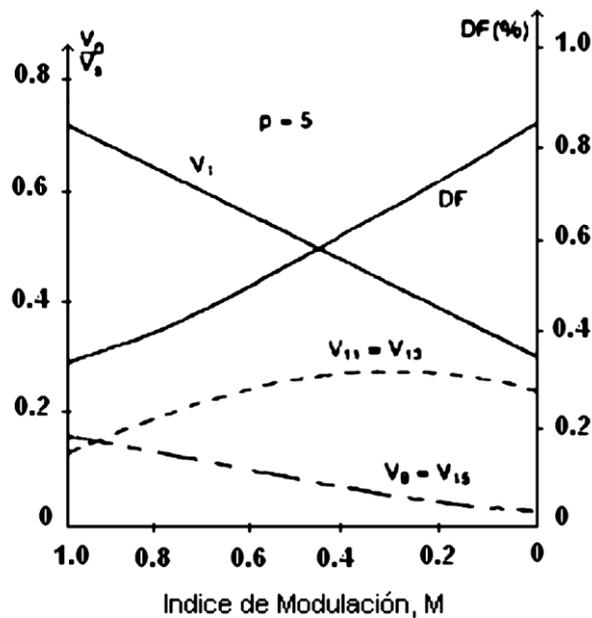


Figura 12. Perfil armónico para esta modulación
Fuente: BALLESTER R. PIQUE (2012). Electrónica de potencia, Principios Fundamentos y Estructuras Básicas



$$V_0 = V_s \left(\sum_{m=1}^p \frac{\partial_m}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.14)$$

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 13*, 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 senoidal.

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

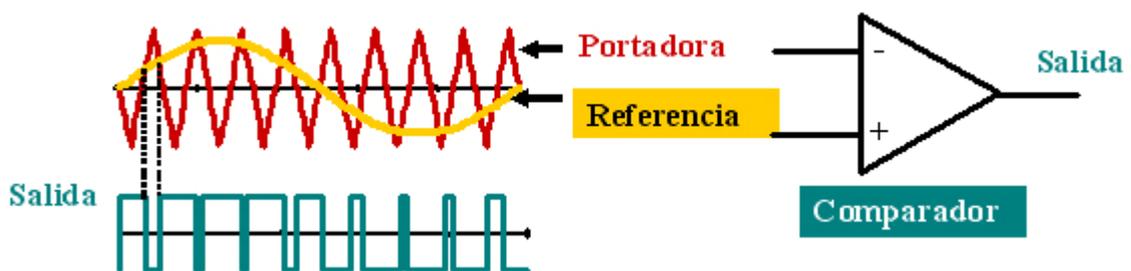


Figura 13. Esquema de generación SPWM

Fuente: (UNAC 2020); elaboración propia

El PWM lleva las armónicas en la onda de voltaje de salida al rango de las altas frecuencias, alrededor de la frecuencia de conmutación f_{tri} y sus múltiplos como $m f$, $2m f$, $3m f$ y más, donde $m f$ es el índice de modulación en frecuencia =



f_{tri}/f_{sin} . En cuanto a su selección, dado que es más fácil filtrar armónicos de alta frecuencia, cuanto mayor sea m_f más pequeño será el filtro necesario a la salida del inversor. En la práctica, el máximo valor de m_f está determinado por la máxima frecuencia de conmutación que permita unas pérdidas aceptables.

Para pequeños valores del índice de modulación en frecuencia ($m_f < 21$), la forma de onda de la señal triangular y la señal de control deben ser sincronizadas para evitar sub-armónicos de la frecuencia fundamental. Cuando m_f se hace grande, los sub-armónicos son reducidos mejorando este aspecto. Si m_f es impar, se puede demostrar como en la serie de Fourier de la tensión de salida aparecen únicamente armónicos de orden impar. Si m_f es par, aparecen armónicos pares e impares, junto con un nivel de continua.

El circuito de control debe adaptarse a la topología seleccionada no solo para el correcto funcionamiento del inversor, sino además para cumplir con las condiciones particulares que exija la aplicación.

Existen dos variantes de la técnica SPWM: a) SPWM bipolar; y b) SPWM unipolar.

A continuación, se comentan brevemente estas dos técnicas.

SPWM Bipolar

Mediante esta técnica se utiliza una única señal de referencia senoidal V_{sin} , y una señal portadora triangular V_{tri} que fija la frecuencia de conmutación, de modo que:

Si $V_{sin} > V_{tri} \rightarrow V_o = +V_{DC}$ (Q1 y Q4 ON).

Si $V_{sin} < V_{tri} \rightarrow V_o = -V_{DC}$ (Q2 y Q3 ON).

En la Figura 14. se muestran las formas de ondas para la modulación SPWM bipolar:



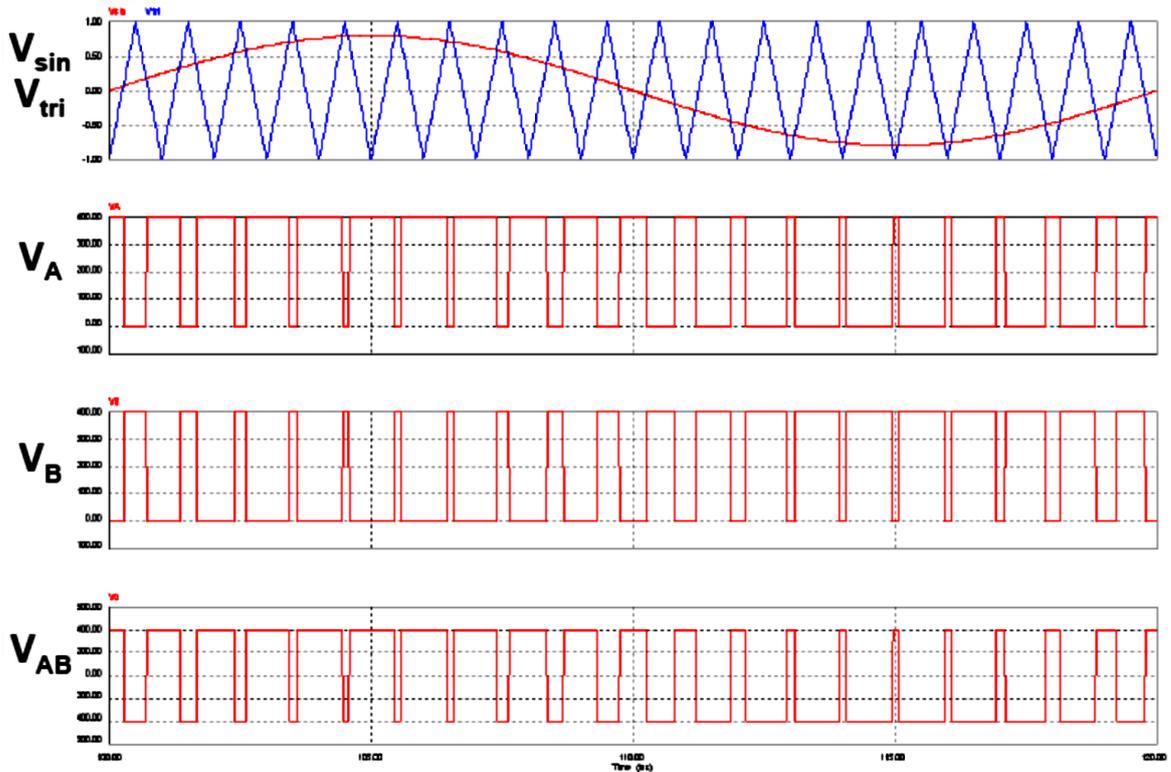


Figura 14. Formas de onda SPWM Bipolar
Fuente: (UNAC 2020); elaboración propia

La serie de Fourier de la salida de la modulación PWM Bipolar es la mostrada en la Figura 15.

