

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



DISEÑO DE UN INVERSOR MULTINIVEL EN CASCADA MONOFÁSICO
DE BAJO CONTENIDO ARMÓNICO PARA CARGAS RESISTIVAS

Tesis para optar el Título de Ingeniero Electrónico

Presentado por:

EDGARDO ALBERTO PORTUGAL FERNÁNDEZ

Lima - Perú

2006

ÍNDICE

<u>INTRODUCCIÓN</u>	I
<u>CAPÍTULO 1: CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA GENERADA A PARTIR DE FUENTES EÓLICAS PARA LAS ZONAS RURALES DEL PERÚ</u>	
1.1. La energía eléctrica y el desarrollo socioeconómico de las comunidades rurales	2
1.2. Sistemas de generación de energía eléctrica a partir de fuentes eólicas	3
1.3. Calidad de energía eléctrica	5
1.3.1 Efectos de la presencia de armónicos en las redes eléctricas monofásicas	6
1.3.2 Normas nacionales y estándares internacionales de calidad de energía	10
1.4 Declaración del problema	15
<u>CAPÍTULO 2: TECNOLOGÍAS EMPLEADAS EN EL DISEÑO DE INVERSORES MONOFÁSICOS</u>	
2.1. Estado del Arte	17
2.1.1. Presentación del asunto de estudio	17
2.1.2. Panorama actual del asunto de estudio	17
2.1.3. Síntesis sobre el asunto de estudio	21
2.2. Inversores multiniveles	21
2.3. Inversor multinivel en cascada	23
2.4. Modelo teórico	26
<u>CAPÍTULO 3: DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN INVERSOR MULTINIVEL MONOFÁSICO</u>	
3.1. Diseño del inversor multinivel en cascada	30
3.1.1. Análisis de Fourier de la tensión multinivel	33
3.1.2. Resolución del sistema de ecuaciones trascendentes no lineales para la reducción de armónicos	37
3.1.3. Diseño del circuito de potencia	38
3.1.4. Diseño del circuito de control	42
3.2. Simulación del diseño propuesto	47
3.2.1. Simulación de la señal de tensión multinivel	47
3.2.2. Simulación del circuito inversor multinivel	50
3.3 Selección de semiconductores	69
3.4 Fabricación de un prototipo a escala reducida	71
<u>CAPÍTULO 4: EVALUACIÓN DEL DISEÑO PROPUESTO</u>	
4.1 Descripción del método empleado	77
4.2 Resultados obtenidos	78

<u>CONCLUSIONES</u>	91
<u>RECOMENDACIONES</u>	93
<u>FUENTES</u>	95
<u>ANEXOS</u>	
Anexo N° 1 Programa que resuelve el sistema de ecuaciones trascendentes no lineales para siete incógnitas	100
Anexo N° 2 Programa que implementa el sistema de ecuaciones trascendentes no lineales para siete incógnitas	101
Anexo N° 3 Programa para controlar la activación secuencial de los transistores del inversor multinivel en cascada de quince niveles	102
Anexo N° 4 Formas de las ondas de tensión, corriente y potencia en las baterías cuando el inversor opera sin carga	106
Anexo N° 5 Formas de las ondas de tensión, corriente y potencia en las baterías cuando el inversor opera con una carga de 12.2 ohm	107
Anexo N° 6 Formas de onda de corriente en las baterías cuando el inversor opera sin carga obtenidas con el osciloscopio Tektronix THS720P	108
Anexo N° 7 Formas de onda de corriente en las baterías cuando el inversor opera con una carga de 12.2 ohm obtenidas con el osciloscopio Tektronix THS720P	109
Anexo N° 8 Circulación de la corriente en el circuito de potencia para los diversos niveles de tensión que entrega el inversor	110
Anexo N° 9 Presupuesto para la fabricación de un inversor multinivel en cascada de 15 niveles de 2,2 KW – 220 VRMS	114

RESUMEN

La carencia del servicio de energía eléctrica es uno de los principales obstáculos para lograr el desarrollo socioeconómico y mejorar la calidad de vida de los pobladores que habitan en las zonas rurales de nuestro país.

Una alternativa tecnológica para la generación de electricidad, que cuenta con un gran potencial, debido a las favorables condiciones climáticas de nuestro país, se basa en los sistemas de conversión de energía de viento. En general, la calidad de la energía eléctrica generada a partir de fuentes de energía renovable es un factor importante en la generación de electricidad.

Los inversores electrónicos son equipos de conversión de potencia eléctrica que transforman una tensión de corriente continua en una tensión de corriente alterna. La tecnología involucrada en el diseño y la fabricación de estos equipos determina la calidad de energía eléctrica que puede generar un sistema de conversión de energía de viento.

El objetivo de esta tesis es diseñar un inversor multinivel en cascada monofásico que genere a partir de un arreglo de baterías una tensión alterna de quince niveles pico a pico, cuyas magnitudes de las tensiones armónicas correspondientes a la tercera, quinta, séptima, novena, undécima, décimo tercera y décimo quinta armónica se vean reducidas y se mantenga por debajo de las tolerancias establecidas en la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos Peruana.

La investigación está desarrollada en cuatro capítulos. El primer capítulo, analiza la calidad de la energía eléctrica generada por un inversor que forma parte de un sistema de conversión de energía de viento. En el segundo capítulo, se describen las tecnologías utilizadas en el diseño de un inversor monofásico. El tercer capítulo muestra el procedimiento seguido para el diseño de un inversor multinivel en cascada monofásico para cargas resistivas. El cuarto capítulo presenta los resultados obtenidos con el prototipo fabricado a escala reducida.

Como conclusión principal del trabajo se establece que el diseño realizado permite generar una tensión de corriente alterna con un factor de distorsión armónica total (*THD*) de 5.2%. Para el prototipo construido, se encontró que la tercera, quinta, séptima, novena, undécima, décimo tercera y décimo quinta armónica se mantenían por debajo de las tolerancias establecidas en la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos.



A Dios:

*Por estar presente en mi vida a través
de las personas que amo.*

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el Perú ha experimentando un crecimiento económico importante. A pesar de este crecimiento, los pobladores que habitan en las zonas rurales de nuestro país aún se encuentran marginados de la modernidad y del desarrollo. Estas personas, que en su mayoría se encuentran en condiciones de extrema pobreza, carecen de acceso a los servicios de infraestructura básica como son el agua potable y la electricidad.

Si bien no existe un vínculo estrecho entre la electrificación rural y el crecimiento económico de estas zonas, la carencia del servicio de energía eléctrica es uno de los principales obstáculos para el mejoramiento de la calidad de vida y el desarrollo socioeconómico de estos pobladores. Por ello, la aplicación de adecuadas tecnologías que permitan proporcionar energía eléctrica a las poblaciones rurales permitirá mejorar la calidad de vida de las personas y posibilitar el desarrollo sostenido de estos sectores sociales.

Una alternativa tecnológica para la generación de electricidad, que cuenta con un gran potencial debido a las favorables condiciones climáticas de nuestro país, se basa en la conversión de energías renovables no convencionales como la energía solar y la energía eólica. Los sistemas de conversión de energía de viento permiten generar electricidad a partir de la energía eólica. El viento, el cual es producido por

el calentamiento irregular de la superficie terrestre, acciona una turbina eólica que convierte la energía cinética en energía mecánica y a través de un generador en energía eléctrica.

La calidad de la energía eléctrica es un factor importante en la generación de electricidad a partir de fuentes de energías renovables. Esta calidad está determinada en base a las tolerancias establecidas por la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos Peruana para los niveles de tensión, frecuencia y perturbaciones en los puntos de entrega.

Las tensiones armónicas son un tipo de perturbación que la norma controla con detalle, estas degradan la calidad de la energía eléctrica ocasionando pérdidas de energía y la reducción de la eficiencia y tiempo de vida útil de diferentes cargas y equipos.

Los inversores electrónicos son equipos de conversión de potencia eléctrica que forman parte de los sistemas de conversión de energía de viento, su funcionamiento está basado en la conmutación de semiconductores que transforman una tensión de corriente continua en una tensión de corriente alterna. La tecnología involucrada en el diseño y la fabricación de estos equipos determina la calidad de energía eléctrica que puede entregar un sistema de conversión de energía de viento.

La presente investigación plantea la siguiente hipótesis: dado que la carencia de la energía eléctrica impide el desarrollo socioeconómico de las poblaciones ubicadas en las zonas rurales de nuestro país; y que las energías renovables, en especial la energía eólica, ofrecen grandes posibilidades para la generación de electricidad para estas poblaciones; además que la calidad de la energía eléctrica generada a

través de un sistema de conversión de energía de viento está determinada por la conversión de potencia eléctrica realizada por el inversor; entonces el empleo de un inversor multinivel en cascada monofásico permitirá reducir la magnitud de las tensiones armónicas presentes en la tensión generada y mantener la calidad de la energía eléctrica dentro las tolerancias establecidas por la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos Peruana para los niveles de tensión, frecuencia y perturbaciones.

El objetivo de esta tesis es diseñar un inversor multinivel en cascada monofásico que genere a partir de un arreglo de baterías una tensión alterna de quince niveles pico a pico, cuyas magnitudes de las tensiones armónicas correspondientes a la tercera, quinta, séptima, novena, undécima, décimo tercera y décimo quinta armónica se vean reducidas y se mantenga por debajo de las tolerancias establecidas en la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos Peruana.

La metodología empleada considera un estudio de la relación existente entre la carencia de la energía eléctrica y el desarrollo de las comunidades rurales, la presentación de la energía eólica como fuente de generación de electricidad para estas zonas, la calidad de la energía eléctrica generada, las normas que la regulan y los efectos de la presencia de tensiones armónicas en las redes eléctricas; así como un estudio de las principales tecnologías utilizadas en el diseño de inversores monofásicos. Estos estudios han dado base a la investigación realizada y han permitido una adecuada comprensión del problema que la tesis aborda, además de una correcta selección de la tecnología a emplear. La principal fuente de información ha provenido de artículos técnicos publicados en Internet.

La investigación está desarrollada en cuatro capítulos. El primer capítulo, analiza la calidad de la energía eléctrica generada por un inversor que forma parte de un

sistema de conversión de energía de viento. Este capítulo, comienza describiendo la relación entre el acceso a los servicios de electricidad y el desarrollo socioeconómico de las comunidades rurales. Luego presenta a la energía eólica como fuente de generación de electricidad para las zonas rurales de la costa norte y sur del país, para en seguida identificar al inversor como el equipo electrónico que determina la calidad de la energía generada en un sistema de conversión de energía de viento. Al final del capítulo, se describe los efectos de las corrientes armónicas y las normas que regulan la presencia de tensiones armónicas en las redes eléctricas.

En el segundo capítulo, se describen las tecnologías utilizadas en el diseño de un inversor monofásico, destacando aquellas tecnologías que ofrecen mayores ventajas en la reducción de contenido armónico en la onda generada. Para completar el modelo teórico, este capítulo desarrolla los conceptos y principios de funcionamiento relacionados con el inversor multinivel en cascada.

El tercer capítulo muestra el procedimiento seguido para el diseño de un inversor multinivel en cascada monofásico para cargas resistivas, que genere una tensión alterna de quince niveles pico a pico, cuyas magnitudes de las tensiones armónicas correspondientes a la tercera, quinta, séptima, novena, undécima, décimo tercera y décimo quinta armónica se encuentren por debajo de las tolerancias establecidas en la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos. Este procedimiento consta del desarrollo matemático que permite reducir el contenido armónico a la salida del inversor, el diseño del circuito de potencia y control, la simulación de la señal de tensión multinivel y del circuito diseñado, la selección de semiconductores y la descripción de la fabricación de un prototipo a escala reducida y su simulación.

El cuarto capítulo presenta los resultados obtenidos en el prototipo a escala reducida fabricado. En este capítulo se evalúa los parámetros de calidad de energía establecidos en la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos.

Como conclusión principal del trabajo realizado se establece que el diseño desarrollado permite generar, a partir de un arreglo de baterías de diferente referencia, una tensión de corriente alterna cuyos parámetros de calidad de energía se encuentran acorde a lo señalado por la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos. Para el prototipo construido, se encontró que la tercera, quinta, séptima, novena, undécima, décimo tercera y décimo quinta armónica se mantenían por debajo de las tolerancias establecidas en la norma.

Para finalizar quiero agradecer a mis padres, a mis hermanas y a mi familia por confiar y creer siempre en mí; a los ingenieros Miguel Cataño, Andrés Flores, Oscar Melgarejo y Ricardo Tantas por su apoyo y asesoría; al licenciado Renzo Astorne por su guía en los inicios de este trabajo; a la ingeniera Crisaida Flores por su constante apoyo y aliento, gracias por acompañarme en este camino; a los ingenieros Jorge Gonzáles, Wilfredo Sifuentes y Alberto Soto por compartir interesantes puntos de vista y diversa información que enriquecieron este trabajo, a los señores Fernando del Campo y Gerardo Guerrero por compartir sus experiencias académicas, y a todos aquellas personas que con su insistente aliento me ayudaron a culminar esta tesis.

CAPÍTULO 1:

CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA GENERADA A PARTIR DE FUENTES EÓLICAS PARA LAS ZONAS RURALES DEL PERÚ

El Perú ha experimentando un crecimiento económico en los últimos años, sin embargo, este crecimiento no se ha visto reflejado en los sectores de extrema pobreza ubicados en las zonas rurales de nuestro país. Es en estos sectores donde los pobladores se encuentran marginados de la modernidad y del desarrollo. La inserción de adecuadas tecnologías en estas realidades sociales permitirá mejorar la calidad de vida de los pobladores y posibilitar un desarrollo sostenido de estos sectores.

El presente capítulo comenzará describiendo la relación entre el acceso a los servicios de energía eléctrica y el desarrollo socioeconómico de las comunidades rurales. Se analizarán luego las posibilidades que ofrece la energía eólica para la generación de electricidad en las zonas rurales de la costa norte y sur del país y se estudiará a los sistemas de conversión de energía de viento distinguiendo la electrónica involucrada que determina la calidad de energía entregada a los consumidores. Finalmente se describirán los efectos de las corrientes armónicas en las redes eléctricas y las normas que las regulan.

1.1. La energía eléctrica y el desarrollo socioeconómico de las comunidades rurales.

Un alto porcentaje de la población mundial (entre el 75% y el 80%) no cuenta con acceso a las redes de distribución eléctrica (SEGUÍ 2004). Este escenario no difiere a la situación de nuestro país, de acuerdo al último censo de población y vivienda elaborado por el INEI en el año 2005, el 27.58% de las viviendas del Perú carecen de electricidad. La situación se agudiza en las zonas rurales siendo cerca de un 65% de estas zonas las que no cuentan con acceso a la electricidad. Es en estos lugares donde habitan las personas más pobres del país, las cuales ven retrasado su desarrollo socioeconómico debido a la carencia del servicio de energía eléctrica (RAMIREZ 2002).

Según el Departamento de Evaluación de Operaciones del Banco Mundial existe poca evidencia de vínculos estrechos entre electrificación rural y crecimiento económico, sin embargo, esta relación parece ser evidente. El Banco Interamericano de Desarrollo (BID) señala que uno de los obstáculos principales para el mejoramiento de la calidad de vida en América Latina es la carencia de acceso a la infraestructura básica, entre ellas el acceso a la electricidad, según el BID las mejoras en la infraestructura surten un efecto multiplicador porque brindan oportunidades directas e indirectas de desarrollo económico y social a la mayoría de habitantes.

En Chile, el Programa Nacional de Electrificación Rural logró duplicar el número de hogares rurales conectados con la red de energía eléctrica, constituyéndose en una estrategia del gobierno para reducir la pobreza y mejorar la calidad de vida en las zonas rurales. En el otro lado del mundo, un estudio en Bangladesh nos muestra que las personas que tuvieron acceso a un programa de electrificación rural tenían

ingresos 22% más altos que aquellos que carecían del servicio eléctrico (ESCOBAL 2004).

Proveer de servicio eléctrico a las áreas rurales podrá mejorar entonces el estado económico y social de las comunidades más pobres del país. El acceso a la electricidad en estas comunidades permitirá en general mejorar la calidad de vida de sus habitantes al generar oportunidades para la implementación de actividades industriales basadas en la agricultura, mejorar las condiciones de infraestructura que permitan el desarrollo de actividades turísticas, generar nuevos puestos de trabajo, mejorar los niveles de ingresos familiares, mejorar los servicios de salud y de educación e interconectar a estas comunidades con el resto del país y del mundo a través de las telecomunicaciones.

1.2. Sistemas de generación de energía eléctrica a partir de fuentes eólicas

Cuando los poblados se encuentran ubicados en lugares poco accesibles y alejados de la red de distribución de electricidad es conveniente recurrir a sistemas aislados de generación, siempre que su costo sea inferior al de extender la red.

Una alternativa de estos sistemas, que se perfila con grandes posibilidades para la generación de electricidad en las zonas rurales de la costa norte y sur del país, es el uso de sistemas de conversión de energía eólica.

La energía eólica es un tipo de energía renovable no convencional a partir de la cual se utiliza la velocidad del viento para generar potencia eléctrica. El viento, el cual es generado por el calentamiento irregular de la superficie terrestre producto de los rayos solares, acciona una turbina eólica que convierte la energía cinética del viento en energía mecánica, la cual acciona un generador que produce electricidad. El Perú es un país que cuenta con un potencial no aprovechado de energía eólica calculado en 57 257 MW (BOCANEGRA 2003). Las altas velocidades que alcanzan

los vientos en la costa norte y sur del Perú señalan a estos lugares como zonas de alto potencial eólico para la generación de electricidad (MINEM 2001), sin embargo no se cuenta con un mapa eólico detallado que permita ubicar zonas rurales específicas donde los vientos alcancen grandes velocidades.

Los sistemas de generación eléctrico – eólico o sistemas de conversión de energía de viento pueden clasificarse en tres tipos de acuerdo a la potencia instalada: de pequeña potencia (hasta 10KW), de mediana potencia (desde 10KW hasta 200KW) y de gran potencia (más de 200KW). También pueden clasificarse de acuerdo al tipo de conexión a la red en sistemas de conexión directa y sistemas de conexión indirecta.

El carácter aleatorio del viento origina que la potencia eléctrica generada sea variable. La fuerza electromotriz producida por el aerogenerador o turbina eólica es proporcional a la velocidad de giro del rotor, al depender la velocidad del rotor de la velocidad del viento, la tensión generada presentará una magnitud y frecuencia variable, dado que las cargas están diseñadas para funcionar a una frecuencia fija y a una tensión y potencia nominal, alimentarlas directamente con la tensión generada ocasionará un funcionamiento inadecuado, aleatorio e ineficaz.

Por ello la mayoría de aerogeneradores de gran potencia con conexión directa a la red funcionan a una velocidad casi constante gracias al uso de sistemas de regulación mecánicos que actúan sobre la velocidad de giro del rotor.

La conexión indirecta a red, utilizada usualmente en sistemas de pequeña y mediana potencia, permite que el aerogenerador funcione a una velocidad de giro variable, con esto el rotor puede girar más rápidamente durante ráfagas de viento y

se puede almacenar parte del exceso de energía en forma de energía rotacional hasta que la ráfaga haya terminado. Sin embargo debido al carácter errático del viento es necesario contar con un sistema de acumulación de energía para los periodos donde la velocidad del viento sea menor a la requerida, estos sistemas estarán basados en acumuladores electroquímicos e inversores.

Una ventaja secundaria del tipo de conexión indirecta es que a través de la electrónica de potencia se puede controlar la potencia reactiva y así mejorar la calidad de potencia de la red eléctrica. Las desventajas para este tipo de conexión son la necesidad de varias etapas de potencia (ca-cd , cd-cd, cd-ca, filtros) lo cual eleva los costos y las pérdidas de energía en el proceso de conversión. Al respecto la Asociación Danesa de la Industria Eólica señala que a medida que el costo de la electrónica de potencia disminuya, el beneficio que reporta construir turbinas más ligeras en conexión indirecta será mayor.

1.3. Calidad de energía eléctrica

En condiciones ideales de operación, las formas de onda de tensión y corriente que fluyen en un sistema eléctrico de potencia son sinusoidales de frecuencia única y constante. En la práctica, la calidad de la energía generada y distribuida es deteriorada por perturbaciones eléctricas que distorsionan las formas de estas ondas sinusoidales. Un tipo de perturbación que deteriora la calidad de la energía es producida por la adición de armónicos a la red eléctrica.

Los armónicos son señales eléctricas de frecuencias múltiplos enteros de la frecuencia fundamental a la que opera el sistema. Estos son producidos por dos clases de elementos: las cargas no lineales y las cargas cuya impedancia depende de la frecuencia. Cuando alimentamos con una tensión sinusoidal a las cargas no lineales estas inyectan armónicos eléctricos a la red al absorber una intensidad no

sinusoidal. Las cargas cuya impedancia depende de la frecuencia pueden generar armónicos también si son energizadas con una tensión sinusoidal distorsionada. El efecto de ambas distorsiones puede originar una interacción compleja en la cual la energía de los armónicos es transformada o multiplicada de una frecuencia a otra (NORIEGA 2005).

Parte importante de un sistema de conversión de energía de viento con conexión indirecta son los inversores, los cuales permiten convertir una tensión de corriente continua (DC) proveniente de la celda de acumulación a una tensión de corriente alterna simétrica (AC) que alimentará a la carga. En general el uso de inversores en los procesos de conversión de energía eléctrica inyecta a la carga un contenido armónico que reduce su tiempo de vida útil así como la degradación de su funcionamiento al generar un consumo de potencia ineficiente.

1.3.1 Efectos de la presencia de armónicos en las redes eléctricas monofásicas

La presencia de corrientes armónicas en las redes eléctricas origina tensiones no sinusoidales en los nodos del sistema y un aumento del valor eficaz real de la corriente consumida para una misma potencia activa.

Para muchos tipos de cargas, la existencia de armónicas en la red es nociva. Por ejemplo para los motores eléctricos son particularmente perjudiciales la tercera y quinta armónica, para las lámparas las armónicas de orden superiores a los 100KHz generan interferencias con los aparatos receptores (ROSATO 1991).

En general, los equipos eléctricos son diseñados para operar correctamente a una tensión de 50Hz ó 60Hz. La presencia de contenido armónico en la tensión con que

son alimentados originan ruido, problemas mecánicos y en algunos casos la falla del equipo.

Los equipos electrónicos, como las computadoras y otros equipos domésticos y de oficina, requieren de una fuente de alimentación muy estable para su correcto funcionamiento. Los armónicos ocasionan perturbaciones en la tensión con que es energizada la fuente de alimentación de estos equipos. Esto puede generar variaciones notables en las tensiones de salida que alimentan a los circuitos electrónicos, originando (por ejemplo) el reinicio de las computadoras. Las variaciones de tensión por periodos prolongados a las salidas de estas fuentes pueden ocasionar daños irremediables en algunos circuitos integrados provocando la inutilidad del componente.

Los efectos de la presencia de contenido armónico en las redes eléctricas dependen del tipo de carga y se pueden clasificar en efectos instantáneos y efectos a largo plazo, estos últimos debidos al sobrecalentamiento (NORIEGA 2005).

Entre los efectos instantáneos se encuentran:

- Vibraciones y ruido en equipos electromagnéticos, como transformadores e inductores, producidos por las fuerzas electrodinámicas asociadas a las corrientes armónicas instantáneas.
- Torques mecánicos pulsantes en motores, debidos a campos rotatorios originados por corrientes armónicas.
- Fallas y distorsiones en controles electrónicos producidos por la presencia de armónicos de tensión que desplazan el cruce por cero de la onda de tensión,

afectando las condiciones de conmutación de los semiconductores y los tiempos de sincronización de los equipos.

- Aumento de la interferencia y disturbios en las líneas de comunicación y control, que son tendidas a lo largo de las líneas de distribución eléctrica, debido a que el acoplamiento entre líneas aumenta con la frecuencia.

- Operación incorrecta de fusibles, de interruptores y equipos de protección debido a las corrientes armónicas instantáneas.

- Operación incorrecta de equipos de protección contra sobrevoltaje cuyos dispositivos de medición están diseñados para responder ante valores eficaces y no detectan cambios abruptos y picos agudos que pueden dañar el sistema. También puede ocurrir el disparo de los equipos ante valores no dañinos debido a que el ajuste de la protección no ha tomado en cuenta la presencia de armónicos en la red.

Entre los efectos a largo plazo, por sobrecalentamiento, se encuentran:

- Pérdidas de energía y destrucción de condensadores. Al ser sensibles los condensadores a sobrecargas originadas por tensiones armónicas, éstas causan pérdidas de energía en el dieléctrico que se disipan en forma de calor, esto puede llevar a un envejecimiento prematuro o al rompimiento del dieléctrico y la destrucción del condensador.

- Disminución de la eficiencia de los motores debido al incremento de pérdidas de energía en el estator y en el rotor causadas por la diferencia de velocidades entre el eje del motor y el campo rotatorio inducido por los armónicos.

- Disminución de la eficiencia de los transformadores debido al incremento de pérdidas de energía en el cobre y en el hierro asociadas a las corrientes armónicas circulantes.

- Aumento de las pérdidas de energía en los cables originadas por la conducción de corrientes armónicas, estas pérdidas son debidas al efecto Joule por el cual una mayor corriente circulante disipa una mayor cantidad de calor incrementando la temperatura de los cables y sometiendo a esfuerzos térmicos su aislamiento.

Otra razón del sobrecalentamiento de conductores relacionada con la presencia de armónicos en las redes eléctricas se debe al efecto pelicular. El efecto pelicular es el fenómeno por el cual las corrientes alternas de alta frecuencia tienden a fluir cerca de la superficie más externa del conductor. Esto se debe a que la variación del campo magnético es mayor en el centro del conductor originando una reactancia inductiva mayor, debido a ello fluye una intensidad menor de corriente en el centro del conductor y mayor cerca de la superficie.

Como consecuencia de esto, el área transversal efectiva del conductor se reduce a medida que la frecuencia de la corriente alterna circulante incrementa, lo que ocasiona una mayor resistencia del conductor, mayores pérdidas de energía y sobrecalentamiento. Este sobrecalentamiento origina fallas en motores, transformadores, inductores y alimentadores en general por la pérdida de aislamiento.

Otro problema relacionado con la presencia de armónicos en las redes eléctricas es su amplificación debido a la resonancia en circuitos eléctricos. Cuando alguna de las frecuencias de las corrientes armónicas presentes en la red coincide con la frecuencia de resonancia de un circuito resonante en paralelo (cargas inductivas en

paralelo con cargas capacitivas) se produce una sobre tensión que amplifica la magnitud de ese armónico. Similar comportamiento ocurre cuando alguna de las frecuencias de las tensiones armónicas coincide con la frecuencia de resonancia de un circuito resonante en serie (cargas inductivas en serie con cargas capacitivas) originándose una sobre corriente que amplifica la magnitud del armónico.

Estas sobre tensiones y sobre corrientes pueden ocasionar el deterioro de los condensadores presentes en los circuitos resonantes.

En general, el condensador es un elemento muy sensible al contenido armónico pues absorbe las corrientes armónicas más fácilmente al tener una baja impedancia a frecuencias altas, lo cual origina la reducción de su tiempo de vida. Por ello no se recomienda conectar bancos de condensadores en instalaciones que tengan una distorsión total armónica (THD) mayor al ocho por ciento (NORIEGA 2005).

1.3.2 Normas nacionales y estándares internacionales de calidad de energía

El Gobierno del Perú ha designado al Ministerio de Energía y Minas (MINEM) como la autoridad competente encargada de promover, dirigir y ejecutar proyectos de electrificación rural basados en el uso de energías renovables no convencionales. En este contexto, el Ministerio de Energía y Minas, a través de la Dirección General de Electricidad, ha emitido la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos Peruana cuya última modificación ha sido aprobada por Decreto Supremo 026-2006-EM.

El título quinto de la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos Peruana determina la calidad del producto en base a las transgresiones de las tolerancias permitidas en los niveles de tensión, frecuencia y perturbaciones en los puntos de entrega.

Esta norma establece un periodo de medición mínimo de siete días calendarios continuos, con excepción de la frecuencia cuya medición es permanente durante el periodo de control. En cada periodo de medición son promediados los valores instantáneos medidos en intervalos de quince minutos para la tensión y la frecuencia y en intervalos de diez minutos para las perturbaciones.

Para la tensión entregada en un intervalo de medición “ k ” de quince minutos, la norma señala como indicador a la diferencia (ΔV_k) entre la media de los valores eficaces medidos en el punto de entrega (V_k) y el valor de la tensión nominal (V_N) del mismo punto expresado en porcentaje de la tensión nominal.

$$\Delta V_k (\%) = \frac{(V_k - V_N)}{V_N} \cdot 100\% \quad (\text{Fórmula 1.1})$$

De acuerdo a la norma, la tolerancia admitida para las tensiones entregadas es de $\pm 5,0\%$ y de $\pm 7,5\%$ en servicios calificados como urbano-rurales y/o rurales. Se considera que la energía eléctrica es de mala calidad, si la tensión se encuentra fuera del rango de tolerancias permitidas por un tiempo superior al cinco por ciento del periodo de medición.

Respecto a la frecuencia entregada, el indicador principal es el que mide las variaciones sostenidas de frecuencia como un porcentaje de la frecuencia nominal. Este indicador está definido para un intervalo de medición “ k ” de quince minutos de duración, como la diferencia (Δf_k) entre la media de los valores instantáneos de frecuencia medidos en el punto de entrega (f_k) y el valor de la frecuencia nominal

(f_N) del mismo punto expresado en porcentaje de la frecuencia nominal. La tolerancia admitida para las variaciones sostenidas de frecuencia es de $\pm 0,6\%$.

$$\Delta f_k (\%) = \frac{(f_k - f_N)}{f_N} \cdot 100\% \quad (\text{Fórmula 1.2})$$

Se considera que la energía eléctrica es de mala calidad, si las variaciones sostenidas de frecuencia se encuentran fuera del rango de tolerancias permitidas por un tiempo acumulado al uno por ciento del periodo de medición.

Respecto a las perturbaciones, la norma controla la presencia de las tensiones armónicas y del Flícker. Para las armónicas existen dos indicadores de calidad, el factor de distorsión armónica total (THD) y el factor armónico de la n -ésima armónica (HF_n).

Estos indicadores se evalúan separadamente en cada intervalo de medición de diez minutos y son definidos de acuerdo a las fórmulas 1.3 y 1.4.

$$THD = \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{40} (V_n^2)} \cdot 100\% \quad (\text{Fórmula 1.3})$$

$$HF_n = \frac{V_n}{V_1} \cdot 100\% \quad (\text{Fórmula 1.4})$$

En estas fórmulas, " V_n " es el valor eficaz de la tensión de la n -ésima armónica expresada en voltios y " V_1 " es el valor eficaz de la componente fundamental de la tensión nominal expresada en voltios. Para el cálculo de los indicadores de calidad y las tolerancias la norma considera desde la segunda hasta la cuadragésima armónica.

La tabla 1.1 muestra los valores de tolerancia del indicador " HF_n " para media y baja tensión, respecto a la tolerancia del indicador " THD " es de ocho por ciento para media y baja tensión.

Orden de la armónica	HF_n
2	2.00
3	5.00
4	1.00
5	6.00
6	0.50
7	5.00
8	0.50
9	1.50
10	0.50
11	3.50
12	0.20
13	3.00
14	0.20
15	0.30
16	0.20
17	2.00
18	0.20
19	1.50
20	0.20
21	0.20
22	0.20
23	1.50
24	0.20
25	1.50
26	0.20
27	0.20
28	0.20
29	0.63
30	0.20
31	0.60
32	0.20
33	0.20
34	0.20
35	0.56
36	0.20
37	0.54

Tabla N° 1.1, Valores máximos de HF_n establecidos por Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos Peruana

Orden de la armónica	HF_n
38	0.20
39	0.20
40	0.20

Tabla N° 1.1, Valores máximos de HF_n establecidos por Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos Peruana (*continuación*)

El indicador de calidad para el Flícker es el índice de severidad por Flicker de corta duración (P_{st}) definido de acuerdo al estándar IEC1000-4-15 (antes IEC868). Este índice no debe superar a la unidad.

