

Análisis de la Aplicación de la Electrónica de Potencia en el Sistema Inversor de los
Vehículos Eléctricos

Marco A. Morales

Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Internacional SEK, Quito

Nota de Autor

Marco A. Morales, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Internacional SEK;
Director Santiago Celi.

Cualquier correspondencia concerniente a este trabajo puede dirigirse a:

mmorales.mec@uisek.edu.ec

Declaración Juramentada

Yo, MARCO ANTONIO MORALES HORMAZA, con cédula de identidad 171595188-3, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que se ha consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento. A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

MARCO A. MORALES HORMAZA

C.I.: 171595188-3

Agradecimiento

Quiero agradecer a mis Padres quienes han sido el pilar fundamental para que yo llegue hasta aquí. Gracias por haber inculcado en mí la perseverancia y el deseo de continuar y terminar lo que me proponga. A mi hermano del quien soy ejemplo y que es mi apoyo en los momentos difíciles. A mis maestros de la Universidad quienes supieron enseñarme y motivarme para continuar hasta el final en mi carrera. A mi director de unidad de titulación el Ing. Santiago Celi por sus conocimientos y experiencia lo cual me ha permitido terminar mis estudios con éxito.

Dedicatoria

Dedico este trabajo de investigación con mucho cariño a mis padres, porque sin su apoyo y preocupación no hubiera logrado llegar tan lejos. A mi familia por su participación y ayuda a lo largo de mi carrera. Y finalmente a mis compañeros y profesores con los que pude compartir muchas experiencias, pudiendo aprender mucho de ellos.

ÍNDICE

Declaración Juramentada 2

Agradecimiento 3

Dedicatoria 4

Resumen 11

INTRODUCCIÓN 12

 Antecedentes 12

 Historia de la electrónica de potencia..... 12

 Actualidad 13

Objetivo 14

 Justificación..... 14

 Marco Teórico 15

 Vehículos híbridos y eléctricos 15

 El sistema inversor del Toyota Prius híbrido 16

 Funciones del sistema inversor 17

 Sistema de conversión de tensión..... 18

 Sistema de inversión de corriente DC – AC..... 20

 Refrigeración del sistema Inversor 22

 Inversor de corriente..... 24

 Transistores IGBT. 26

 Convertidores de corriente continua (DC-DC) 27

Convertidor elevador (Boost).....	27
Convertidor reductor Buck.....	28
Modulación por ancho de pulso (PWM)	28
Controlador de modos deslizante avanzado (ASMC).	29
METODO	31
Análisis del diseño	31
Convertidor tipo Boost	32
Diseño del convertidor elevador tipo Boost	33
Diseño del convertidor elevador Boost en Simulink.....	35
Inversor trifásico de 6 pasos desfasado a 120°	35
Diseño del Inversor Trifásico en Simulink.....	38
Convertidor Reductor (Buck).....	39
Condiciones de diseño convertidor reductor tipo Buck.	39
Diseño Convertidor Reductor Buck Simulink.....	42
RESULTADOS	43
Convertidor elevador tipo Boost.	43
Resultados Simulación Simulink	43
Inversor Trifásico	45
Resultados Simulación Simulink	45
Convertido Buck	47
Resultados y Simulación Simulink	48
Diagrama de flujo del módulo inversor.....	49

DISCUSION.....	51
Conclusiones	53
Recomendaciones.....	53
BIBLIOGRAFIA.....	55
ANEXOS.....	57
Anexo A. Data sheet Transistor IGBT IRG4BC30K.....	57
Anexo B. Data sheet batería Bosch D126	58
Anexo C_ Cálculos realizados	60

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Historia de la electrónica de Potencia. 13

Figura 2. Aplicaciones de la electrónica de potencia. 14

Figura 3. Ventas mundiales de autos de pasajeros e intensidad promedio de emisión. 15