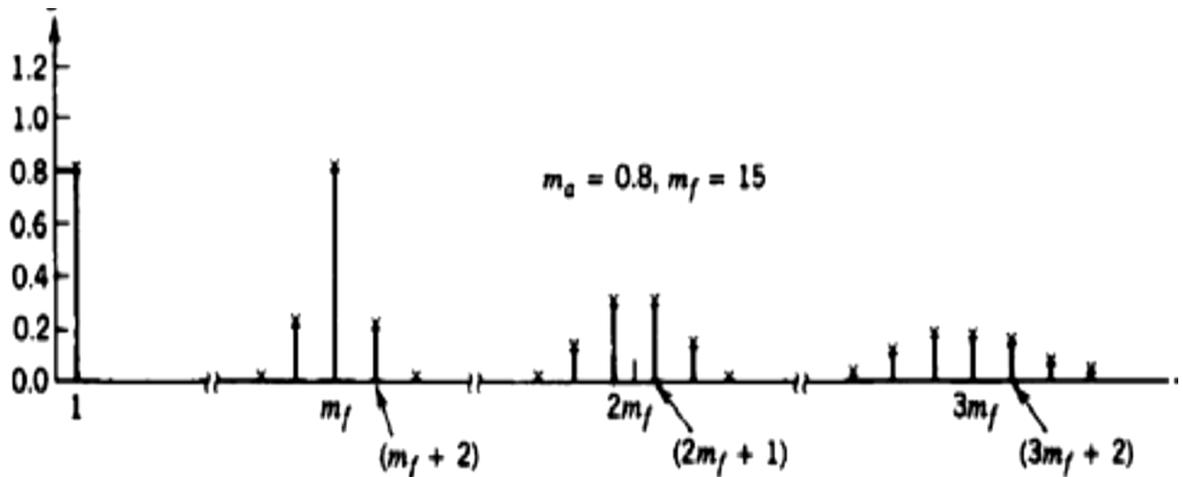


Figura 15. Serie de Fourier de la salida SPWM Bipolar
Fuente: (UNAC 2020); elaboración propia

La forma de onda triangular está sincronizada con la de referencia, y se suele elegir una m_f que sea un entero impar. De esta forma, la salida del PWM muestra una simetría impar.



En la Tabla 1. se muestran los coeficientes de Fourier normalizados V_n/V_{DC} para modulación SPWM bipolar. Las amplitudes de los términos de la serie de Fourier dependen de las ondas moduladora y portadora.

Tabla 1.

Coefficientes de Fourier normalizados para SPWM Bipolar

ma	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
n=1	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
n=2mf±1	1,27	1,24	1,20	1,15	1,08	1,01	0,92	0,82	0,71	0,60
n=2mf±3	0,00	0,02	0,03	0,06	0,09	0,13	0,17	0,22	0,27	0,32

Fuente: (UNAC 2020); elaboración propia

SPWM Unipolar

Mediante esta técnica se utilizan dos señales de referencia senoidal V_{sin_p} y V_{sin_n} , y una señal portadora triangular V_{tri} que fija la frecuencia de conmutación, de modo que:

Si $V_{sin_p} > V_{tri} \rightarrow V_A = +V_{DC}$ (Q1 ON).

Si $V_{sin_p} < V_{tri} \rightarrow V_A = 0$ (Q2 ON).

Si $V_{sin_n} < V_{tri} \rightarrow V_B = 0$ (Q4 ON).

Si $V_{sin_n} > V_{tri} \rightarrow V_B = +V_{DC}$ (Q3 ON).

En la Figura 16. se muestran las formas de ondas para la modulación SPWM unipolar:



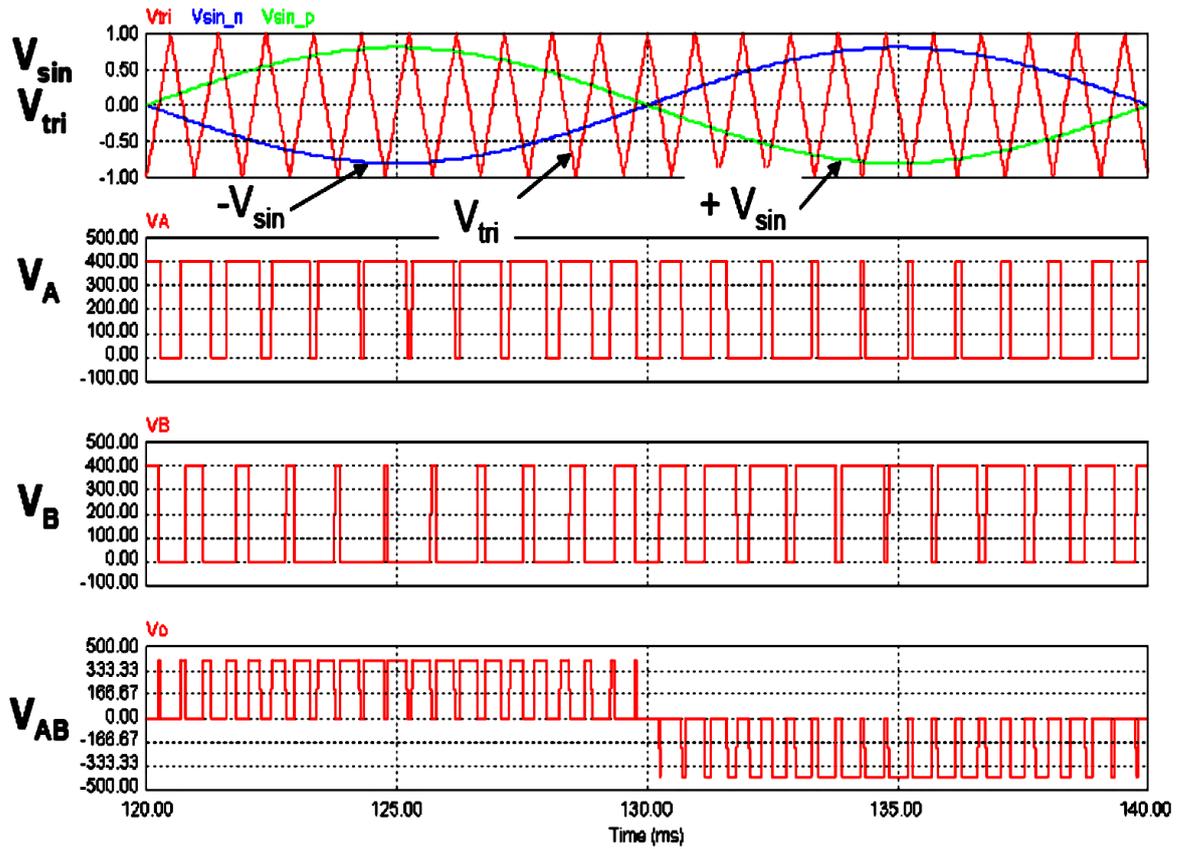


Figura 16. Formas de onda SPWM Unipolar
Fuente: (UNAC 2020); elaboración propia

La serie de Fourier de la salida de la modulación PWM Unipolar es la mostrada en la Figura 17.

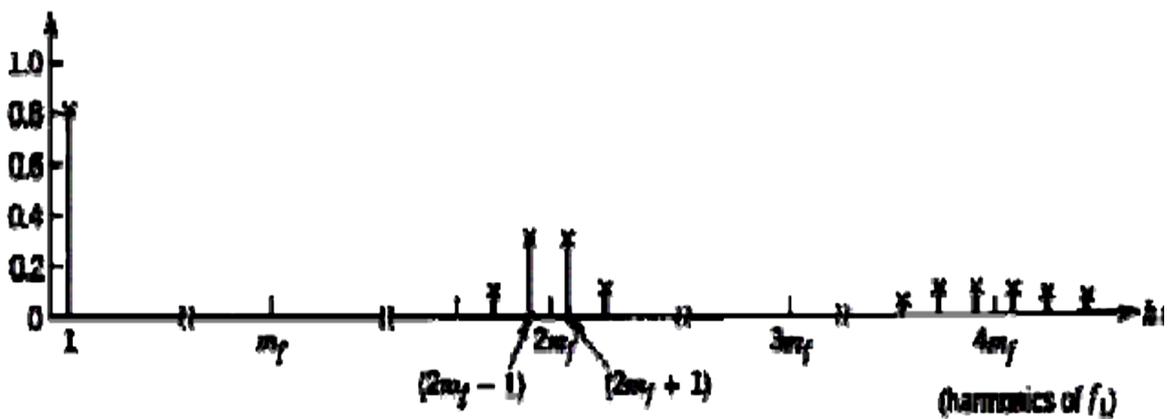


Figura 17. Serie de Fourier de la salida SPWM Unipolar
Fuente: (UNAC 2020); elaboración propia



Si se elige una m_f que sea un entero par, se eliminan los armónicos impares múltiplos de m_f .

En la Tabla 2 se muestran los coeficientes de Fourier normalizados V_n/V_{DC} para modulación SPWM unipolar:

Tabla 2.

Coefficientes de Fourier normalizados para SPWM Unipolar

ma	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
n=1	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
n=2mf±1	0,10	0,19	0,27	0,33	0,36	0,37	0,35	0,31	0,25	0,18
n=2mf±3	0,00	0,00	0,01	0,02	0,04	0,07	0,10	0,14	0,18	0,21

Fuente: (UNAC 2020); elaboración propia

La principal ventaja que presenta el PWM con modulación de voltaje unipolar frente al bipolar, es que reduce el número de armónicos. Concretamente los armónicos de menor frecuencia están localizados alrededor del doble de la frecuencia de conmutación. Otra ventaja es que estresa en menor medida los componentes posteriores de filtrado, al conmutar la salida entre 0 y +/-VDC, en lugar de entre +VDC y -VDC .