Se considera que la energía eléctrica es de mala calidad, si los indicadores de las perturbaciones medidas se encuentran fuera del rango de tolerancias por un tiempo superior al cinco por ciento del periodo de medición.

La norma estadounidense IEEE 519-1992 reúne las recomendaciones, prácticas y requerimientos para el control de armónicas en sistemas eléctricos de potencia (VÁSQUEZ 1998). Esta norma establece límites en el nivel de contenido armónico que una compañía de distribución de electricidad puede suministrar a los consumidores. La tabla N° 1.2 señala los límites permitidos de distorsión armónica total (THD) y distorsión individual armónica (HF_n) para los armónicos impares.

Tensión en el punto de acoplamiento común	Distorsión individual HF_n (%)	Distorsión total THD (%)
Hasta 69 KV	3.0	5.0
De 69 KV a 137.9 KV	1.5	2.5
138 KV y más	1.0	1.5

Tabla N° 1.2. Valores máximos de HF_n y THD establecidos por la norma estadounidense IEEE 519-1992

Para los armónicos pares la distorsión individual es un 25 % de los límites establecidos para los armónicos impares.

1.4. Declaración del problema

La carencia del servicio de energía eléctrica en las comunidades rurales del Perú limita el desarrollo socioeconómico de estas poblaciones. Las alternativas de generación de electricidad para estas comunidades basadas en la conversión de energías renovables no convencionales, como la energía eólica, se ven limitadas por la calidad de energía que pueden entregar al usuario final.

Esta calidad de energía está determinada en base a las tolerancias establecidas por la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos Peruana para los niveles de tensión, frecuencia y perturbaciones en los puntos de entrega. Los inversores electrónicos son equipos de conversión de potencia eléctrica que forman parte de los sistemas de sistema de conversión de energía de viento. La tecnología involucrada en el diseño y la fabricación de estos equipos determina la calidad de energía eléctrica que puede entregar un sistema de conversión de energía de viento.

CAPÍTULO 2:

TECNOLOGÍAS EMPLEADAS EN EL DISEÑO DE INVERSORES

MONOFÁSICOS

Luego de determinar que en un sistema de conversión de energía de viento de baja potencia, el inversor cumple un papel fundamental en la determinación de la calidad de la energía eléctrica entregada al usuario final, se inicia el estudio de las principales tecnologías utilizadas en el diseño de un inversor monofásico.

El presente capítulo, presenta el estado actual de las tecnologías empleadas en el diseño de inversores monofásicos, destacando aquellas tecnologías que ofrecen mayores ventajas en la reducción de contenido armónico en la onda generada.

La recopilación de información realizada muestra que los inversores basados en la conmutación de dispositivos semiconductores de potencia tienen un mayor rendimiento y permiten variadas alternativas de modulación y topologías para la reducción de armónicos. Como se verá en el capítulo, la clase de inversor que ofrece mayores ventajas para la generación de electricidad a partir de fuentes de energía renovables es el inversor multinivel.

2.1. Estado del Arte

2.1.1. Presentación del asunto de estudio

Los inversores electrónicos son equipos de conversión de potencia eléctrica que transforman una tensión de corriente continua en una tensión de corriente alterna, su funcionamiento esta basado en la conmutación de semiconductores de potencia.

Las tecnologías empleadas en el diseño y la fabricación de estos equipos son variadas. En el presente estudio se muestran las tecnologías más importantes utilizadas en el diseño de inversores monofásicos enfocándose en aquellas que buscan incrementar la eficiencia del inversor y la calidad de energía entregada.

Se empezará describiendo las clases de inversores, luego se señalarán las diferentes tecnologías empleadas en su diseño y finalmente se compararán las tecnologías presentadas.

2.1.2. Panorama actual del asunto de estudio

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 esta 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 pasabajos, 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.

2.1.3. Síntesis sobre el asunto de estudio

Los inversores basados en dispositivos semiconductores son los más eficientes. Mientras menor sea la frecuencia de conmutación de estos dispositivos menores serán las pérdidas de energía y mayor será la eficiencia del equipo.

Dentro de las tecnologías empleadas en el diseño de inversores electrónicos monofásicos destaca la topología multinivel en cascada pues tiene menores pérdidas de energía por conmutación de semiconductores y permite obtener una mejor calidad de energía al maximizar el número de niveles en la tensión de salida del inversor.

2.2. Inversores multiniveles

En general, los inversores electrónicos son equipos que permiten convertir una tensión de corriente continua en una tensión de corriente alterna. El funcionamiento de estos equipos esta basado en la conmutación de transistores de potencia como el MOSFET y el IGBT, de forma que ante una adecuada polarización de sus terminales permite el paso alternado de la tensión de corriente directa hacia la carga.

De esta manera a partir de una tensión de corriente directa " V_{cd} " es posible obtener en la carga tres niveles de tensión: cero, " $+V_{cd}$ " y " $-V_{cd}$ ".

Un inversor multinivel permite obtener más de estos tres niveles de tensión en la carga. Un mayor número de niveles en la tensión de salida del inversor mejorará la calidad de energía entregada y permitirá reducir el tamaño del filtro entre la salida del inversor y la carga.

A partir de una rama conformada por condensadores conectados en serie dispuesta en paralelo con la fuente de tensión de corriente directa es posible dividir la tensión en varios niveles. El inversor multinivel con diodo fijador utiliza una red compuesta por diodos y transistores para entregar la tensión de cada condensador alternadamente hacia la carga, mientras que el inversor multinivel con condensadores volantes utiliza una red compuesta por condensadores para reemplazar a los diodos fijadores.

Los semiconductores utilizados en un inversor multinivel con diodo fijador deben soportar altos niveles de tensión inversa, esta tensión es variable y depende de la posición del semiconductor en la red. Las especificaciones de máxima corriente de los diodos y transistores también son variables debido a que conducen por lapsos de tiempo diferentes. En este tipo de inversores, si el número de niveles es muy grande la cantidad de diodos requeridos hace impráctica la implementación del inversor.

En los inversores con diodo fijador las tensiones y niveles de corriente en los condensadores no son iguales, por ello se suelen reemplazar a los condensadores por fuentes controladas de tensión de corriente directa, reguladores de voltaje PWM o arreglos de baterías.

Los inversores con capacitores volantes requieren de una gran cantidad de condensadores, esto permite tener redundancia en la generación de los niveles de tensión internos que pueden obtenerse a través de las combinaciones de activación de diversos transistores.

La redundancia permite balancear los distintos niveles de tensión y controlar así las tensiones individuales de cada capacitor al permitir la carga o descarga preferencial de ciertos condensadores para mantenerlos en sus valores nominales.

Es posible utilizar esta redundancia para balancear la potencia en la carga, pero el control de la activación de los transistores se hace complejo y se requiere aumentar la frecuencia de conmutación incrementándose así las pérdidas de energía.

La gran cantidad de condensadores que poseen estos inversores origina un mayor volumen del equipo y un mayor costo, pero pueden proporcionar operación durante cortes de energía.

Al igual que en los inversores con diodo fijador, los semiconductores tienen diferentes tiempos de encendido y activación.

2.3. Inversor multinivel en cascada

El inversor multinivel en cascada está constituido por varios inversores de puente completo conectados en serie o cascada. Este inversor genera una tensión de varios niveles a partir de fuentes de corriente continua individuales que pueden ser baterías, celdas de combustible o celdas solares. La tensión de salida del inversor multinivel se obtiene al sumar las tensiones de salida de los inversores de puente completo.

La figura N° 2.1 muestra un inversor multinivel en cascada constituido por tres inversores puentes completos.

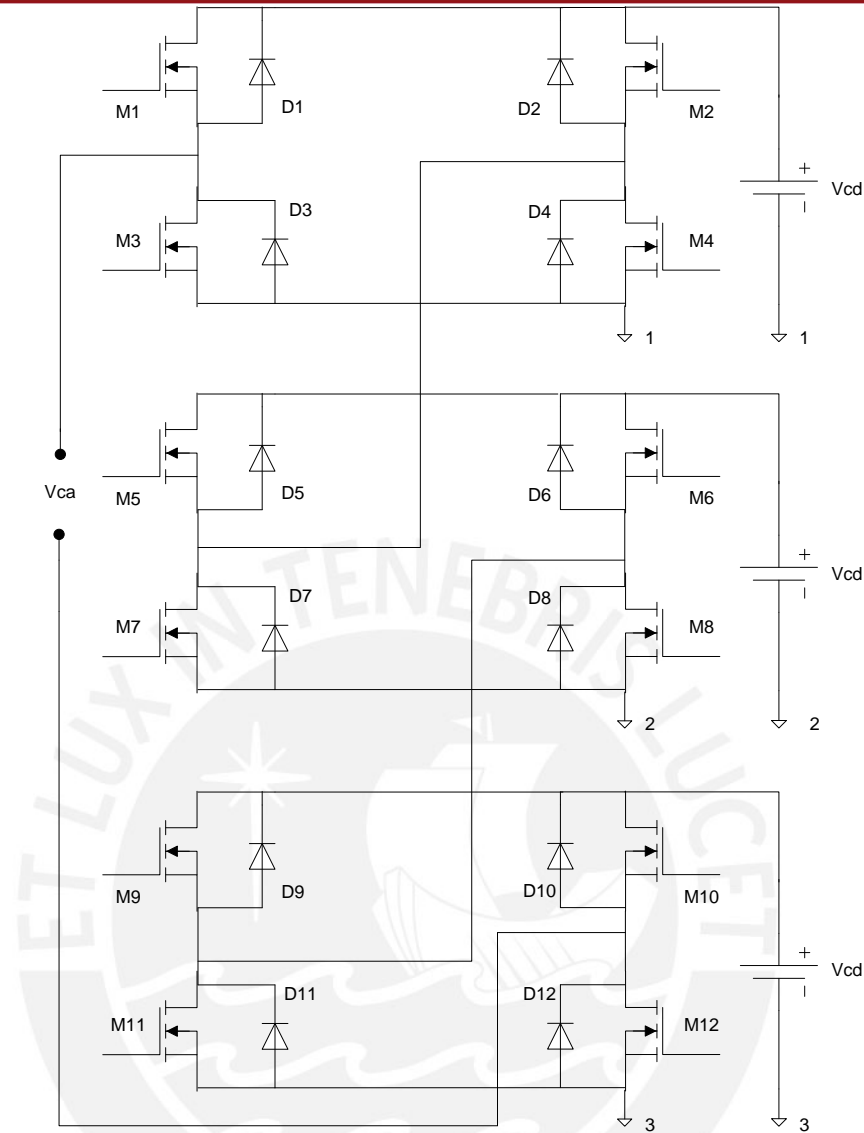


Figura N° 2.1. Inversor multinivel en cascada de tres puentes H

En comparación con los otros tipos de inversores multinivel, esta topología requiere de una menor cantidad de componentes debido a que no utiliza diodos fijadores o capacitores de balanceo.

Esta topología permite reducir el factor armónico total (THD) al controlar los tiempos de activación de los transistores que dan inicio a los distintos niveles de tensión, de esta forma se puede obtener una tensión casi sinusoidal con un bajo THD. Además esta topología permite utilizar técnicas de conmutación suave para activar los transistores y reducir las pérdidas de energía por conmutación.

Debido a que cada inversor de puente completo tiene un ciclo de trabajo diferente las baterías no se descargan por igual, esto se puede evitar intercambiando la conmutación de transistores en modo secuencial de forma que los diferentes puentes completos se alternen los ciclos de trabajo.

Para un inversor multinivel en cascada constituido por k inversores puente completo es posible obtener una tensión pico a pico de $(2k + 1)$ niveles. La figura N° 2.2 muestra las tensiones generadas en los tres puentes completos de la figura N° 2.1.

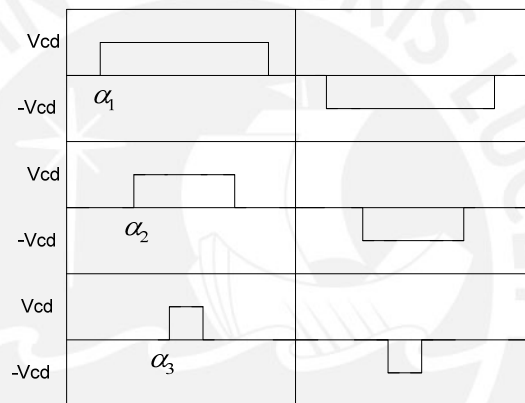


Figura N° 2.2. Tensiones generadas por puente del inversor de la figura N° 2.1

La figura N° 2.3 muestra la tensión multinivel obtenida a la salida del inversor conformada por siete niveles incluido el cero.

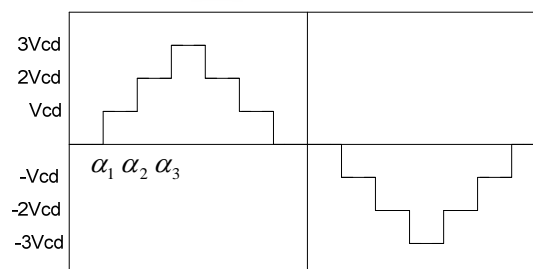


Figura N° 2.3. Tensión generada a la salida del inversor de la figura N° 2.1

Con la misma cantidad de inversores de puente completo es posible maximizar el número de niveles a la salida del inversor multinivel escalando los niveles de

tensión de las baterías. De acuerdo a Ríos (RÍOS 2003) se puede lograr un óptimo número de niveles escalando las fuentes de tensión en potencia de tres, para que de esta forma puedan lograrse “3^k” niveles de tensión, para “k” inversores de puente completo.

El escalar las fuentes de tensión en potencia de tres implica que la batería de cada puente completo debe estar en la capacidad de absorber corriente, ello hace necesario del uso de fuentes DC bidireccionales. Rashid (RASHID 2004) muestra un circuito para la construcción de una fuente DC bidireccional que permite entregar y absorber potencia, la figura N° 2.4 muestra el circuito.

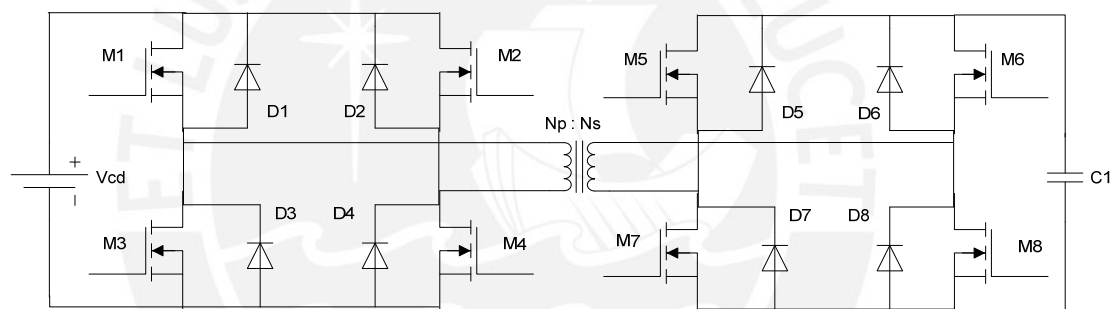


Figura N° 2.4. Circuito esquemático de una fuente DC bidireccional

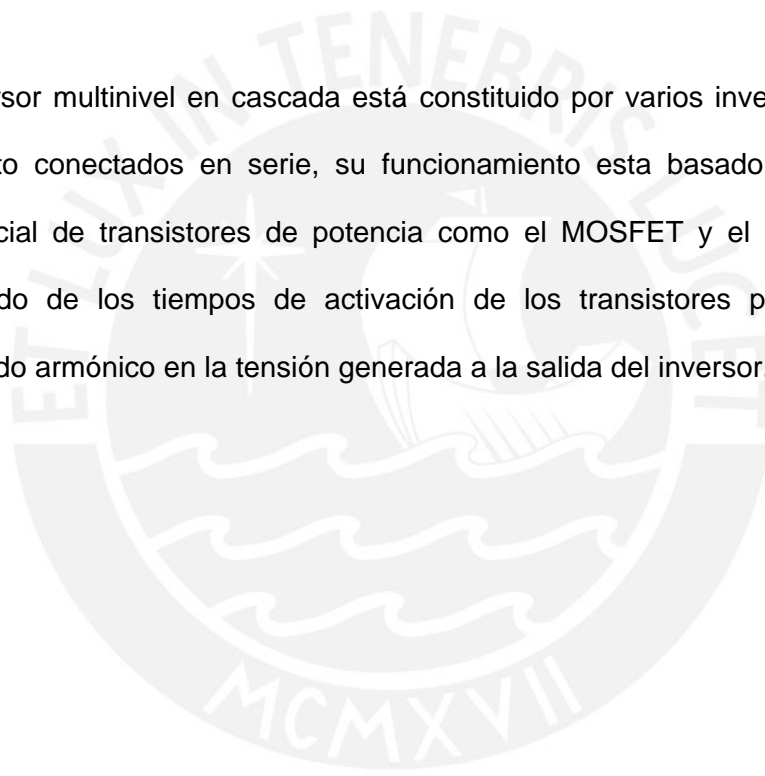
2.4. Modelo teórico

Los sistemas eléctricos de potencia pueden clasificarse en sistemas trifásicos y sistemas monofásicos. Los sistemas monofásicos se utilizan para alimentar cargas domésticas de pequeña potencia.

Para poder realizar un análisis de los sistemas eléctricos es necesario representar matemáticamente las señales eléctricas que se generan. Estas señales pueden ser representadas a través de una serie de Fourier, la cual es una sumatoria infinita de funciones sinusoidales armónicamente relacionadas.

Idealmente una señal eléctrica transmitida en un sistema monofásico puede ser representada matemáticamente a través de una sola función seno o coseno de frecuencia constante, sin embargo, en la realidad esta señal es la sumatoria de infinitas funciones sinusoidales cuyas frecuencias son múltiplos de la frecuencia constante de la señal ideal, a esta frecuencia se le denominará frecuencia fundamental y a sus múltiplos frecuencias armónicas. El componente armónico de una señal estará determinado por los coeficientes que acompañan a cada función sinusoidal de frecuencia armónica que conforman la serie de Fourier.

El inversor multinivel en cascada está constituido por varios inversores de puente completo conectados en serie, su funcionamiento esta basado en la activación secuencial de transistores de potencia como el MOSFET y el IGBT. Un control adecuado de los tiempos de activación de los transistores permite reducir el contenido armónico en la tensión generada a la salida del inversor.



CAPÍTULO 3:

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN INVERSOR MULTINIVEL MONOFÁSICO

Como se vio en el capítulo anterior, el inversor multinivel en cascada permite reducir la magnitud de las tensiones armónicas presentes en la tensión alterna generada y posee menores pérdidas de energía por conmutación que los inversores modulados por ancho de pulso. Además, este inversor, permite evitar el uso de transformadores para elevar la tensión y se adecua al uso de energías renovables al utilizar fuentes de tensión de corriente continua de diferente referencia.

La presente investigación plantea la siguiente hipótesis: dado que la calidad de la energía eléctrica generada a través de un sistema de conversión de energía de viento está determinada por la conversión de potencia eléctrica realizada por el inversor; entonces el empleo de un inversor multinivel en cascada monofásico permitirá reducir la magnitud de las tensiones armónicas presentes en la tensión generada y mantener la calidad de la energía eléctrica dentro las tolerancias establecidas por la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos Peruana para los niveles de tensión, frecuencia y perturbaciones.

Este capítulo presenta el diseño de un inversor monofásico para cargas resistivas, como primer paso para el diseño de un equipo que permita entregar potencia

eléctrica a una pequeña comunidad rural. El objetivo del trabajo es diseñar un inversor multinivel en cascada monofásico que genere a partir de un arreglo de baterías, una tensión alterna de quince niveles pico a pico, cuyas magnitudes de tensión armónica correspondientes a la tercera, quinta, séptima, novena, undécima, décimo tercera y décimo quinta armónica se vean reducidas y se mantenga por debajo de las tolerancias establecidas en la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos Peruana.

Se comenzará determinando los tiempos y la secuencia de conmutación de los transistores que permiten reducir el contenido armónico en la tensión generada. Luego se diseñará un inversor multinivel en cascada constituido por tres puentes completos y se optimizará el número de niveles de la tensión de salida evitando además el uso de fuentes DC bidireccionales para cargas resistivas.

El inversor diseñado deberá ser capaz de entregar una potencia máxima de 5 KW y una tensión de 220 VRMS de bajo contenido armónico dentro de las tolerancias establecidas por la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos Peruana. Se ha considerado una potencia máxima de 5 KW para una pequeña comunidad conformada por diez hogares, con un consumo de 500 W por casa.

3.1. Diseño del inversor multinivel en cascada

El inversor multinivel en cascada a diseñar está constituido por tres puentes completos, cada puente completo consta de cuatro transistores dispuestos en una configuración conocida como puente H. La figura N° 3.1 muestra la disposición de cuatro transistores MOSFET canal N para la configuración de un puente H.

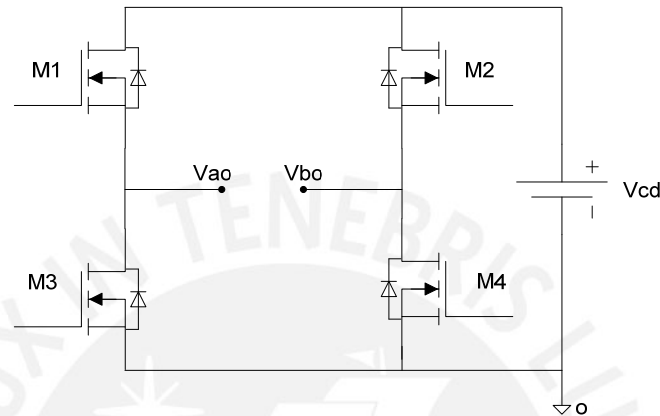


Figura N° 3.1. Configuración de un puente H

La tensión de salida alterna será tomada entre los terminales “Vao” y “Vbo”, ambas tensiones están definidas respecto al punto de referencia de la batería “o”. La tensión “Vab” se define como la diferencia de la tensión “Vao” menos la tensión “Vbo”. Esta tensión puede tomar tres valores “+Vcd”, “-Vcd” y tensión igual a cero voltios.

Cuando “Vab” toma el valor de “+Vcd” los transistores “M1” y “M4” están cortocircuitados y los transistores “M2” y “M3” abiertos, cuando toma el valor de “-Vcd” los transistores “M2” y “M3” están cortocircuitados y los transistores “M1” y “M4” abiertos, para tomar el valor de tensión igual a cero voltios existen dos opciones: “M3” y “M4” cortocircuitados y “M1” y “M2” abiertos, o, “M1” y “M2” cortocircuitados y “M3” y “M4” abiertos. Ambas opciones permiten la circulación de corriente en ambos sentidos cuando la tensión en el puente sea cero. Para el diseño realizado cuando la corriente fluya en sentido horario pasará a través del

transistor “M4” y del diodo interno del transistor “M3”, cuando la corriente fluya en sentido antihorario pasará por el transistor “M3” y por el diodo interno del transistor “M4”.

Debido a la precisión que se requiere en los tiempos de conmutación de los dispositivos semiconductores, cada transistor debe ser activado desde un microcontrolador. Entre cada transistor y el microcontrolador se requiere un circuito excitador de compuerta que permita aislar eléctricamente las etapas de control y potencia, este circuito es conocido como driver. La figura N° 3.2 muestra el diagrama de bloques del inversor multinivel en cascada diseñado para esta aplicación.

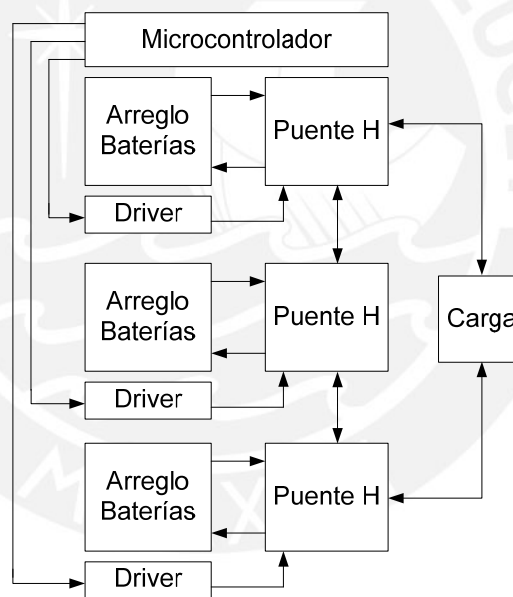


Figura N° 3.2. Diagrama de bloques del inversor multinivel en cascada

Para un inversor multinivel en cascada constituido por tres puentes H, cuyas tensiones de batería por puente son iguales, es posible obtener una tensión pico a pico a la salida del inversor de siete niveles (figura N° 2.3). Para incrementar el número de niveles en la tensión de salida del inversor, manteniendo constante el número de puentes H, debemos escalar los valores de tensión de las baterías de cada puente. De acuerdo a Ríos (RÍOS 2003) en un inversor multinivel en cascada

de tres puentes H, donde las tensiones de las baterías están escaladas en potencia de tres (V_{cd} , $3V_{cd}$ y $9V_{cd}$) se consigue un número máximo de veintisiete niveles en la tensión pico a pico a la salida del inversor.

Obtener una salida de tensión del máximo de niveles implica generar al mismo tiempo tensiones negativas y positivas en los puentes H, de forma que las baterías entreguen y absorban potencia, por ello se requiere del uso de fuentes DC bidireccionales.

En el caso de cargas resistivas, para evitar el uso de fuentes DC bidireccionales se puede escalar las tensiones de las baterías en potencia de dos (" V_{cd} ", " $2V_{cd}$ " y " $4V_{cd}$ ") generando por puente las formas de onda de tensión mostradas en la figura N° 3.3. De esta forma no se generan al mismo tiempo niveles de tensión negativa y positiva en diferentes puentes H.

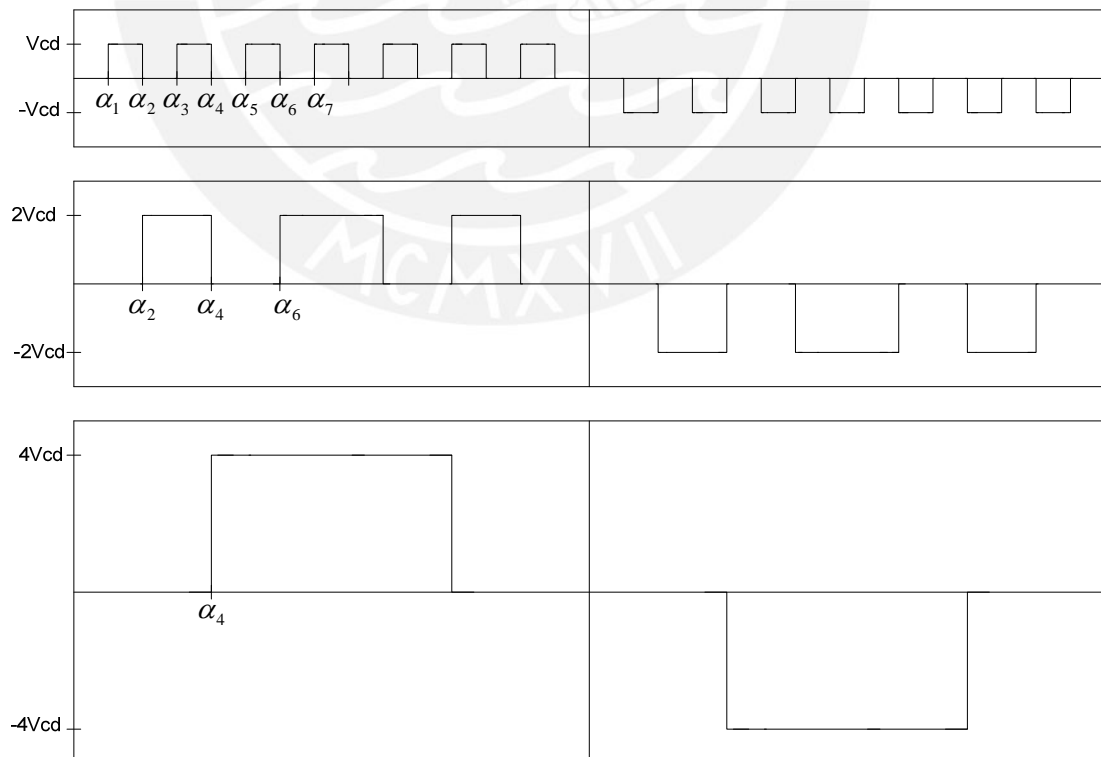


Figura N° 3.3. Tensiones por puente H del inversor multinivel en cascada

El uso de fuentes DC bidireccionales se hace necesario para grandes cargas inductivas, en donde para un mismo instante de tiempo, un puente H requiera generar una tensión cuya corriente vaya desde un menor a un mayor potencial en las baterías y deba soportar la circulación de una alta corriente inductiva (retrasada respecto a la tensión) que vaya en sentido opuesto, de forma que las baterías absorban potencia.

La figura N° 3.4 muestra la tensión de quince niveles pico a pico que se obtendría a la salida del inversor multinivel en cascada diseñado.

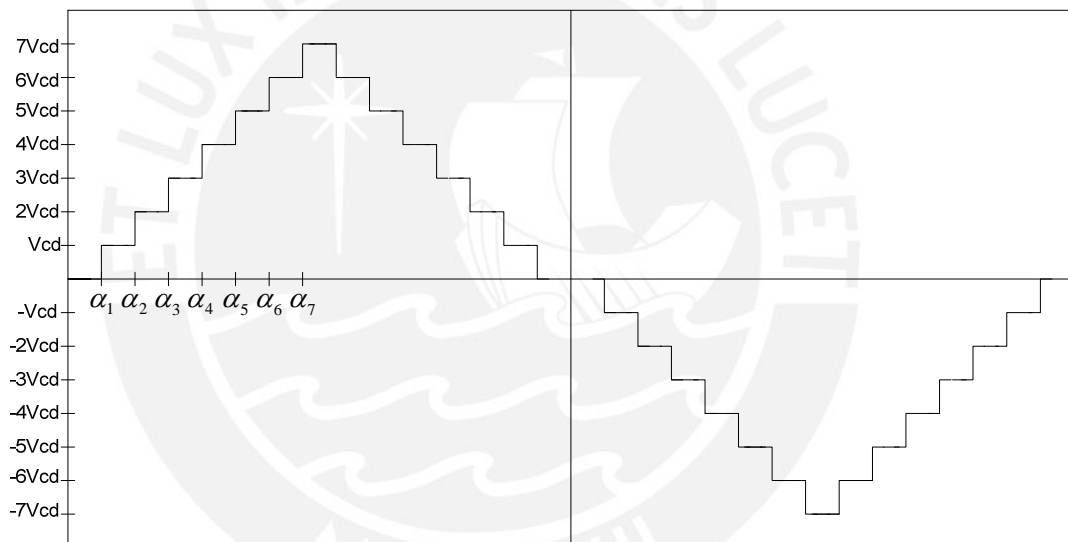


Figura N° 3.4. Tensión generada a la salida del inversor multinivel en cascada

3.1.1. Análisis de Fourier de la tensión multinivel

En estado permanente la tensión de salida del inversor multinivel en cascada ($V_o(t)$) es una función periódica en el tiempo. El teorema de Fourier establece que una función periódica puede representarse a través de una sumatoria infinita de términos seno y coseno de frecuencia " $n\omega$ ", siendo " n " un número entero y " ω " la frecuencia angular de la señal. La tensión a la salida del inversor puede expresarse como:

$$V_o(t) = \frac{a_o}{2} + \sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \text{senn}\omega t) \quad (\text{Fórmula 3.1})$$

Donde:

$$a_o = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} v_o(\omega t) \cdot d(\omega t) \quad (\text{Fórmula 3.2})$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} v_o(\omega t) \cdot \cos n\omega t \cdot d(\omega t) \quad (\text{Fórmula 3.3})$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} v_o(\omega t) \cdot \text{senn}\omega t \cdot d(\omega t) \quad (\text{Fórmula 3.4})$$

La tensión a la salida del inversor multinivel en cascada de la figura N° 3.4 puede descomponerse como la suma de las señales que se muestran en la figura N° 3.5.