Figura 4. Toyota Prius Hibrido didáctico. 16

Figura 5. Esquema eléctrico del Inversor del Toyota Prius Hibrido. 17

Figura 6. Conjunto de condensadores 19

Figura 7. Esquema eléctrico Moto generadores Toyota Prius. 20

Figura 8. Moto generador 1. 21

Figura 9. Moto generador 2. 21

Figura 10. Esquema eléctrico inversor de A/C. 22

Figura 11. Sistema de refrigeración del módulo inversor y moto generadores. 24

Figura 12. Inversor monofásico. 25

Figura 13. Esquema inversor Trifásico de 6 pasos. 25

Figura 14. Esquema de conmutación para salida de 6 pulsos. 26

Figura 15. Tensiones línea-neutro para una carga conectada en estrella. 26

Figura 16. Diagrama convertidor elevador Boost. 27

Figura 17. (a) Convertidor CC-CC reductor. 28

Figura 18 Modulación PWM unipolar y bipolar. 29

Figura 19 Comparación controlador deslizante C-SMC y ASMC 30

Figura 20. Diagrama de flujo del diseño. 31

Figura 21. Diagrama de flujo del convertidor elevador (Boost). 32

Figura 22. Convertidor elevador Boost en Simulink..... 35

Figura 23. Inversor Trifásico de 6 pasos. 36

Figura 24. Diagrama de flujo del inversor trifásico. 37

Figura 25. Primer paso de funcionamiento del inversor trifásico. 37

Figura 26. Segundo paso de funcionamiento del inversor trifásico. 38

Figura 27. Inversor Trifásico con controlador de ancho de pulso (PWM) en Simulink 38

Figura 28. Diagrama de flujo convertidor reductor Buck. 39

Figura 29. Convertidor reductor Buck en Simulink. 42

Figura 30. Convertidor Boost..... 44

Figura 31. Gráfica Osciloscópica del Voltaje de salida del convertidor tipo Boost. El eje “y”
representa el voltaje en voltios, el eje “x” representa el lapso de tiempo en milisegundos que
duro la simulación. 44

Figura 32. Diseño inversor trifásico Simulink 45

Figura 33. Esquema de conmutación de las fases U, V y W del inversor trifásico..... 46

Figura 34. Diagrama del inversor trifásico para una carga conectada en estrella 46

Figura 35. Medición de la tensión línea-neutro para una carga en estrella sin toma de tierra
delas fases V, W, U. 47

Figura 36. Convertidor reductor Buck. 48

Figura 37. Grafica Osciloscopica del Voltaje de salida del convertidor Buck..... 49

Figura 38. Diagrama de flujo del diseño del módulo inversor 50

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resultados del diseño del Convertidor Boost.....	43
Tabla 2. Resultados del diseño del inversor Trifásico.....	45
Tabla 3. Resultados del diseño del Convertidor Boost.....	47

Resumen

El presente documento de investigación tiene como objeto el estudio de las aplicaciones de la electrónica de potencia en el sistema inversor de los vehículos eléctricos. Para esto se describe la historia de la electrónica de potencia, los componentes principales del sistema inversor-convertidor de los vehículos eléctricos, y las funciones de los subsistemas del sistema inversor que utilizan electrónica de potencia como son: los convertidores de potencia tanto elevadores y reductores, como también el inversor de corriente continua a corriente alterna. Para el análisis de la aplicación de la electrónica de potencia en el sistema inversor, se propone un modelo simple pero que refleja el funcionamiento de éste, realizando los cálculos respectivos y llevando acabo simulaciones que permitan comprobar el funcionamiento de los convertidores elevadores, convertidores reductores y los inversores trifásicos.

INTRODUCCIÓN

Según Rashid (2004) “la electrónica de potencia se puede definir como la aplicación de la electrónica de estado sólido para el control y la conversión de la energía eléctrica.” Entonces se puede definir a la electrónica de potencia como la combinación de la energía, la electrónica y el control.

El control se encarga del régimen permanente y de las características dinámicas de los sistemas. La energía tiene que ver con el equipo de potencia estática y rotativa o giratoria, para la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica y finalmente la electrónica se ocupa de los dispositivos y circuitos de estado sólido requeridos en el procesamiento de señales para cumplir con los objetivos de control deseados.

Antecedentes

Historia de la electrónica de potencia.

La historia de la electrónica de potencia se inicia en 1900 con la introducción del rectificador de arco de mercurio. Después se introdujeron los rectificadores de tanque metálico, del tubo al vacío controlado por una rejilla, el ignitrón, el fanotrón y el tiratrón. Estos dispositivos servían para el control de potencia y se utilizaron hasta 1950. Sin embargo es en 1948 donde empieza a tomar fuerza la electrónica de potencia con la invención del transistor de silicio en los Bell Telephone Laboratories, por Bardeen, Brattain y Shockley. A partir de este invento se puede decir que nace la tecnología moderna de la electrónica avanzada.

La microelectrónica moderna fue evolucionando progresivamente con la invención de los transistores de silicio. En 1956 Bell laboratories inventa el transistor de disparo PNP, al que se le dio nombres como tiristor, o rectificador controlado de silicio. Con el desarrollo comercial del tiristor por parte de la General Electric Company se daría inicio a una nueva era de la electrónica de potencia.