GENERADOR DE SPWM:

El generador de SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation) se compone de cinco bloques: oscilador sinusoidal, desfasador de 180 grados, generador de señal portadora triangular, comparador de dos canales y restador.

Oscilador sinusoidal

Utilizando uno de los cuatro operacionales del integrado TL084, se diseña el oscilador, la resistencia R_2 debe ser algo mayor que R_1 , si tomamos como valor $R_1=1K\Omega$, para que se produzca la oscilación, pero cuanto mayor sea, más se distorsiona la señal de salida sinusoidal, si tomamos R_2 un potenciómetro de



5KΩ que se regula o varia lentamente para obtener una sinusoidal lo mejor posible. La frecuencia de oscilación depende del producto RC.

$f_{osc} = 1/2\pi RC$, utilizando los condensadores de 330uf y las resistencias de 2.2KΩ encontramos los valores adecuados.

Se alimentara los operacionales con ± 5V. Obtenemos la tensión Seno1 en el osciloscopio, variamos el potenciómetro hasta conseguir que la señal sinusoidal tenga una amplitud mas o menos de 0.6V y la menor distorsión posible.

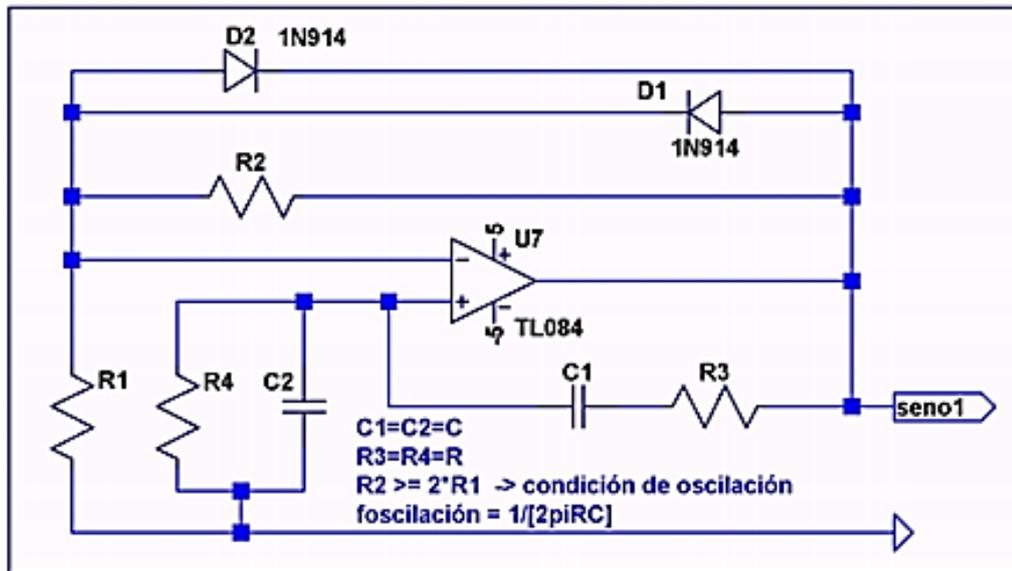


Figura 18. Oscilador sinusoidal
Fuente: (UNAC 2020); elaboración propia

Desfasador de 180 grados

El circuito que desfasa la señal Seno1 a 189 grados, se implementa con un operacional en configuración de amplificador inversor, con una ganancia unitaria, usando el segundo operacional del integrado TL084 armamos como la Figura 19, para verificar el correcto funcionamiento del mismo, visualizamos la señal Seno1 en el canal uno del osciloscopio, y la señal Seno2 en el segundo canal de osciloscopio respectivamente.



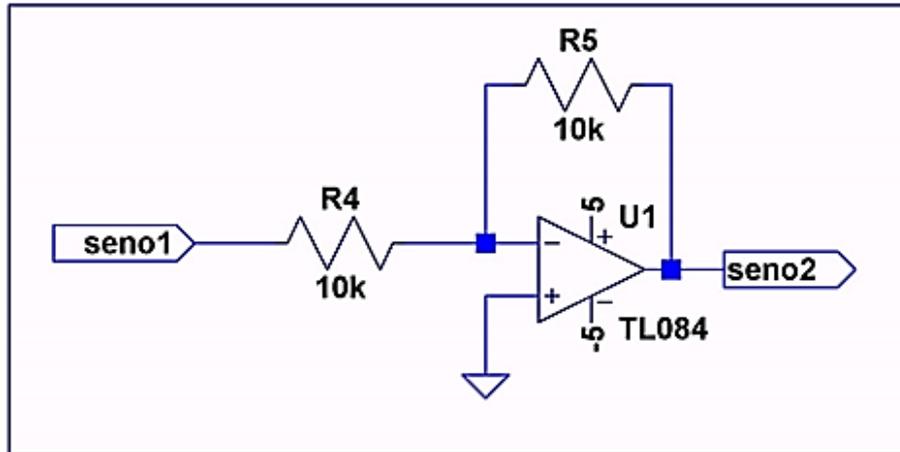


Figura 19. Circuito inversor
Fuente: (UNAC 2020); elaboración propia

Generador de portadora

Para obtener la señal triangular portadora, se utilizará directamente el generador de señales. Disponga el mismo con salida triangular. Para la correcta configuración de la amplitud y de la frecuencia, visualice en el canal uno del osciloscopio la señal Seno1 y en el canal dos la salida del generador de señales. Las escalas de voltaje de ambos canales del osciloscopio deben ser iguales. Regule la amplitud de la triangular hasta que sea ligeramente superior a la sinusoidal.

Tener presente que, para un correcto funcionamiento del convertidor, es necesario que la frecuencia de la triangular debe ser al menos 10 veces superior a la frecuencia de la sinusoidal. Pero si la frecuencia de la triangular es demasiado elevada, el comparador puede tener problemas para operar correctamente. El margen de frecuencias utilizables es $2,5\text{kHz} \leq f_{tri} \leq 20\text{kHz}$, siendo f_{tri} la frecuencia de la señal portadora (señal triangular).

Comparador de dos canales

Para el diseño de este circuito, se usa el tercer u cuarto operacional del integrado TL084. Directamente se conecta la señal triangular a la entrada no inversora de ambos operacionales, esta señal triangular se obtiene del generador de señales. La señal Seno1 se conecta a la entrada inversora del tercer operacional, y la



señal Seno 2 a la entrada inversora del cuarto operacional, tal como se indica en la *Figura 20*.

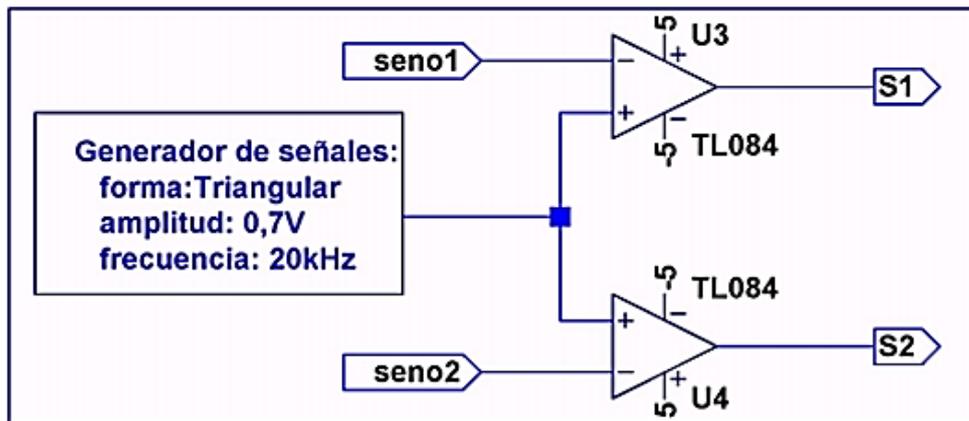


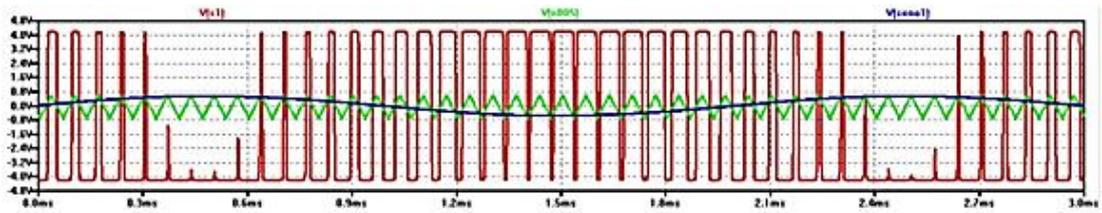
Figura 20. Circuito comparador
Fuente: (UNAC 2019); elaboración propia

La salida del tercer operacional la denominamos S1, es una señal cuadrada bipolar con valores entre $\pm 4V$, cuya frecuencia coincide con la de la señal triangular.

