

# **CONVERTIDOR BIFÁSICO A TRIFÁSICO PARA EL ACCIONAMIENTO DE MOTORES DE INDUCCIÓN**

## *TWO TO THREE PHASE CONVERTER FOR INDUCTION MOTORS*

**José Antonio Aquino Robles**

Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas del IPN  
*jaquinor@gmail.com*

**Cecilia Fernández N.**

Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas del IPN  
*cfernandezn@ipn.mx*

**Leonel G. Corona R.**

Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas del IPN  
*lcoronaramirez@hotmail.com*

### **Resumen**

El sistema diseñado propone la rectificación de las ondas sinusoidal para obtener un voltaje en Corriente Directa, posteriormente se agregó un inversor trifásico que hace uso de transistores y electrónica de estado sólido, el cual permite generar una señal sinusoidal trifásica con una baja distorsión armónica. El programa que controla el sistema de inversión realiza una variación de frecuencia en el arranque del sistema para evitar los picos de corriente producidos por el arranque del motor, esto permite proteger y aumentar el tiempo de vida la instalación eléctrica además este proyecto busca poder ser instalado con facilidad, evitando la manipulación de las conexiones provenientes del transformador.

**Palabra(s) Clave:** Electrónica de estado sólido, tensión monofásica, tensión bifásica, rectificador de voltaje, inversor, arranque de motor trifásico.

### **Abstract**

*The designed model proposes the rectification of the sinusoidal waves to obtain direct current voltage, subsequently added a three-phase converter which uses transistors and solid-state electronics, this allows to generate a three-phase sinusoidal wave with low-level harmonic distortion. The main program which*

controls the inverter system allows a frequency variation at the systems boot to avoid current peaks produced by starting a motor, all the above allows to protect and increase lifetime of the electrical installation also the project will seek an easy installation without the necessity of the connection manipulation in the transformer.

**Keywords:** Solid-state electronics, single-phase voltage, biphasic voltage, rectifier, power inverter three-phase motor start.

## 1. Introducción

En México el ramo empresarial está constituido principalmente por microempresas, en muchas de ellas se hace el uso de maquinaria industrial para poder llevar a cabo la labor de cada día. Sin embargo, en México no se cuenta siempre con suministro de energía eléctrica trifásica para satisfacer a este sector productivo, pues dependiendo del lugar; la energía que suele llegar a sus instalaciones es monofásica o bifásica, dotada principalmente por transformadores del tipo YT o monofásico a dos boquillas, figura 1.



Figura 1 Transformadores monofásicos de distribución utilizados en zonas rurales y en los suburbios de las grandes ciudades (CFE 2013).

Ello principalmente porque la electrificación rural o de los suburbios es mucho más barata realizarla con este tipo de transformadores en vez de hacerlo con red trifásica (Comisión Federal de Electricidad CFE 2013). La importancia de que estas empresas cuenten con energía trifásica radica en que ésta permite un mejor desempeño en la maquinaria, específicamente en el rendimiento de los motores,

pues a pesar de que existen motores que se adaptan a las redes disponibles; su costo y baja disponibilidad los hacen inaccesibles para su uso en industrias que no tienen el capital suficiente para adquirir este tipo de máquinas eléctricas o para cambiar la locación de la empresa (Ibíd.).

Para solucionar este problema y compitiendo con los actuales aparatos disponibles en el mercado; se busca la fabricación de un dispositivo capaz de proporcionar y sostener una potencia de trabajo de cinco caballos de fuerza, la cual es requerida por los motores del taller donde se instalará. El dispositivo contará con un rectificador de onda completa, para poder pasar a un sistema de inversión que permitirá crear la señal trifásica, el sistema de control implementado debe de asegurar una señal suficientemente estable para poder ser utilizada por cualquier motor con una potencia nominal igual a la establecida, además el proyecto contará con la función de arranque suave lo cual asegurará una protección del convertidor, del motor y del resto de la instalación eléctrica.