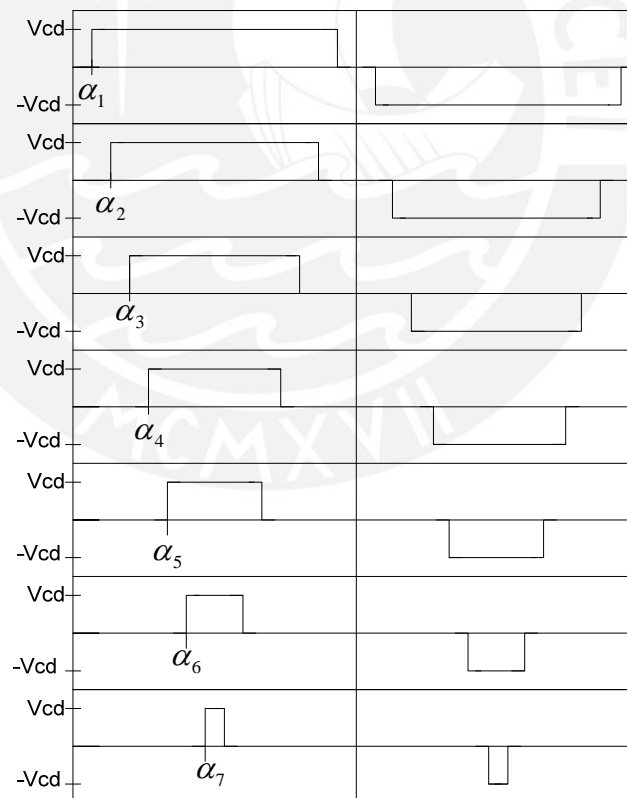


Figura N° 3.5. Señales que componen la tensión multinivel a generar

Al desarrollar la serie de Fourier para una de las señales periódicas de la figura N° 3.5 considerando un α genérico se obtiene:

$$a_o = 0 \quad (\text{Fórmula 3.5})$$

$$a_n = 0 \quad (\text{Fórmula 3.6})$$

$$b_n = \frac{2 \cdot V_{cd}}{\pi \cdot n} \cdot \cos n\alpha \cdot (1 - (-1)^n) \quad (\text{Fórmula 3.7})$$

$$V(t) = \sum_{\substack{n=1,3,5,\dots \\ \text{impares}}}^{\infty} \left[\frac{4V_{cd}}{\pi \cdot n} \cos \alpha \right] \text{sen}(n\omega t) \quad (\text{Fórmula 3.8})$$

Para una señal de “k” niveles pico a pico se tendrá a la salida del inversor multinivel una tensión que puede expresarse como:

$$V_o(t) = \sum_{\substack{n=1,3,5,\dots \\ \text{impares}}}^{\infty} \frac{4V_{cd}}{\pi \cdot n} \left[\sum_{i=1}^{\frac{K-1}{2}} \cos n\alpha_i \right] \text{sen}(n\omega t) \quad (\text{Fórmula 3.9})$$

Donde definimos B_n como la magnitud del n-ésimo armónico.

$$B_n = \frac{4V_{cd}}{\pi \cdot n} \left[\sum_{i=1}^{\frac{K-1}{2}} \cos n\alpha_i \right] \quad (\text{Fórmula 3.10})$$

A partir de la fórmula 3.10 es posible establecer un sistema de ecuaciones trascendentes no lineales cuya resolución permitirá reducir la presencia de “(K-1)/2” armónicas en la tensión de salida del inversor.

Una ecuación es trascendente, si uno de los lados de la ecuación no es una función algebraica. Son ejemplos de estas ecuaciones aquellas que incluyen funciones exponenciales, logarítmicas, trigonométricas e hiperbólicas. Este tipo de ecuaciones sólo pueden resolverse en forma aproximada.

Para una tensión de quince niveles pico a pico como la de la figura N° 3.4 podemos establecer un sistema de ecuaciones trascendentes no lineales que reduzca la magnitud de siete armónicas: la tercera, la quinta, la séptima, la novena, la undécima, la decimotercera y la decimoquinta. Con este objetivo definimos las siguientes ecuaciones:

$$B_3 = \frac{4V_{cd}}{3\pi} [\cos(3\alpha_1) + \cos(3\alpha_2) + \cos(3\alpha_3) + \cos(3\alpha_4) + \cos(3\alpha_5) + \cos(3\alpha_6) + \cos(3\alpha_7)]$$

(Fórmula 3.11)

$$B_5 = \frac{4V_{cd}}{5\pi} [\cos(5\alpha_1) + \cos(5\alpha_2) + \cos(5\alpha_3) + \cos(5\alpha_4) + \cos(5\alpha_5) + \cos(5\alpha_6) + \cos(5\alpha_7)]$$

(Fórmula 3.12)

$$B_7 = \frac{4V_{cd}}{7\pi} [\cos(7\alpha_1) + \cos(7\alpha_2) + \cos(7\alpha_3) + \cos(7\alpha_4) + \cos(7\alpha_5) + \cos(7\alpha_6) + \cos(7\alpha_7)]$$

(Fórmula 3.13)

$$B_9 = \frac{4V_{cd}}{9\pi} [\cos(9\alpha_1) + \cos(9\alpha_2) + \cos(9\alpha_3) + \cos(9\alpha_4) + \cos(9\alpha_5) + \cos(9\alpha_6) + \cos(9\alpha_7)]$$

(Fórmula 3.14)

$$B_{11} = \frac{4V_{cd}}{11\pi} [\cos(11\alpha_1) + \cos(11\alpha_2) + \cos(11\alpha_3) + \cos(11\alpha_4) + \cos(11\alpha_5) + \cos(11\alpha_6) + \cos(11\alpha_7)]$$

(Fórmula 3.15)

$$B_{13} = \frac{4V_{cd}}{13\pi} [\cos(13\alpha_1) + \cos(13\alpha_2) + \cos(13\alpha_3) + \cos(13\alpha_4) + \cos(13\alpha_5) + \cos(13\alpha_6) + \cos(13\alpha_7)]$$

(Fórmula 3.16)

$$B_{15} = \frac{4V_{cd}}{15\pi} [\cos(15\alpha_1) + \cos(15\alpha_2) + \cos(15\alpha_3) + \cos(15\alpha_4) + \cos(15\alpha_5) + \cos(15\alpha_6) + \cos(15\alpha_7)]$$

(Fórmula 3.17)

Para eliminar estas componentes igualamos estos componentes a cero obteniendo el siguiente sistema de ecuaciones trascendentes no lineales:

$$\cos(3\alpha_1) + \cos(3\alpha_2) + \cos(3\alpha_3) + \cos(3\alpha_4) + \cos(3\alpha_5) + \cos(3\alpha_6) + \cos(3\alpha_7) = 0$$

(Fórmula 3.18)

$$\cos(5\alpha_1) + \cos(5\alpha_2) + \cos(5\alpha_3) + \cos(5\alpha_4) + \cos(5\alpha_5) + \cos(5\alpha_6) + \cos(5\alpha_7) = 0$$

(Fórmula 3.19)

$$\cos(7\alpha_1) + \cos(7\alpha_2) + \cos(7\alpha_3) + \cos(7\alpha_4) + \cos(7\alpha_5) + \cos(7\alpha_6) + \cos(7\alpha_7) = 0$$

(Fórmula 3.20)

$$\cos(9\alpha_1) + \cos(9\alpha_2) + \cos(9\alpha_3) + \cos(9\alpha_4) + \cos(9\alpha_5) + \cos(9\alpha_6) + \cos(9\alpha_7) = 0$$

(Fórmula 3.21)

$$\cos(11\alpha_1) + \cos(11\alpha_2) + \cos(11\alpha_3) + \cos(11\alpha_4) + \cos(11\alpha_5) + \cos(11\alpha_6) + \cos(11\alpha_7) = 0$$

(Fórmula 3.22)

$$\cos(13\alpha_1) + \cos(13\alpha_2) + \cos(13\alpha_3) + \cos(13\alpha_4) + \cos(13\alpha_5) + \cos(13\alpha_6) + \cos(13\alpha_7) = 0$$

(Fórmula 3.23)

$$\cos(15\alpha_1) + \cos(15\alpha_2) + \cos(15\alpha_3) + \cos(15\alpha_4) + \cos(15\alpha_5) + \cos(15\alpha_6) + \cos(15\alpha_7) = 0$$

(Fórmula 3.24)

3.1.2. Resolución del sistema de ecuaciones trascendentes no lineales para la reducción de armónicos

Las fórmulas 3.18, 3.19, 3.20, 3.21, 3.22, 3.23 y 3.24 conforman un sistema de ecuaciones trascendentes no lineales de siete incógnitas. Los ángulos “ α_1 ”, “ α_2 ”, “ α_3 ”, “ α_4 ”, “ α_5 ”, “ α_6 ” y “ α_7 ” descritos en estas fórmulas corresponden a los tiempos donde la onda de tensión multinivel cambia de magnitud. La solución del sistema de ecuaciones descrito permitirá determinar los valores de los ángulos que reducen la magnitud de la tercera, quinta, séptima, novena, undécima, decimotercera y decimoquinta armónica.

El software Matlab 7.0 implementa la función “fsolve”, la cual permite resolver un sistema de ecuaciones no lineales de varias variables. Para resolver el sistema, la función “fsolve” requiere que el sistema de ecuaciones se implemente en una función adicional, el anexo N°1 y el anexo N°2 muestran el código de las funciones utilizadas para resolver el sistema de ecuaciones.

Los valores del vector “x0” definidos en el anexo N°1 son escogidos de forma que las raíces del sistema de ecuaciones sean diferentes y se encuentren entre cero y noventa grados.

Luego de la ejecución de la función “fsolve” obtenemos los siguientes valores para “ α_1 ”, “ α_2 ”, “ α_3 ”, “ α_4 ”, “ α_5 ”, “ α_6 ” y “ α_7 ”.

α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7
7.44°	8.48°	21.97°	26.92°	38.73°	47.96°	62.57°

Tabla N° 3.1. Ángulos de conmutación calculados

3.1.3. Diseño del circuito de potencia.

El circuito de potencia está conformado por la conexión en serie de tres puentes H. La figura N° 3.6 muestra el circuito esquemático del inversor multinivel en cascada.

El circuito mostrado está conformado por doce transistores MOSFET de enriquecimiento canal N. Para activar cada transistor se requiere aplicar una tensión positiva de valor adecuado entre la puerta y el surtidor. Cuando un MOSFET está activado la corriente fluye de drenador a surtidor y la tensión entre estos dos terminales es muy pequeña, cuando un MOSFET está desactivado el transistor no permite la conducción de corriente en ese sentido.

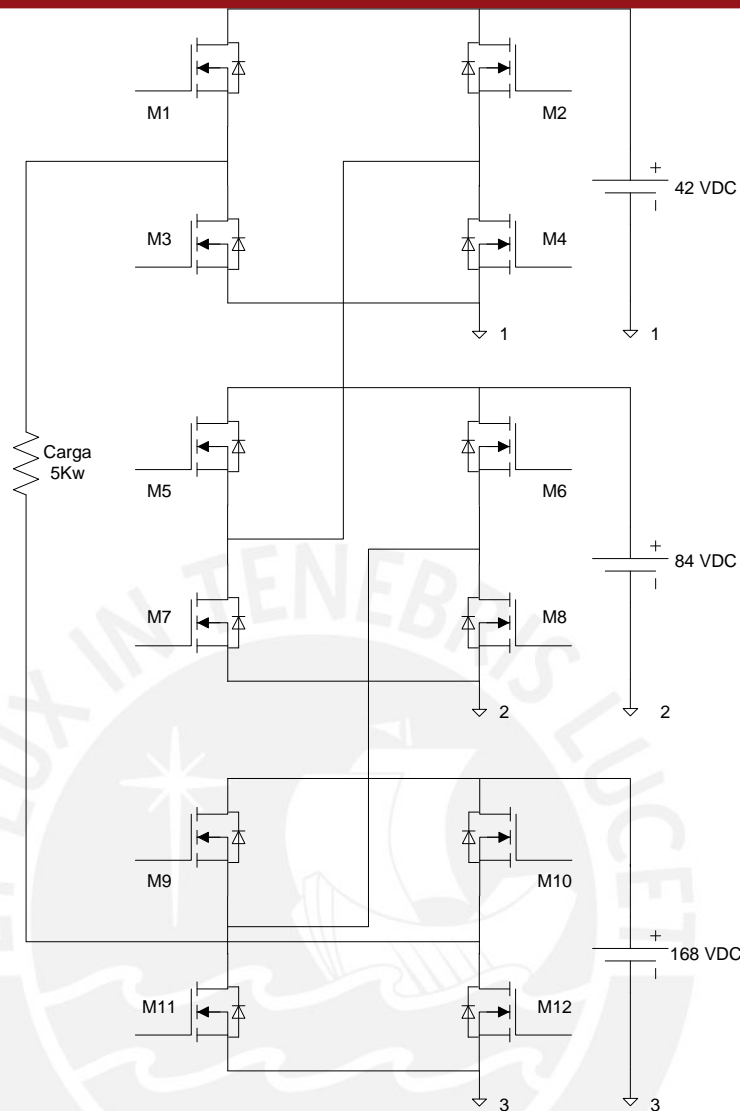


Figura N° 3.6. Circuito esquemático del inversor multinivel en cascada diseñado

Los transistores MOSFET incorporan además en su diseño un diodo, el cual permite la circulación de corriente por el transistor de surtidor a drenador. Esta cualidad permitirá la conducción de corriente cuando la tensión en el puente H sea cero o cuando la corriente se desfase de la tensión en la carga.

Los valores de las fuentes de corriente continua de cada nivel han sido seleccionados para obtener a la salida del inversor una tensión cercana a 220 VRMS que esté dentro de la tolerancia de $\pm 7.5\%$ establecida por la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos Peruana para las zonas rurales. Cada fuente

de corriente continua puede ser reemplazada por arreglos de baterías de 6VDC y 12 VDC conectados en serie.

Los valores de los arreglos escogidos son 42 VDC, 84VDC y 168 VDC, estos valores se encuentran escalados en potencia de dos.

La tabla N° 3.2 muestra los tiempos de conmutación de acuerdo a los ángulos calculados en 3.1.2 para una tensión alterna de 60Hz.

alfa 1	alfa 2	alfa 3	alfa 4	alfa 5	alfa 6	alfa 7
7.44°	8.48°	21.97°	26.92°	38.73°	47.96°	62.57°
0.344 ms	0.393 ms	1.017 ms	1.246 ms	1.793 ms	2.22 ms	2.897 ms

Tabla N° 3.2. Tiempos de conmutación para los ángulos calculados

La tabla N° 3.3 muestra la secuencia de valores de tensión que se generan en cada puente H para un periodo de 16.667 ms. Los valores de “H1“, “H2“ y “H3“ corresponden a los puentes H cuyas tensiones de arreglos de batería son 42VDC, 84VDC y 168 VDC respectivamente, la columna “Salida” muestra la tensión de salida del inversor en cada intervalo de tiempo.

ms	H1	H2	H3	Salida
0.000	0	0	0	0
0.344	42	0	0	42
0.393	0	84	0	84
1.017	42	84	0	126
1.246	0	0	168	168
1.793	42	0	168	210
2.220	0	84	168	252
2.897	42	84	168	294
5.436	0	84	168	252
6.113	42	0	168	210
6.540	0	0	168	168
7.087	42	84	0	126
7.316	0	84	0	84
7.940	42	0	0	42
7.989	0	0	0	0
8.333	0	0	0	0

Tabla N° 3.3. Tensiones generadas por puente H y tensión de salida para un periodo

ms	H1	H2	H3	Salida
8.677	-42	0	0	-42
8.726	0	-84	0	-84
9.350	-42	-84	0	-126
9.579	0	0	-168	-168
10.130	-42	0	-168	-210
10.550	0	-84	-168	-252
11.230	-42	-84	-168	-294
13.770	0	-84	-168	-252
14.450	-42	0	-168	-210
14.870	0	0	-168	-168
15.420	-42	-84	0	-126
15.650	0	-84	0	-84
16.270	-42	0	0	-42
16.320	0	0	0	0

Tabla N° 3.3. Tensiones generadas por puente H y tensión de salida para un periodo (*continuación*)

La tabla N° 3.4 muestra los intervalos de tiempo donde es activado cada transistor para un periodo de de 16.667 ms.

ms	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
0.000	-	-	ON	ON	-	-	ON	ON	-	-	ON	ON
0.344	ON	-	-	ON	-	-	ON	ON	-	-	ON	ON
0.393	-	-	ON	ON	ON	-	-	ON	-	-	ON	ON
1.017	ON	-	-	ON	ON	-	-	ON	-	-	ON	ON
1.246	-	-	ON	ON	-	-	ON	ON	ON	-	-	ON
1.793	ON	-	-	ON	-	-	ON	ON	ON	-	-	ON
2.220	-	-	ON	ON	ON	-	-	ON	ON	-	-	ON
2.897	ON	-	-	ON	ON	-	-	ON	ON	-	-	ON
5.436	-	-	ON	ON	ON	-	-	ON	ON	-	-	ON
6.113	ON	-	-	ON	-	-	ON	ON	ON	-	-	ON
6.540	-	-	ON	ON	-	-	ON	ON	ON	-	-	ON
7.087	ON	-	-	ON	ON	-	-	ON	-	-	ON	ON
7.316	-	-	ON	ON	ON	-	-	ON	-	-	ON	ON
7.940	ON	-	-	ON	-	-	ON	ON	-	-	ON	ON
7.989	-	-	ON	ON	-	-	ON	ON	-	-	ON	ON
8.333	-	-	ON	ON	-	-	ON	ON	-	-	ON	ON
8.677	-	ON	ON	-	-	-	ON	ON	-	-	ON	ON
8.726	-	-	ON	ON	-	ON	ON	-	-	-	ON	ON
9.350	-	ON	ON	-	-	ON	ON	-	-	-	ON	ON
9.579	-	-	ON	ON	-	-	ON	ON	-	ON	ON	-
10.130	-	ON	ON	-	-	-	ON	ON	-	ON	ON	-
10.550	-	-	ON	ON	-	ON	ON	-	-	ON	ON	-
11.230	-	ON	ON	-	-	ON	ON	-	-	ON	ON	-
13.770	-	-	ON	ON	-	ON	ON	-	-	ON	ON	-
14.450	-	ON	ON	-	-	-	ON	ON	-	ON	ON	-

Tabla N° 3.4. Activación de los transistores para un periodo de la tensión generada

ms	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12
14.870	-	-	ON	ON	-	-	ON	ON	-	ON	ON	-
15.420	-	ON	ON	-	-	ON	ON	-	-	-	ON	ON
15.650	-	-	ON	ON	-	ON	ON	-	-	-	ON	ON
16.270	-	ON	ON	-	-	-	ON	ON	-	-	ON	ON
16.320	-	-	ON	ON	-	-	ON	ON	-	-	ON	ON

Tabla N° 3.4. Activación de los transistores para un periodo de la tensión generada
(continuación)

3.1.4. Diseño del circuito de control

La figura N° 3.7 muestra el circuito esquemático de un circuito excitador de compuerta o driver que permite controlar la activación de cada MOSFET y aislar eléctricamente al microcontrolador de cada transistor. En total, el inversor diseñado requiere de doce circuitos excitadores de compuerta diferentes, uno para cada transistor.

El circuito excitador de compuerta está conformado por un optoacoplador, una pila alcalina de 12 voltios y dos resistencias. Cada driver está conectado a un pin de salida del microcontrolador, los niveles de tensión utilizados en la parte de control serán los niveles de tensión TTL. Cuando el microcontrolador entregue al driver un nivel de tensión en alta el optoacoplador se saturará permitiendo que la tensión de la pila pase a la resistencia de 4.7K ohm y active al transistor.

Tanto los MOSFET como los optoacopladores no conmutan instantáneamente, ambos poseen tiempos de activación y desactivación que determinan una pendiente entre un nivel de conducción y un nivel de bloqueo. En los optoacopladores esta pendiente permite proteger a los MOSFET ante variaciones rápidas de tensión (dv/dt).

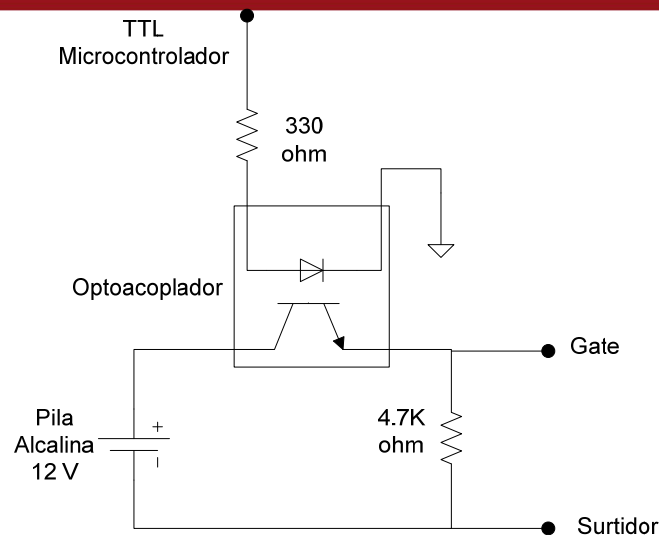


Figura N° 3.7. Circuito excitador de compuerta

En el puente H de la figura N° 3.1, si los transistores "M1" y "M3" o "M2" y "M4" se encuentran activados simultáneamente se generará un cortocircuito. A fin de evitar esto, es conveniente desactivar primero el transistor que se encontraba conduciendo y luego iniciar la activación del otro, por ello se debe buscar que el tiempo de desactivación de los optoacopladores sea menor o igual que el tiempo de activación.

El optoacoplador seleccionado es el "4N25" el cual posee un tiempo de activación y desactivación típico de 2 us.

La lógica que siga el programa de control determinará el número de ciclos de reloj que dure la ejecución del programa y la velocidad del microcontrolador determinará el tiempo que dure su ejecución.

El microcontrolador a utilizar en el diseño es el ATmega8L, el cual operará utilizando su oscilador interno a la velocidad de 8 MHz. La figura N° 3.8 muestra la configuración del ATmega8L para su funcionamiento.

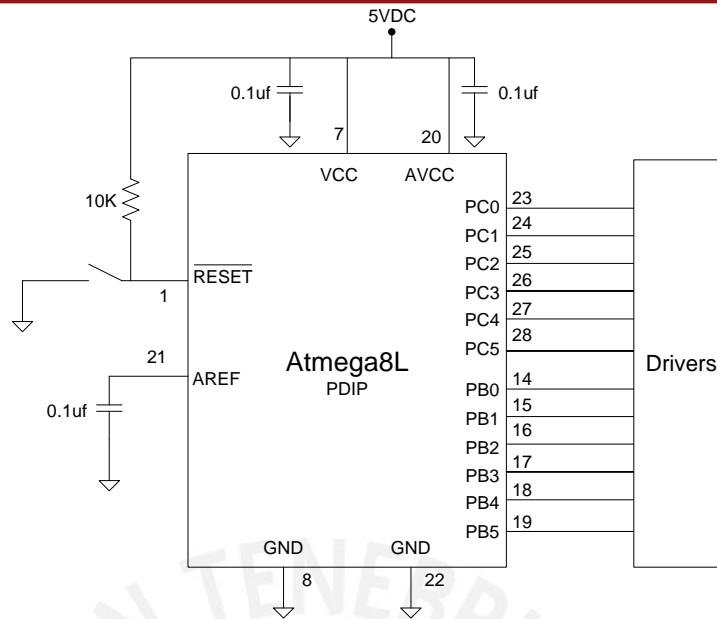


Figura N° 3.8. Configuración de ATmega8L para su funcionamiento

La tabla N° 3.5 muestra la relación entre los bits de cada puerto del ATmega8L y las señales de control para cada transistor MOSFET.

Puerto C						Puerto B					
Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1
M12	M11	M10	M9	M8	M7	M6	M5	M4	M3	M2	M1

Tabla N° 3.5. Relación entre bits de los puertos del ATmega8L y señales de control para la activación de los transistores

La figura N° 3.9 muestra el diagrama de flujo del programa principal y la figura N° 3.10 muestra el diagrama de flujo de la subrutina de interrupción. El anexo N° 3 muestra el código “assembler” de la programación en el ATmega8L.

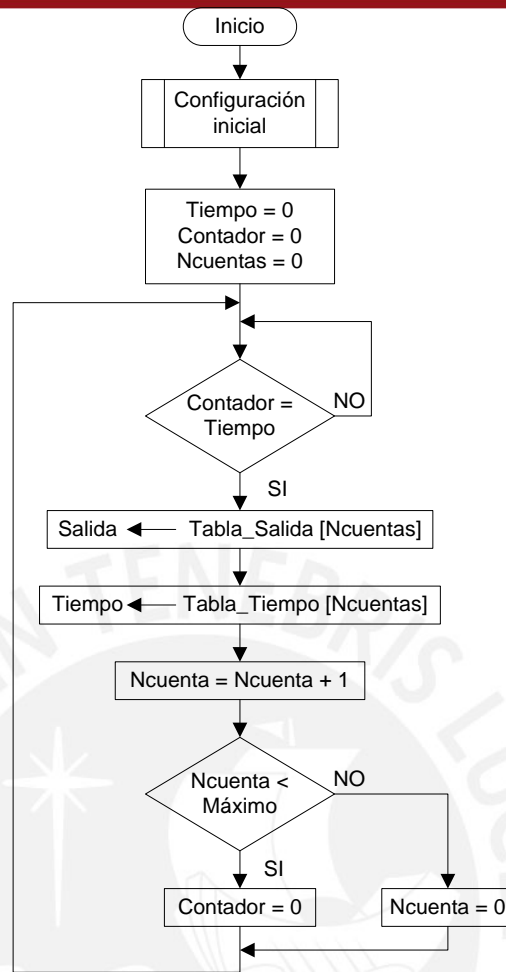


Figura N° 3.9. Diagrama de flujo del programa principal de control

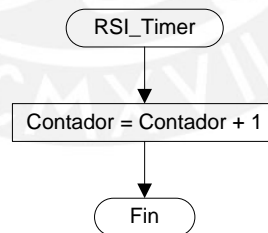


Figura N° 3.10. Diagrama de flujo de la subrutina de interrupción

Las variables del programa principal son las siguientes:

- Contador: variable que cuenta el tiempo transcurrido en intervalos de diez microsegundos.
- Tiempo: variable que indica el valor del tiempo en microsegundos en que la salida mantiene su valor.

- Ncuentas: puntero que indica la fila de la tabla a extraer.
- Salida: valores que toma los bits de salida del microcontrolador.
- Tabla_Salida []: Tabla de 16 bits por fila que contiene los valores de los 12 bits de salida del microcontrolador.
- Tabla_Tiempo []: Tabla de 16 bits por fila que contiene los valores que toma la variable tiempo.
- Máximo: constante que indica el número de intervalos de tiempo en un ciclo.

La subrutina de interrupción se ejecuta cada 10us incrementando el valor de la variable “contador”, cuando esta alcanza al valor de la variable “tiempo”, el valor de la variable “salida” cambia. Luego se carga el siguiente valor de la variable “tiempo” a alcanzar y se incrementa el puntero. Cuando el puntero alcanza el valor de la constante “máximo” esta se reinicia y se repite el ciclo. El desarrollo del código del programa se realizó con la ayuda del software AVR Studio 4.

La tabla N° 3.4 muestra los tiempos de conmutación con una precisión de tres decimales, esta precisión requiere que el procesador cuente en pasos de 1us. Las simulaciones desarrolladas en el AVR Studio 4 muestran que para una frecuencia de 8 MHz la ejecución de solo la subrutina de interrupción dura alrededor de 3us. Por ello se escogió el valor de 10us como paso mínimo para la cuenta del tiempo, esto implica que los valores de la tabla N° 3.4 deben redondearse a dos decimales.

La columna tiempo de la tabla N° 3.6 muestra los valores de tiempo en microsegundos durante los cuales la salida se mantendrá de acuerdo a los valores establecidos para cada bit de los puertos B y C del microcontrolador. Esta tabla es la que se ha implementado en el programa del anexo N° 3.

Tiempo	Puerto C						Puerto B					
	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1
340	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
50	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1
630	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0
230	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1
540	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0
430	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1
680	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0
2540	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1
670	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0
430	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1
550	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0
230	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1
620	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	0
50	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1
340	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
350	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
50	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0
620	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0
230	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0
550	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0
420	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0
680	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0
2540	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0
680	0	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0
420	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0
550	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0
230	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0
620	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0
50	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0
350	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0

Tabla N° 3.6. Tiempo Vs. Salida por puerto

3.2. Simulación del diseño propuesto.

Para la simulación del diseño propuesto se ha seleccionado el software Matlab 7.0 debido a las variadas herramientas de análisis y simulación que ofrece a través de la librería SimPowerSystems de Simulink.

3.2.1. Simulación de la señal de tensión multinivel.

A partir de los ángulos calculados en la sección 3.1.2 se simulará la tensión de salida del inversor multinivel en cascada para tres periodos y con una precisión de

dos decimales para los tiempos de conmutación. En la figura N° 3.11 se muestra el diagrama de simulación realizado en Simulink.

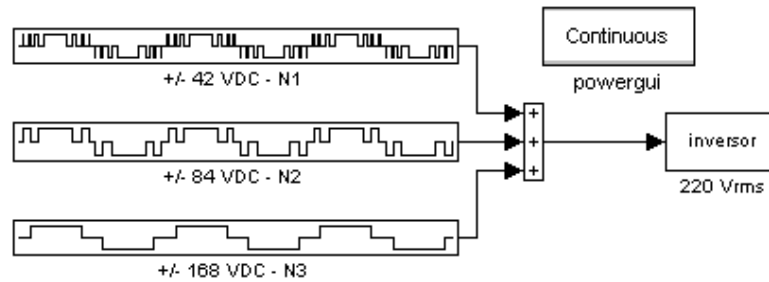


Figura N° 3.11. Diagrama de bloques en Simulink para simular la tensión de salida del inversor multinivel en cascada

La figura N° 3.12 muestra la tensión de salida del inversor y la figura N° 3.13 su transformada de Fourier hasta los 2400 Hz (40° cuadragésima armónica).