Con la revolución de la micro electrónica los avances que se dieron con la inclusión de nuevos semiconductores y técnicas de conversión; permitió tener la capacidad de procesar una cantidad gigantesca de información con una rapidez increíble. Lo mismo que sucedió con la revolución en la electrónica de potencia, ya que la eficiencia en el control de grandes cantidades de potencia empezó a crecer constantemente.

La revolución de la electrónica adquirió impulso a finales de los años 80 y a principios de los 90. Como se puede apreciar en la figura 1, gracias al enlace entre la electrónica de potencia con la microelectrónica, están surgiendo actualmente muchas aplicaciones potenciales de la electrónica de potencia, y esta tendencia va a continuar. Por lo que Rashid (2004) dice que “Dentro de los siguientes 30 años, la electrónica de potencia conformará y acondicionará la electricidad en algún lugar de la red de transmisión entre su generación y todos los usuarios.”

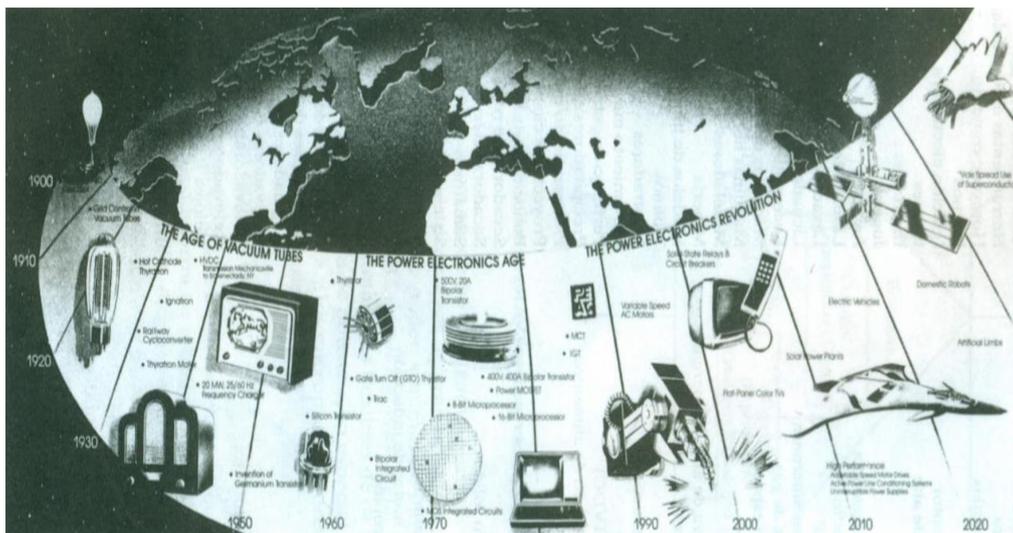


Figura 1. Historia de la electrónica de Potencia. (RASHID, 2004)

Actualidad

“La electrónica de potencia (o electrónica de las corrientes fuertes) es una técnica relativamente nueva que se ha desarrollado gracias al avance tecnológico que se ha alcanzado en la producción de dispositivos semiconductores” (Gonzales, 2009)

La electrónica de potencia ya encontró un lugar importante en la tecnología moderna, y se usa ahora en infinidad de productos de gran potencia, como controles de temperatura, de iluminación, de motores, fuentes de poder, sistemas de impulsión de vehículos y sistemas de corriente directa en alto voltaje, como se aprecia en la figura 2. Se puede determinar entonces que la electrónica de potencia se encuentra en la mayoría de los elementos electrónicos actuales especialmente en los dispositivos de potencia y en microprocesadores.

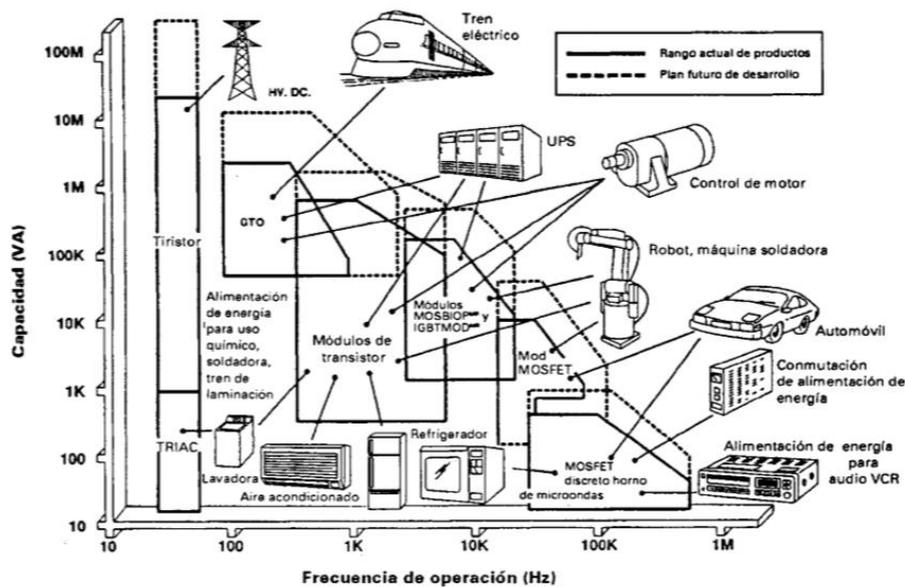


Figura 2. Aplicaciones de la electrónica de potencia. (Hart, 2001)