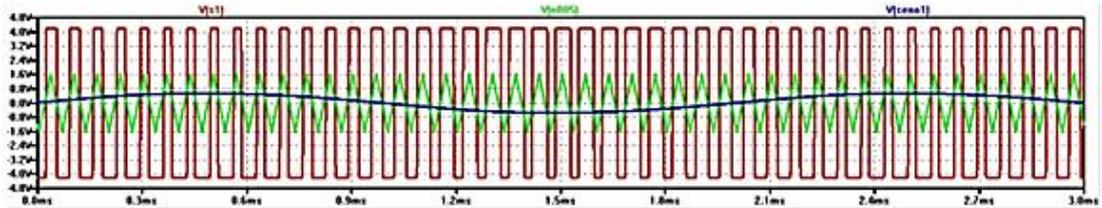
Posteriormente, la señal triangular proveniente del generador de señales, será sustituido por un circuito generador de onda triangular.

Visualice la señal S1 en el canal dos del osciloscopio, y la señal Seno1 en el canal uno, deberá obtenerse algo similar, modifique ligeramente la amplitud de la señal triangular en el generador de señales, para ver el efecto en S1 y la amplitud de la triangular es la que se muestra en la *Figura 21*. No se puede visualizar S1 y S2 al mismo tiempo en el osciloscopio.

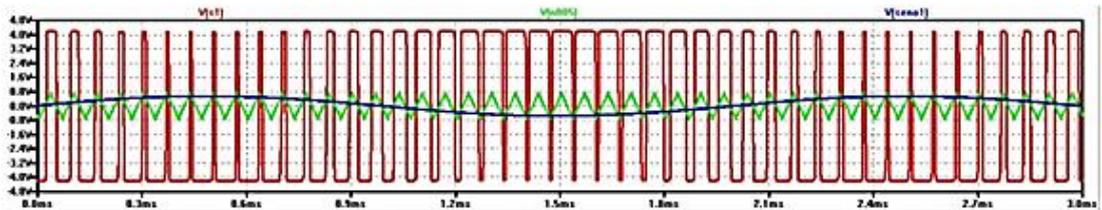




(a) Amplitud de la triangular insuficiente



(b) Amplitud de la triangular excesiva



(c) Amplitud de la triangular correcta

Figura 21. Efecto de la relación de amplitudes entre la sinusoidal y la triangular
Fuente: (UNAC 2020); elaboración propia

Circuito restador

El restador se implementa con el operacional del circuito integrado TL081, armar el circuito de la Figura 22, la salida del restador es S2-S1, que es la SPWM, esta señal tiene una frecuencia que es el doble de la que tienen S1 y S2, pero además introduce un subarmónico de la misma frecuencia que la señal Seno1.

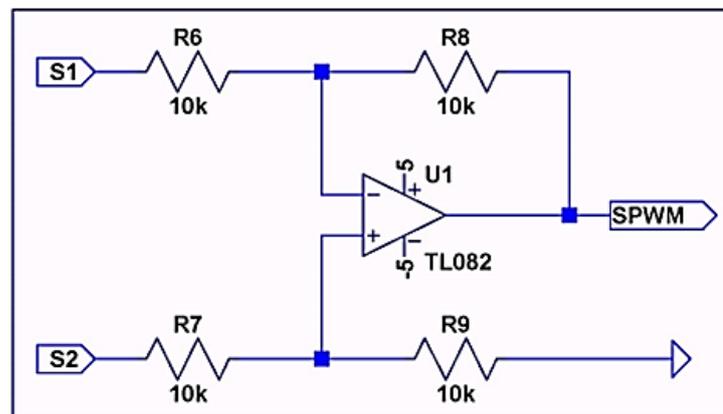


Figura 22. Circuito restador
Fuente: (UNAC 2019); elaboración propia



para poder visualizar correctamente la señal SPWM, mantener en el canal uno del osciloscopio la señal Seno 1 y conectar SPWM al canal dos debe verse algo parecido a la *Figura 23*.

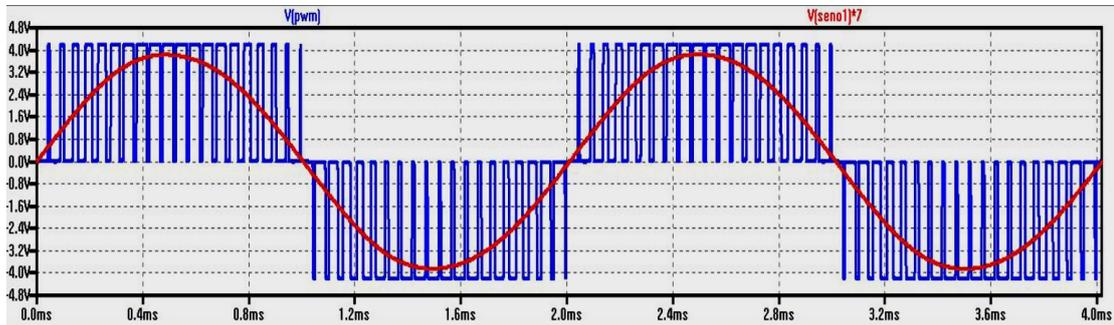


Figura 23. Señal SPWM
Fuente: (UNAC 2020); elaboración propia

2.3. Conceptual:

Un inversor, también llamado Ondulador, es un circuito utilizado para convertir corriente continua en corriente alterna [1]. La realización del proyecto es diseñar y simular un inversor que cambia un voltaje de entrada de corriente directa a un voltaje simétrico de salida de corriente alterna, con la magnitud y frecuencia deseada por el usuario o el diseñador. Estos inversores son utilizados en una gran variedad de aplicaciones, desde pequeñas fuentes de alimentación para computadoras, hasta aplicaciones industriales para manejar alta potencia, también son utilizados para convertir la corriente continua generada por los paneles solares fotovoltaicos, acumuladores o baterías, etc, en corriente alterna y de esta manera poder ser inyectados en la red eléctrica o usados en instalaciones eléctricas aisladas [5].

Un inversor simple consta de un oscilador que controla a un transistor, el cual es utilizado para interrumpir la corriente entrante y generar una onda cuadrada [6]. Esta onda cuadrada alimenta a un transformador que suaviza su forma, haciéndola parecer un poco más una onda senoidal y produciendo el voltaje de salida necesario. La forma de onda de salida del voltaje de un inversor ideal debería ser sinusoidal [6].



Inversores más avanzados utilizan la modulación por ancho de pulsos con una frecuencia portadora mucho más alta para aproximarse más a la onda seno o modulaciones por vectores de espacio mejorando la distorsión armónica de salida. También se puede pre distorsionar la onda para mejorar el factor de potencia.

2.4. Definición de términos básicos:

Modulador. - Elemento encargado de generar las señales PWM.

Driver. - Elemento adaptador de niveles de tensión.

Simulación. - es el artificio contextual que hace referencia a la investigación de una hipótesis o conjunto de hipótesis de trabajo utilizando modelos.

Simulador. - es un aparato por lo general informático que permite la reproducción de un sistema.



III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1 Hipótesis

3.1.1 Hipótesis general

Mediante índices de modulación y técnicas de modulación por ancho de pulso senoidal, será posible el diseño y simulación de un convertidor DC/AC (Inversor) monofásico de 220V controlado por ancho de pulso con modulación sinusoidal (Spwm) de baja potencia

3.1.2 Hipótesis específicas

Mediante índices de modulación, será posible comprender cómo influyen en el diseño y simulación de un convertidor DC/AC (Inversor) monofásico de 220V controlado por ancho de pulso con modulación sinusoidal (Spwm) de baja potencia

Mediante técnicas de modulación, por ancho de pulso sinusoidal será posible comprender cómo influyen en el diseño y simulación de un convertidor DC/AC (Inversor) monofásico de 220V controlado por ancho de pulso con modulación sinusoidal (Spwm) de baja potencia

3.1.3 Definición conceptual de variables

La relación entre las variables de investigación es mediante ecuaciones matemáticas.

La planta a investigar es un inversor SPWM, las variables que actúan sobre el sistema son:

Variable independiente (variables de entrada):

Índice de modulación de modulación

Variable dependiente (variables de salida):

Técnica de modulación de modulación por ancho de pulso sinusoidal (SPWM)

3.2 Operacionalización de las variables

Operacionalizando las variables intervinientes en la presente investigación, se establecen las relaciones y conexiones internas que existen entre ellas, determinándose:

Variable independiente: Índice de modulación.