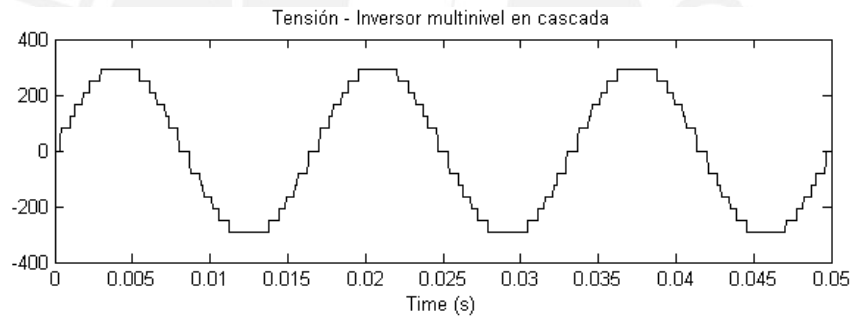


Figura N° 3.12. Simulación de la tensión de salida del inversor multinivel en cascada

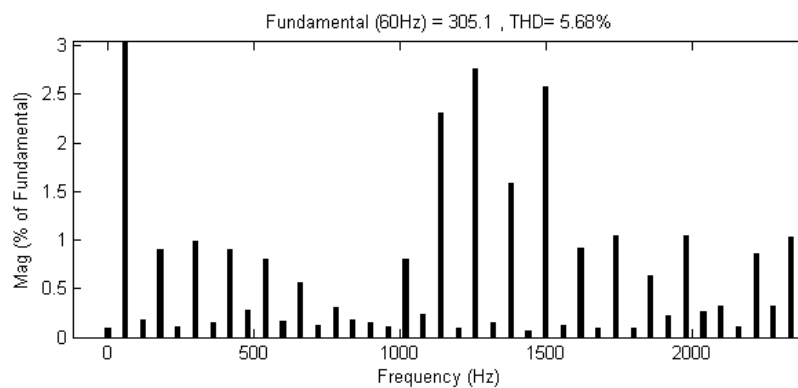


Figura N° 3.13. Transformada de Fourier de la tensión de salida del inversor multinivel en cascada

A través de la simulación realizada se obtiene que el valor de la tensión eficaz para la armónica fundamental es de 215.7 VRMS y el factor de distorsión armónica total THD es de 5.68 %, valores que están dentro de las tolerancias establecidas por la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos Peruana.

La tabla N° 3.7 muestra una comparación para cada armónico entre el indicador de calidad de energía HF_n obtenido a través de la simulación y el establecido por la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos Peruana.

Aquí se muestra que la tercera, quinta, séptima, novena, undécima, decimotercera y decimoquinta armónica tienen valores reducidos y por debajo de las tolerancias indicadas en la norma.

Para las armónicas 18, 19, 21, 23, 25, 27, 29, 31, 32, 33, 34, 37, 38 y 39 la simulación muestra que se supera ligeramente las tolerancias establecidas por la norma pero en todos los casos se mantiene por debajo del 3 %.

Orden armónica	HF _n (%) según norma	HF _n (%) Simulación	Diferencia
2	2.00	0.17	1.83
3	5.00	0.90	4.10
4	1.00	0.11	0.89
5	6.00	0.99	5.01
6	0.50	0.15	0.35
7	5.00	0.90	4.10
8	0.50	0.28	0.22
9	1.50	0.80	0.70
10	0.50	0.16	0.34
11	3.50	0.56	2.94
12	0.20	0.12	0.08

Tabla N° 3.7. Comparación entre el indicador de calidad de energía HF_n obtenido a través de la simulación y el establecido por la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos Peruana

Orden armónica	HF _n (%) según norma	HF _n (%) Simulación	Diferencia
13	3.00	0.30	2.70
14	0.20	0.18	0.02
15	0.30	0.16	0.14
16	0.20	0.11	0.09
17	2.00	0.80	1.20
18	0.20	0.23	-0.03
19	1.50	2.30	-0.80
20	0.20	0.09	0.11
21	0.20	2.76	-2.56
22	0.20	0.15	0.05
23	1.50	1.58	-0.08
24	0.20	0.06	0.14
25	1.50	2.58	-1.08
26	0.20	0.12	0.08
27	0.20	0.92	-0.72
28	0.20	0.09	0.11
29	0.63	1.04	-0.41
30	0.20	0.09	0.11
31	0.60	0.63	-0.03
32	0.20	0.23	-0.03
33	0.20	1.04	-0.84
34	0.20	0.26	-0.06
35	0.56	0.31	0.25
36	0.20	0.11	0.09
37	0.54	0.86	-0.32
38	0.20	0.33	-0.13
39	0.20	1.03	-0.83
40	0.20	0.08	0.12

Tabla N° 3.7. Comparación entre el indicador de calidad de energía HF_n obtenido a través de la simulación y el establecido por la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos Peruana (*continuación*)

3.2.2. Simulación del circuito del inversor multinivel

La simulación del circuito del inversor diseñado se realizó para tres periodos y con diferentes cargas. En la figura N° 3.14 se muestra el diagrama de simulación realizado en Simulink con las herramientas que ofrece la librería SimPowerSystems.

Debido a la complejidad del diagrama de simulación, cuando se evalúa la respuesta del sistema para una carga completamente resistiva, el software de simulación

requiere de un mayor tiempo de procesamiento y de una mayor capacidad de memoria. Cuando el software de simulación agota los recursos de la computadora el programa se bloquea y la simulación no llega a completarse. Por ello se colocará una pequeña carga inductiva en serie con la carga resistiva, lo cual permitirá reducir el tiempo de simulación y mantener el factor de potencia cercano a la unidad.

La figura N° 3.15 muestra la tensión de salida del inversor multinivel en cascada para una carga que consume una potencia activa de 4.999 KW y una potencia reactiva de 100 VAR a 220 VRMS y a 60Hz con un factor de potencia de uno.

La figura N° 3.16 corresponde a la transformada de Fourier de la tensión de la figura 3.15.

La tabla N° 3.8 muestra una comparación entre el indicador HF_n obtenido por simulación para una carga de 5 KW y el establecido por la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos Peruana. La simulación muestra que el valor de la tensión eficaz para la armónica fundamental es de 209.2 VRMS y el factor de distorsión armónica total THD es de 5.67 %, valores que están dentro de las tolerancias establecidas por la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos Peruana.

La figura N° 3.17 muestra la corriente en la carga, la cual alcanza un valor de 21,61 amperios eficaces reales y las figuras N° 3.18, N° 3.19 y N° 3.20 muestran la corriente en cada arreglo de batería para una carga de 5 KW.

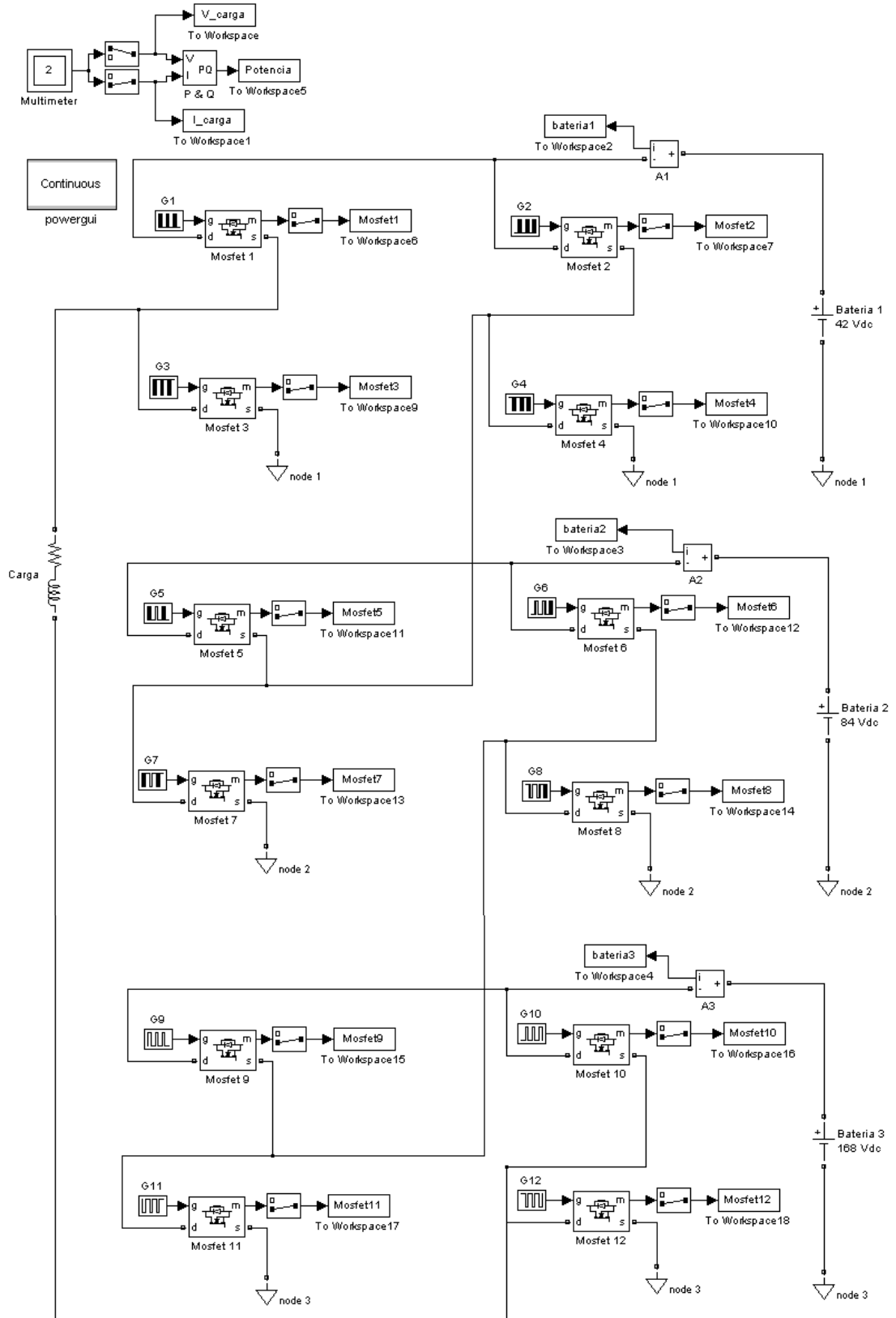


Figura N° 3.14. Diagrama de simulación del inversor multinivel en cascada

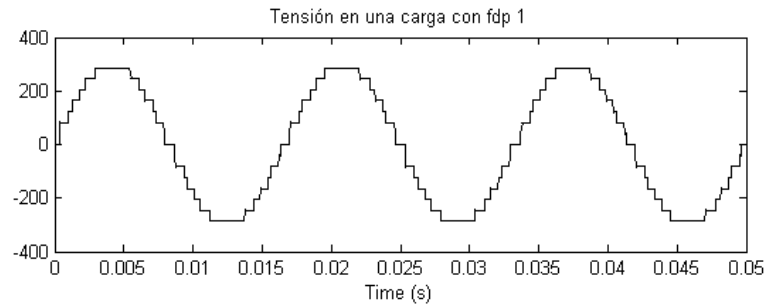


Figura N° 3.15. Tensión generada en una carga de 5KW

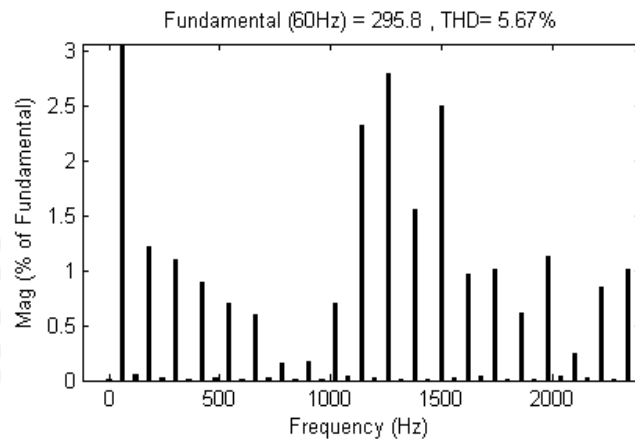


Figura N° 3.16. Transformada de Fourier de la tensión generada en una carga de 5KW

Orden armónica	HF _n (%) según norma	HF _n (%) Simulación	Diferencia
2	2.00	0.05	1.95
3	5.00	1.21	3.79
4	1.00	0.02	0.98
5	6.00	1.09	4.91
6	0.50	0.01	0.49
7	5.00	0.89	4.11
8	0.50	0.02	0.48
9	1.50	0.7	0.80
10	0.50	0.01	0.49
11	3.50	0.6	2.90
12	0.20	0.02	0.18
13	3.00	0.16	2.84
14	0.20	0.01	0.19
15	0.30	0.17	0.13
16	0.20	0.01	0.19
17	2.00	0.7	1.30

Tabla N° 3.8. Comparación entre el indicador HF_n para una carga de 5 KW y el establecido por la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos Peruana

Orden armónica	HF _n (%) según norma	HF _n (%) Simulación	Diferencia
18	0.20	0.03	0.17
19	1.50	2.32	-0.82
20	0.20	0.02	0.18
21	0.20	2.79	-2.59
22	0.20	0	0.20
23	1.50	1.55	-0.05
24	0.20	0	0.20
25	1.50	2.5	-1.00
26	0.20	0.03	0.17
27	0.20	0.97	-0.77
28	0.20	0.03	0.17
29	0.63	1.02	-0.39
30	0.20	0	0.20
31	0.60	0.61	-0.01
32	0.20	0.01	0.19
33	0.20	1.13	-0.93
34	0.20	0.03	0.17
35	0.56	0.25	0.31
36	0.20	0.02	0.18
37	0.54	0.85	-0.31
38	0.20	0.01	0.19
39	0.20	1.02	-0.82
40	0.20	0.01	0.19

Tabla N° 3.8. Comparación entre el indicador HF_n para una carga de 5 KW y el establecido por la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos Peruana (continuación)

En la tabla N° 3.8 se observa que para las armónicas 19, 21, 23, 25, 27, 29, 31, 33, 37 y 39 el indicador de calidad de energía HF_n supera ligeramente las tolerancias establecidas por la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos Peruana, pero en todos los casos se mantiene por debajo del 3 %.

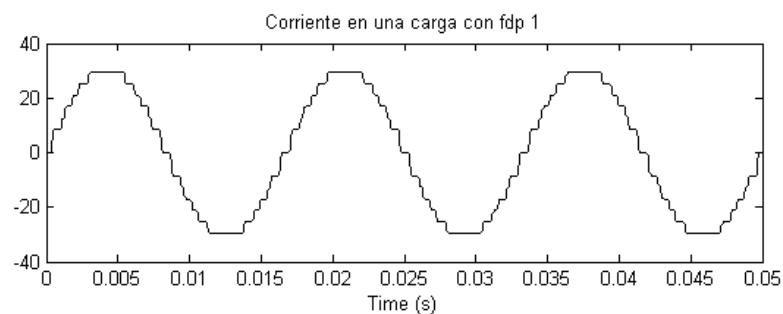


Figura N° 3.17. Corriente en una carga de 5KW

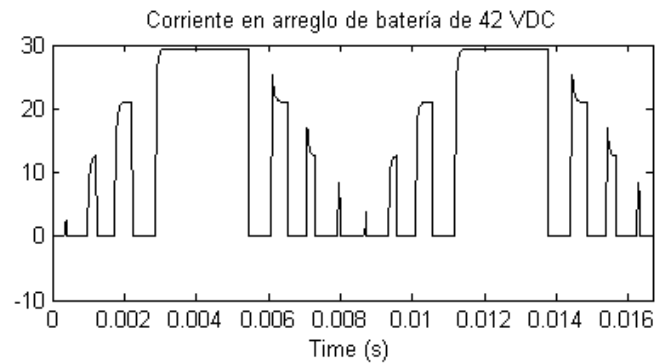


Figura N° 3.18. Corriente en batería de 42 VDC para una carga de 5KW

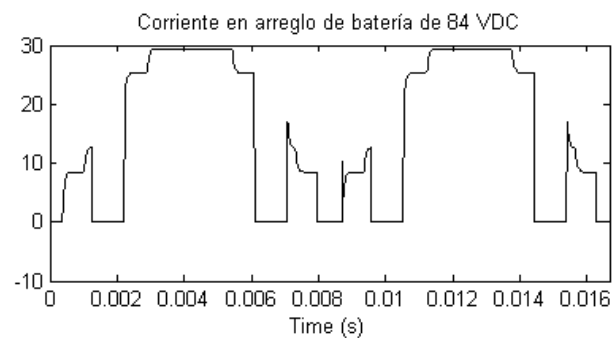


Figura N° 3.19. Corriente en batería de 84 VDC para una carga de 5KW

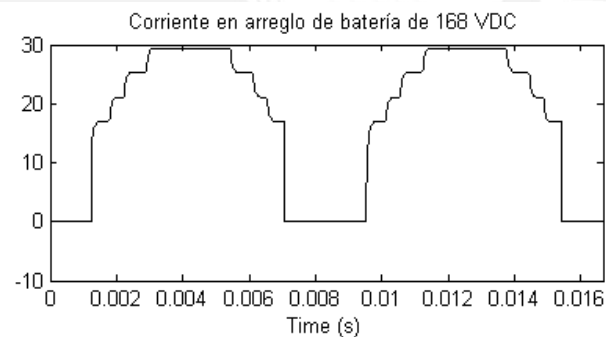


Figura N° 3.20. Corriente en batería de 168 VDC para una carga de 5KW

De las figuras N° 3.18, N° 3.19 y N° 3.20 se observa que a lo largo del periodo las baterías nunca absorben potencia solo la entregan a la carga, esto se debe a que las baterías de cada puente H han sido escaladas en potencia de dos (42 VDC, 84 VDC y 168 VDC).

Las figuras N° 3.21, N° 3.22 y N° 3.23 muestran las tensiones de los MOSFET para una carga de 5 KW y las figuras N° 3.24, N° 3.25 y N° 3.26 muestran las corrientes en los MOSFET para la misma carga.

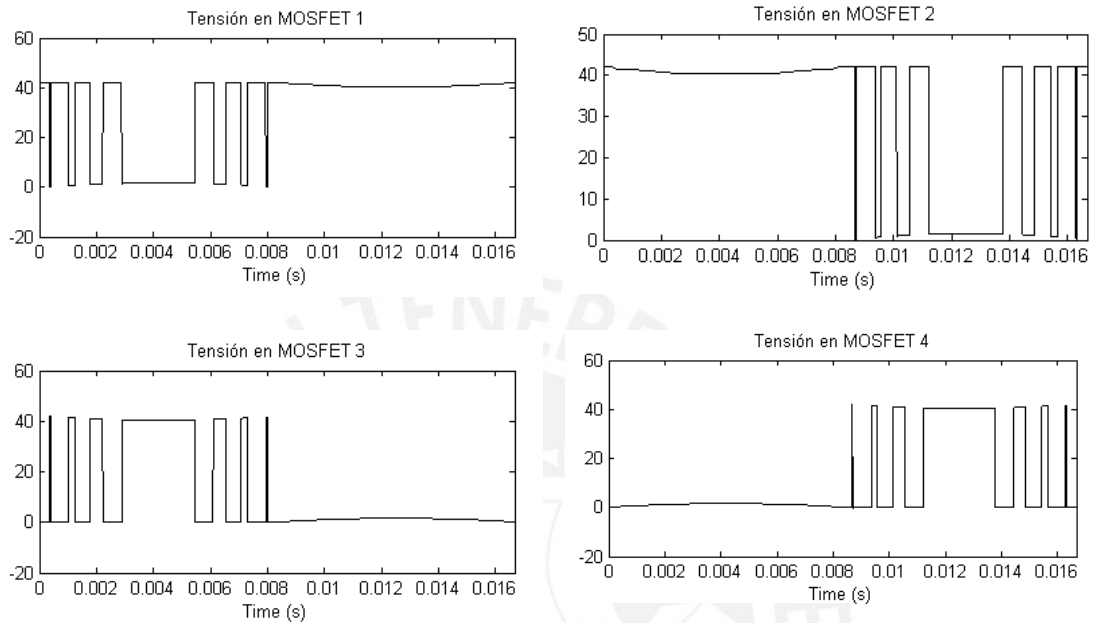


Figura N° 3.21. Tensiones en los MOSFET del puente H de 42 VDC

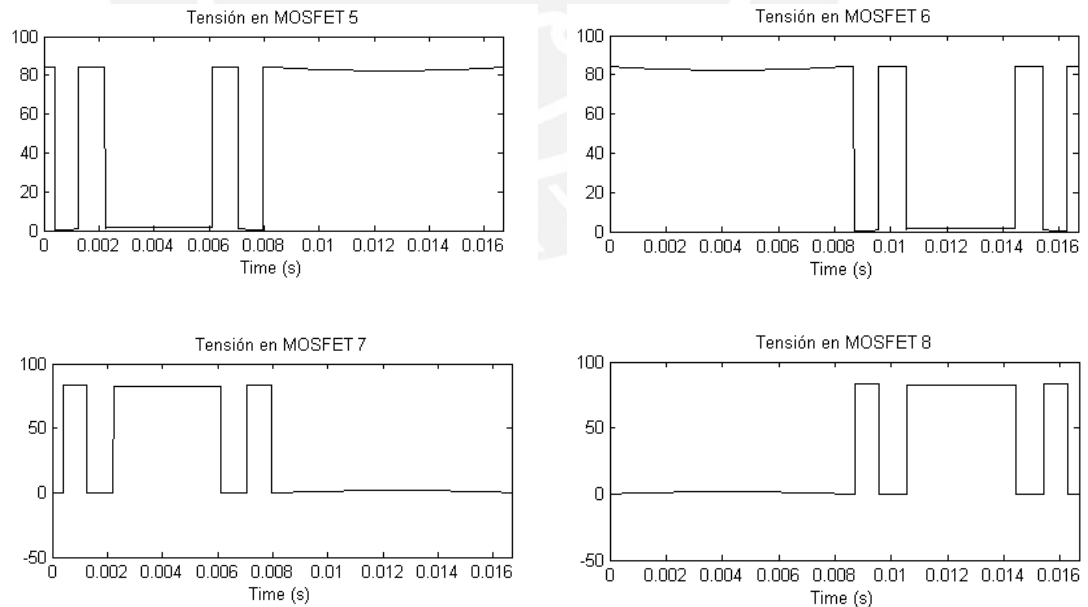


Figura N° 3.22. Tensiones en los MOSFET del puente H de 84 VDC

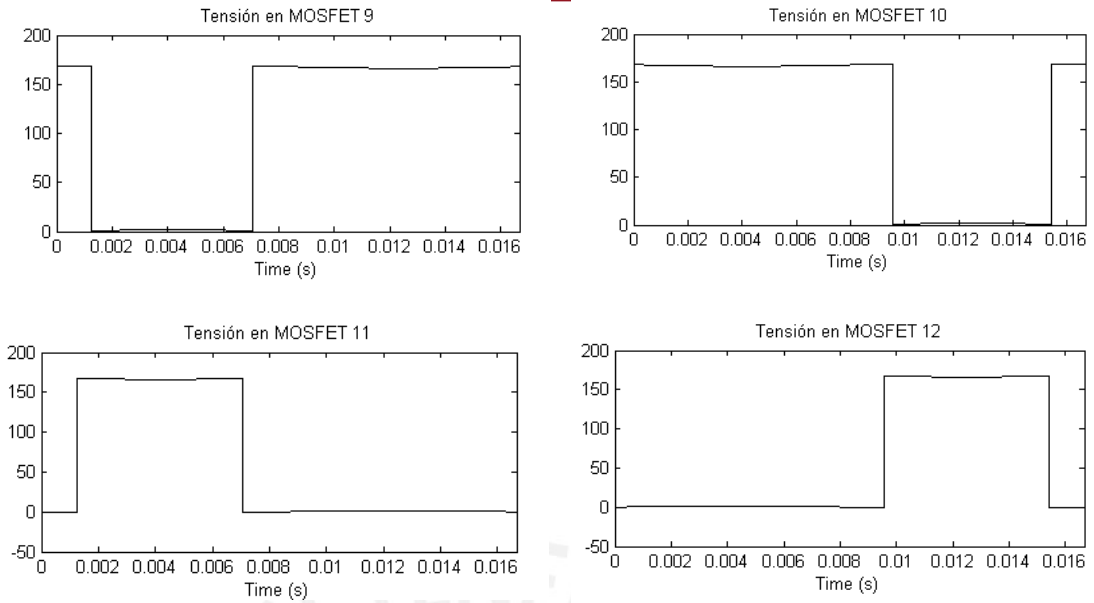


Figura N° 3.23. Tensiones en los MOSFET del puente H de 168 VDC

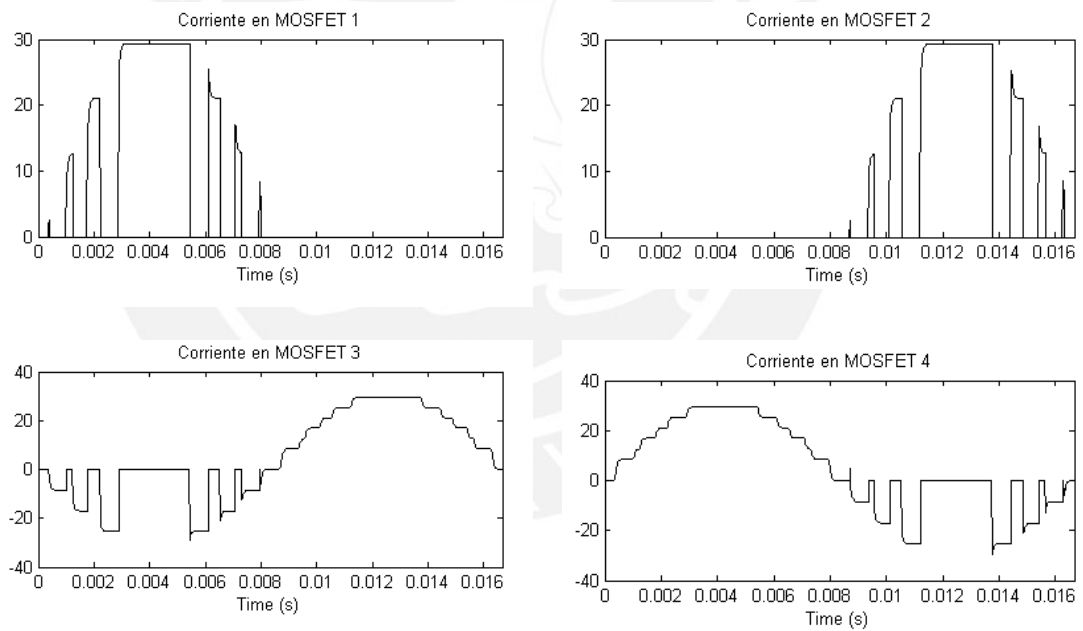


Figura N° 3.24. Corrientes en los MOSFET del puente H de 42 VDC

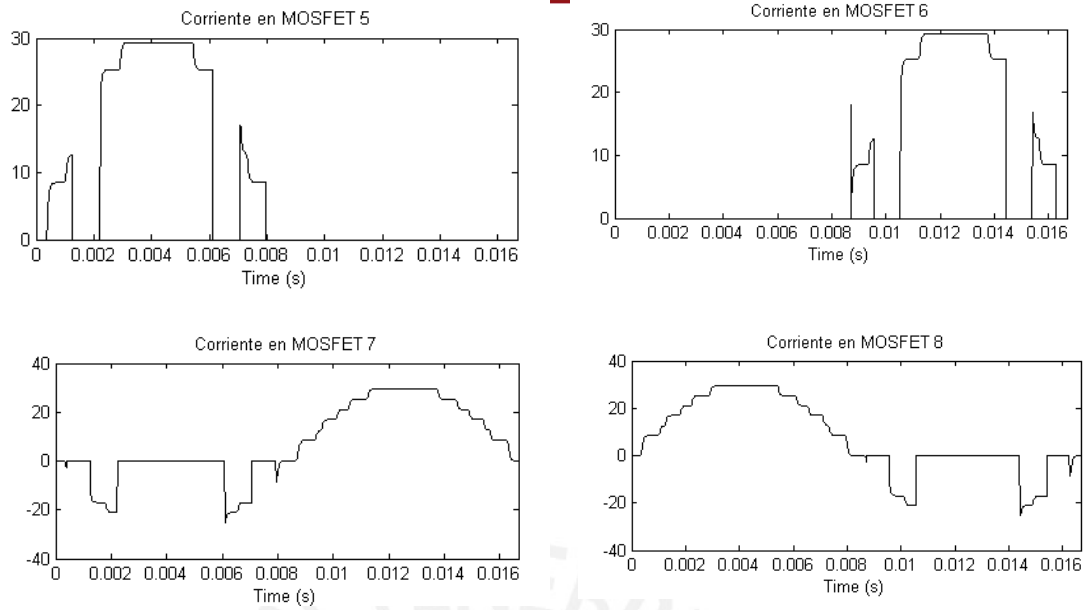


Figura N° 3.25. Corrientes en los MOSFET del puente H de 84 VDC

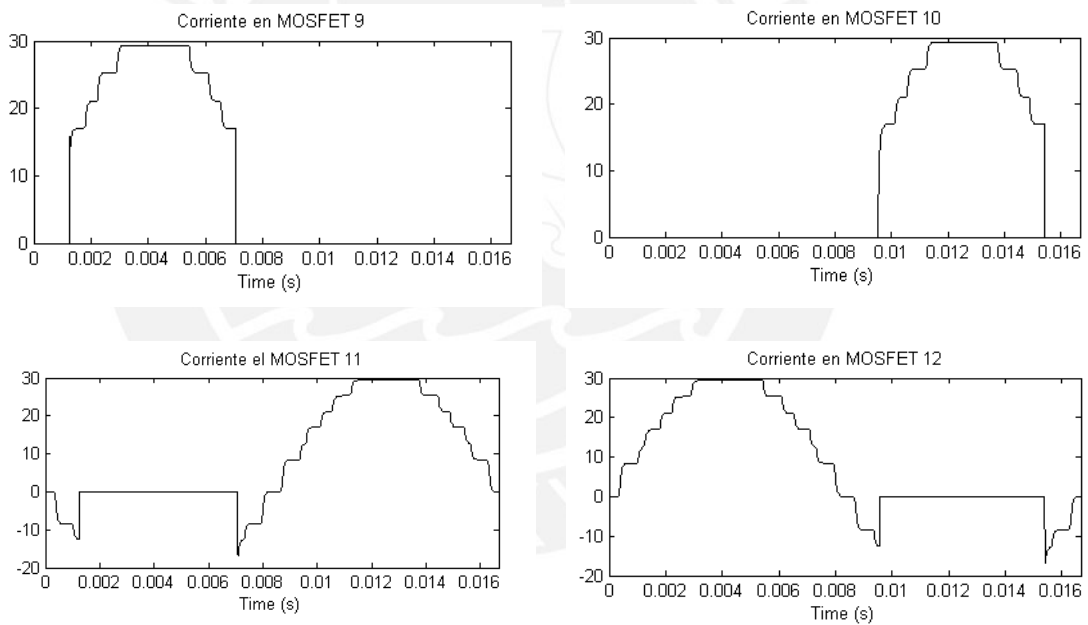


Figura N° 3.26. Corrientes en los MOSFET del puente H de 168 VDC

Los MOSFET 3, 4, 7, 8, 11 y 12 conducen la corriente en ambos sentidos, por ello los diodos internos de estos MOSFET deben soportar las ondas de corriente mostradas.

La figura N° 3.27, muestra la tensión de salida del inversor para una carga que consume una potencia activa de 499.9 W y una potencia reactiva de 10 VAR a 220 Vrms y a 60 Hz, con un factor de potencia de uno. La simulación muestra que el valor de la tensión eficaz de la armónica fundamental para esta carga es de 215.1 VRMS y el factor de distorsión armónica total (*THD*) es de 5.59 %, valores que varían respecto a los hallados para una carga de 5 KW pero se mantienen dentro de las tolerancias establecidas por la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos Peruana.

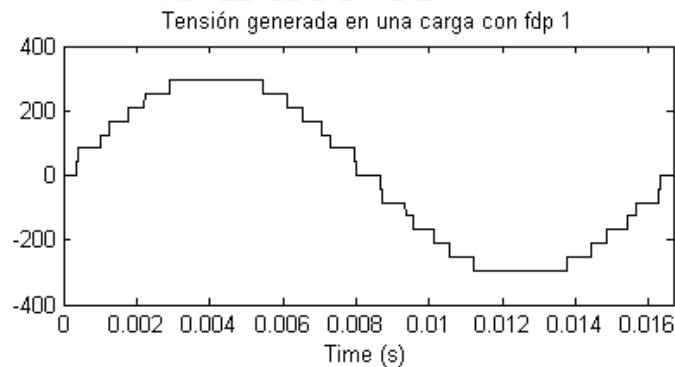


Figura N° 3.27. Tensión en Tensión generada en una carga de 500 W

La tabla N° 3.9 muestra la comparación entre el indicador HF_n para la carga de 500 W, en ella se observa que para las armónicas 19, 21, 23, 25, 27, 29, 31, 33, 37 y 39 el indicador HF_n supera ligeramente las tolerancias establecidas por la norma, pero en todos los casos se sigue manteniendo por debajo del 3 %.