Objetivo

Analizar la aplicación de la electrónica de potencia en los inversores de los vehículos eléctricos, por medio de la descripción de los componentes del módulo inversor y simulando los principales procesos que realiza este sistema; para ofrecer información detallada que sea de utilidad al lector sobre este elemento de los vehículos híbridos y eléctricos los cuales ya se encuentran en el mercado ecuatoriano.

Justificación

La importancia de este análisis se basa principalmente en generar un recurso bibliográfico para el usuario que le permita familiarizarse con el funcionamiento de los vehículos híbridos y

eléctricos, ya que según Parra (2011) “El aporte más relevante en el corto plazo para disminuir el consumo de petróleo y mitigar la cantidad de emisiones de CO2 está dado por los vehículos híbridos y los vehículos híbridos “plug-in”. Así lo indican las proyecciones para los próximos 20 años de la Agencia Internacional de Energía en la venta de autos: eléctricos, híbridos y convencionales a gasolina, bajo el escenario 450”. El escenario 450 consiste en, limitar el contenido de CO2 en la atmósfera a 450 partes por millón; para no incrementar en más de 2°C la temperatura del planeta sobre los niveles preindustriales. Como se presenta en la figura 3.

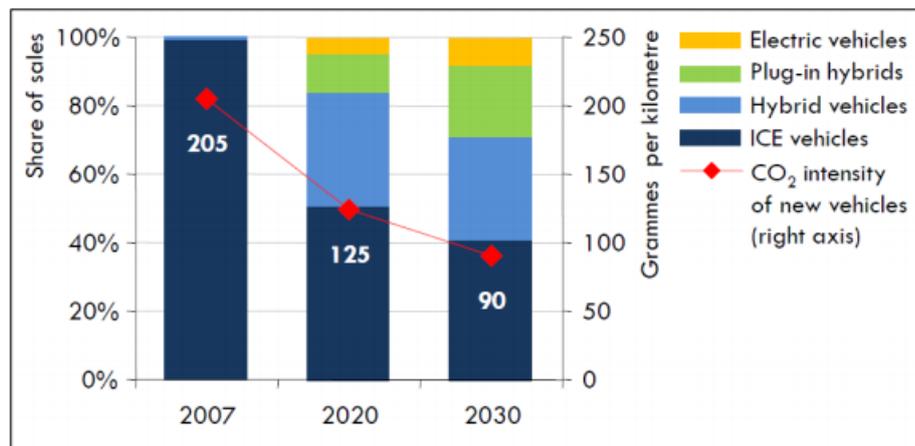


Figura 3. Ventas mundiales de autos de pasajeros e intensidad promedio de emisión. (Parra, 2011)

Marco Teórico

Vehículos híbridos y eléctricos

“La historia de los vehículos híbridos y eléctricos refleja tendencias económicas y sociales. La popularidad de los vehículos eléctricos aumentan cuando los precios del combustible suben o cuando la sociedad se encuentra consternada sobre la contaminación ambiental” (Anderson & Anderson, 2005)

La utilización de este tipo de vehículos presenta ventajas principalmente desde el punto de vista medioambiental, ya que permite disminuir el nivel de emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera.

Estableciendo una diferencia entre los vehículos eléctricos e híbridos se puede establecer que el vehículo eléctrico se caracteriza porque para su propulsión utiliza un sistema de motor eléctrico, el cual es alimentado por baterías de iones de Litio (Li-ion), mientras que los vehículos híbridos además de utilizar un motor eléctrico establecen una combinación de fuentes de energías con un motor de combustión interna.

El sistema inversor del Toyota Prius híbrido

El sistema inversor en los vehículos híbridos y eléctricos como es el caso del Toyota Prius se emplea para transformar la corriente continua de la batería de alto voltaje en corriente alterna para el funcionamiento de los moto generadores, su funcionamiento es controlado por la ECU híbrida del vehículo. En la figura 4, se presenta el Toyota Prius híbrido en corte.