La diferencia con los sistemas comúnmente usados en el país es que éstos usan regularmente convertidores de fase rotativos o estáticos. Los primeros son únicamente para arrancar motores trifásicos, sin embargo, con un aproximado de 66% de su potencia o menor. Por otro lado, los rotativos elevan en gran manera su precio, aunado a que se requiere personal especializado para llevar a cabo la instalación, a diferencia del sistema propuesto en este documento que buscará la simplicidad en el diseño para que así el usuario sea capaz de instalarlo sin poner en riesgo su salud o la integridad de la red eléctrica del taller.

## **2. Métodos**

El sistema que se desarrolló debió cumplir con los siguientes requerimientos:

- Funcionar a partir de una red monofásica tres hilos a 220 V.
- Las fases del voltaje de entrada deben estar desfasadas 180°.
- Sólo se podrán accionar motores trifásicos de 5 hp o menor potencia.
- Deberá contar con protección contra sobrecargas.
- Deberá tener programadas rampas de aceleración para accionar el motor.
- La salida del sistema será un conector para una clavija de media vuelta.

- Deberá ser lo más fácil de instalar y utilizar.
- El voltaje que proporcionará el sistema deberá de estar en un rango de  $\pm 8\%$ .

Para cumplir con lo anterior se han planteado algunos objetivos en el proyecto, vea figura 2 para observar las áreas funcionales del dispositivo.



Figura 2 Requerimientos del proyecto.

Teóricamente se propuso que el dispositivo constaría en su parte operativa de un sistema de rectificación con su filtro capacitivo de salida, que a su vez sirviera de sistema de desacople de carga y que la potencia eléctrica ya en CD, pudiera pasar a través de un inversor, accionado por medio de un microcontrolador para finalmente tener corriente alterna trifásica en la salida, figura 3.

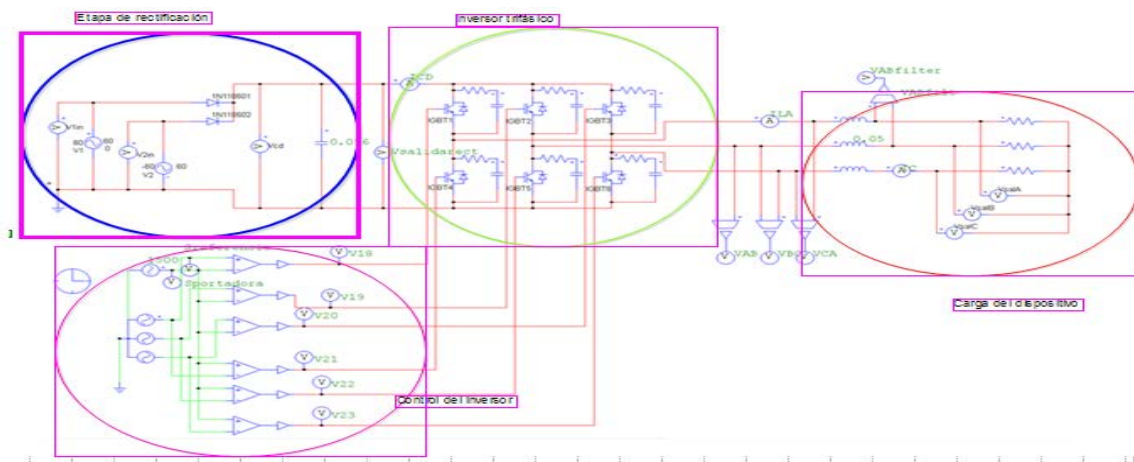


Figura 3 Esquema de simulación del dispositivo.