Variable dependiente: La técnica de modulación por ancho de pulso sinusoidal (SPWM) mejorara la salida de tensión alterna del inversor de baja potencia



IV. DISEÑO METODOLÓGICO

4.1 Tipo y diseño de investigación

Para el siguiente trabajo, el tipo de investigación es de tipo descriptivo y experimental.

4.2 Método de investigación

El diseño de la investigación es experimental; porque, se manipula una de las variables independientes, además se tiene el máximo control sobre dicha variable y se influye directamente para observar sus efectos sobre la variable dependiente.

4.3 Población y muestra.

Por tratarse de un proyecto experimental no es necesario precisar el Universo (Población).

4.4 Lugar de estudio y periodo desarrollado

El trabajo de Investigación se realizará en la Universidad Nacional del Callao en la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, que se encuentra ubicado en el Distrito de Bellavista en la Provincia Constitucional del Callao, Departamento de Lima, se desarrolló de proyecto de investigación del 01 de junio de 2019 al 31 de mayo de 2020.

4.5 Técnicas e instrumentos para la recolección de la información

Como fuentes primarias la recolección de información será mediante la bibliografía y manuales de equipos consultados.

La técnica de recolección de información es mediante la observación experimental porque elabora datos en condiciones relativamente controladas, particularmente porque éste puede manipular la o las variables.



4.6 Análisis y procesamiento de datos

Cabe notar que la teoría de la identificación de sistemas, así como el software utilizado utiliza gran cantidad de tratamiento de la información, basada en procedimientos estadísticos que permite realizar validaciones con patrones ya establecidos.

Para el presente trabajo en la investigación básica se aplicará la metodología siguiente:

4.6.1 Investigación bibliográfica:

Se utilizarán las fuentes de información disponibles como libros, revistas, hojas de fabricante, internet; para establecer el marco teórico necesario para el diseño del convertidor DC/AC (inversor), así como los componentes necesarios para el mismo.

4.6.2 Diseño:

Con la teoría recopilada se escoge el método de diseño apropiado, que permita simular el circuito con las herramientas disponibles.

Ya que no existe un convertidor que satisfaga todas las posibles aplicaciones, se diseña el inversor de modo que se mantenga una estructura simple pero flexible para su implementación en múltiples aplicaciones.

Se estudian los componentes a utilizar considerando su nivel tecnológico y precio, finalmente se procede al diseño.

4.6.3 Simulación:

Aprovechando el software disponible, como Proteus, se realiza la simulación del circuito propuesto.



4.6.4 Rediseño y simulación:

Si no se obtienen los resultados deseados o no es posible simular una parte específica del circuito, se realizan los cambios necesarios al diseño y se intenta de nuevo.



V. RESULTADOS

5.1 Resultados descriptivos

Se realizó la simulación del convertidor (inversor) monofásico para diferentes voltajes de entrada variable y carga obteniéndose los siguientes resultados:

Simulación

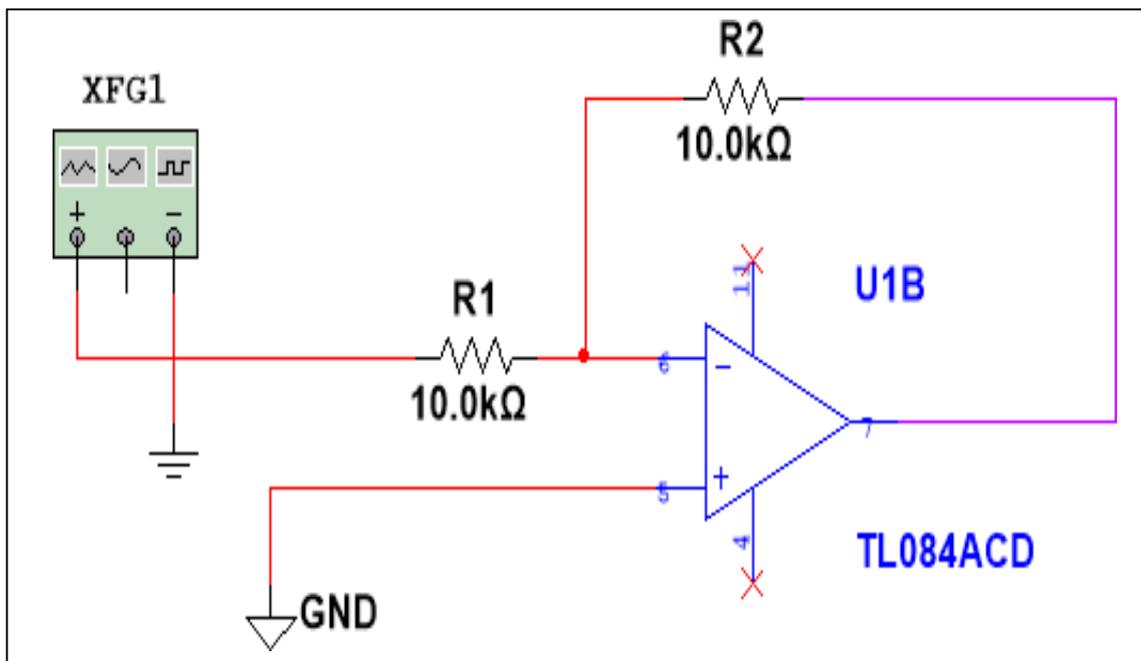


Figura 24. Circuito desfasador de 180 grados y salida vista en el osciloscopio, respectivamente. Fuente: (UNAC 2020); elaboración propia



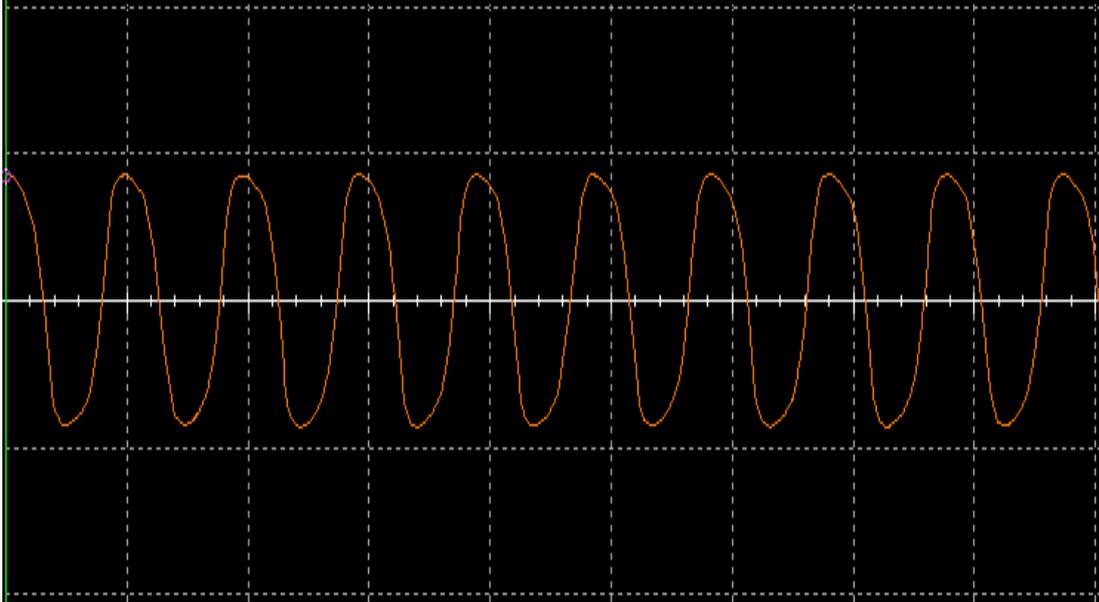


Figura 25. Circuito de salida del oscilador vista en el osciloscopio.
Fuente: (UNAC 2020); elaboración propia