Figura 4. Toyota Prius Híbrido didáctico. (Clavero)

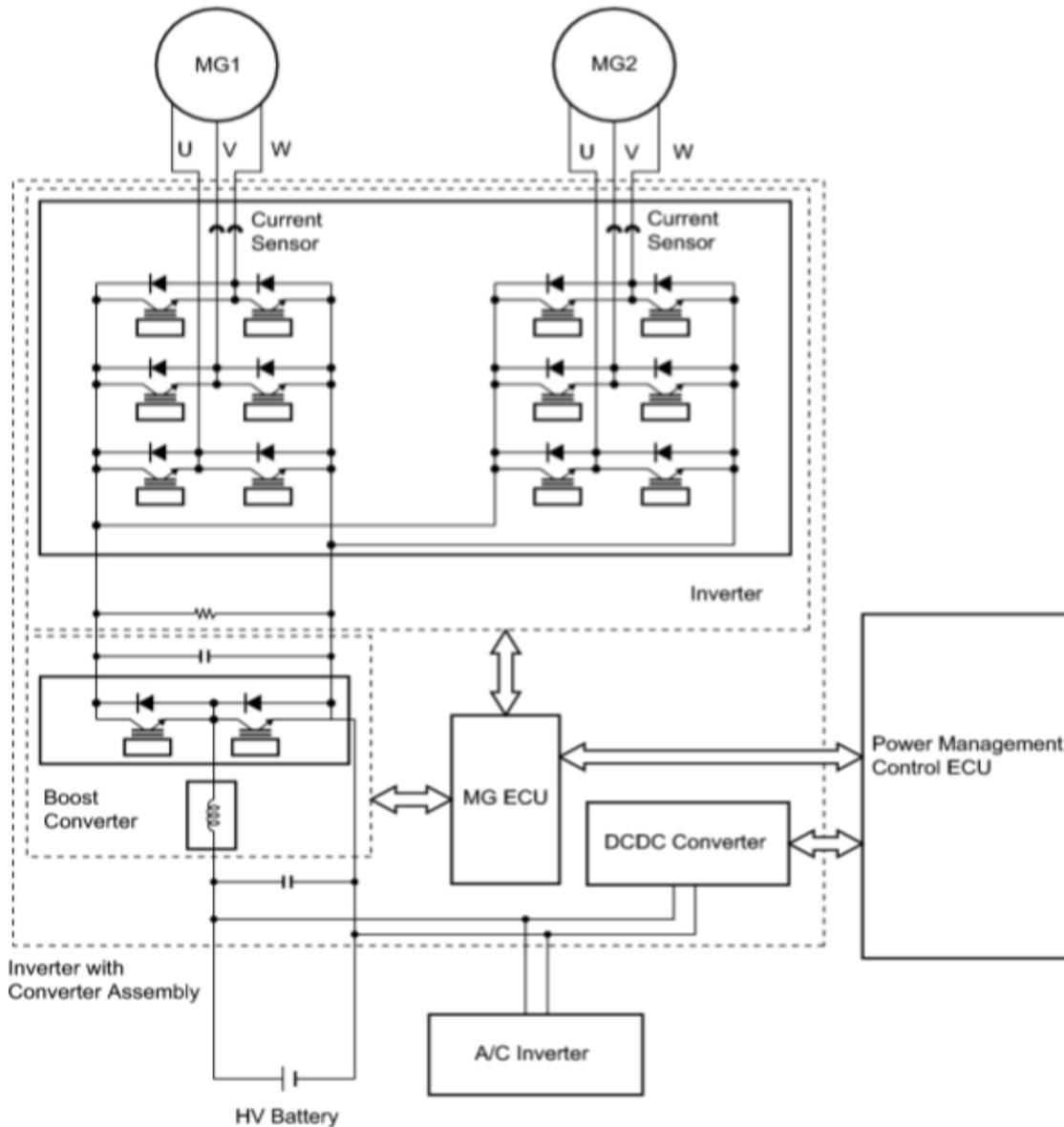


Figura 5. Esquema eléctrico del Inversor del Toyota Prius Híbrido. (Toyota Motor Corporation, 2011)

Funciones del sistema inversor

Las funciones que cumple el sistema inversor del Toyota Prius son las siguientes:

- Elevar la tensión de 207,2 V a 500V en corriente continua (CC).
- Generar una corriente alterna trifásica para mover el moto generador uno (MG1) y el moto generador dos (MG2) de forma independiente.

- Generar una corriente alterna trifásica capaz de mover un motor eléctrico para el aire acondicionado.
- Cargar la batería de 12 V.