Orden armónica	HF _n (%) según norma	HF _n (%) Simulación	Diferencia
2	2.00	0.05	1.95
3	5.00	0.91	4.09
4	1.00	0.02	0.98
5	6.00	1.06	4.94
6	0.50	0.02	0.48
7	5.00	0.92	4.08

Tabla N° 3.9. Comparación entre el indicador HF_n para una carga de 500 W y el establecido por la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos Peruana

Orden armónica	HF _n (%) según norma	HF _n (%) Simulación	Diferencia
8	0.50	0.02	0.48
9	1.50	0.74	0.76
10	0.50	0.01	0.49
11	3.50	0.63	2.87
12	0.20	0.02	0.18
13	3.00	0.2	2.80
14	0.20	0.02	0.18
15	0.30	0.12	0.18
16	0.20	0.01	0.19
17	2.00	0.77	1.23
18	0.20	0.04	0.16
19	1.50	2.28	-0.78
20	0.20	0.02	0.18
21	0.20	2.77	-2.57
22	0.20	0.01	0.19
23	1.50	1.53	-0.03
24	0.20	0.01	0.19
25	1.50	2.51	-1.01
26	0.20	0.03	0.17
27	0.20	0.97	-0.77
28	0.20	0.04	0.16
29	0.63	1.03	-0.40
30	0.20	0	0.20
31	0.60	0.61	-0.01
32	0.20	0.02	0.18
33	0.20	1.11	-0.91
34	0.20	0.04	0.16
35	0.56	0.28	0.28
36	0.20	0.03	0.17
37	0.54	0.84	-0.30
38	0.20	0.02	0.18
39	0.20	0.99	-0.79
40	0.20	0.01	0.19

Tabla N° 3.9. Comparación entre el indicador HF_n para una carga de 500 W y el establecido por la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos Peruana (continuación)

La corriente en la carga de 500 W alcanza el valor de 2,22 amperios eficaces reales. Esta corriente, mantiene también la forma de onda de la corriente en la carga de 5 KW.

Las corrientes en las baterías también mantienen la forma de onda respecto a las corrientes mostradas para la carga de 5 KW y tienen un valor máximo de 3 amperios.

Con el objetivo de analizar el comportamiento del inversor diseñado cuando alimenta cargas inductivas se realizará una simulación para una carga que consume una potencia activa de 4 KW y una potencia reactiva de 3 KVAR a 220 VRMS y a 60Hz, con un factor de potencia (fdp) de 0.8. La figura N° 3.28 muestra la tensión en la carga.

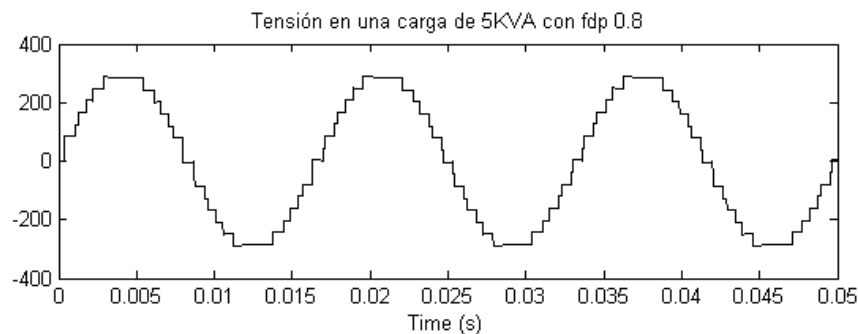


Figura N° 3.28. Tensión generada en una carga de 5KVA con fdp de 0.8

La simulación muestra que para esta carga, el valor de la tensión eficaz de la armónica fundamental es de 210 VRMS y el factor de distorsión armónica total (*THD*) es de 5.77 %, valores que se mantienen dentro de las tolerancias establecida por la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos Peruana.

La tabla N° 3.10 muestra la comparación entre el indicador HF_n para la carga de 5 KVA con un fdp 0.8, en ella se observa que para las armónicas 19, 21, 23, 25, 27, 29, 33, 37 y 39 el indicador HF_n supera ligeramente las tolerancias establecidas por la norma, pero en todos los casos se sigue manteniendo por debajo del 3 %.

Orden armónica	HF _n (%) según norma	HF _n (%) Simulación	Diferencia
2	2.00	0.24	1.76
3	5.00	1.04	3.96
4	1.00	0.09	0.91
5	6.00	1.25	4.75
6	0.50	0.02	0.48
7	5.00	0.82	4.18
8	0.50	0.05	0.45
9	1.50	0.8	0.70
10	0.50	0.05	0.45
11	3.50	0.59	2.91
12	0.20	0.04	0.16
13	3.00	0.19	2.81
14	0.20	0.03	0.17
15	0.30	0.13	0.17
16	0.20	0.05	0.15
17	2.00	0.69	1.31
18	0.20	0.08	0.12
19	1.50	2.39	-0.89
20	0.20	0.05	0.15
21	0.20	2.84	-2.64
22	0.20	0.01	0.19
23	1.50	1.57	-0.07
24	0.20	0.02	0.18
25	1.50	2.54	-1.04
26	0.20	0.03	0.17
27	0.20	0.97	-0.77
28	0.20	0.03	0.17
29	0.63	1.06	-0.43
30	0.20	0.05	0.15
31	0.60	0.6	0.00
32	0.20	0.03	0.17
33	0.20	1.14	-0.94
34	0.20	0.05	0.15
35	0.56	0.26	0.30
36	0.20	0.06	0.14
37	0.54	0.86	-0.32
38	0.20	0.02	0.18
39	0.20	1.03	-0.83
40	0.20	0.03	0.17

Tabla N° 3. 10. Comparación entre el indicador HF_n para una carga de 5 KVA con fdp 0.8 y el establecido por la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos Peruana

La figura N° 3.29 muestra la forma de la onda de corriente en la carga de 5 KVA con fdp 0.8, la cual alcanza un valor de 21,86 amperios eficaces reales. Las figuras

Nº 3.30, Nº 3.31 y Nº 3.32 muestran la corriente en cada arreglo de batería para la misma carga.

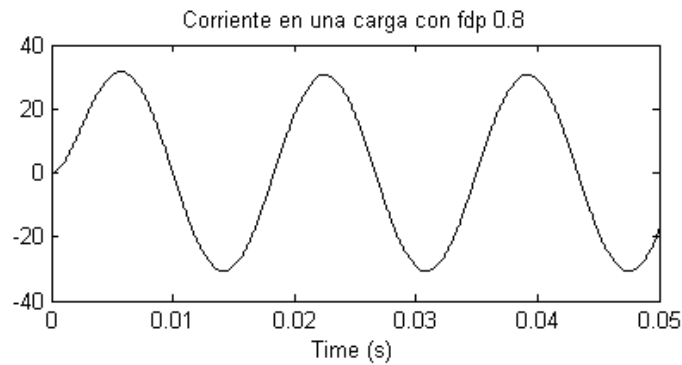


Figura Nº 3.29. Corriente en una carga de 5KVA con fdp de 0.8

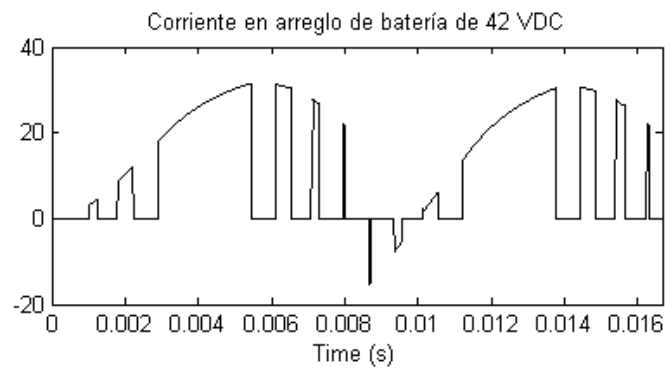


Figura Nº 3.30. Corriente en batería de 42 VDC para una carga de 5KVA con fdp 0.8

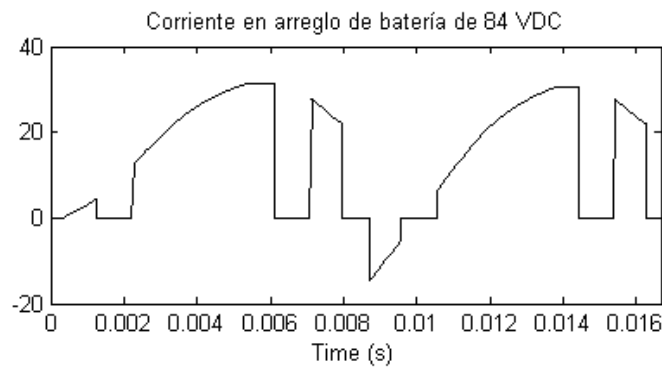


Figura Nº 3.31. Corriente en batería de 84 VDC para una carga de 5K VA con fdp 0.8

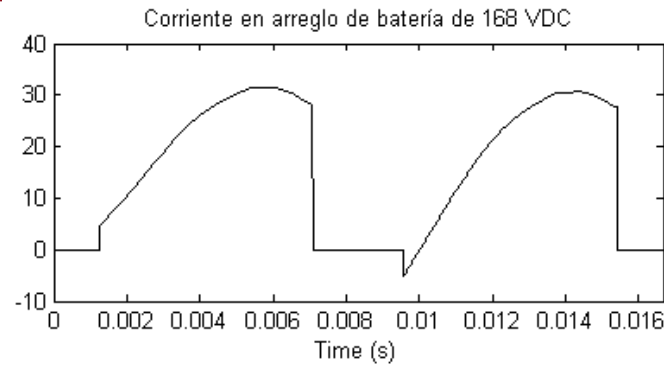


Figura N° 3.32. Corriente en batería de 168 VDC para una carga de 5K VA con fdp 0.8

En las figuras N° 3.30, N° 3.31 y N° 3.32 se observa que a lo largo de un periodo las baterías absorben pulsos de corriente. El arreglo de baterías de 42 VDC absorbe cuatro pulsos por periodo, dos de ellos de 100 microsegundos de duración aproximadamente y de 15 amperios pico, y los otros dos de 200 microsegundos de duración y 7 amperios pico. El arreglo de baterías de 84 VDC absorbe dos pulsos por periodo, ambos de 15 amperios pico y de 900 microsegundos de duración aproximadamente. El arreglo de baterías de 168 VDC absorbe dos pulsos por periodo también, ambos de 5 amperios pico y de 500 microsegundos de duración aproximadamente.

Las figuras N° 3.33, N° 3.34 y N° 3.35 muestran las tensiones de los MOSFET para una carga de 5 KVA con fdp de 0.8 y las figuras N° 3.36, N° 3.37 y N° 3.38 muestran las corrientes en los MOSFET para la misma carga.

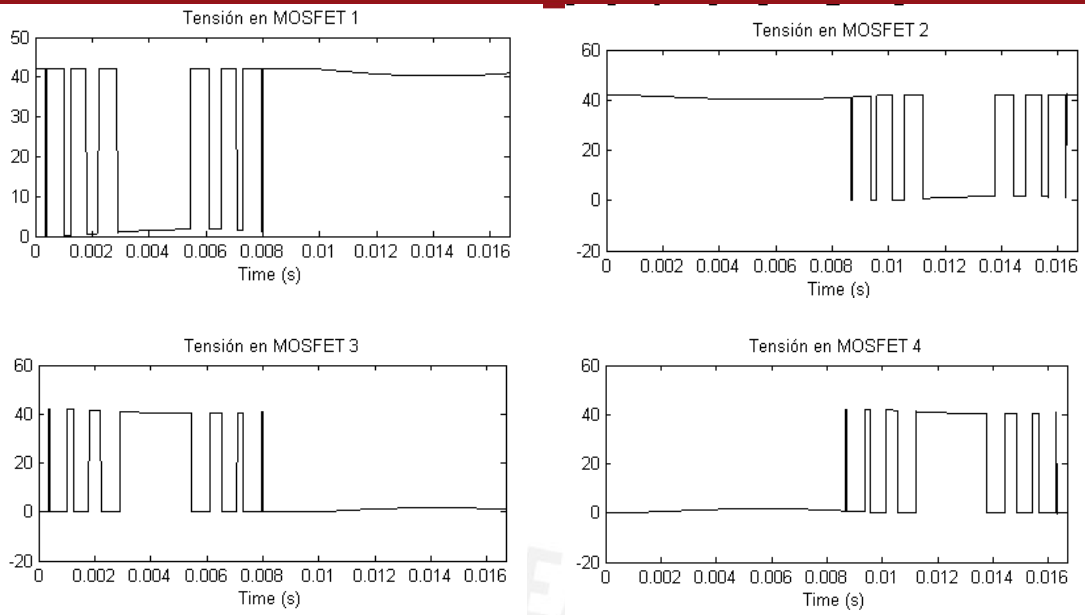


Figura N° 3.33. Tensiones en los MOSFET del puente H de 42 VDC

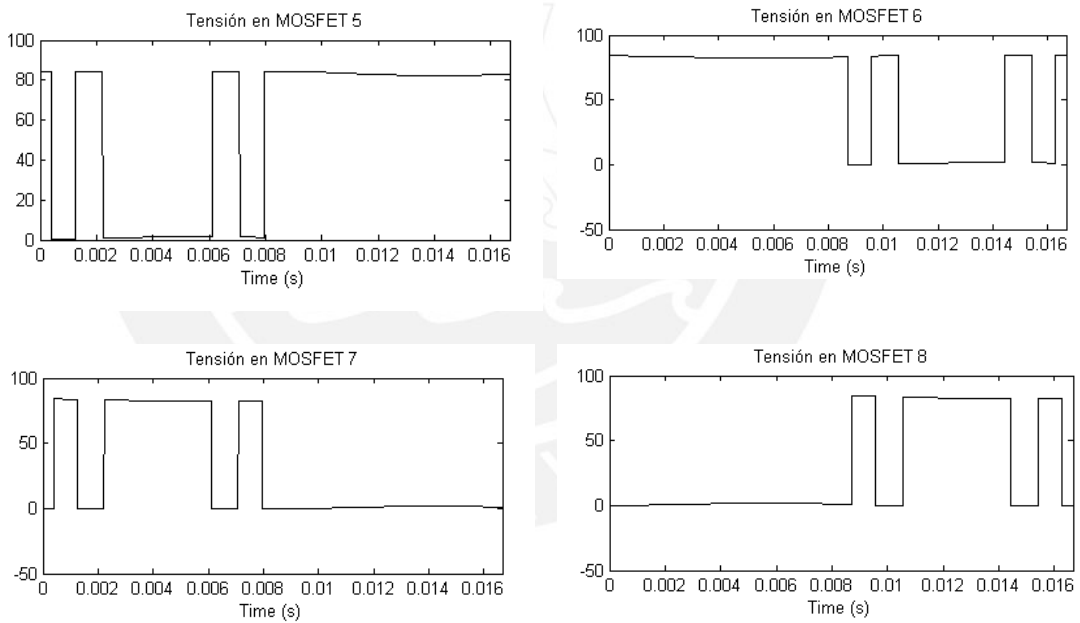


Figura N° 3.34. Tensiones en los MOSFET del puente H de 84 VDC

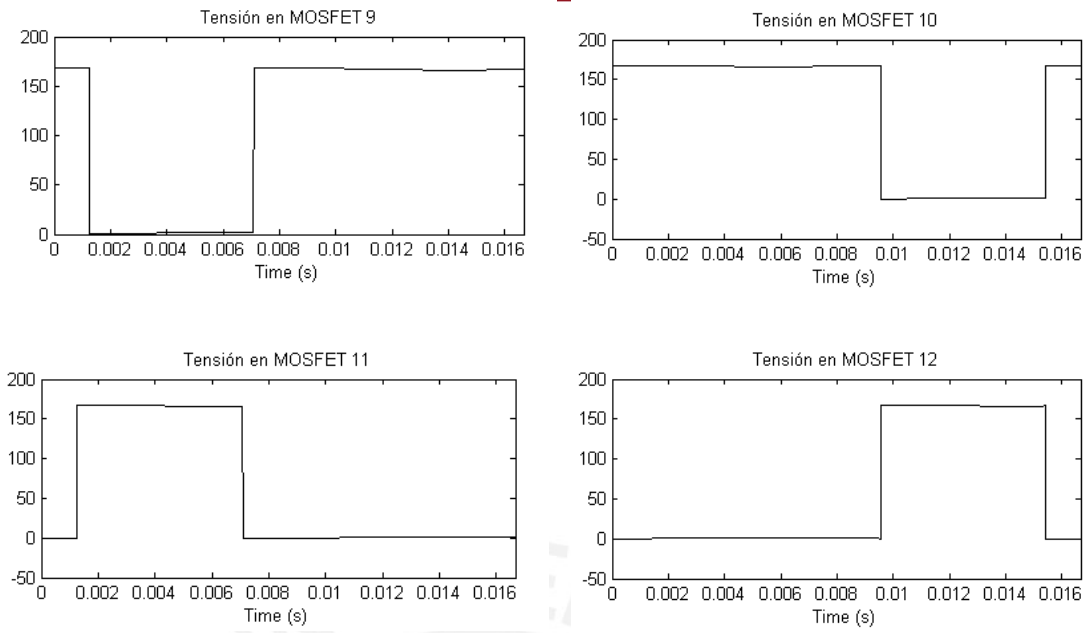


Figura N° 3.35. Tensiones en los MOSFET del puente H de 168 VDC

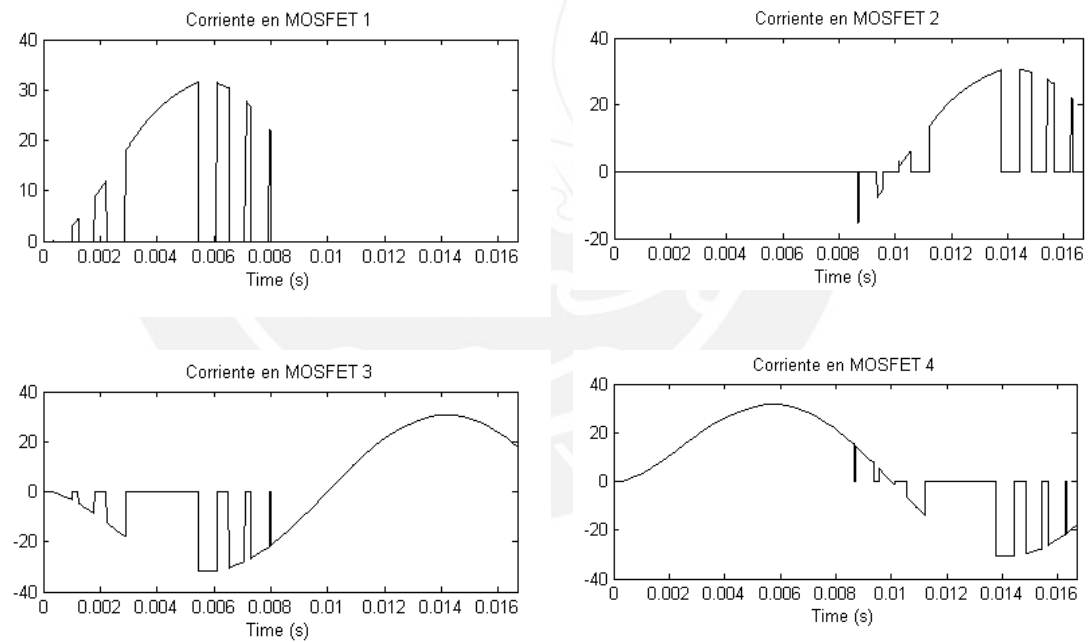


Figura N° 3.36. Corrientes en los MOSFET del puente H de 42 VDC

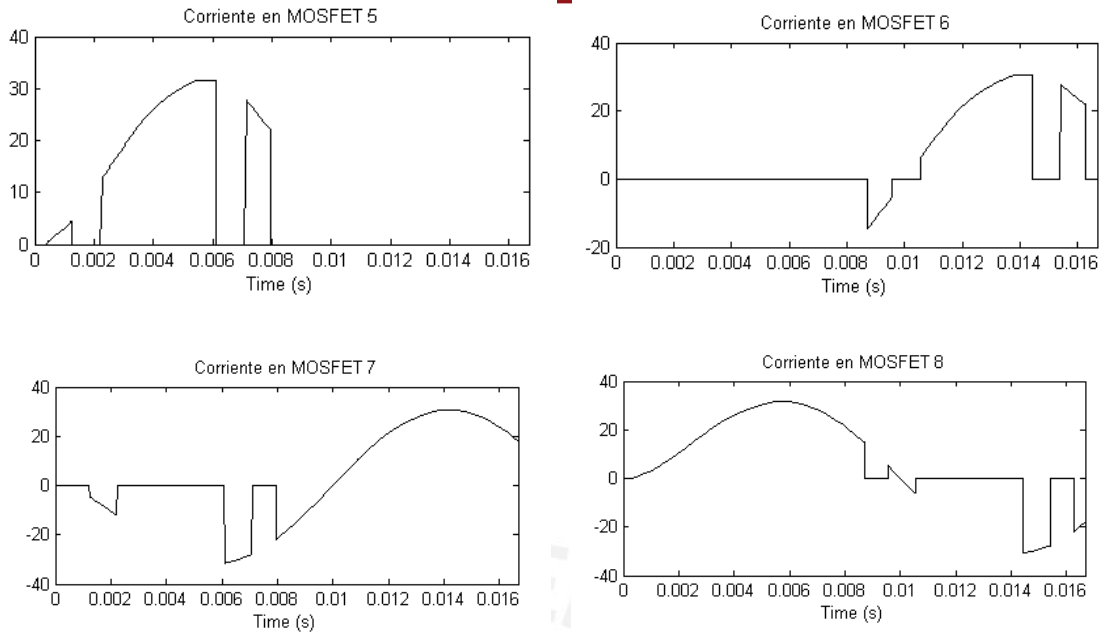


Figura N° 3.37. Corrientes en los MOSFET del puente H de 84 VDC

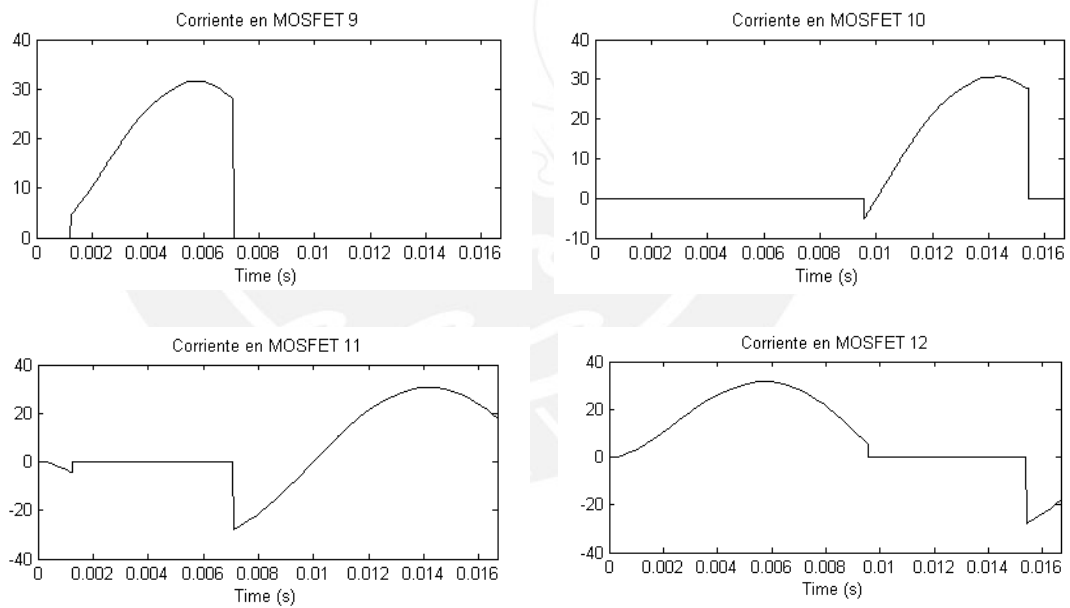


Figura N° 3.38. Corrientes en los MOSFET del puente H de 168 VDC

La figura N° 3.39, muestra la tensión de salida del inversor para una carga que consume una potencia de 500VA con un factor de potencia de 0.8 a 220 VRMS y a 60Hz. La simulación muestra que el valor de la tensión eficaz de la armónica fundamental para esta carga es de 215.2 VRMS y el factor de distorsión armónica

total (*THD*) es de 5.60 %, valores muy cercanos a los hallados para la carga de 500 W.

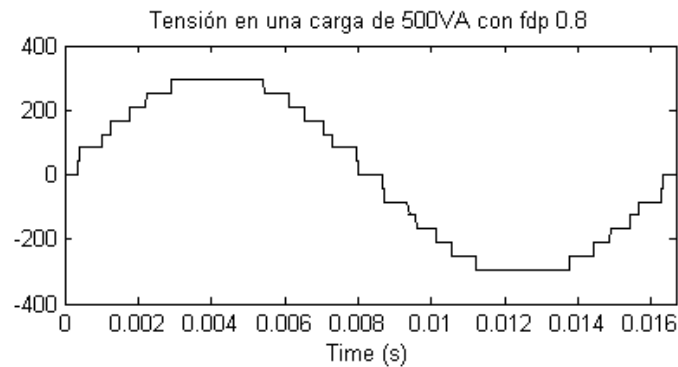


Figura N° 3.39. Tensión generada en una carga de 500 VA con fdp 0.8

La tabla N° 3. 11 muestra la comparación entre el indicador HF_n para la carga de 500 VA, en ella se observa que para las armónicas 19, 21, 23, 25, 27, 29, 31, 33, 37 y 39 el indicador HF_n supera ligeramente las tolerancias establecidas por la norma, pero en todos los casos se sigue manteniendo por debajo del 3 %.

Orden armónica	HF _n (%) según norma	HF _n (%) Simulación	Diferencia
2	2.00	0.07	1.93
3	5.00	0.87	4.13
4	1.00	0.03	0.97
5	6.00	1.09	4.91
6	0.50	0.02	0.48
7	5.00	0.93	4.07
8	0.50	0.02	0.48
9	1.50	0.73	0.77
10	0.50	0.01	0.49
11	3.50	0.66	2.84
12	0.20	0.01	0.19
13	3.00	0.17	2.83
14	0.20	0.01	0.19
15	0.30	0.12	0.18
16	0.20	0.02	0.18
17	2.00	0.75	1.25
18	0.20	0.04	0.16
19	1.50	2.28	-0.78

Tabla N° 3.11. Comparación entre el indicador HF_n para una carga de 500 VA y el establecido por la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos Peruana

Orden armónica	HF _n (%) según norma	HF _n (%) Simulación	Diferencia
20	0.20	0.03	0.17
21	0.20	2.77	-2.57
22	0.20	0.01	0.19
23	1.50	1.53	-0.03
24	0.20	0.01	0.19
25	1.50	2.51	-1.01
26	0.20	0.03	0.17
27	0.20	0.97	-0.77
28	0.20	0.04	0.16
29	0.63	1.03	-0.40
30	0.20	0	0.20
31	0.60	0.63	-0.03
32	0.20	0.01	0.19
33	0.20	1.14	-0.94
34	0.20	0.03	0.17
35	0.56	0.28	0.28
36	0.20	0.01	0.19
37	0.54	0.84	-0.30
38	0.20	0.01	0.19
39	0.20	0.98	-0.78
40	0.20	0.01	0.19

Tabla N° 3.11. Comparación entre el indicador HF_n para una carga de 500 VA y el establecido por la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos Peruana (continuación)

La corriente en la carga de 500 VA alcanza el valor de 2,24 amperios eficaces reales. Esta corriente, mantiene también la forma de onda de la corriente en la carga de 5 KVA. Las corrientes en las baterías también mantienen la forma de onda respecto a las corrientes mostradas para la carga de 5 KW y tienen un valor máximo de 3,25 amperios.

3.3. Selección de semiconductores

En las figuras de la sección 3.2.2 se puede observar las condiciones de máxima corriente y máxima tensión inversa que deben soportar los transistores del inversor diseñado. Teniendo en cuenta estos parámetros y la resistencia drenador surtidor en conducción es posible seleccionar los transistores para el inversor diseño. Las tablas N° 3.12 muestra las condiciones de tensión y corriente que deben soportar

los semiconductores, la tabla N° 3.13 muestra las características de los MOSFET elegidos.

MOSFET	ID (A)	VBRDSS (V)
M1 - M4	30	42
M5 - M8	30	84
M9 - M12	30	168

Tabla N° 3.12. Condiciones de tensión y corriente que deben soportar los semiconductores.

Semiconductor seleccionado HEXFET Power MOSFETs Discrete N-Channel							
MOSFET	Código	ID(A)@ TC=25°	ID(A)@ TC=100°	VBRDSS (V)	RDON (ohm)	VSD (V)	Package
M1 - M12	IRFB31N20D	31	21	200	0.082	1.3	TO-220AB

Tabla N° 3.13. Semiconductores seleccionados para el inversor diseñado.

Mientras menor sea el valor de la resistencia drenador - surtidor, menores serán las pérdidas de energía por conducción en el semiconductor, sin embargo la intensidad de los picos de corriente en las baterías será mayor en los tiempos donde conmuten dos transistores conectados en serie y en paralelo con la batería de cada puente. Las pérdidas de energía por conmutación dependerán de los tiempos de activación y desactivación de los transistores, los cuales están en el orden de los nanosegundos, mientras menores sean estos tiempos menores serán las pérdidas de energía.

Los semiconductores seleccionados poseen un diodo interno que permite la conducción de corriente de surtidor a drenador, de acuerdo a lo requerido por el diseño. La caída de tensión en estos diodos se muestra en la columna V_{SD} de la tabla N° 3.13. La columna R_{DON} muestra la resistencia drenador surtidor en conducción para cada MOSFET.

3.4. Fabricación de un prototipo a escala reducida

Con el objetivo de evaluar el diseño propuesto se implementó un prototipo a escala reducida del inversor multinivel en cascada de 15 niveles. Las tensiones de cada arreglo de baterías conectadas a cada puente H serán de 6 VDC, 12 VDC y 24 VDC, para obtener estas tensiones se usarán tres baterías de 12 VDC de 12AH.20HR y una batería de 6 VDC de 10AH.20HR.

Los MOSFET escogidos para todos los puentes H del prototipo son el IRF640B. Estos soportan una tensión de ruptura (V_{BRDSS}) de 200 V y una corriente máxima (I_D) de 18 amperios, la resistencia drenador - surtidor en conducción ($R_{DS(ON)}$) del IRF640B es de 0.18 ohm. Los transistores serán colocados entre un conjunto de barras de aluminio las cuales tendrán la función de disipar el calor de los MOSFET durante la operación del inversor. Cada transistor se encuentra aislado eléctricamente de las barras por una mica y por silicona en pasta.

Para evaluar la respuesta del inversor ante diferentes cargas se utilizó dos bancos de resistencias de 25 ohm y 12.5 ohm, estos bancos están conformados por resistencias de 25 W - 50 ohm conectadas en paralelo. Las resistencias de los bancos se colocarán entre dos barras de aluminio para disipar el calor producido durante la operación del inversor. Con el objetivo de evitar la destrucción de las baterías y transistores por cortocircuito, se ha considerado el uso de fusibles de 10 A - 250V conectados en serie con cada banco de baterías.