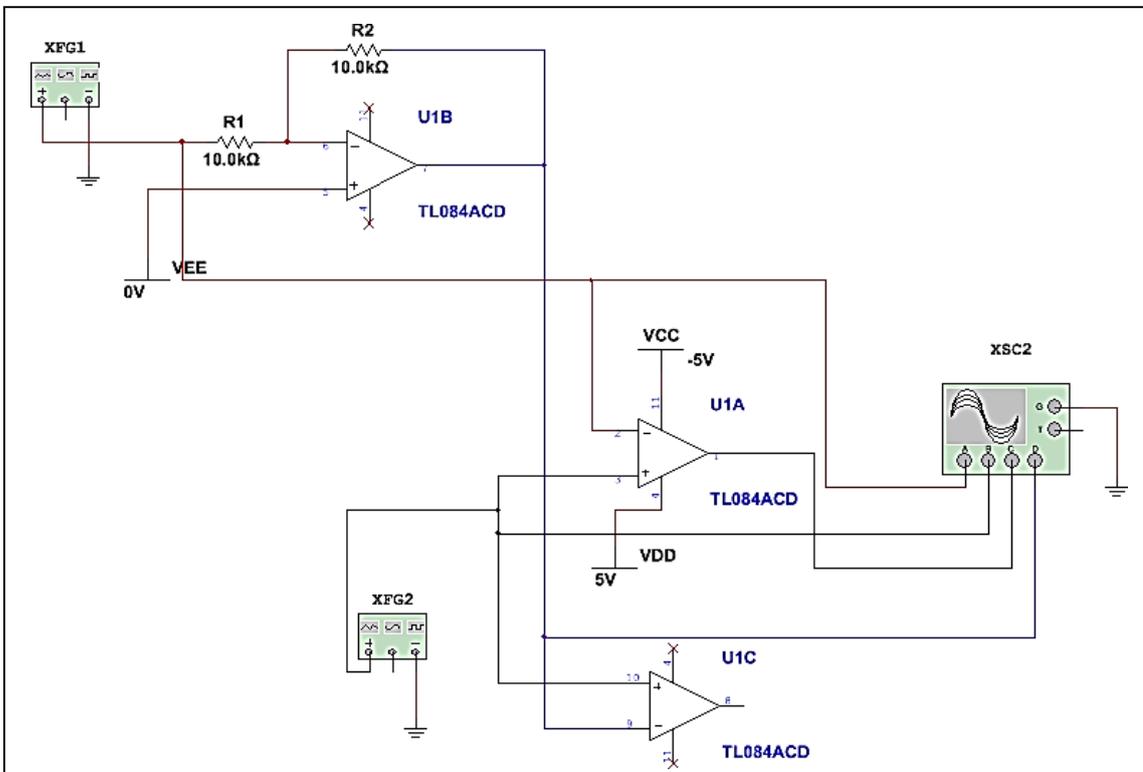


Figura 26. Circuito PWM y salida vista en el osciloscopio, respectivamente.
Fuente: (UNAC 2020); elaboración propia



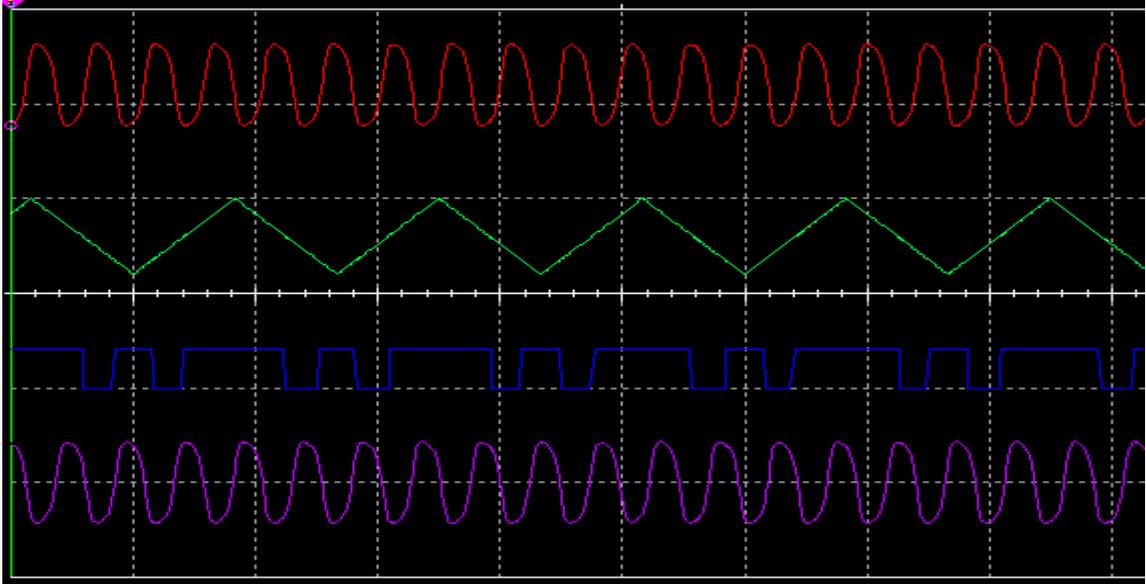


Figura 27. Circuito desfasador de 180 grados y generador de la señal triangular (señal portadora).
Fuente: (UNAC 2020); elaboración propia

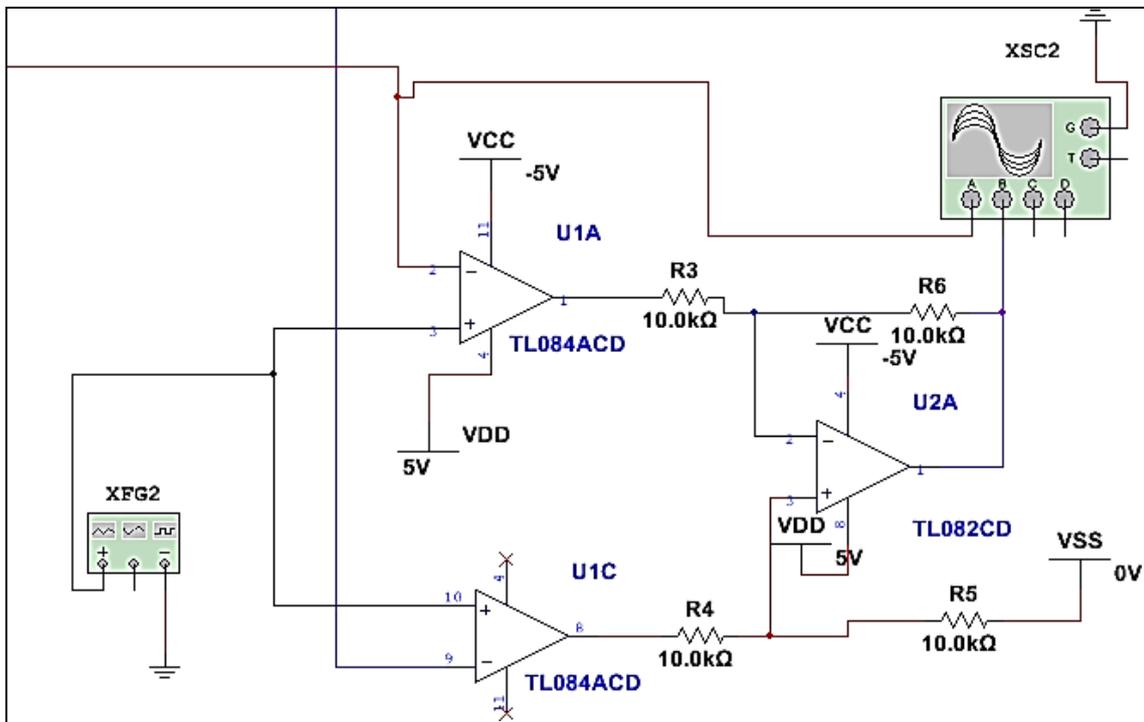


Figura 28. Circuito SPWM y salida vista en el osciloscopio.
Fuente: (UNAC 2020); elaboración propia