Sistema de conversión de tensión

El sistema de conversión de tensión es una parte fundamental del sistema inversor ya que es el que eleva la tensión de la batería de alto voltaje o high-voltage (HV), hasta alcanzar la tensión necesaria para que funcionen los moto generadores. Todo el proceso de conmutación es procesado por la unidad de control electrónico (ECU) del Prius.

Elevador de tensión (Boost)

“Su aplicación principal es en fuentes de energía de CC regulada y en el frenado regenerativo de motores de CC. Como implica su nombre, el voltaje de salida siempre es más grande que el voltaje de entrada.”(MOHAN et al, 2009)

Es por esto que este tipo de elevador de tensión de refuerzo o Boost se utiliza en los inversores de los automóviles híbridos y eléctricos para elevar el voltaje de corriente continua. Está conformado por un reactor y módulo inteligente de potencia (IPM) el cual en su interior contiene dos transistores IGBT que realizan la conmutación de acuerdo a lo que indique la ECU del vehículo.

Reactor

“El reactor es un componente electrónico que tiene la característica de ser resistente a los cambios en el flujo de corriente. Si un circuito con un reactor que cambia su estado de encendido y luego a apagado, el reactor intentara mantener el flujo de corriente después de haber sido apagado.” (Pauta & Miotto, 2014)

Módulo IPM

“Los IPM son módulos aislados, diseñados para aplicaciones de manejo de poder conmutado, operan en altas frecuencias, alrededor de 20 KHZ. Contiene circuitos de control y sensores para una operación segura. Contiene dos diodos de Poder (free-Wheel). La denominación hace referencia hacia el voltaje y amperaje que manejen, las denominaciones varían entre fabricantes.” (CALDERÓN, 2015)

“El módulo IPM tiene como función generar la conmutación a la masa del reactor utilizando transistores IGBT los mismos que bajo sus siglas en ingles significan Insulated Gate Transistor Bipolar.”(Pauta et al, 2014)

Condensadores

“En la etapa de Potencia tanto del convertidor Booster como de manipulación de moto generadores (MG1 y MG2) y recarga de las baterías HV, están involucrados los condensadores, estos se encuentran dispuestos en un paquete sellado muy estable y de un manejo importante de potencia y disipación. El valor de estos condensadores está estipulado en la etiqueta del mismo.” (BARRERA & CANACUÁN, 2012)



Figura 6. Conjunto de condensadores (CALDERÓN, 2015)

Conjunto de resistencia Inversor

“Este conjunto de resistencia forma parte de circuito RC (resistencia condensador) su utilización es muy importante ya que de no existir los capacitores permanecerían mucho tiempo cargados luego de una condición de apagado del vehículo, esto podría provocar daños al sistema.” (CALDERÓN, 2015)

Sistema de inversión de corriente CC – CA

Moto generadores (mg1 y mg2).

Se trata de moto generadores del tipo sincrónico de imán permanente altamente eficientes a la hora de alternar la corriente, compactos y de poco peso. Son motores trifásicos de frecuencia constante y desfase variable lo que permite conseguir la rotación del motor, la ECU HV es la encargada de controlar los moto generadores disparando los transistores de potencia IGBT para que estos entren en operación. (Jiménez, 2013)