## Protección contra sobrecargas, sistema de rectificación y filtrado de rizo

La primera parte donde fue necesario realizar es la entrada del sistema donde es inexistente un sistema de protección contra sobrecargas. El principal problema con esta sección del sistema es la corriente de carga del capacitor, pues al funcionar como un “corto”, la corriente generada es excesiva si no es limitada por un resistor, por lo tanto, el sistema requería limitar dicha corriente. El sistema de la figura 4, es el resultado de un rediseño del sistema de rectificación y filtro de rizo encargado de entregar una señal en corriente directa al sistema de inversión, el cual se encargará de generar las tres señales senoidales (Escobar 2012). El diseño actual contiene una protección termo magnética que protege el sistema completo de cambios bruscos en la corriente generadas por algún corto, además de esto, el diseño presenta la implementación de un aislamiento magnético mediante un transformador uno a uno, esto permite al sistema trabajar y generar una señal en corriente directa de manera limpia y sin pérdidas de eficiencia sin importar el desfase de la señal bifásica (dicho desfase puede ser de 120 o 180° entre fase y fase) (Breton 2003). Otra de las ventajas del sistema es que entre los pines A y B mostrados en la figura 4, se puede generar un voltaje de 340 V en corriente directa, este voltaje será introducido al sistema de inversión, con lo cual se podrán generar fácilmente los voltajes de 220 V RMS de la señal trifásica que alimentara al motor (Medina 2014).

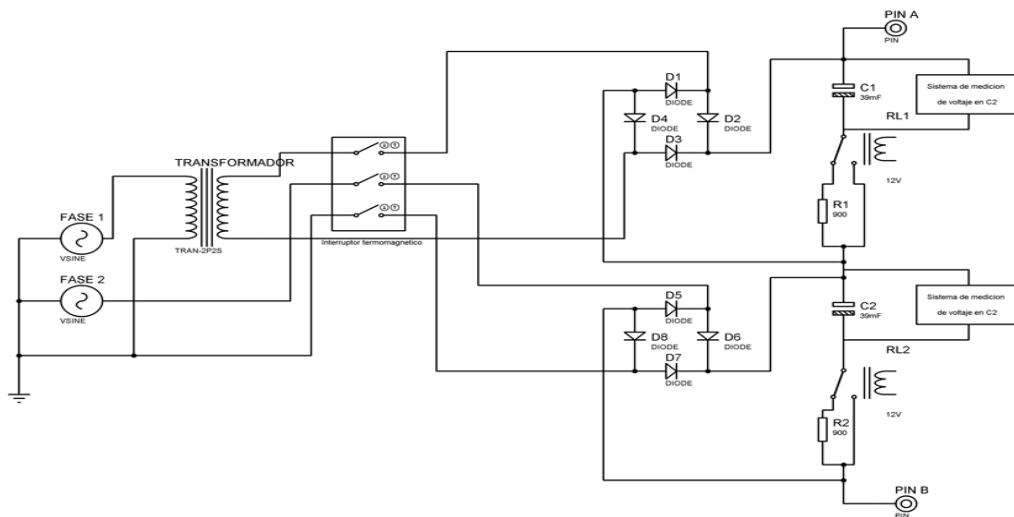


Figura 4 Sistema de rectificación y filtrado del rizo (Medina 2014).

Para poder realizar el diseño detallado, debemos de tomar en cuenta lo siguiente:

- Sabemos que 746 W equivalen a 1 caballo de potencia por lo que el sistema debe de generar y soportar un total de 3730 W aproximadamente para poder alimentar un motor de 5 hp, en este diseño debe de considerarse un margen que permita al sistema trabajar con seguridad y sin llegar al límite, lo que permitirá conservar la vida útil del sistema durante más tiempo, Rashid (2005).
- Como característica principal del sistema se encuentra una salida trifásica de 220 V y 17 A es la corriente mínima que debe de soportar el sistema para obtener los 5 CP y un voltaje de salida de 220 V. La primera parte del sistema se refiere a un rectificador de onda completa dividido por fases, cada una de las fases del sistema con una entrada de voltaje de 120 V RMS desfasados entre ellas 180°, donde al final de la rectificación obtendremos un voltaje de 170 V DC en cada una de las fases. Para asegurarnos que una vez recibida la alimentación el sistema no falle se seleccionaron diodos de potencia 1N1186 capaz de soporta un voltaje y una corriente alta Boylestad (2004).

### **Control del inversor**

Para generar las ondas que disparan los transistores se utilizó un microcontrolador ATMEGA16. En una primera aproximación se trató de calcular las tres ondas senoidales y la onda portadora en tiempo real; sin embargo, esto tiene un costo computacional demasiado alto, el cual provoca que el microcontrolador no genere las señales de disparo a la frecuencia necesaria, ATMEL (2017).