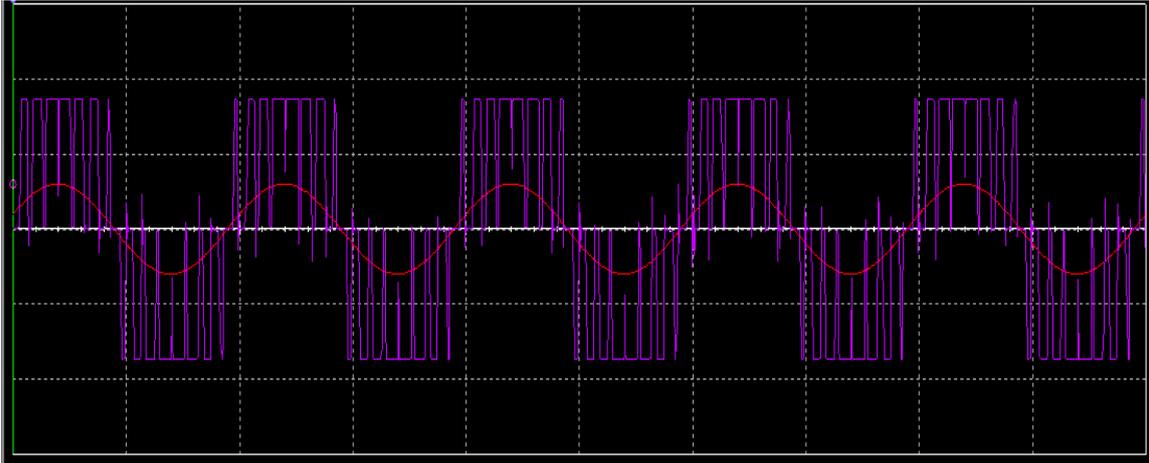


Figura 29. Etapa de salida SPWM
Fuente: (UNAC 2020); elaboración propia

Acoplamiento y etapa de potencia

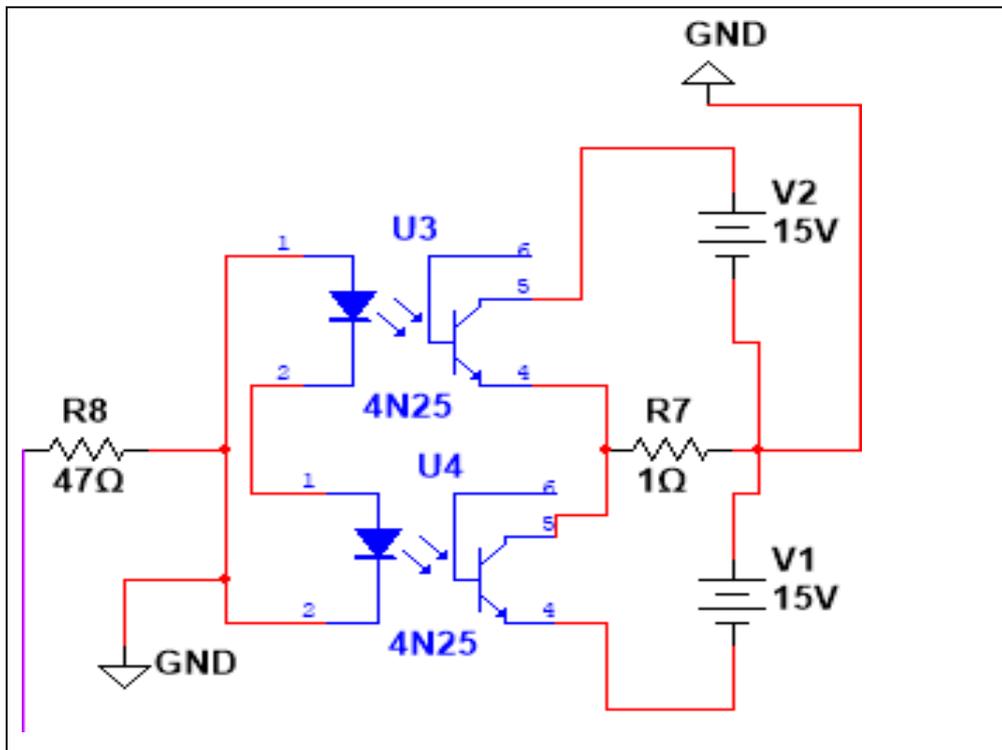


Figura 30. Etapa de acoplamiento entre el circuito generador SPWM y el convertidor DC/AC se realiza mediante optoacopladores.
Fuente: (UNAC 2020); elaboración propia

La característica de este optoacoplador 4N25 es su salida, es un BJT, este BJT soporta 30V, lo que indica que utilizamos dos fuentes de 15 V así como se mostró en la simulación.



Circuito Final

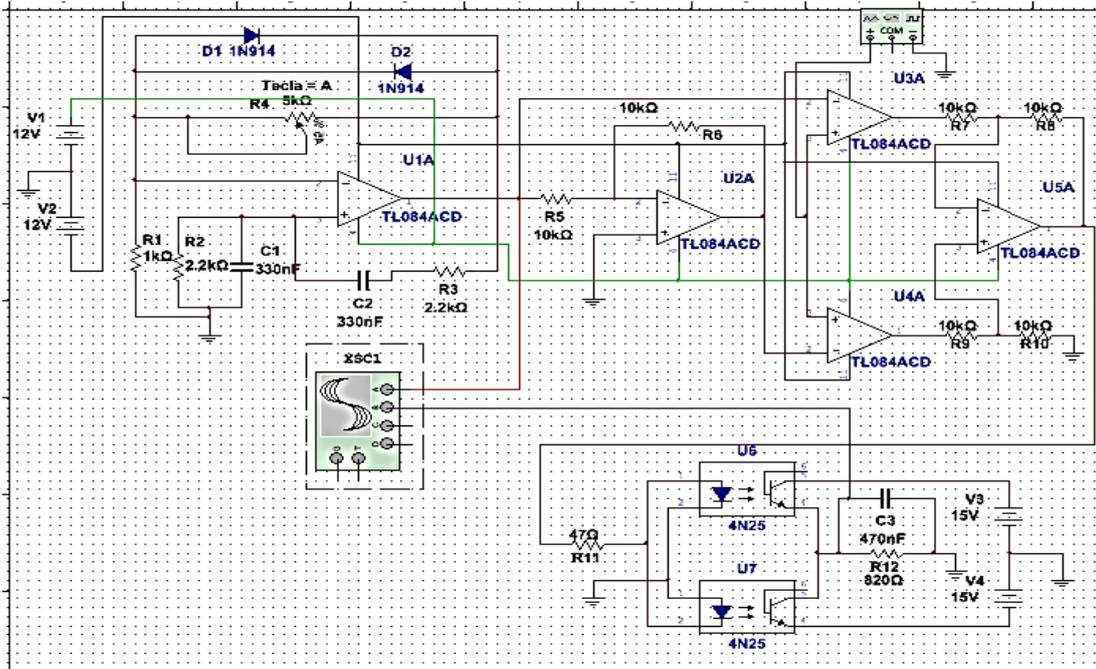


Figura 31. Convertidor DC/AC controlado por ancho de pulso con modulación sinusoidal SPWM.

Fuente: (UNAC 2020); elaboración propia

Tabla 3.

Valores obtenidos mediante la técnica de Modulación SPWM

Modulación - SPWM								
m	Vp A			Vrms AB			Uab(rms)/U	Respues
	Teórico	Simulad	Error	Teórico	Simulad	Error		
0,25	62,5	65,01	4,02%	76,5	75,99	0,67%	0,152	Lineal
0,50	125,0	125,64	0,51%	153	150,9	1,37%	0,302	Lineal
0,75	187,5	185,96	0,82%	229,5	225,4	1,79%	0,451	Lineal
1,00	250,0	246,6	1,36%	306	300	1,96%	0,600	Lineal
1,05	262,5	254,32	3,12%	321,3	312	2,89%	0,624	No
1,10	275,0	258,65	5,95%	336,6	320	4,93%	0,640	No
1,15	287,5	263,07	8,50%	351,9	326,8	7,13%	0,654	No
1,20	300,0	267,72	10,76%	367,2	332,4	9,48%	0,665	No
1,25	312,5	271,81	13,02%	382,5	337,1	11,87%	0,674	No
1,50	375,0	292,35	22,04%	459	352,3	23,25%	0,705	No
2,00	500,0	312,47	37,51%	612	366,7	40,08%	0,733	No
2,50	625,0	319,07	48,95%	765	373,5	51,18%	0,747	No

Fuente: (UNAC 2020); elaboración propia

Se contrastó el valor teórico con el valor simulado mediante la técnica de modulación SPWM para varios índices de modulación m.



VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados

El presente trabajo de investigación corresponde al área de las ciencias de ingeniería aplicada, en el cual se ha realizado el diseño y simulación de un convertidor DC/AC (Inversor), monofásico de 220V controlado por ancho de pulso con modulación sinusoidal (SPWM), de baja potencia. Se ha verificado la actuación del control SPWM en el inversor DC/DC, es capaz de gobernar el sistema y así mejora la señal alterna de salida del inversor de baja potencia. facilitando la enseñanza -aprendizaje de tópicos de electrónica de potencia

6.2 Contrastación de los resultados con otros estudios similares

Se ha llegado a diseñar el control (SPWM) para el inversor, es eficiente, de buena performance y que cumple con los requisitos de diseño, llegándose a obtener una onda de tensión muy aproximada a una onda sinusoidal como el desarrollado por Elgueta (ELGUETA 2005), Breton y Ríos.

6.3 Responsabilidad ética

El fin de la investigación es que este resultado pueda generar mejoras para el área y campo de la electrónica de potencia.

Garantizar y asegurar la validez con rigor científico, la fiabilidad y credibilidad de los métodos, fuentes y datos.



CONCLUSIONES

- a. La salida de nuestra señal portadora es una señal triangular, en este caso la simulación es eficiente, para el momento de hacer la simulación se deberá usar un generador de onda con salida triangular.
- b. Observamos que cuando las señales llegan al restador, la señal de salida es una señal SPWM.
- c. Este trabajo cumple con los objetivos propuestos y se entiende más allá de ellos al diseñar un circuito capaz de suplir cargas inductivas y capacitivas, así como dejar margen para cargas hasta 2 Kw.
- d. Es posible diseñar un convertidor sencillo, controlado analógicamente que mantenga un voltaje deseado a través de la modulación de ancho de pulso senoidal (SPWM), con componentes que se encuentran en el mercado nacional capaz de suplir hasta 2 Kw, con un factor de potencia de 0.8 es posible alimentar cargas resistivas, inductivas y capacitivas.
- e. La señal de voltaje resultante de un inversor SPWM no es una senoidal exacta ya que tiene una forma casi escalonada, casi imperceptible que es característico de todos los convertidores (inversores) controlados por PWM.