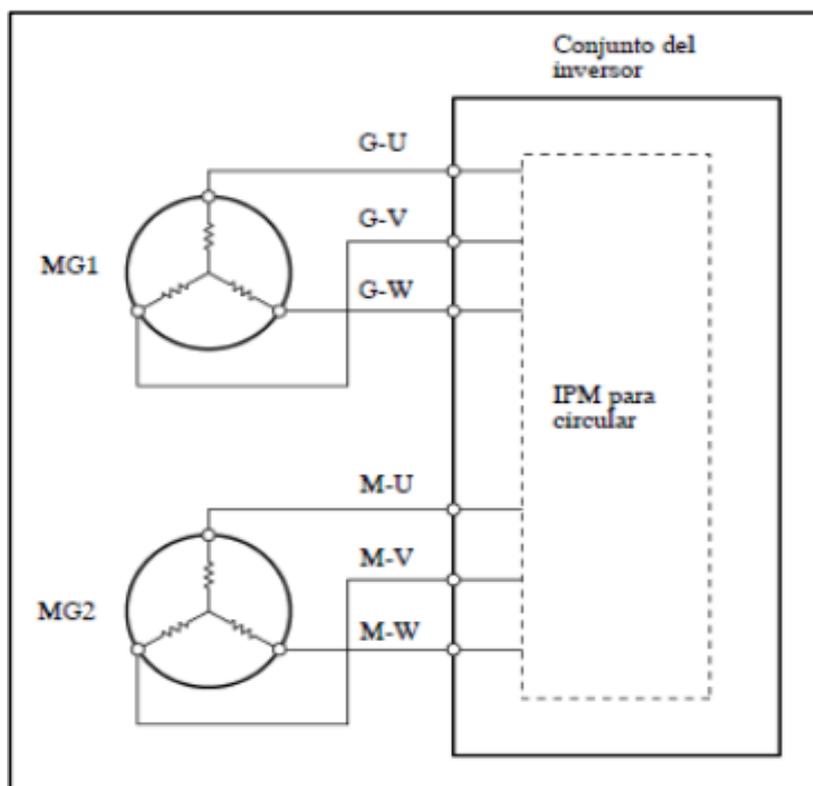


Figura 7. Esquema eléctrico Moto generadores Toyota Prius. (Jiménez, 2013)

“Los motores generadores son motores trifásicos de corriente alterna, la conexión de cada uno de ellos es de tipo estrella, en relación a la rotación del motor sus movimientos se encuentra desfasados a 120 grados.” (CALDERÓN, 2015)

En el caso de MG1 funciona como generador cuando se necesita recargar la batería de alto voltaje o HV, y lo hace como motor para el arranque del motor de combustión interna.



Figura 8. Moto generador 1. (Jiménez, 2013)

Por otro lado el MG2 actúa como motor directamente en la transmisión para el movimiento de las ruedas, y lo hace como generador al momento en que se activan los frenos regenerativos transformando la energía cinética del vehículo en energía eléctrica la cual posteriormente se almacena en la batería de alto voltaje.



Figura 9. Moto generador 2. (Jiménez, 2013)

Inversor del A/C

“En el conjunto del inversor se ha incluido un inversor del A/C que suministra alimentación para impulsar el compresor del inversor eléctrico del sistema del A/C. Este inversor convierte la tensión nominal de la batería de 201,6 V CC a 201,6 V CA y suministra alimentación para operar el compresor del sistema del A/C.” (Jiménez, 2013)

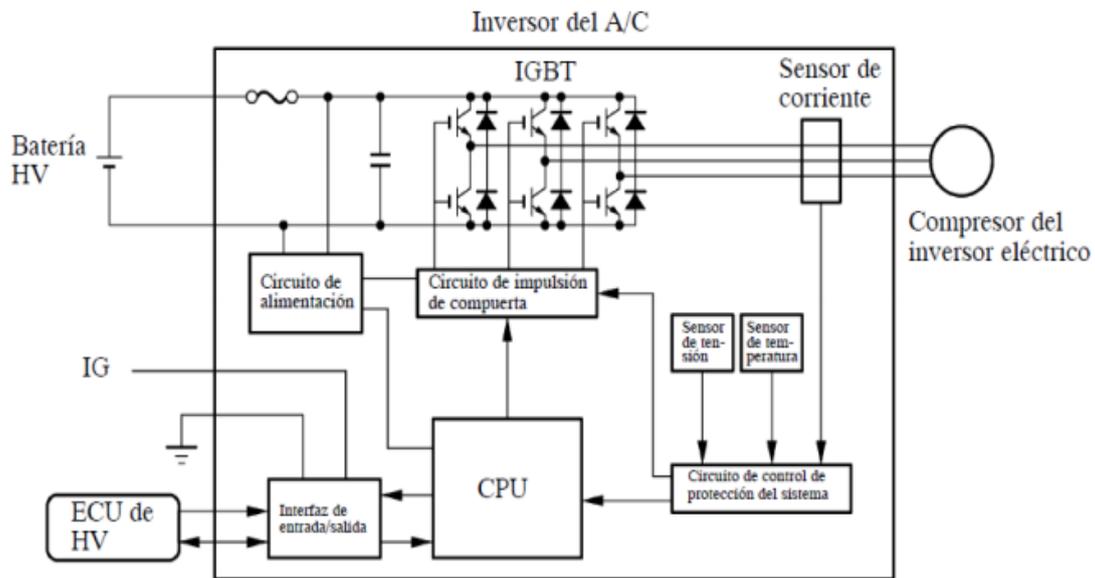


Figura 10. Esquema eléctrico inversor de A/C. (Jiménez, 2013)

Refrigeración del sistema Inversor

Según Jiménez (2013)“Los valores de temperatura normales en el inverso fluctúan entre 30 y 100 grados centígrados lo que equivale a voltajes en el rango de los 4,5 V (100°) y 2V (30°).”

Para su refrigeración está provisto de ductos internos de enfriamiento por refrigerante además de termocuplas de tipo NTC que monitorean el aumento de temperatura ya que cuando conmutan los transistores generan calor por la variación de frecuencia y circulación de altas corrientes.