La figura N° 3.40 muestra la tensión, obtenida por simulación, generada por el prototipo en una carga de 12.5 ohm y 0.4 mH, cuyo fdp es la unidad. Como se señaló en la sección 3.2.2, la simulación requiere de una pequeña carga inductiva para reducir el tiempo de simulación y mantener el factor de potencia cercano a la

unidad. La figura N° 3.41 muestra la onda de corriente en la carga de 12.5 ohm y 0.4 mH.

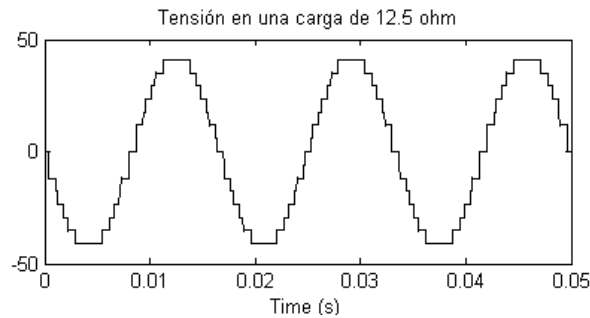


Figura N° 3.40. Tensión generada por el prototipo para una carga de 12.5 ohm

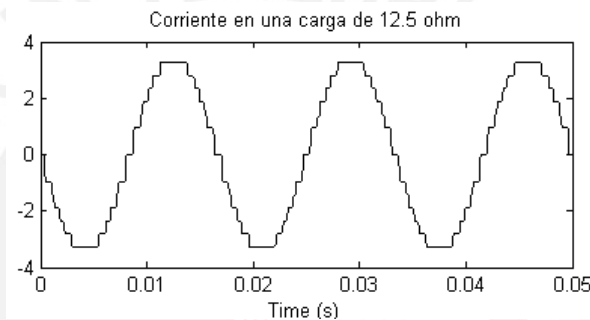


Figura N° 3.41. Corriente generada por el prototipo en una carga de 12.5 ohm

La tabla N° 3.14 muestra los valores obtenidos por simulación, de la tensión y la corriente eficaz para la armónica fundamental, el factor de distorsión armónica total de la tensión (*THD*) y la corriente pico para ambas cargas de prueba.

Carga	Tensión eficaz (V)	THDv (%)	Corriente eficaz (A)	Corriente pico en la carga (A)
12.5 ohm 0.4mH	30.09	5.64	2.407	3.272
25 ohm 0.8mH	30.45	5.62	1.218	1.657

Tabla N° 3.14. Valores de tensión, corriente y THDv para las cargas de prueba

Para la carga de de 25 ohm y 0.8 mH, la potencia activa obtenida en la simulación es de 37.02 W, la potencia reactiva es de 0.448 VAR y la potencia aparente es de 37.023 VA. Para la carga de 12.5 ohm y 0.3 mH la potencia activa obtenida en la

simulación es de 72.3 W, la potencia reactiva es de 0.875 VAR y la potencia aparente es de 72.305 VA.

La tabla N° 3.15 muestra la comparación entre el indicador HF_n establecido por la norma y obtenido a través de la simulación para ambas cargas de prueba, en ella se observa que para las armónicas 19, 21, 23, 25, 27, 29, 31, 33, 37 y 39 el indicador HF_n supera ligeramente las tolerancias establecidas por la norma, pero en todos los casos se sigue manteniendo por debajo del 3 %.

Orden armónica	HF _n (%) según norma	HF _n (%) Simulación carga 25 ohm	HF _n (%) Simulación carga 12.5 ohm
2	2.00	0.06	0.06
3	5.00	1.00	1.13
4	1.00	0.04	0.03
5	6.00	1.08	1.08
6	0.50	0.02	0.01
7	5.00	0.89	0.90
8	0.50	0.02	0.02
9	1.50	0.74	0.71
10	0.50	0.00	0.01
11	3.50	0.60	0.60
12	0.20	0.02	0.02
13	3.00	0.22	0.17
14	0.20	0.02	0.01
15	0.30	0.13	0.16
16	0.20	0.01	0.02
17	2.00	0.75	0.72
18	0.20	0.05	0.04
19	1.50	2.31	2.32
20	0.20	0.03	0.02
21	0.20	2.79	2.79
22	0.20	0.01	0.00
23	1.50	1.54	1.55
24	0.20	0.00	0.00
25	1.50	2.50	2.50
26	0.20	0.04	0.03
27	0.20	0.95	0.96
28	0.20	0.04	0.04
29	0.63	1.04	1.02

Tabla N° 3.15. Comparación entre el indicador HF_n establecido por la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos Peruana y obtenido para las cargas de prueba

Orden armónica	HF _n (%) según norma	HF _n (%) Simulación carga 25 ohm	HF _n (%) Simulación carga 12.5 ohm
30	0.20	0.01	0.01
31	0.60	0.59	0.61
32	0.20	0.02	0.01
33	0.20	1.08	1.11
34	0.20	0.05	0.04
35	0.56	0.28	0.27
36	0.20	0.03	0.03
37	0.54	0.85	0.85
38	0.20	0.02	0.02
39	0.20	1.02	1.00
40	0.20	0.00	0.01

Tabla N° 3.15. Comparación entre el indicador HF_n establecido por la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos Peruana y obtenido para las cargas de prueba (*continuación*)

Las figuras N° 3.42, N° 3.43 y N° 3.44 muestran la forma de onda de la corriente en cada arreglo de baterías de 6 VDC, 12 VDC y 24 VDC para una carga de 12.5 ohm.

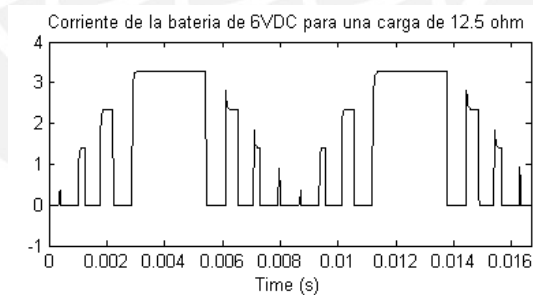


Figura N° 3.42. Corriente en batería de 6 VDC para una carga de 12.5 ohm

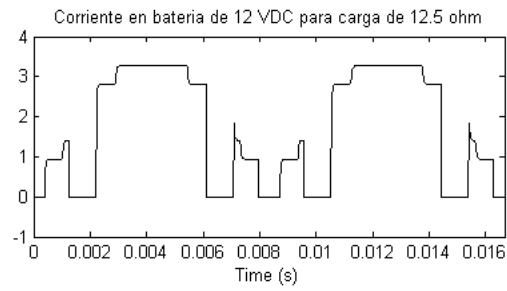


Figura N° 3.43. Corriente en batería de 12 VDC para una carga de 12.5 ohm

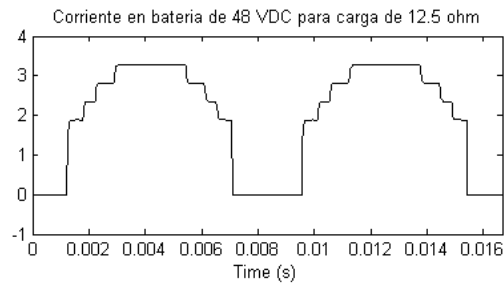
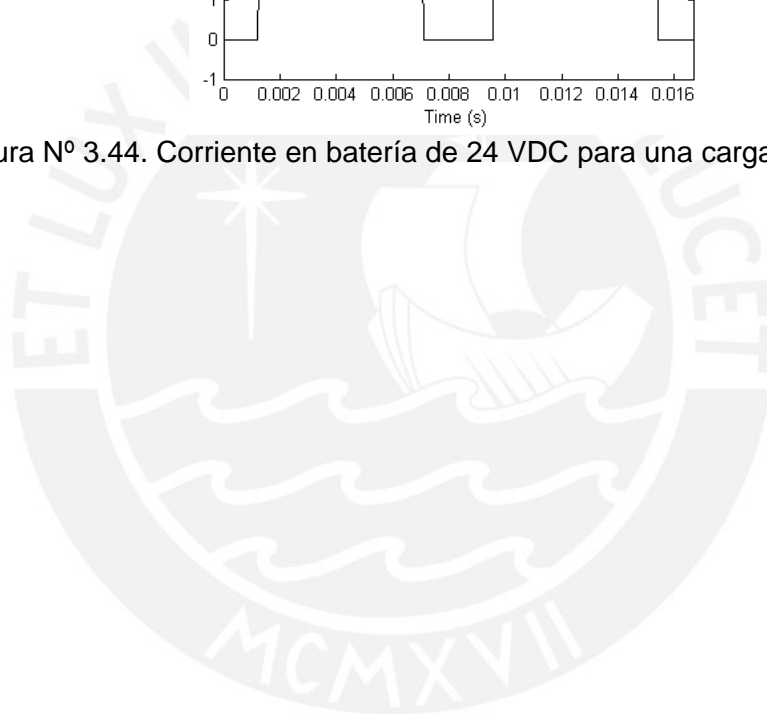


Figura N° 3.44. Corriente en batería de 24 VDC para una carga de 12.5 ohm



CAPÍTULO 4:

EVALUACIÓN DEL DISEÑO PROPUESTO

Es posible evaluar el diseño de un inversor monofásico desde diferentes aspectos, como la eficiencia del inversor, la calidad de energía generada y el rango de potencias y factores de potencia (fdp) para el cual la variación de los parámetros de calidad de energía se mantiene dentro de un rango aceptable.

Dado que el objetivo de la tesis es diseñar un inversor de bajo contenido armónico para cargas resistivas, este capítulo se centrará en la evaluación del diseño desde el aspecto de la calidad de energía generada.

La evaluación se realizó sobre los parámetros obtenidos en la implementación del prototipo a escala reducida. Estos parámetros se midieron con la ayuda de un instrumento analizador de calidad de potencia eléctrica.

La evaluación obtiene como resultado principal que el prototipo implementado es capaz de generar una tensión alterna con un factor de distorsión armónica total (*THD*) de 5.26%.

4.1. Descripción del método empleado.

Las simulaciones efectuadas en el capítulo tres permiten verificar que el inversor diseñado puede generar una tensión de corriente alterna cuyo nivel de tensión y factor de distorsión armónica total de la tensión se encuentran por debajo de las tolerancias establecidas por la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos Peruana. Con el objetivo de pasar a una siguiente etapa de evaluación se validó el diseño realizado a partir de la construcción del prototipo descrito en la sección 3.4. La figura N° 4.1 muestra el prototipo construido.

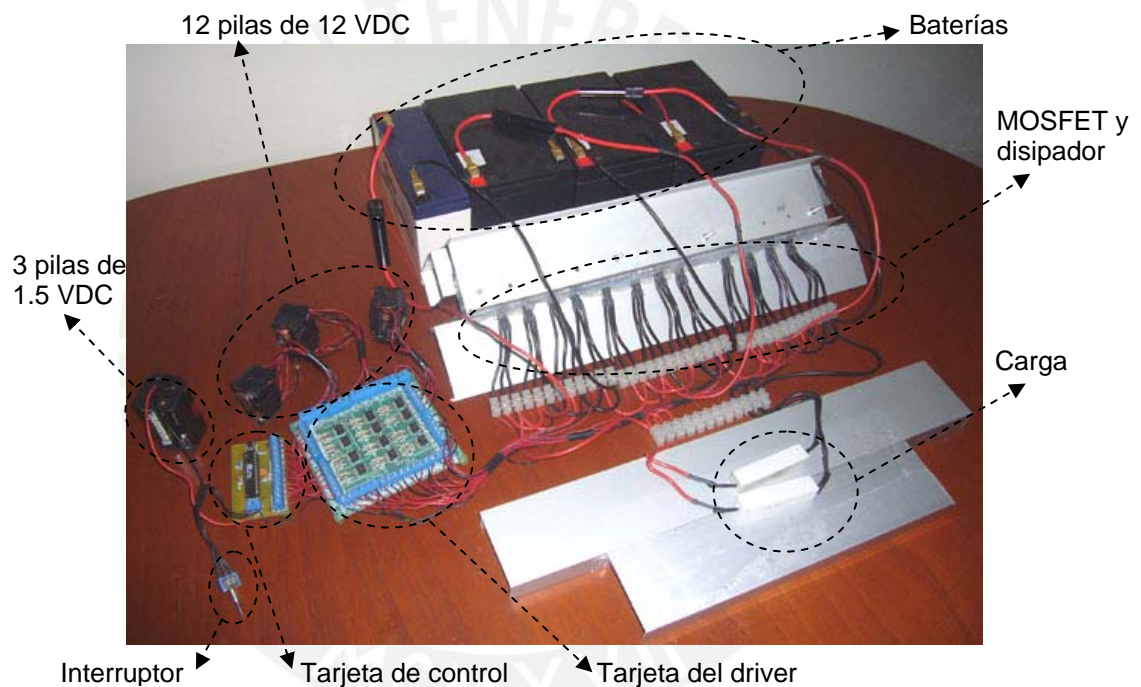


Figura N° 4.1. Implementación del prototipo del inversor multinivel en cascada de 15 niveles

En la implementación del prototipo a escala reducida del inversor se midieron los niveles de tensión, corriente y frecuencia, además de los parámetros THD (factor de distorsión armónica total) y HF_n (factor armónico de la n -ésima armónica) relacionados con la presencia de armónicos en la tensión generada por el inversor. Para realizar las mediciones se utilizó el multímetro Fluke 77, el analizador de calidad de potencia eléctrica Fluke 43 y el osciloscopio Tektronix THS720P.

4.2. Resultados obtenidos.

El microcontrolador ATmega8L durante su operación está energizado con una tensión de 4.39 VDC, esta tensión es proporcionada por tres pilas AA de 1.5 VDC conectas en serie. Durante la operación del inversor el microcontrolador absorbe una corriente de 58.5 mA. La corriente que el driver consume de la pila de 12 VDC cuando el MOSFET está activado y conduce de drenador a surtidor o de surtidor a drenador a través del diodo interno es de 2.58 mA.

Los valores de resistencia de las cargas de prueba son 24.3 ohm y 12.2 ohm. La tabla N° 4.1 muestra los valores de la tensión drenador surtidor de los MOSFET cuando circula por ellos la máxima corriente para cada carga, la referencia de los MOSFET está de acuerdo al circuito esquemático de la figura N° 3.6.

Tensión drenador surtidor	Carga de 24.3 ohm	Carga de 12.2 ohm
M1	0.270	0.555
M2	0.235	0.494
M3	0.255	0.580
M4	0.245	0.512
M5	0.259	0.553
M6	0.243	0.503
M7	0.255	0.553
M8	0.247	0.536
M9	0.238	0.506
M10	0.264	0.599
M11	0.261	0.551
M12	0.241	0.543

Tabla N° 4.1. Valores de tensión drenador surtidor para las cargas de prueba.

Las tensiones de las baterías, medidas en sus bornes, antes de iniciar la operación del inversor, son 6.44 VDC, 12.93 VDC y 25.84 VDC. Durante el funcionamiento del inversor las tensiones de las baterías decaen con el tiempo. Las tablas N° 4.2 y N° 4.3 muestra los valores de las tensiones de las baterías cuando el inversor opera sin carga y cuando opera a máxima carga (12.2 ohm), estas tablas también

incluyen el valor de la tensión eficaz alterna generada a la salida del inversor.

Todos los valores anteriores han sido medidos con el multímetro Fluke 77.

Tiempo minutos	Batería 6 VDC	Batería 12 VDC	Batería 24 VDC	Salida RMS AC
0	6.44	12.93	25.84	
1	6.31	12.58	25.34	30.86
5	6.29	12.59	25.31	30.80
10	6.29	12.60	25.33	30.80
15	6.30	12.60	25.34	30.81
20	6.29	12.60	25.34	30.81
25	6.29	12.60	25.34	30.81
30	6.29	12.60	25.34	30.81
35	6.29	12.60	25.34	30.81
40	6.29	12.60	25.34	30.81
45	6.29	12.60	25.33	30.80
50	6.29	12.59	25.32	30.80
55	6.29	12.59	25.33	30.79
60	6.29	12.59	25.33	30.79

Tabla N° 4.2: Valores de las tensiones de las baterías y tensión generada por el inversor cuando opera sin carga

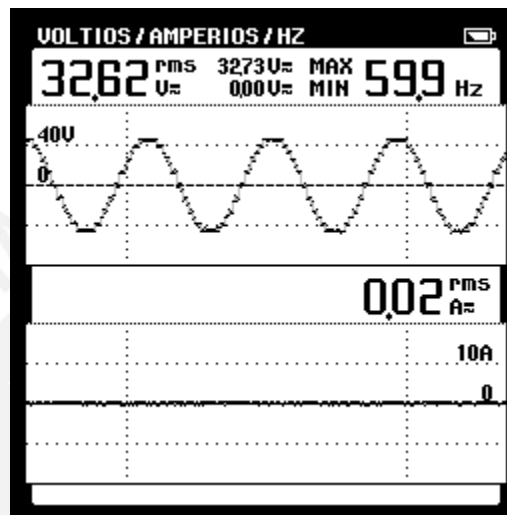
Tiempo minutos	Batería 6 VDC	Batería 12 VDC	Batería 24 VDC	Salida RMS AC
0	6.43	12.99	25.85	
1	6.18	12.47	24.85	28.89
5	6.19	12.49	24.86	28.82
10	6.20	12.49	24.83	28.73
15	6.20	12.47	24.80	28.69
20	6.19	12.44	24.78	28.66
25	6.19	12.42	24.75	28.60
30	6.18	12.41	24.72	28.55
35	6.17	12.40	24.69	28.53
40	6.16	12.38	24.66	28.50
45	6.15	12.37	24.63	28.47
50	6.14	12.35	24.60	28.42
55	6.13	12.34	24.57	28.40
60	6.12	12.33	24.53	28.34

Tabla N° 4.3: Valores de las tensiones de las baterías y tensión generada por el inversor cuando opera a máxima carga (12.2 ohm)

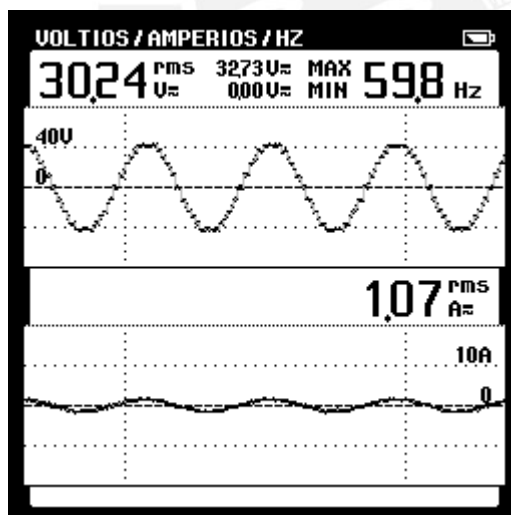
De las tablas N° 4.1, N° 4.2 y N° 4.3 se observa que, para una mayor carga, la caída de tensión drenador – surtidor en los MOSFET es mayor, por ello se obtiene una menor tensión eficaz a la salida del inversor. Además, debido al consumo de

energía en las baterías, la tensión entre sus bornes decae con el tiempo y con ello, la tensión a la salida del inversor.

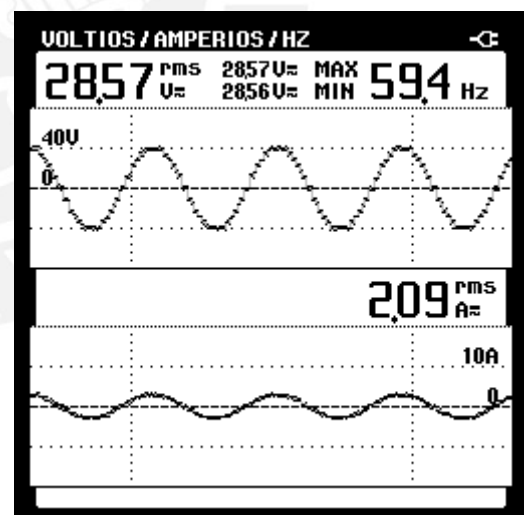
La figura N° 4.2 muestra la frecuencia, los valores eficaces y las formas de onda de la tensión y corriente obtenidas a la salida del inversor.



Sin carga



En carga de 24.3 ohm



En carga de 12.2 ohm

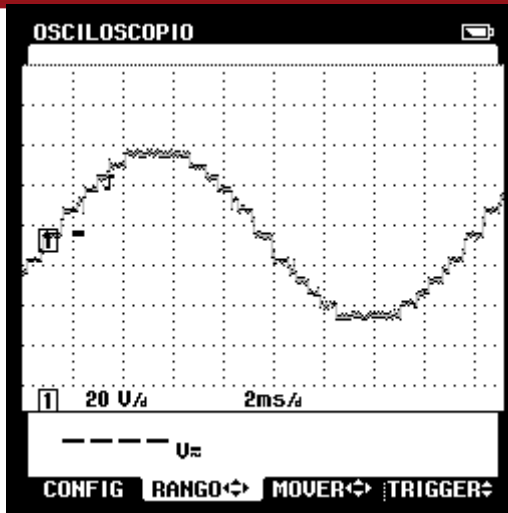
Figura N° 4.2. Tensión, corriente y frecuencia generadas a la salida del inversor

La tensión nominal esperada para el prototipo es 30.85 VRMS, esta tensión ha sido obtenida por simulación a partir del diagrama de la figura N° 3.11, al variar los valores de 42 V, 84 V y 168 V por 6 V, 12 V y 24 V respectivamente.

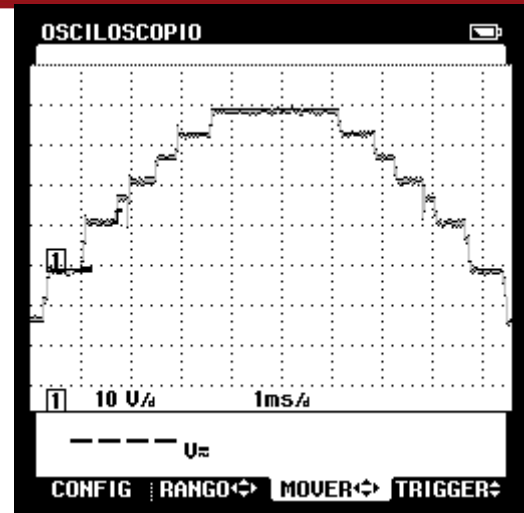
La figura N° 4.2 muestra que las tensiones eficaces obtenidas a la salida del inversor sin carga conectada y para ambas cargas de prueba, se encuentran dentro de la tolerancia admitida ($\pm 7.5\%$) para las tensiones entregadas en servicios calificados como urbano-rurales o rurales. La tensión máxima que se puede obtener dentro del rango de tolerancias admitidas es 33.16 VRMS y la tensión mínima es 28.53 VRMS.

Respecto a la frecuencia, se encontró experimentalmente que disminuye cuando la carga es mayor. A mayor carga, la tensión en las baterías disminuye, esto puede modificar el tiempo de subida de la respuesta del sistema al primer escalón (α_1) y variar la medición del inicio del periodo que realiza el Fluke 43 para el cálculo de la frecuencia. La máxima frecuencia admitida dentro del rango de tolerancias ($\pm 0.6\%$) es 60.36 Hz y la mínima frecuencia es 59.64Hz. Sin carga conectada y para la carga de 24.3 la frecuencia se encuentra dentro del rango de tolerancias admitidas, para la carga de 12.2 ohm la frecuencia se encuentra 0.24Hz fuera del rango, pero dado que las especificaciones del Fluke 43 indican una exactitud de $\pm 0.5\%$ para las mediciones de frecuencia, se considera que el equipo se encuentra operando dentro de las tolerancias indicadas por la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos Peruana.

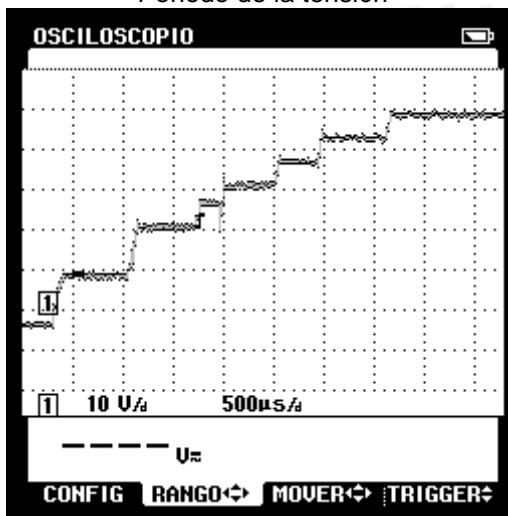
La figura N° 4.4 muestra la tensión generada por el inversor, en ella se observa los siete escalones que conforman la onda tensión generada.



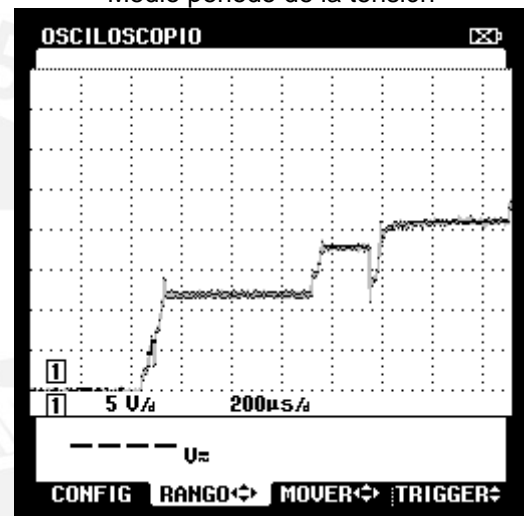
Período de la tensión



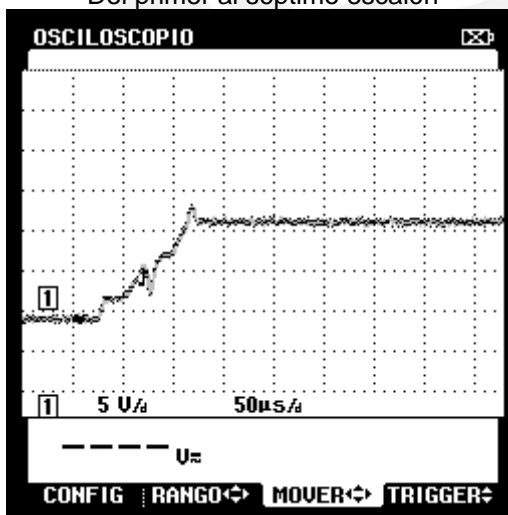
Medio periodo de la tensión



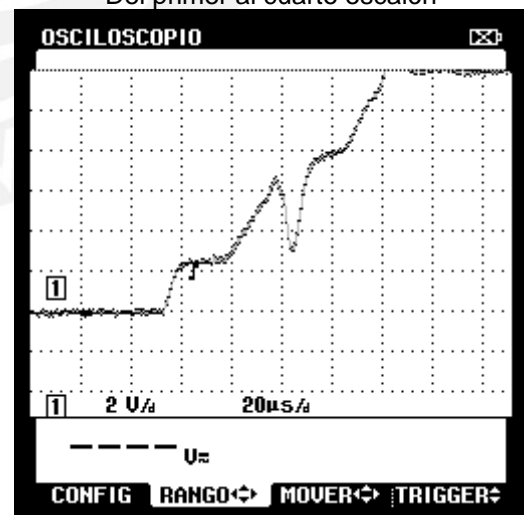
Del primer al séptimo escalón



Del primer al cuarto escalón



Del primer al segundo escalón



Primer escalón

Figura N° 4.4. Forma de onda de la tensión generada

Las respuestas invertidas observadas entre el primer y segundo escalón y entre el tercer y cuarto escalón se deben a que durante estos tiempos de conmutación, en el inversor se desactiva el paso de corriente por un conjunto de baterías y se activa el paso de corriente por otro conjunto de baterías.

La figura N° 4.5 muestra la potencia activa medida para ambas cargas de prueba. El indicador PF señala el factor de potencia de la carga e incluye todos los armónicos para su cálculo. Para ambas gráficas se observa que el indicador es igual a la unidad. Acorde a las especificaciones del Fluke 43, cuando el indicador PF es igual a la unidad la carga esta consumiendo toda la potencia suministrada y no hay presencia de potencia reactiva, por ello se desprecia los valores de 3 VAR y 4VAR mostrados por el equipo.

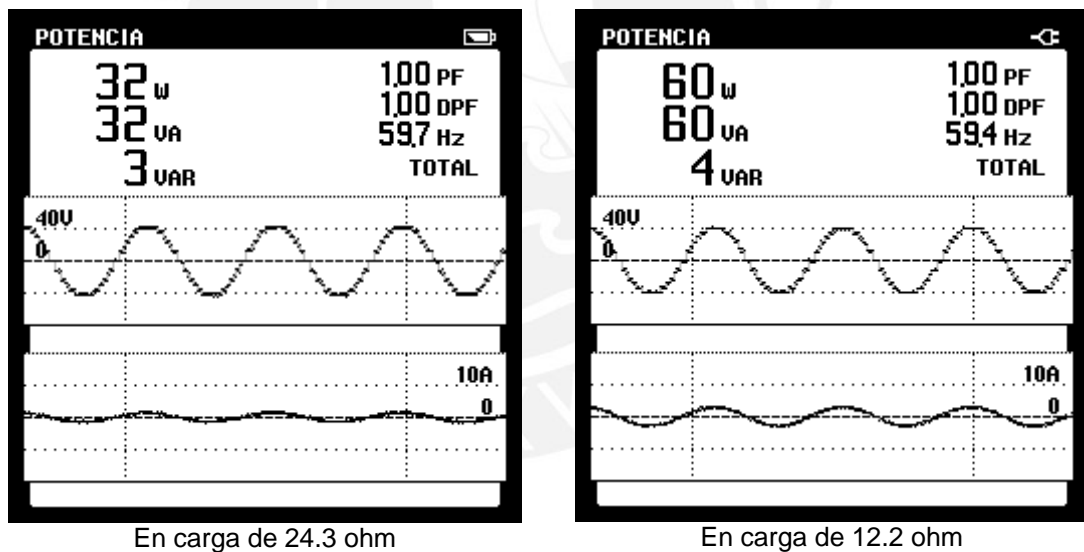


Figura N° 4.5. Potencia activa medida en las carga de prueba

Las figuras N° 4.6 y N° 4.7 muestran el espectro de frecuencia de la tensión generada, el factor de distorsión armónica total (THD) y el factor armónico de la n -ésima armónica (HF_n) para la primera, tercera, quinta, séptima, novena, undécima, decimotercera y decimoquinta armónica en cada carga de prueba.

De los THD de las figuras N° 4.6 y N° 4.7 se puede hallar que el THD promedio, para la carga de 24.3 ohm es 5.3% y para la carga de 12.2 ohm es 5.2%.