Lo anterior nos obligó a la recreación del programa principal cambiando completamente el programa del microcontrolador el cual se describe a continuación en la figura 5. Para que las señales de disparo generen un ciclo de 60 Hz, se calcularon las tres ondas senoidales y la señal portadora en MATLAB, se comparó cada onda senoidal con la portadora, si la senoidal era mayor se guardaba un 1 en un arreglo de números enteros, en caso contrario se guardaba

un 0. Posteriormente se pasaron los tres arreglos a la memoria del microcontrolador y éste únicamente reproduce los valores alojados en su memoria.

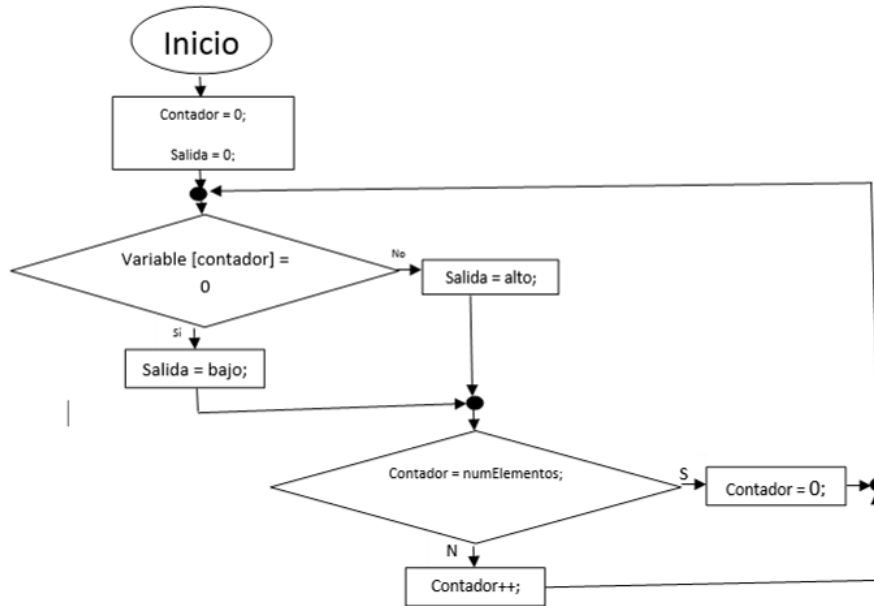


Figura 5 Diagrama de flujo para el control del inversor.

Con lo anterior se generan las siguientes señales para cada uno de los transistores superiores en el arreglo de medio puente, la figura 6 nos da la salida ideal que deberá generar el microcontrolador utilizando el programa anteriormente descrito Bootstrap (2016). La línea verde muestra la señal de referencia, la señal azul es colocada como señal portadora y la línea roja representa la activación del IGBT superior en el arreglo de medio puente.

Para ello se crea una señal de referencia a 60 Hz como señal final, una señal portadora, en este caso una señal de diente de sierra que funciona como se describió con el flujo de programa, y la señal roja que a su vez es la más importante pues genera la señal de control para la activación del transistor IGBT superior que es el encargado de permitir el paso de la corriente y voltaje para hacer funcionar el motor.

La señal en el inversor inferior únicamente es lo contrario a la del transistor superior, es decir, que para que se el sistema permita el paso de voltaje, el

programa deberá mandar un “uno” lógico en la parte superior y al mismo tiempo un “cero” lógico en la parte inferior, sin embargo se desea cortar el voltaje en el sistema el transistor superior deberá permanecer apagado enviando al circuito Bootstrap un “cero” lógico para el control de este último, mientras que al mismo tiempo que el transistor inferior permanezca encendido recibiendo un “uno” lógico en la señal de control del mismo.