RECOMENDACIONES

- a. Es de importancia seguir el orden de cada circuito; para la alimentación se tuvo que usar un divisor de tensión para poder alimentar los CI.
- b. Se debe tener en cuenta que las tierras tanto para el circuito de control como de potencia están totalmente aisladas.
- c. Tener en cuenta que el inicio de la señal portadora debe coincidir con el inicio de la señal moduladora.
- d. Para aplicaciones de alta potencia para trabajos posteriores es necesario el uso de transistores IGBT, que superen en gran manera los clásicos MOSFET, poder conducir mucho mayor corriente, al mismo tiempo que tiene una alta velocidad de conmutación.
- e. El entorno de simulación Proteus, destaca por su versatilidad al poder simular circuito de manera exitosa.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Benavent J. *Teoría Electrónica de Potencia y Aplicaciones*. Madrid, España: Alfaomega, 1987.
- [2] Bose, Bimal K. *Modern Power Electronics and AC Drivers*, USA: Prentice Hall, 2002.
- [3] B.R. Pelly *Thyristor Phase - Controlled Converters and Cycloconverters. Operation Control and Performance*, USA: John Wiley, 1971.
- [4] Christiansen F, *Electronics Engineers Handbook*, USA: McGraw Hill, 1982.
- [5] Hart W. Daniel. *Electrónica de Potencia*, España: Pearson Educación, S.A., 2001.
- [6] RASHID, Muhammad. *Electrónica de Potencia*. 3era.ed. México: Pearson Educación, 1998. ISBN 970-26-0532-6
- [7] Unitrode, *Application Handbook*. USA: Prentice Hall Hispanoamericana, S.A. 1993.



ANEXOS



Anexo A: Matriz De Consistencia

TITULO: "DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN CONVERTIDOR DC/AC (INVERSOR) MONOFÁSICO DE 220V CONTROLADO POR ANCHO DE PULSO CON MODULACIÓN SINUSOIDAL (SPWM) DE BAJA POTENCIA"

PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA
<p>Descripción de la realidad problemática Los convertidores DC/AC, facilitan la comprensión y el funcionamiento de los dispositivos electrónicos de potencia, así como la parte experimental de la conversión de la corriente continua en alterna y de esta forma sustituir la falta del suministro eléctrico permitiendo así el funcionamiento de los equipos de corriente alterna.</p> <p>En la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Nacional del Callao (UNAC), se dictan los siguientes cursos de especialidad: Electrónica de Potencia I, Electrónica de Potencia II, Electrónica Industrial y de Potencia, Instrumentación y Control de Procesos. Los laboratorios de los cursos mencionados, no cuentan con estos equipos debido</p>	<p>Objetivo General: Diseñar y simular un convertidor DC/AC (Inversor) monofásico de 220V controlado por ancho de pulso con modulación sinusoidal (SPWM) de baja potencia.</p> <p>Objetivos Específicos: Comprender cómo influye el índice de modulación en el diseño y simulación de un convertidor DC/AC (Inversor) monofásico de 220V controlado por ancho de pulso con modulación sinusoidal (Spwm) de baja potencia Comprender cómo influye la técnica de modulación por ancho de pulso sinusoidal en el diseño y simulación de un convertidor DC/AC (Inversor) monofásico de 220V controlado por ancho de pulso con modulación</p>	<p>Hipótesis General Mediante índices de modulación y técnicas de modulación por ancho de pulso sinusoidal, será posible el diseño y simulación de un convertidor DC/AC (Inversor) monofásico de 220V controlado por ancho de pulso con modulación sinusoidal (Spwm) de baja potencia</p> <p>Hipótesis Específicas Mediante índices de modulación será posible comprender cómo influyen en el diseño y simulación de un convertidor DC/AC (Inversor) monofásico de 220V controlado por ancho de pulso con modulación sinusoidal (Spwm) de baja potencia Mediante técnicas de modulación por ancho de pulso sinusoidal</p>	<p>Definición conceptual de variables La relación entre las variables de investigación es mediante ecuaciones matemáticas. La planta a investigar es un inversor SPWM, las variables que actúan sobre el sistema son: <u>Variable independiente</u> (variables de entrada): Índice de modulación de modulación <u>Variable dependiente</u> (variables de salida): Técnica de modulación por ancho de pulso sinusoidal (SPWM)</p> <p>Operacionalización de variable Operacionalizando las variables intervinientes en la presente investigación, se establecen las relaciones y conexiones internas que existen entre ellas, determinándose: Variable independiente: Índice de modulación.</p>	<ul style="list-style-type: none"> Tipo y diseño de investigación La investigación es de tipo descriptivo y experimental. Método de Investigación El diseño de la investigación es experimental; porque, se manipula una de las variables independientes, además se tiene el máximo control sobre dicha variable y se influye directamente para observar sus efectos sobre la variable dependiente. Población y muestra Por tratarse de un proyecto experimental no es necesario precisar el Universo (Población). Lugar de estudio El trabajo de investigación se realizará en la Universidad Nacional del Callao, en la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, que se encuentra ubicado en el Distrito de Bellavista en la Provincia Constitucional del Callao, Departamento de Lima. Técnicas e instrumentos para la recolección de información Como fuentes primarias la recolección de información será mediante la bibliografía y manuales de equipos consultados. La técnica de recolección de información es mediante la observación experimental, porque elabora datos en condiciones relativamente controladas, particularmente porque este puede manipular la o las variables. Análisis y procesamiento de datos Cabe notar que la teoría de la identificación de sistemas, así como el software utilizado utiliza gran cantidad de tratamiento de la información, basada en

<p>a su alto costo en el mercado nacional, ante la inexistencia de estos, hace que el aprendizaje de los alumnos, sea lento, redundando negativamente en su formación profesional como futuros ingenieros, ante ello se plantea la siguiente interrogante</p> <p>Formulación del problema</p> <p>Problema general</p> <p>¿Cómo es el diseño y simulación de un convertidor DC/AC (Inversor) monofásico de 220V controlado por ancho de pulso con modulación sinusoidal (Spwm) de baja potencia?</p> <p>Problemas Específicos</p> <p>¿Cómo influye el índice de modulación en el diseño y simulación de un convertidor DC/AC (Inversor) monofásico de 220V controlado por ancho de pulso con modulación sinusoidal (Spwm) de baja potencia?</p> <p>¿Cómo influye la técnica de modulación por ancho de pulso sinusoidal en el diseño y simulación de un convertidor DC/AC (Inversor) monofásico de 220V controlado por</p>	<p>sinusoidal (Spwm) de baja potencia</p>	<p>será posible comprender cómo influyen en el diseño y simulación de un convertidor DC/AC (Inversor) monofásico de 220V controlado por ancho de pulso con modulación sinusoidal (Spwm) de baja potencia</p>	<p>Variable dependiente: La técnica de modulación por ancho de pulso sinusoidal (SPWM) mejorara la salida de tensión alterna del inversor de baja potencia</p>	<p>procedimientos estadísticos que permite realizar validaciones con patrones ya establecidos. Para el presente trabajo en la investigación básica se aplicará la metodología siguiente:</p> <p>Investigación bibliográfica:</p> <p>Se utilizarán las fuentes de información disponibles como libros, revistas, hojas de fabricante, internet; para establecer el marco teórico necesario para el diseño del convertidor DC/AC (inversor), así como los componentes necesarios para el mismo.</p> <p>Diseño:</p> <p>Con la teoría recopilada se escoge el método de diseño apropiado que permita simular el circuito con las herramientas disponibles.</p> <p>Ya que no existe un convertidor que satisfaga todas las posibles aplicaciones, se diseña el inversor de modo que se mantenga una estructura simple pero flexible para su implementación en múltiples aplicaciones.</p> <p>Se estudian los componentes a utilizar considerando su nivel tecnológico y precio, finalmente se procede al diseño.</p> <p>Simulación:</p> <p>Aprovechando el software disponible, como Cadence® PSpice® o Simulink® de Matlab®, se realiza la simulación del circuito.</p> <p>Rediseño y simulación:</p> <p>Si no se obtienen los resultados deseados o no es posible simular una parte específica del circuito se realizan los cambios necesarios al diseño y se intenta de nuevo.</p>
--	---	--	--	--



ancho de pulso con modulación sinusoidal (Spwm) de baja potencia?				
--	--	--	--	--