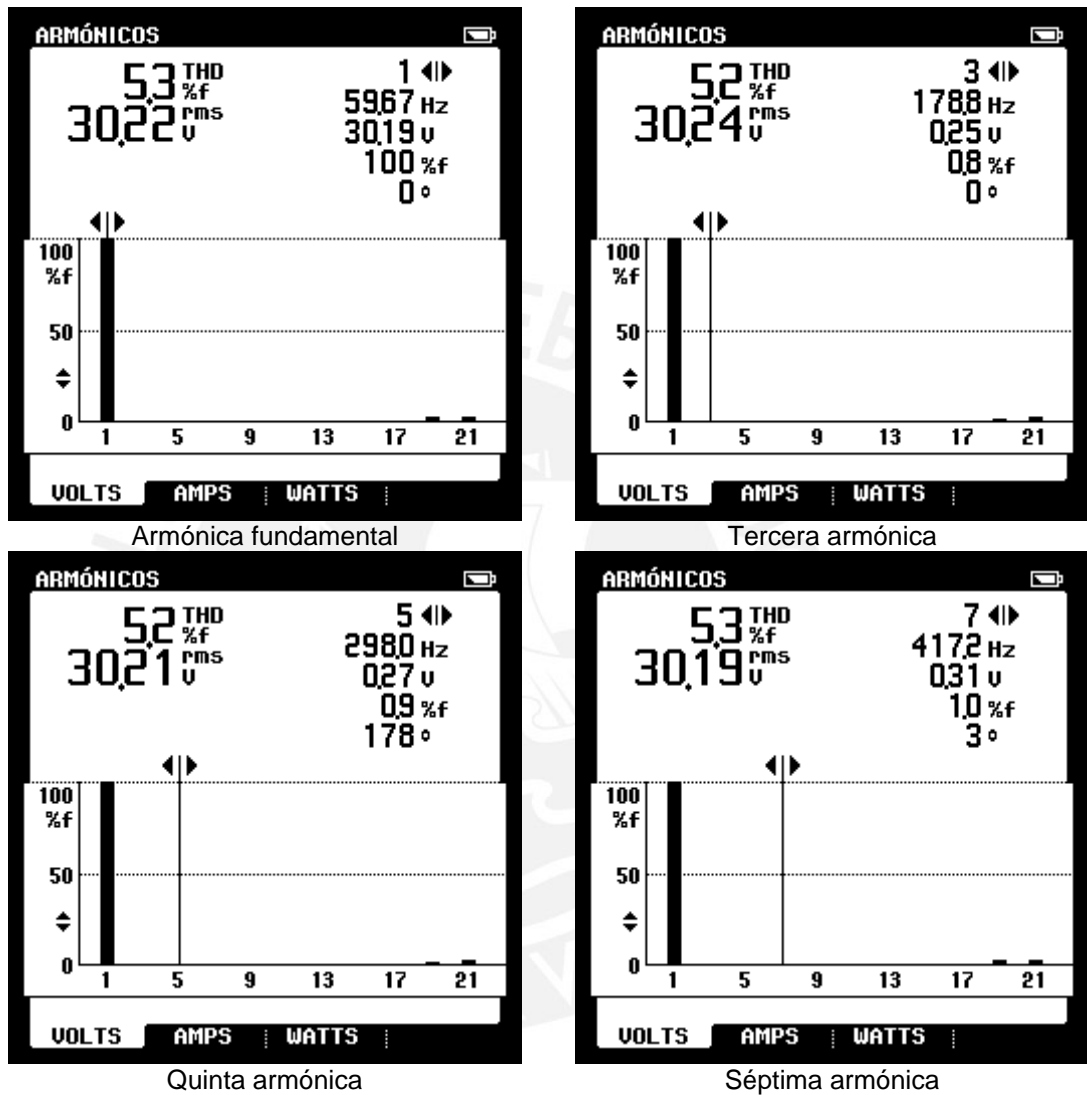
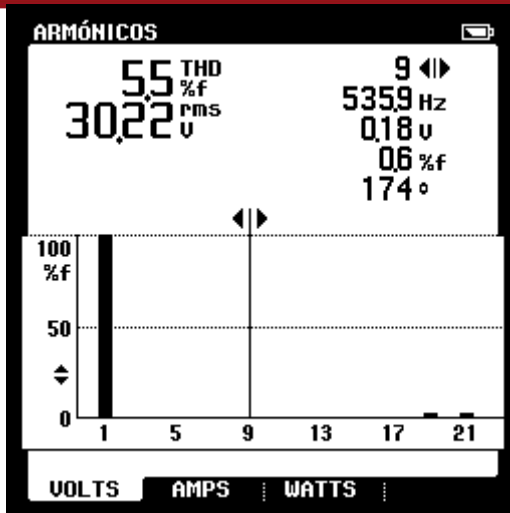
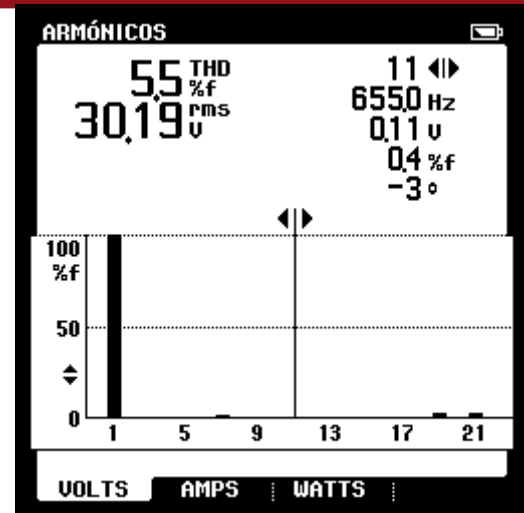


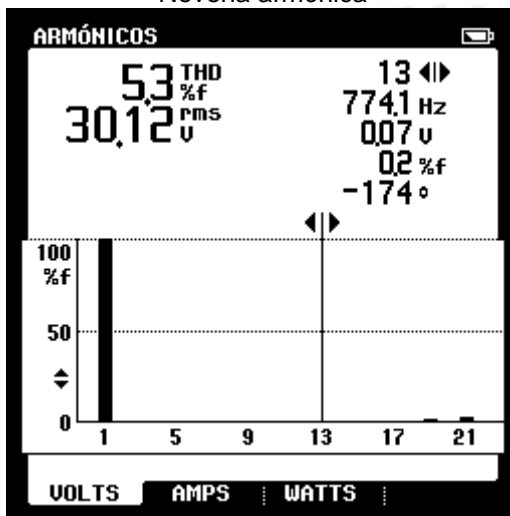
Figura N° 4.6. THD , HF_n (%f) obtenido en la carga de prueba de 24.3 ohm



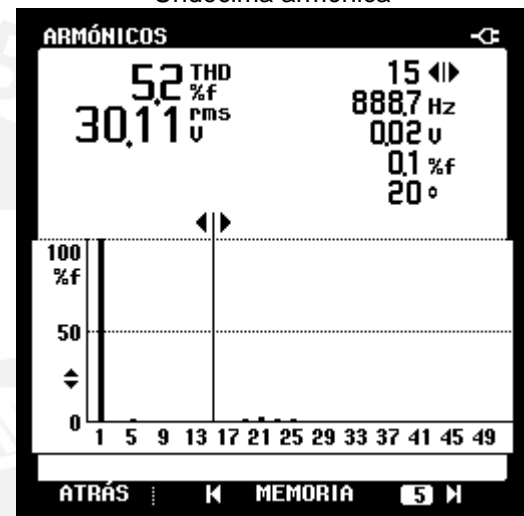
Novena armónica



Undécima armónica



Decimotercera armónica

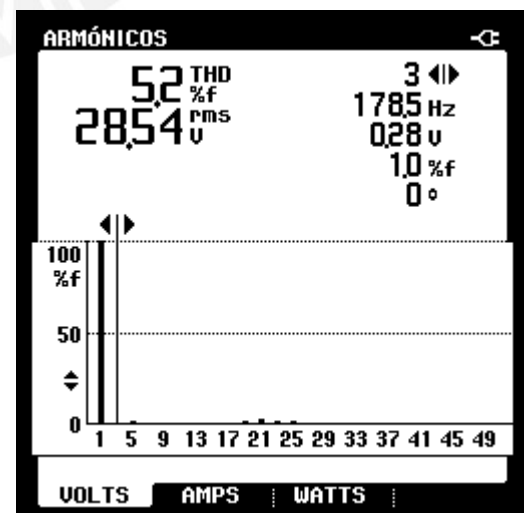


Decimoquinta armónica

Figura N° 4.6. THD , HF_n (%) obtenido en la carga de prueba de 24.3 ohm
(continuación)



Armónica fundamental



Tercera armónica

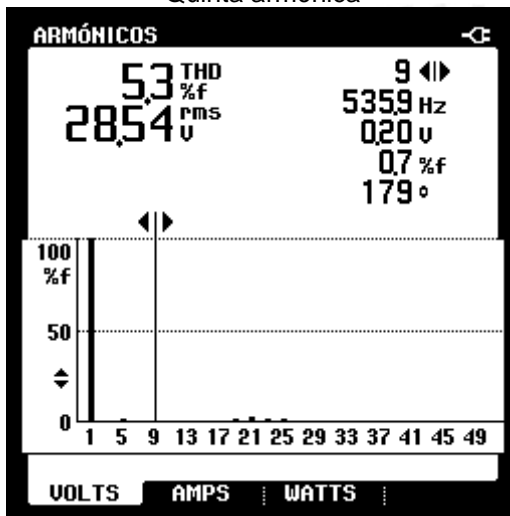
Figura N° 4.7. THD , HF_n (%) obtenido en la carga de prueba de 12.2 ohm



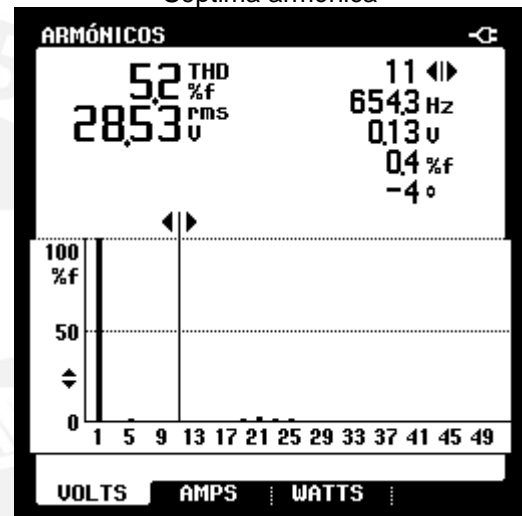
Quinta armónica



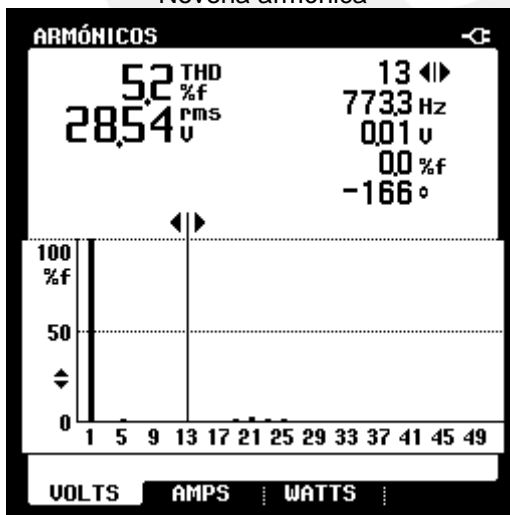
Séptima armónica



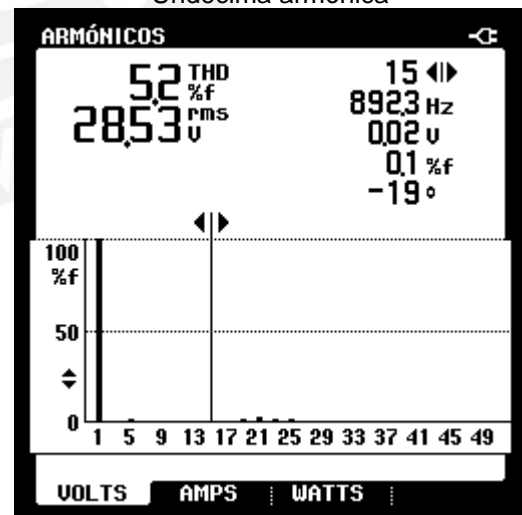
Novena armónica



Undécima armónica



Decimotercera armónica



Decimoquinta armónica

Figura N° 4.7. THD , HF_n (%f) obtenido en la carga de prueba de 12.2 ohm
(continuación)

La tabla N° 4.4 muestra la comparación entre el indicador HF_n establecido por la norma y obtenido en el prototipo para ambas cargas de prueba, en ella se observa que para las armónicas 19, 21, 25, 27, 29, 33, 37 y 39 el indicador HF_n supera ligeramente las tolerancias establecidas por la norma, pero en todos los casos se sigue manteniendo por debajo del tres por ciento (3%) al igual que en la simulación.

Orden armónica	HF _n (%) según norma	HF _n (%) carga 24.3 ohm	HF _n (%) carga 12.2 ohm
2	2.00	0.1	0.0
3	5.00	0.8	1.1
4	1.00	0.0	0.0
5	6.00	0.9	1.1
6	0.50	0.0	0.0
7	5.00	1.0	0.5
8	0.50	0.0	0.0
9	1.50	0.6	0.7
10	0.50	0.1	0.0
11	3.50	0.4	0.5
12	0.20	0.1	0.0
13	3.00	0.2	0.1
14	0.20	0.0	0.0
15	0.30	0.0	0.0
16	0.20	0.0	0.0
17	2.00	0.6	0.5
18	0.20	0.1	0.0
19	1.50	2.1	2.2
20	0.20	0.0	0.0
21	0.20	2.5	2.6
22	0.20	0.0	0.0
23	1.50	1.3	1.3
24	0.20	0.0	0.0
25	1.50	2.3	2.2
26	0.20	0.0	0.0
27	0.20	0.9	0.7
28	0.20	0.0	0.0
29	0.63	0.7	0.9
30	0.20	0.0	0.0
31	0.60	0.5	0.5
32	0.20	0.0	0.0

Tabla N° 4.4. Comparación entre el indicador HF_n establecido por la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos Peruana y obtenido en el prototipo

Orden armónica	HF _n (%) según norma	HF _n (%) carga 24.3 ohm	HF _n (%) carga 12.2 ohm
33	0.20	0.8	0.9
34	0.20	0.0	0.0
35	0.56	0.5	0.5
36	0.20	0.0	0.0
37	0.54	0.9	0.9
38	0.20	0.0	0.0
39	0.20	0.8	0.8
40	0.20	0.0	0.0

Tabla N° 4.4. Comparación entre el indicador HF_n establecido por la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos Peruana y obtenido en el prototipo (continuación)

Los anexos N° 4 y N° 5 muestran las ondas de tensión, corriente y potencia en las baterías, cuando el inversor opera sin carga y cuando opera con una carga de 12.2 ohm. Debido a que las baterías entregan una tensión de corriente continua y circula por ellas una corriente alterna, el equipo de medición considera a la potencia medida como potencia reactiva. De acuerdo a la guía de funcionamiento del Fluke 43, un valor de factor de potencia (PF) cercano a cero indica que la corriente se encuentra retrasada respecto a la tensión, debido a que la tensión de corriente continua no tiene fase la potencia mostrada se encuentra en unidades de voltios-amperios reactivos (VAR).

Para la carga resistiva de 12.2 ohm es posible calcular la eficiencia del inversor a partir de la potencia mostrada en la figura N° 4.5 y la suma de las potencias mostradas en el anexo N° 5, la eficiencia calculada para esta carga es de 57.42 %.

Los anexos N° 6 y N° 7 muestran en detalle las formas de onda de la corriente en las baterías, obtenidas con el osciloscopio Tektronix THS720P, cuando el inversor opera sin carga y con una carga de 12.2 ohm. Las gráficas muestran que las baterías entregan potencia aun sin carga conectada, esto se debe a que cuando conmutan al mismo tiempo dos transistores de un mismo puente H conectados en

serie y en paralelo con la batería, sus tiempos de activación y desactivación se traslapan originándose un pico de corriente. Una solución para evitar estos picos de corriente es esperar la desactivación del transistor que se encontraba conduciendo para iniciar la activación del otro, pero esto originaría un tiempo en el cual la corriente inductiva de una carga con factor de potencia menor a la unidad, no tenga camino por donde circular, lo cual puede producir la destrucción de los transistores.

Para la carga de 12.2 ohm, el anexo N° 7, muestra que las baterías absorben corriente en ciertos periodos de tiempo, esto se debe a que durante la operación del circuito de potencia, circula una corriente que carga a las baterías a través de los diodos internos de los MOSFET. La circulación de la corriente en el circuito de potencia para los diversos niveles de tensión que entrega el inversor se muestra en el anexo N° 8.

Con el objetivo de evaluar el uso de MOSFET que permitan reducir las pérdidas de energía por conmutación y conducción, se realizaron diversas pruebas intercambiando los MOSFET IRF640B por los MOSFET IRFP250N, IRF540N, IRFB260N e IRFB4310. La tabla N° 4.7 muestra las características de estos transistores.

Estos transistores poseen menores tiempos de conmutación y menores resistencias en conducción que el IRF640B, debido a esto último cuando conmutan dos transistores de un mismo puente H conectados en serie y en paralelo con la batería, se produce un pico de corriente mayor. Cuando el inversor opera sin carga, para el IRF640B fusibles de cinco amperios como mínimo soportan los picos de corriente en las baterías, para los MOSFET IRFP250N, IRF540N e IRFB260N fusibles de diez amperios como mínimo soportan los picos de corriente, para el IRFB4310 fusibles de quince amperios como mínimo soportaron los picos de corriente. Se

encontró experimentalmente que a mayor RDON, menor será la intensidad de los picos de corriente en las baterías.

Característica	Unidad	IRF640B	IRFP250N	IRF540N	IRFB260N	IRFB4310
I_D	A	18	30	33	56	140
V_{DSS}	V	200	200	100	100	100
RD_{ON}	ohm	0.18	0.075	0.044	0.04	0.0056
$P_D @ T_C=25^\circ$	w	139	214	130	380	330
td(on)	ns	20	14	11	17	26
tr	ns	145	43	35	64	110
td(off)	ns	145	41	33	52	68
tf	ns	110	33	35	50	78
dv/dt	V/ns	5.5	8.6	7	10	14
di/dt (*)	A/us	300	374	340	480	550
$I_{SD} (*)$	A	18	18	16	34	75

(*) Señalado como condición para el dv/dt mencionado.

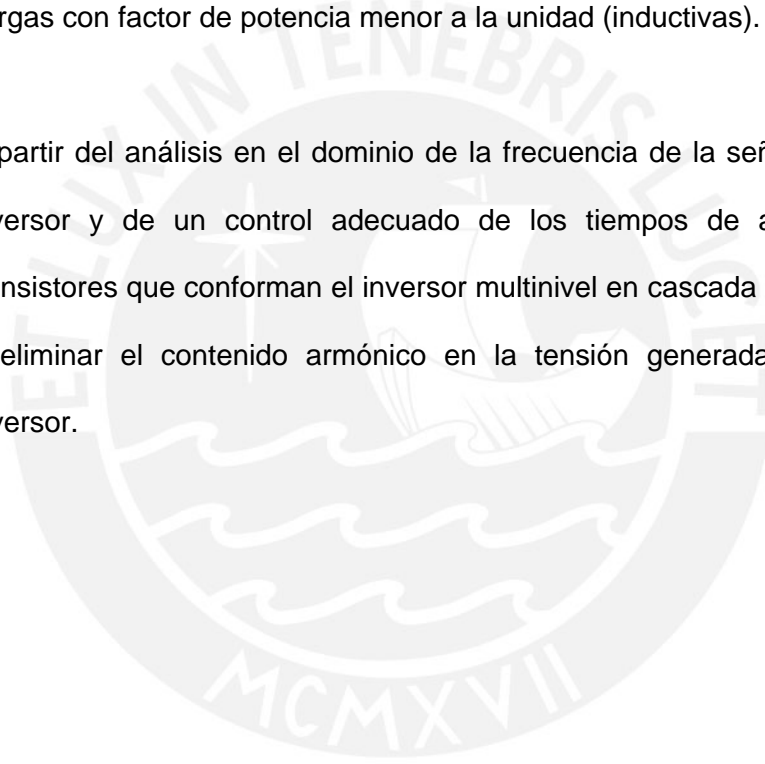
Tabla N° 4.7. Características de los MOSFET IRF640B, IRFP250N, IRF540N, IRFB260N e IRFB4310.

CONCLUSIONES

1. A pesar de contar con un potencial enorme para generar electricidad a partir de fuentes eólicas, más de una cuarta parte de las viviendas del país carecen de electricidad. Esta carencia afecta el desarrollo socioeconómico de este sector de la población, en especial de los que se encuentran en las zonas rurales de nuestro país.
2. La presencia de contenido armónico en la tensión producida por los sistemas de conversión de energía de viento, degrada la calidad de la energía eléctrica generada, al ocasionar pérdidas de energía, reducción de la eficiencia y de la vida útil de diferentes cargas y equipos, interferencias electromagnéticas en las líneas de control y comunicación, y el inadecuado funcionamiento de equipos de protección.
3. La tecnología involucrada en el diseño y la fabricación del inversor electrónico determina la calidad de energía que un sistema de conversión de energía de viento puede entregar.
4. El inversor multinivel en cascada diseñado permite generar, a partir de un arreglo de baterías de diferente referencia, una tensión de corriente alterna con un factor de distorsión armónica total (*THD*) de 5.2%, cuyos parámetros

de calidad de energía se encuentran acorde a lo señalado por la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos Peruana. Para el prototipo construido, se encontró que la tercera, quinta, séptima, novena, undécima, décimo tercera y décimo quinta armónica se mantenían por debajo de las tolerancias establecidas en la norma.

5. El prototipo construido muestra que las baterías pueden absorber corriente durante la operación del inversor, lo cual posibilita el uso del inversor para cargas con factor de potencia menor a la unidad (inductivas).
6. A partir del análisis en el dominio de la frecuencia de la señal a la salida del inversor y de un control adecuado de los tiempos de activación de los transistores que conforman el inversor multinivel en cascada es posible reducir o eliminar el contenido armónico en la tensión generada a la salida del inversor.



RECOMENDACIONES

1. A fin de mantener la variación sostenida de frecuencia dentro de la tolerancia establecida por la Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos Peruana para cualquier carga, se recomienda continuar investigando la relación experimental encontrada entre la frecuencia y la tensión eficaz de la onda generada por el inversor, a partir de la comparación de las formas de onda de tensión, medidas en diferentes cargas resistivas e inductivas.
2. En caso se encuentre que los picos de corriente en las baterías sean excesivos para la característica de máxima corriente pico de los transistores IRFB31N20D, se recomienda utilizar un arreglo de transistores IRFB31N20D o IRF640B en paralelo que permita soportar dicha corriente.
3. Como se ha comprobado, durante el funcionamiento del circuito diseñado, es posible que las baterías absorban potencia. Por ello, se recomienda optimizar los niveles para tres puentes H escalando la magnitud de las baterías en potencia de tres para mejorar la calidad de energía generada.
4. Antes de realizar cualquier medición, se recomienda cargar al máximo las baterías del inversor para evitar que la tensión en los bornes de cada batería disminuya con el tiempo y se logren mediciones estables.

5. Debido a los altos picos de corriente que deben soportar los MOSFET, se recomienda sobre dimensionar el tamaño del disipador, a fin de lograr una mayor disipación de calor.



FUENTES

1. ALONSO, José
1999 Inversores resonantes de alta frecuencia. Universidad de Oviedo. Gijón [en línea]
<<http://www2.ate.uniovi.es/marcos/IR/Inversores%20Resonantes.pdf>>
2. ÁLVAR ONSO, Miguel
2006 Contribuciones al sistema electrónico de control de un convertidor NPC de tres niveles de 250KVA usado en turbinas eólicas [en línea]
<http://www.depeca.uah.es/personal/emilio/tfc_dirigidos.htm>
3. ASOCIACIÓN DANESA DE LA INDUSTRIA EÓLICA
2003 Conexión indirecta a red de aerogeneradores [en línea]
<<http://www.windpower.org/es/tour/wtrb/indirect.htm>>
4. BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO - BID
2006 Oportunidades para la mayoría [en línea]
<<http://enet.iadb.org/idbdocswebservices/idbdocsInternet/IADBPUBLICDOC.aspx?docnum=748824>>
5. BENAVENT, José Manuel et al.
2000 Electrónica de Potencia, teoría y aplicaciones
México, Alfaomega grupo editor
6. BENAVENT, José Manuel et al.
2001 Simulación de circuitos electrónicos de potencia con PSPICE
México, Alfaomega grupo editor
7. BOCANEGRA, Luis et al.
2003 Estudio de la situación actual de la energía eólica y sus perspectivas de aplicación en el sector eléctrico peruano. Tesis (Mag.) PUCP CENTRUM. Mención: Administración Estratégica de Empresas. 187 p.
8. BRETÓN, Alberto
2003 Diseño y construcción de un inversor trifásico multinivel de cuatro etapas para compensación armónica y de reactivos [en línea]
<<http://www2.ing.puc.cl/power/paperspdf/dixon/tesis/Breton.pdf>>
9. DEPARTAMENTO DE ENERGÍA, EE.UU
2005 Sistemas eólicos pequeños para generación de electricidad [en línea]
<<http://www.nrel.gov/docs/fy05osti/37497.pdf>>

10. DE ARMAS, Marcos
Calidad de la energía en los sistemas eléctricos de potencia. Efecto de las perturbaciones de corta duración sobre las máquinas asincrónicas. [en línea]
<<http://energiaycomputacion.univalle.edu.co/edicion22/22art4.pdf>>
11. EL PERUNANO
2005 Ley N° 28546, Ley de promoción y utilización de recursos energéticos renovables no convencionales en zonas rurales, aisladas y de frontera del país [en línea] <<http://www.greenenergy.com.pe/Ley28546.pdf>>
12. ELGUETA, Cristian
2005 Aplicación de un inversor multinivel como variador de frecuencia de un motor de inducción trifásico. [en línea]
<<http://www2.ing.puc.cl/power/paperspdf/dixon/tesis/Elgueta.pdf>>
13. ESCOBAL, Javier y TORERO, Máximo
2004 Análisis de los servicios de Infraestructura rural y las condiciones de vida en las zonas rurales de Perú. [en línea]
<<http://www.grade.org.pe/infraestructura/doc2analisis.pdf>>
14. FERNÁNDEZ, Roberto. et al.
Análisis de un sistema aislado de generación eólica [en línea]
<<http://www.asades.org.ar/averma/5-2001/ar89-06.pdf>>
15. GARCIA, Luis y CUBA, Antonio
2001 Diseño de un aerogenerador de 100 w basado en un generador de imanes permanentes y utilizando tecnología apropiada para el Perú. Tesis (Ing.) PUCP. Facultad de Ciencias e Ingeniería. Mención: Ingeniería Mecánica. Lima
16. GAVIRIA, Carlos.
2004 Utilización de GSSA en el diseño de controladores para rectificadores AC/DC.
Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Automatización Avanzada y Robótica. Barcelona. ix + 107. [en línea]
<http://www.tdx.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-0519105-095424/01Cagl01de01.pdf>
17. INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA - INEI
2005 Censo X de población y V de vivienda [en línea]
<<http://www.inei.gob.pe/cpv2005/>>

18. MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS
1987 Norma de autoprodutores de energía eléctrica y plantas eléctricas de emergencia [en línea]
<<http://www.minem.gob.pe/archivos/dge/legislacion/normas/dge008-p-3-1987.pdf>>
19. MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS
2001 Generación eléctrica a partir de fuentes nuevas: energía eólica [en línea]
<http://www.minem.gob.pe/archivos/ogp/publicaciones/atlasmineriaenergia2001/electricidad/energia_eolica.pdf>
20. MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS
2001 Mapa de potencial disponible de energía eólica [en línea]
<http://www.minem.gob.pe/archivos/ogp/publicaciones/atlasmineriaenergia2001/electricidad/2001_potenc_disponibl_ener_eolica.pdf>
21. MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS
2002 Ley de Electrificación Rural y de Localidades Aisladas y de Frontera. Ley N° 27744 [en línea]
<<http://www.osinerg.gob.pe/osinerg/elect/normas/05/1.LeyElectrificaci%F3nRural.pdf>>
22. MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS
2006 Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos Peruana. Decreto Supremo N° 020-97-EM [en línea]
<<http://www.minem.gob.pe/archivos/dge/publicaciones/compendio/ds02097mod.pdf>>
23. MORA, Carlos y VILLAVICENCIO, Alberto
2005 Marco de desarrollo de pueblos indígenas aplicable al proyecto de electrificación rural [en línea]
<http://www.minem.gob.pe/archivos/ogp/publicaciones/foner/Marco_desarrollo.pdf>
24. NÁJERA, Porfirio et al.
2001 Convertidor de CA/CA con corrección del factor de potencia y alta eficiencia, para aplicaciones en cargas no lineales de uso doméstico [en línea]
<<http://www.depi.itchiuhua.edu.mx/electro/archivo/electro2001/mem2001/articulos/pot1.pdf>>
25. NILSSON, James
1995 Circuitos Eléctricos
Cuarta Edición
Buenos Aires, Addison-Wesley Iberoamericana

26. NORIEGA, Ernesto
2005 Generalidades sobre los armónicos y su influencia en los sistemas de distribución de energía. [en línea]
<<http://www.monografias.com/trabajos21/armonicos/armonicos.shtml>>
27. ORTEGA Mario
2000 Energías Renovables
Madrid. Editorial Paraninfo
28. LÓPEZ, Fernando; MORALES, Oscar
2001 Circuitos Eléctricos II
Tercera edición
Lima. Editorial Ciencias S.R.Ltda.
29. PIETZSCH GARCÍA, Mónica
2004 Convertidores CC/CA para la conexión directa a red de sistemas fotovoltaicos: comparación entre topologías de 2 y 3 niveles [en línea]
<http://biblioteca.upc.es/pfc/mostrar_dades_PFC.asp?id=36106>
30. RAMIREZ, Juan de Dios et al.
2002 Propuesta de Ley que exonera de derechos arancelarios y del pago del Impuesto General a las Ventas, a la importación y venta de equipos de energía solar destinados a zonas rurales. [en línea]
<<http://www2.congreso.gob.pe/sicr/tradocestproc/clproley2001.nsf/0/b9fc4cc8e55a557f05256d25005d5ceb?OpenDocument&Click=>>>
31. RASHID, Muhammad
1993 Electrónica de Potencia. Circuitos, dispositivos y aplicaciones. Segunda Edición
México. Pearson
32. RASHID, Muhammad
2004 Electrónica de Potencia. Circuitos, dispositivos y aplicaciones. Tercera Edición
México. Pearson
33. RÍOS, Carlos et al.
2003 Análisis de armónicos en sistemas eléctricos [en línea]
<<http://www.utp.edu.co/php/revistas/ScientiaEtTechnica/docsFTP/962721%20-%2026.pdf>>
34. RÍOS, Felipe
2003 Diseño y construcción de un inversor trifásico multinivel [en línea]
<<http://www2.ing.puc.cl/power/paperspdf/dixon/tesis/Rios.pdf>>

35. RONCERO, Pedro et al.
2004 Control de lazo cerrado para la eliminación de armónicos en inversores de fuentes de tensión. XXV Jornadas de Automática [en línea]
<<http://www.cea-ifac.es/actividades/jornadas/XXV/documentos/145-edosancisr.pdf>>
36. ROSATO, Mario
1991 Diseño de máquinas eólicas de pequeña potencia
Sevilla. Editorial Progreso
37. SANSONOV, Vassili
2005 Aerodinámica y control de turbinas eólicas
Lima. Apuntes de libro a publicarse
38. SEGUÍ, Salvador et al.
2004 Electrónica de Potencia. Fundamentos básicos.
México. Alfaomega
39. SOTO, Alberto et al.
2006 Propuesta de un control digital para un inversor *Electro Electrónica*, 26:
46 – 54.
Lima
40. VÁSQUEZ, Jaime.
1998 Armónicos IEEE 519 [en línea]
<<http://members.tripod.com/JaimeVp/Electricidad/armonico519.htm>>

ANEXO Nº 1**PROGRAMA QUE RESUELVE EL SISTEMA DE ECUACIONES
TRASCENDENTES NO LINEALES PARA SIETE INCÓGNITAS**

```
x0 = [1; 15; 20; 25; 30; 40; 60];
```