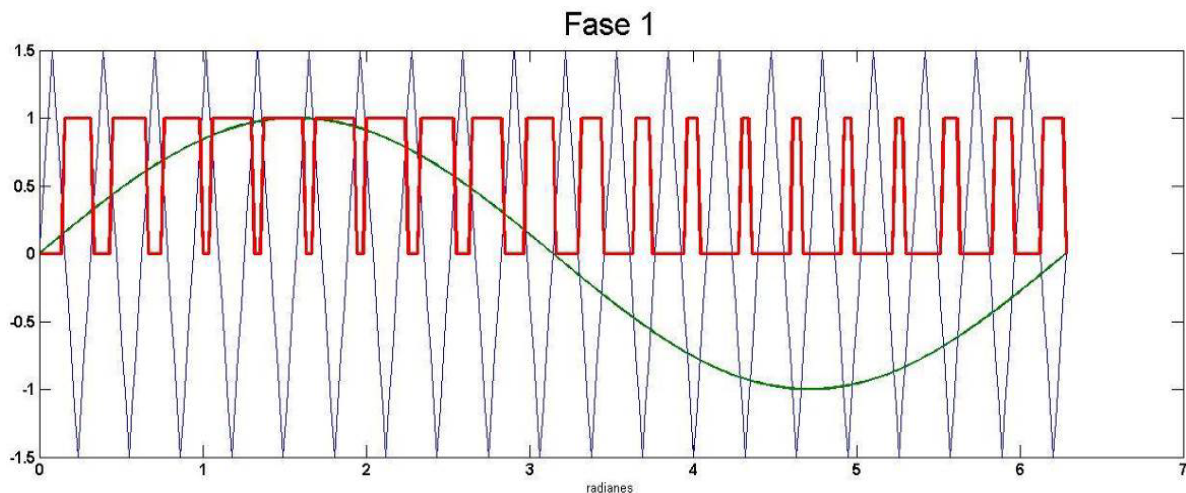


Figura 6 Señal de salida generada en el microcontrolador.

### **Sistema de control de activación para transistores y sistema de inversión trifásico**

La activación del sistema requiere de un circuito Bootstrap, este circuito nos permite la correcta activación y desactivación de las compuertas de los transistores IGBT o MOSFET superiores del arreglo de medio puente, utilizando para ello una fuente flotante generada por un capacitor esto nos permite asegurar el voltaje Threshold ( $V_{GS(th)}$  o  $V_{GE(th)}$ ), este voltaje Compuerta-Fuente en un dispositivo MOSFET o voltaje Compuerta-Emisor de un dispositivo IGBT es el mínimo necesario para crear un canal de conducción entre Drenaje-Fuente en el primer transistor o su similar Colector-Emisor en un transistor IGBT.

Para llevar a cabo esta función existen varias propuestas de circuito Bootstrap, la primera, es un circuito hecho por transistores que permite la activación y desactivación del sistema mediante un circuito como en la figura 7.



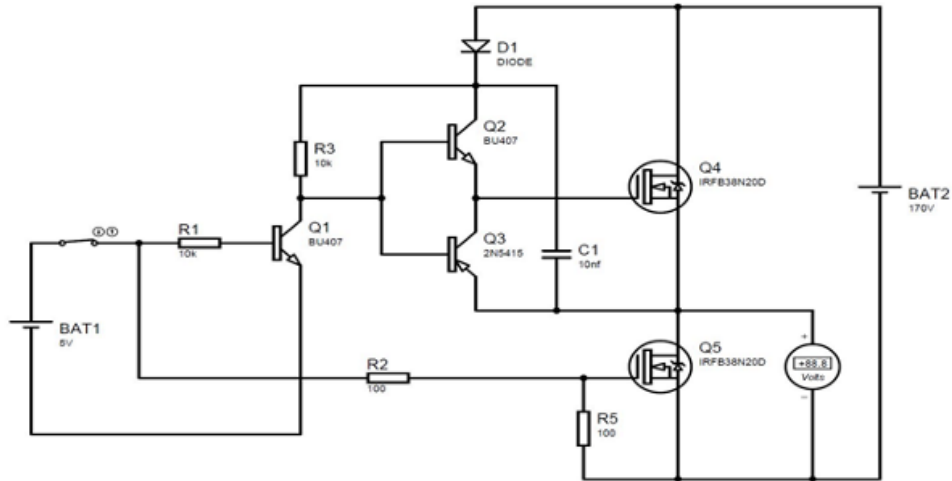


Figura 7 Circuito Bootstrap de medio puente con transistores.

### 3. Resultados

La manufactura del sistema de conversión trifásica inicio con la fabricación de un transformador uno a uno de aislamiento magnético. Este transformador cumple una función de vital importancia para el correcto funcionamiento de nuestro sistema, la principal función de este transformador es un aislamiento magnético entre fases, cual es necesario para poder generar un voltaje de 340 V, figura 8.

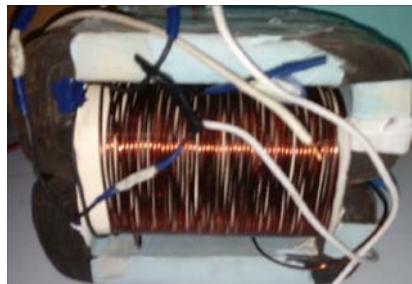


Figura 8 Transformador que genera las dos fases a 180°.

Lo segundo en realizarse fue el sistema de rectificación y filtrado de rizo a 322.2 Volts en CD. Que alimentara el sistema de inversión trifásico figura 9.

Lo tercero en realizarse fue la etapa del inversor el cual consta del módulo de 6 transistores IGBT 7MBP150RA-060 producido por la marca FUJI – ELECTRIC, cada IGBT de este módulo tiene un Driver, un diodo de marcha libre y un diodo Zener para regular el voltaje de entrada del driver. Los transistores que se

encuentran en la parte superior requieren una fuente de alimentación independiente de 12 V, los que se encuentran en la parte inferior comparten otra fuente de 12 V, figura 10.

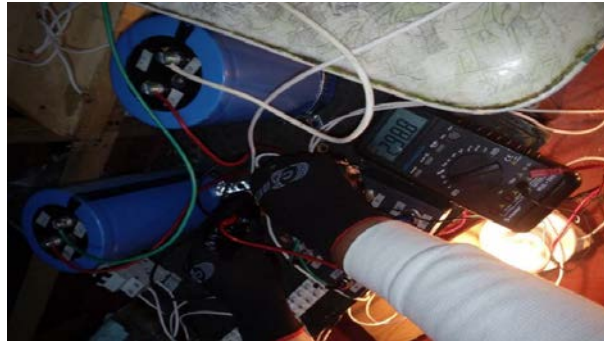


Figura 1 Medición de voltaje durante la carga de los capacitores.

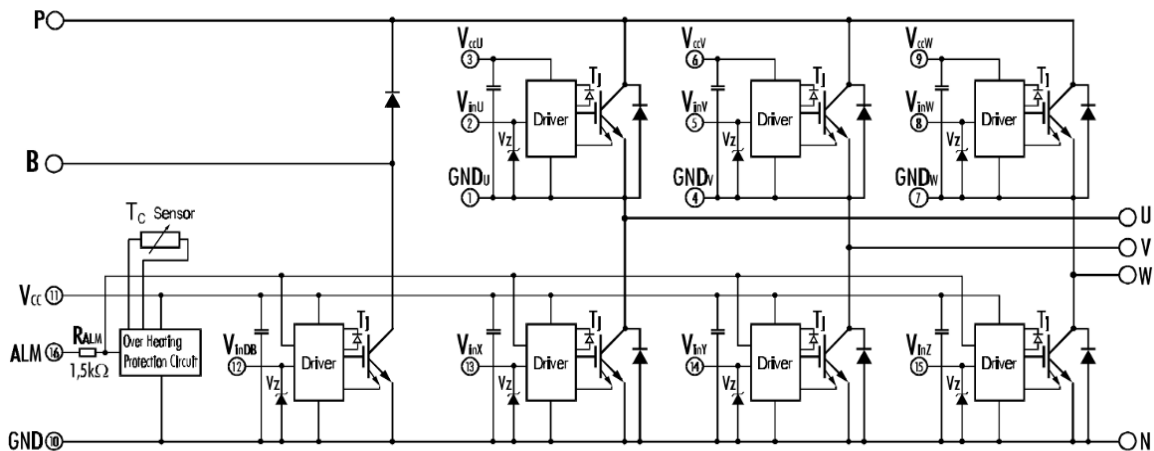


Figura 10 Módulo de transistores IGBT 7MBP150RA-060.