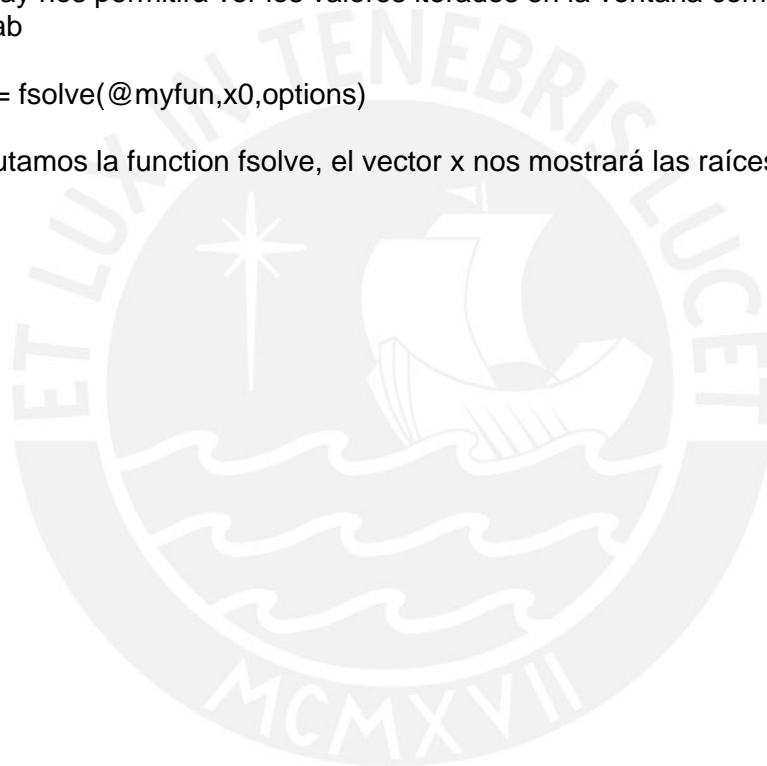
```
% El vector x0 define los valores a partir de los cuales la función fsolve comenzará  
% a buscar la solución de las variables del sistema de ecuaciones.
```

```
options=optimset('Display','iter');
```

```
% A través de la variable options configuramos las opciones de la función fsolve  
% Display nos permitirá ver los valores iterados en la ventana comand window de  
% Matlab
```

```
[x,fval] = fsolve(@myfun,x0,options)
```

```
% Ejecutamos la función fsolve, el vector x nos mostrará las raíces de la ecuación.
```



ANEXO Nº 2
**PROGRAMA QUE IMPLEMENTA EL SISTEMA DE ECUACIONES
TRASCENDENTES NO LINEALES PARA SIETE INCÓGNITAS**

% La función myfun implementa el sistema de ecuaciones trascendentes no lineales
% Esta función será llamada por la función fsolve descrita en el anexo N°1

function F = myfun(x)

k = pi/180;

F = [cos(3*x(1)*k) + cos(3*x(2)*k) + cos(3*x(3)*k) + cos(3*x(4)*k) + cos(3*x(5)*k) +
cos(3*x(6)*k) + cos(3*x(7)*k);

cos(5*x(1)*k) + cos(5*x(2)*k) + cos(5*x(3)*k) + cos(5*x(4)*k) + cos(5*x(5)*k) +
cos(5*x(6)*k) + cos(5*x(7)*k);

cos(7*x(1)*k) + cos(7*x(2)*k) + cos(7*x(3)*k) + cos(7*x(4)*k) + cos(7*x(5)*k) +
cos(7*x(6)*k) + cos(7*x(7)*k);

cos(9*x(1)*k) + cos(9*x(2)*k) + cos(9*x(3)*k) + cos(9*x(4)*k) + cos(9*x(5)*k) +
cos(9*x(6)*k) + cos(9*x(7)*k);

cos(11*x(1)*k) + cos(11*x(2)*k) + cos(11*x(3)*k) + cos(11*x(4)*k) + cos(11*x(5)*k) +
cos(11*x(6)*k) + cos(11*x(7)*k);

cos(13*x(1)*k) + cos(13*x(2)*k) + cos(13*x(3)*k) + cos(13*x(4)*k) + cos(13*x(5)*k) +
cos(13*x(6)*k) + cos(13*x(7)*k);

cos(15*x(1)*k) + cos(15*x(2)*k) + cos(15*x(3)*k) + cos(15*x(4)*k) + cos(15*x(5)*k) +
cos(15*x(6)*k) + cos(15*x(7)*k)];

MCMXVII

ANEXO Nº 3

PROGRAMA PARA CONTROLAR LA ACTIVACIÓN SECUENCIAL DE LOS TRANSISTORES DEL INVERSOR MULTINIVEL EN CASCADA DE QUINCE NIVELES

```

.include "m8def.inc"

;*****
; PROGRAMA DE CONTROL DEL INVERSOR MULTINIVEL
; Este programa permite controlar la activación secuencial de 12 MOSFET
;*****

;*****
; Definición de Variables

.def Tiempo_L= R23 ; duración de la salida en microsegundos
.def Tiempo_H      = R24

.def Contador_L    = R25 ; contador que será incrementado con cada
interrupción del timer
.def Contador_H    = R26;

.def Ncuenta      = R27 ; puntero que indica el valor de la tabla a llamar

.equ Maximo       = 30 ; número de intervalos de tiempo en un ciclo

.cseg
.org $0000
    RJMP Inicio

.org $0006
    RJMP RSI_TIMER_10us

;*****
; Programa Principal

Inicio:
; Definimos el puntero de pila
    LDI    R16, HIGH(RAMEND)
    OUT   SPH, R16
    LDI    R16, LOW (RAMEND)
    OUT   SPL, R16

; Configuramos los puertos
    LDI    R16, $FF
    OUT   DDRB, R16
    OUT   DDRC, R16

; Definimos las tablas
    RCALL DefineTablas
  
```



```

; Limpiamos nuestras variables
  CLR  Tiempo_H
  CLR  Tiempo_L
  CLR  Contador_H
  CLR  Contador_L
  CLR  Ncuenta

; Configuramos el registro TCCR1A:
  LDI  R16, 0
  OUT  TCCR1A, R16

; Configuramos el registro TCCR1B:
  LDI  R16, 0b00001001
  OUT  TCCR1B, R16

; Configuramos el registro TMSK:
  LDI  R16, 0b00010000
  OUT  TMSK, R16

; Configuramos el registro OCR1A:
  LDI  R16, $00
  OUT  OCR1AH, R16

  LDI  R16, $4F          ;cada 10us produce una interrupción a 8MHz
  OUT  OCR1AL, R16

; Habilita todas las interrupciones
  SEI

; Se inicia el lazo infinito del programa principal
Lazo:
  CP   Contador_L,Tiempo_L
  CPC  Contador_H,Tiempo_H
  BRNE Lazo

  LDI  ZH, High(Tabla_Salida*2)
  LDI  ZL, Low (Tabla_Salida*2)
  MOV  R16, Ncuenta
  LSL  R16
  ADD  ZL, R16
  CLR  R16
  ADC  ZH, R16
  LPM  R16, Z+
  LPM  R17, Z
  OUT  PortC, R16      ; Cambia el valor del puerto B y C de acuerdo a tabla
de salida
  OUT  PortB, R17

  LDI  ZH, High(Tabla_Tiempo*2)
  LDI  ZL, Low (Tabla_Tiempo*2)
  MOV  R16, Ncuenta
  LSL  R16
  ADD  ZL, R16
  CLR  R16

```

```

ADC   ZH, R16
LPM   Tiempo_H, Z+
LPM   Tiempo_L, Z ; Actualiza el valor del registro Tiempo

INC   Ncuenta

CPI   Ncuenta, Maximo
BRLO  LimpiaCuenta
CLR   Ncuenta
    
```

LimpiaCuenta:

```

CLR   Contador_L
CLR   Contador_H
RJMP  Lazo
    
```

```

;*****
;
; Definición de tablas
    
```

DefineTablas:

Tabla_Salida:

```

.db 0b00110011, 0b00001100
.db 0b00110011, 0b00001001
.db 0b00110010, 0b00011100
.db 0b00110010, 0b00011001
.db 0b00100111, 0b00001100
.db 0b00100111, 0b00001001
.db 0b00100110, 0b00011100
.db 0b00100110, 0b00011001
.db 0b00100110, 0b00011100
.db 0b00100111, 0b00001001
.db 0b00100111, 0b00001100
.db 0b00100111, 0b00001100
.db 0b00100111, 0b00001100
.db 0b00110010, 0b00011001
.db 0b00110010, 0b00011100
.db 0b00110011, 0b00001001
.db 0b00110011, 0b00001100
.db 0b00110011, 0b00001100
.db 0b00110011, 0b00000110
.db 0b00110001, 0b00101100
.db 0b00110001, 0b00100110
.db 0b00011011, 0b00001100
.db 0b00011011, 0b00000110
.db 0b00011001, 0b00101100
.db 0b00011001, 0b00100110
.db 0b00011001, 0b00101100
.db 0b00011011, 0b00000110
.db 0b00011011, 0b00001100
.db 0b00110001, 0b00100110
.db 0b00110001, 0b00101100
.db 0b00110011, 0b00000110
.db 0b00110011, 0b00001100
    
```

Tabla_Tiempo:

```

.db $01, $54
    
```

```

.db $00, $32
.db $02, $76
.db $00, $E6
.db $02, $1C
.db $01, $AE
.db $02, $A8
.db $09, $EC
.db $02, $9E
.db $01, $AE
.db $02, $26
.db $00, $E6
.db $02, $6C
.db $00, $32
.db $01, $54
.db $01, $5E
.db $00, $32
.db $02, $6C
.db $00, $E6
.db $02, $26
.db $01, $A4
.db $02, $A8
.db $09, $EC
.db $02, $A8
.db $01, $A4
.db $02, $26
.db $00, $E6
.db $02, $6C
.db $00, $32
.db $01, $5E

```

RET

```

,*****
,
; Rutina de Interrupción

```

RSI_TIMER_10us:

```

IN    R10,SREG    ; salvamos el registro de las banderas en pila
PUSH R10

```

```

LDI   R16, $0A

```

```

ADD   Contador_L, R16    ; incrementamos el valor del contador en 10us

```

```

CLR   R16

```

```

ADC   Contador_H, R16

```

```

POP   R10

```

```

OUT   SREG,R10    ; devolvemos el valor de la bandera

```

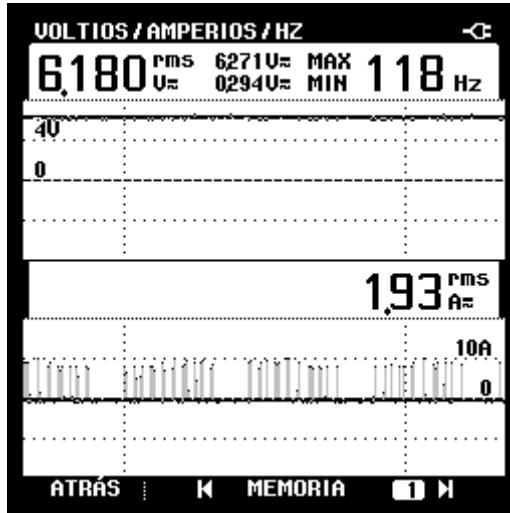
```

RETI

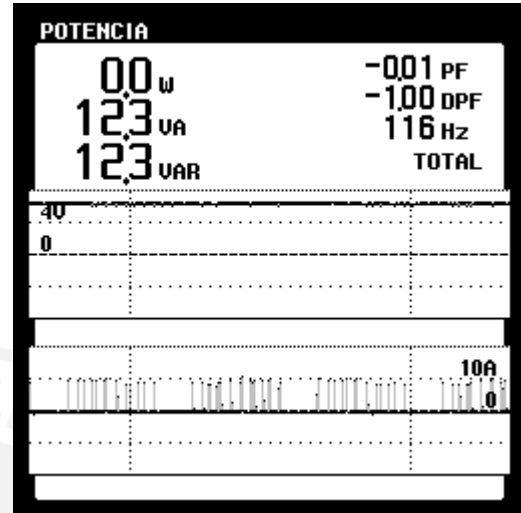
```

ANEXO Nº 4

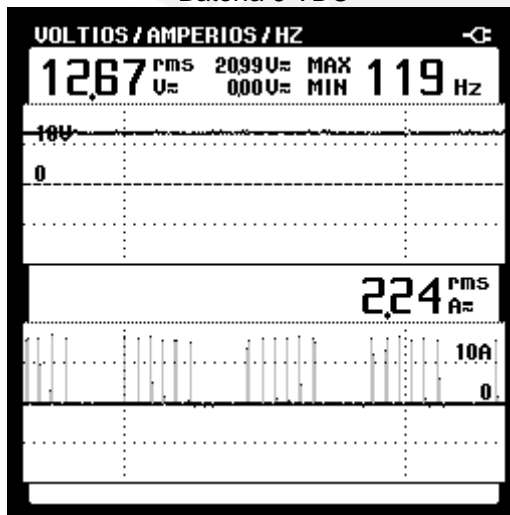
FORMAS DE LAS ONDAS DE TENSIÓN, CORRIENTE Y POTENCIA EN LAS BATERÍAS CUANDO EL INVERSOR OPERA SIN CARGA



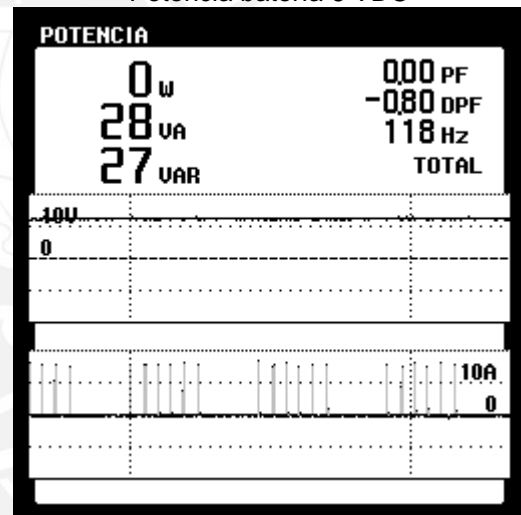
Batería 6 VDC



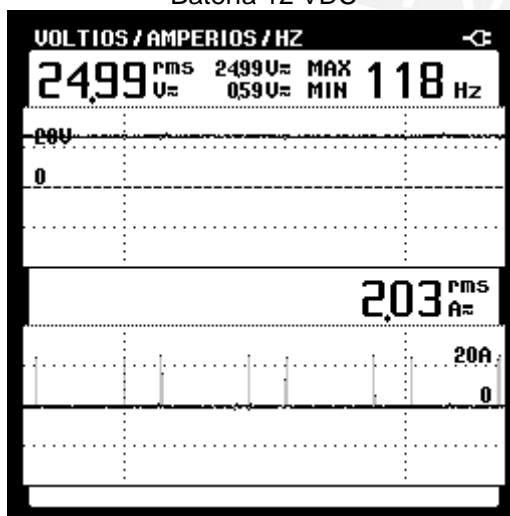
Potencia batería 6 VDC



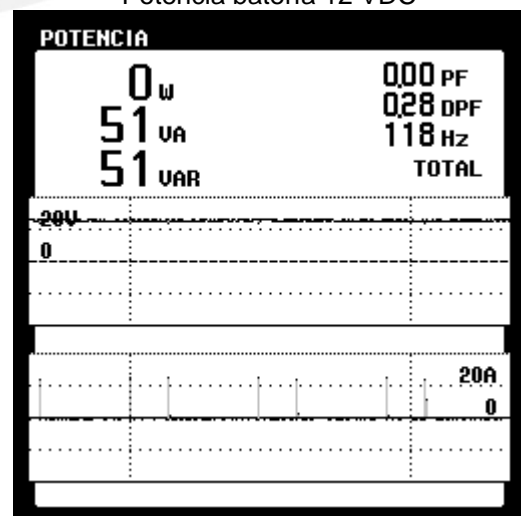
Batería 12 VDC



Potencia batería 12 VDC



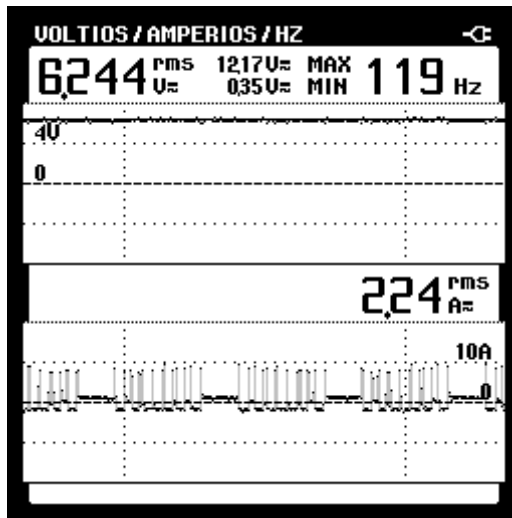
Batería 24 VDC



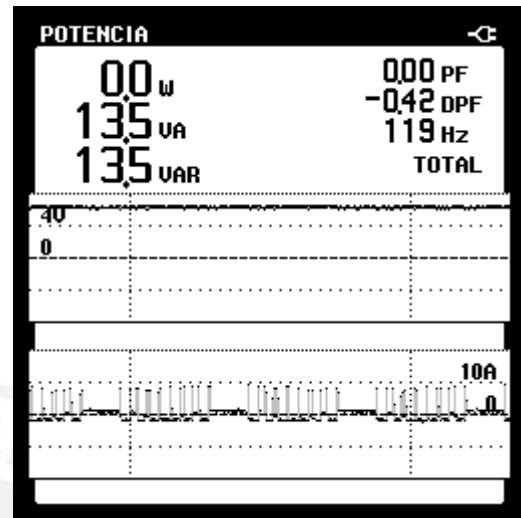
Potencia batería 24 VDC

ANEXO Nº 5

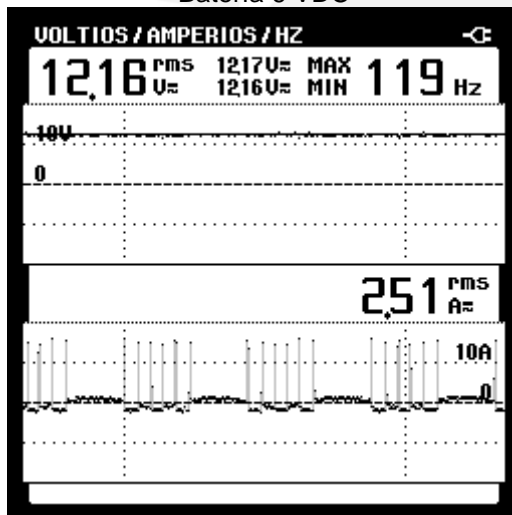
FORMAS DE LAS ONDAS DE TENSIÓN, CORRIENTE Y POTENCIA EN LAS BATERÍAS CUANDO EL INVERSOR OPERA CON UNA CARGA DE 12.2 OHM



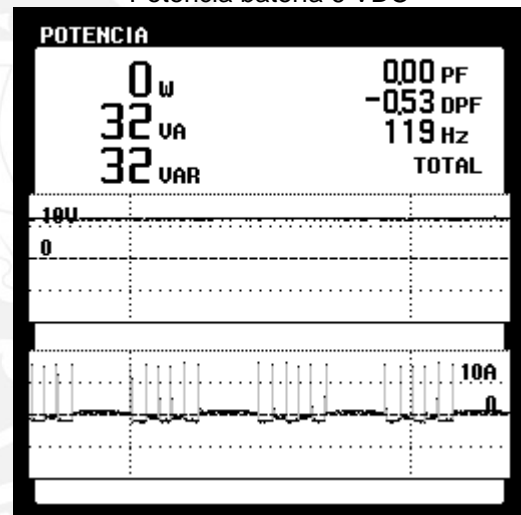
Batería 6 VDC



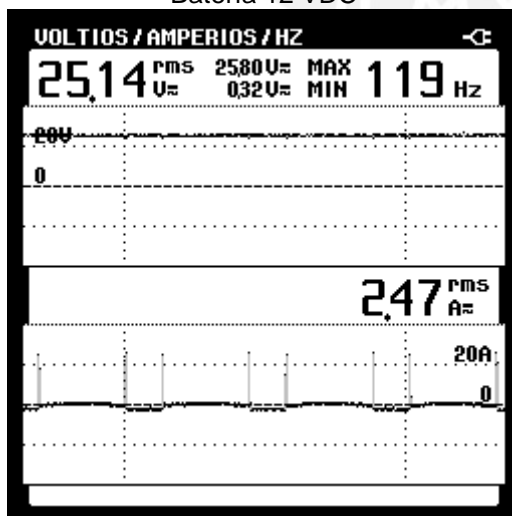
Potencia batería 6 VDC



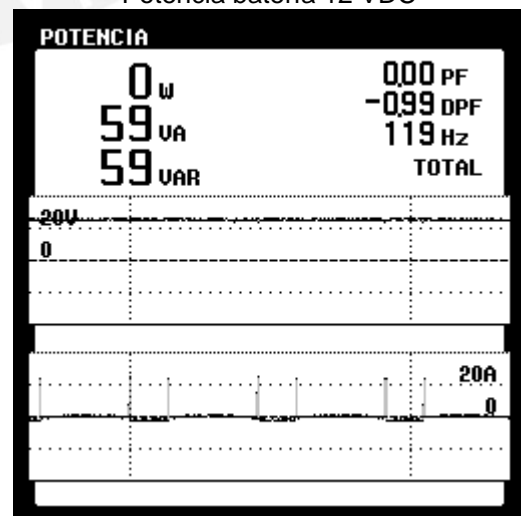
Batería 12 VDC



Potencia batería 12 VDC



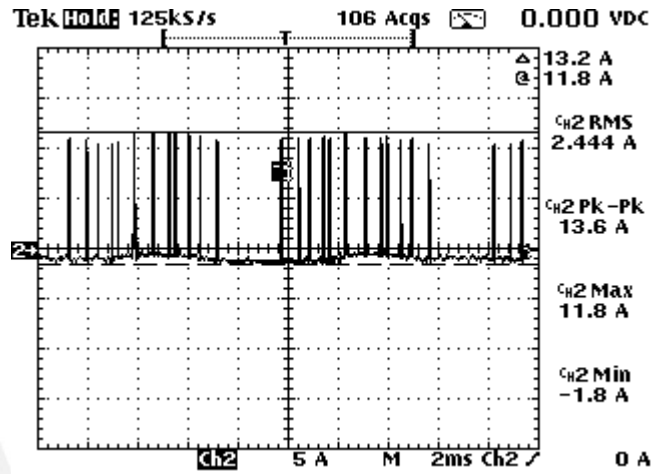
Batería 24 VDC



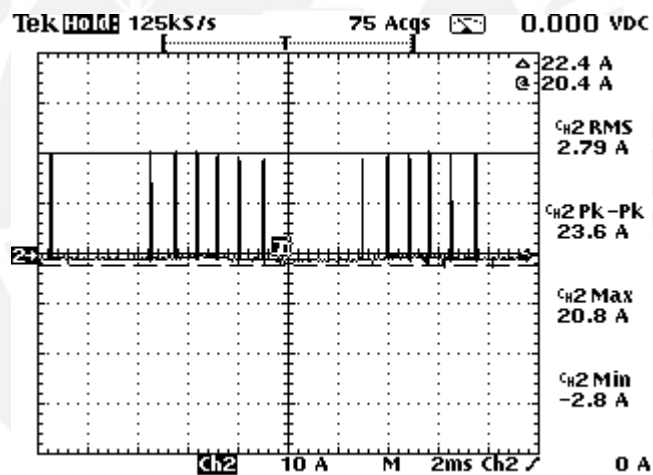
Potencia batería 24 VDC

ANEXO Nº 6

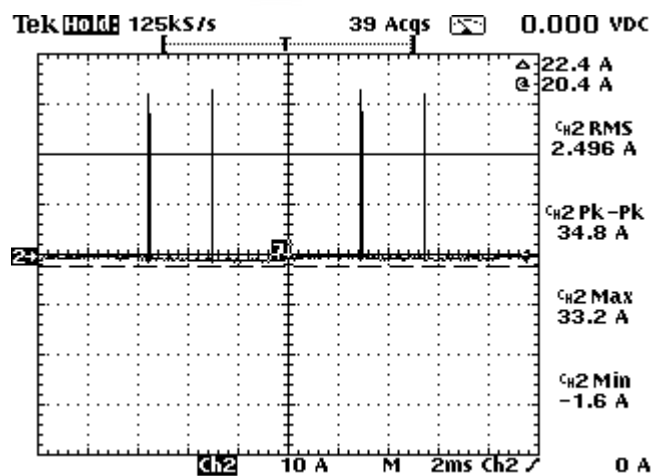
FORMAS DE ONDA DE CORRIENTE EN LAS BATERÍAS CUANDO EL INVERSOR OPERA SIN CARGA OBTENIDAS CON EL OSCILOSCOPIO TEKTRONIX THS720P



Batería 6 VDC



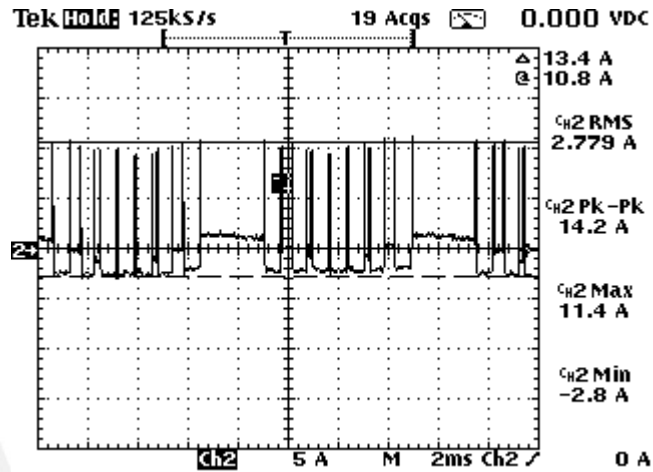
Batería 12 VDC



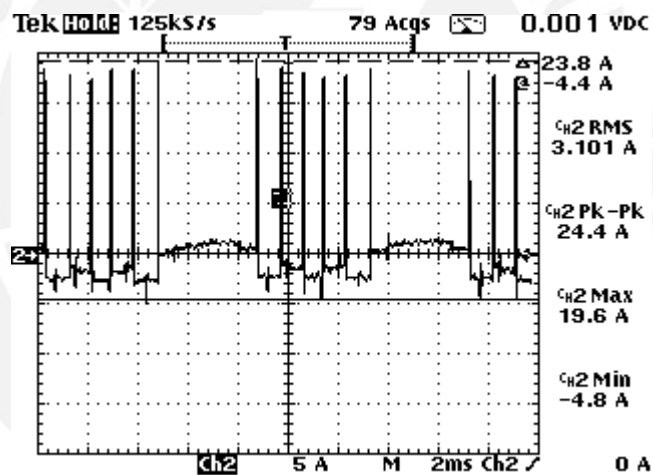
Batería 24 VDC

ANEXO N° 7

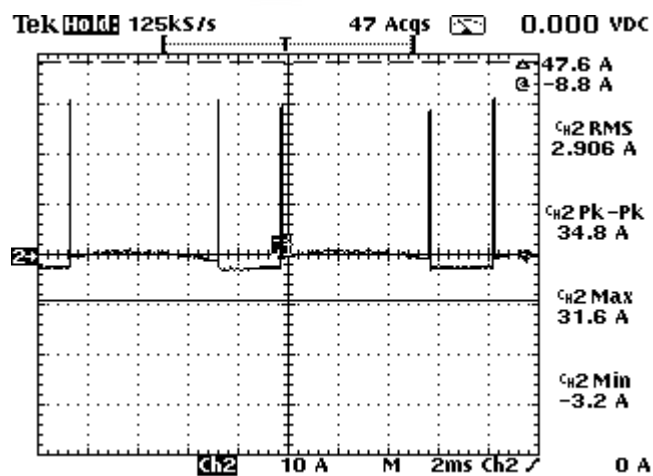
FORMAS DE ONDA DE CORRIENTE EN LAS BATERÍAS CUANDO EL INVERSOR OPERA CON UNA CARGA DE 12.2 OHM OBTENIDAS CON EL OSCILOSCOPIO TEKTRONIX THS720P



Batería 6 VDC



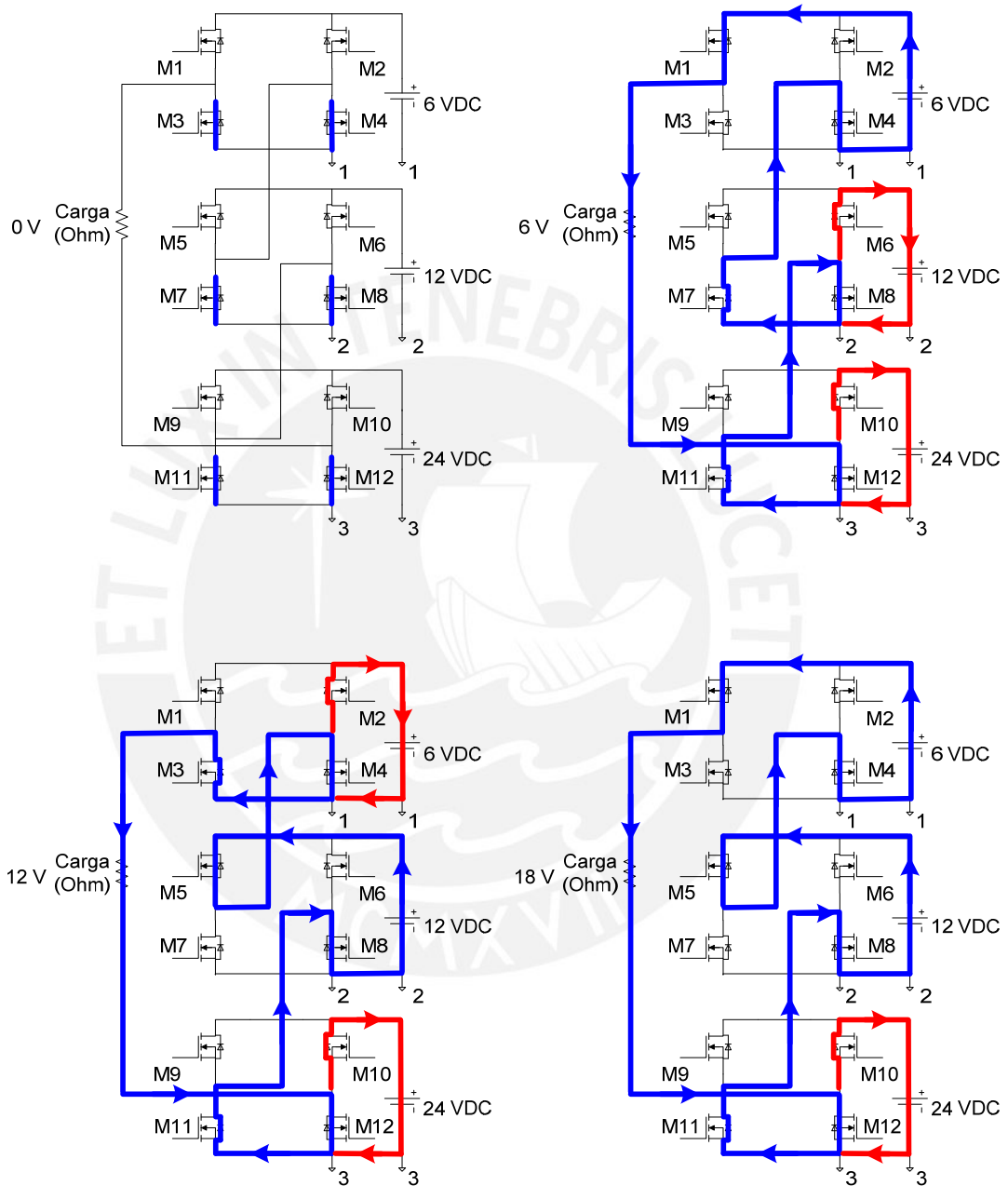
Batería 12 VDC



Batería 24 VDC

ANEXO Nº 8

CIRCULACIÓN DE LA CORRIENTE EN EL CIRCUITO DE POTENCIA PARA LOS DIVERSOS NIVELES DE TENSIÓN QUE ENTREGA EL INVERSOR



ANEXO Nº 8

CIRCULACIÓN DE LA CORRIENTE EN EL CIRCUITO DE POTENCIA PARA LOS DIVERSOS NIVELES DE TENSIÓN QUE ENTREGA EL INVERSOR