En la figura 11 están desplegados los voltajes de línea. El voltaje entre las fases 2 y 1 está en color amarillo, el voltaje entre las fases 3 y 1 está en color azul. Se alimentó el circuito a 70 V y se utilizaron unas puntas atenuadas con un factor 10 X para poder visualizarlas. El programa que se encuentra corriendo dentro del microcontrolador además de generar las señales que requiere el circuito de Bootstrap se encuentra realizando una variación de frecuencias desde 1 Hz hasta 60 Hz, esto asegura al sistema un arranque suave en el motor para evitar los grandes picos de voltaje generado en el encendido de este último.

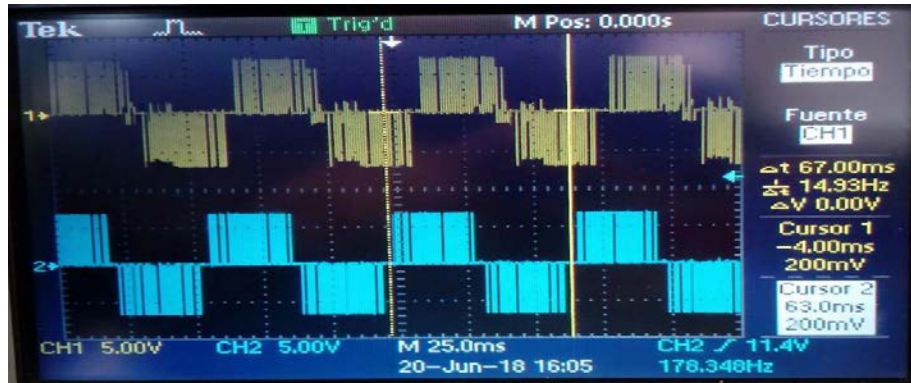


Figura 11 Parte de la salida generada por el microcontrolador.

Las figuras 12 muestra el estado estable del sistema a 60 Hz que es la señal que permanecerá en la salida del sistema hasta que se resetee el microcontrolador, también se puede observar en la figura 13, el desfase entre 2 señales del sistema trifásico.

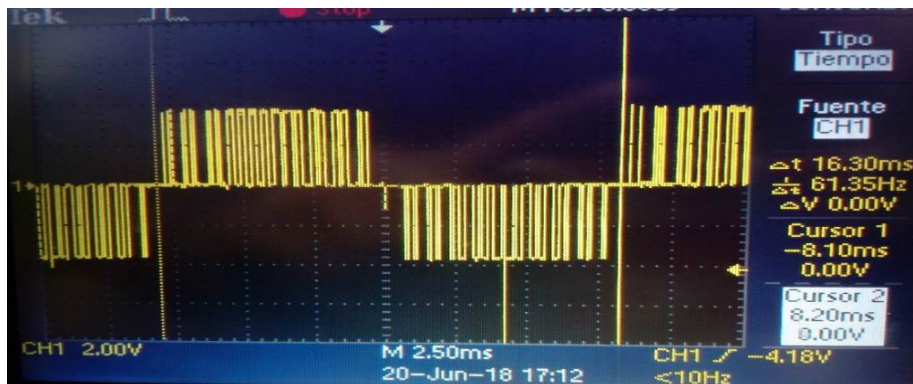


Figura 12 Señales trifásicas, la cual se encuentra trabajando a 60 Hz.

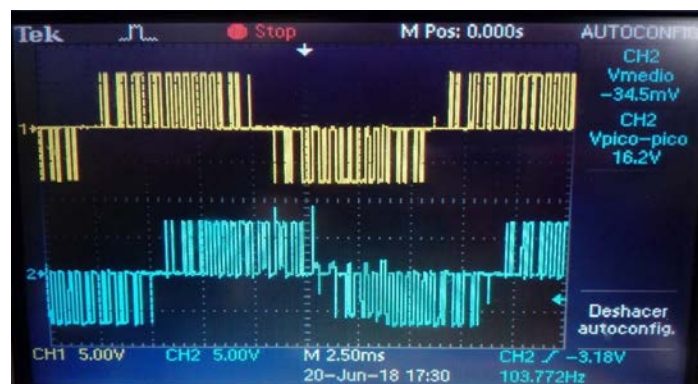


Figura. 2 Dos señales del sistema trifásico.

## **4. Discusión**

Es necesario siempre considerar la corriente de carga de los capacitores de valores considerables, pues sin una limitante a esta, los capacitores no pueden cargarse de manera adecuada en pequeñas instalaciones con un suministro de energía limitado.

Se debe dejar en claro que el sistema que llevamos a cabo al unir ambas fases de la acometida bifásica es posible únicamente con el transformador de aislamiento uno a uno, el cual genera una “nueva” fase y un neutro; permitiendo el comportamiento anterior, de lo contrario se genera un corto circuito en el sistema impidiendo su funcionamiento.

Usar un transformador trifásico para elevar el voltaje y/o filtrar incrementaría demasiado el precio del prototipo y lo haría poco accesible económicamente. Por lo que se buscó obtener el mismo voltaje a través de dos rectificadores de onda completa, sin embargo, los “espacios” intrínsecamente presentes en la modulación Senoidal de ancho de pulsos, afectan significativamente en el voltaje RMS que suministra el sistema.

Es posible la utilización del inversor acoplado con un sistema de celdas solares para crear cualquiera de las tres: una red monofásica, bifásica o trifásica en comunidades en las que ni siquiera se cuentan con un suministro eléctrico.

De acuerdo a nuestra experiencia es recomendable colocar las señales del microcontrolador de manera directa al CI del driver, debido a que retrasos en las señales de encendido y apagado podrían provocar un corto circuito que cause un daño severo en el sistema, lo anterior provocaría una descarga del voltaje almacenado en los capacitores a una alta corriente sobre los transistores IGBT lo que acabaría destruyendo o dañando de forma permanente dichos dispositivos.

## **Agradecimientos**

Los autores agradecen a la SIP del Instituto Politécnico Nacional por el apoyo recibido para la realización de este trabajo el cual es parte del proyecto de investigación registro SIP No. 2018707.

## **5. Bibliografía y Referencias**

- [1] Comisión Federal de Electricidad. (2013). Instalación de Cometidas en Baja Tensión: [https://lapem.cfe.gob.mx/normas/carga\\_pagina\\_construccion.asp?pag=DCABT000.pdf](https://lapem.cfe.gob.mx/normas/carga_pagina_construccion.asp?pag=DCABT000.pdf).
- [2] Escobar Noriega Carlos. (2012). Control Vectorial de Corriente del Inversor Trifásico con Carga RL. Universidad Tecnológica de la Mixteca. Oaxaca, México.
- [3] Bretón Schuwirth Alberto Andrés. (2003). Diseño y Construcción de un inversor Trifásico multinivel de cuatro etapas para compensación armónica y de reactivos. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago de Chile, Chile.
- [4] Medina Silva Luis Alberto. (2014). Diseño de un inversor de corriente eléctrica con selector manual de conexión por fases a la salida. Instituto Politécnico Nacional. Ciudad de México, México.
- [5] Rashid Muhammad H. (2005). Electrónica de potencia (Tercera edición). Prentice Hall hispanoamericana, SA Naucalpan de Juárez, Edo. de México
- [6] Boylestad Robert L. (2004). Introducción al análisis de circuitos (Décima edición). Pearson Educación de México, SA de CV Naucalpan de Juárez, Edo. de México
- [7] ATMEL. 8-bit AVR Microcontroller with 16K Bytes In-System Programmable Flash: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/doc2466.pdf>.
- [8] Circuito driver Bootstrap para transistores Fet, Mosfets e IGBT. (2016). [Video]: <https://www.youtube.com/watch?v=ec5EuVD-4hs&t=341s>.
- [9] Nájera B.M. & Olea V.J.E. Prototipo de convertidor bifásico a trifásico para el accionamiento de motores de hasta 5 caballos de potencia, Proyecto de fin de carrera de ingeniería Mecatrónica UPIITA IPN agosto del 2018.