“Las termocuplas son del orden de los 5k y están conectadas en serie a una resistencia de valor fijo formando un divisor de tensión que facilita el monitoreo de las temperaturas por medio de la ECU híbrida.” (Jiménez, 2013)

Como se mencionó, los valores de temperatura normales en el inversor fluctúan entre 30 y 100 grados centígrados. Cuando la ECU híbrida detecta valores de temperatura cercanos a los 100 grados centígrados, trata de enfriar el inversor; para lo cual activa la bomba y el electro ventilador. Activada la bomba el líquido refrigerante comienza a circular produciendo un intercambio de calor en la parte inferior del inversor para disminuir la temperatura del mismo y adicionalmente al accionar el electro ventilador ayuda al enfriamiento del líquido al pasar por el radiador.

El sistema de refrigeración del inversor y los moto generadores no tiene nada que ver con el sistema de refrigeración del motor de combustión interna. Este sistema de enfriamiento se activa cuando se conmuta el estado de la alimentación a encendido.

Los componentes del sistema de refrigeración son:

- Reservorio
- Radiador del inversor
- Ductos de enfriamiento
- Bomba de refrigerante

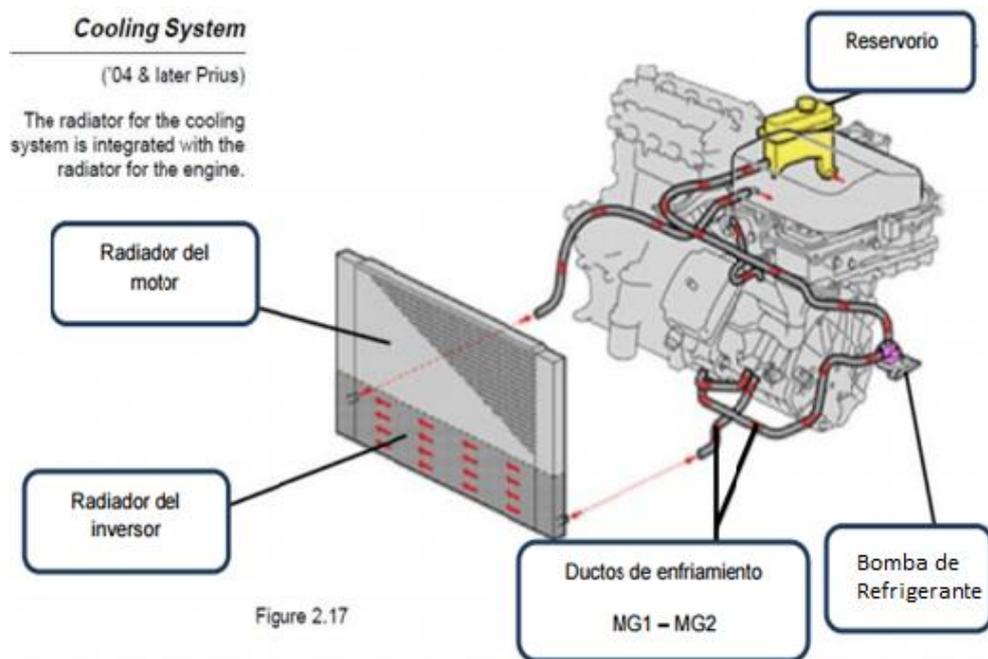


Figura 11. Sistema de refrigeración del módulo inversor y moto generadores. (Jiménez, 2013)

Inversor de corriente

“Los inversores son circuitos que convierten la corriente continua en corriente alterna. Los inversores transfieren potencia desde una fuente de corriente continua a una carga de corriente alterna.” (Hart, 2001)

Actualmente los inversores se usan mucho en aplicaciones industriales, como por ejemplo controladores de motores de corriente alterna y velocidad variable, o en calentamiento por inducción, fuentes de alimentación de reserva y fuentes de alimentación permanentes. La entrada puede ser una batería, una celda de combustible, celda solar u otra fuente de corriente continua.

Los inversores se pueden clasificar en el sentido amplio en dos tipos:

Inversores monofásicos

Los inversores monofásicos la corriente continua en alterna pero en una sola fase. El principio de funcionamiento de estos inversores consiste en un circuito con dos pulsadores o

transistores. Al momento en que se active el primer transistor durante un periodo de tiempo, el voltaje instantáneo es positivo. Mientras que si el segundo transistor se enciende durante un periodo de tiempo el voltaje instantáneo es negativo. Para el diseño del circuito lógico de este tipo de inversor se debe establecer que tanto el primer transistor como el segundo transistor no se encuentren encendidos al mismo tiempo.

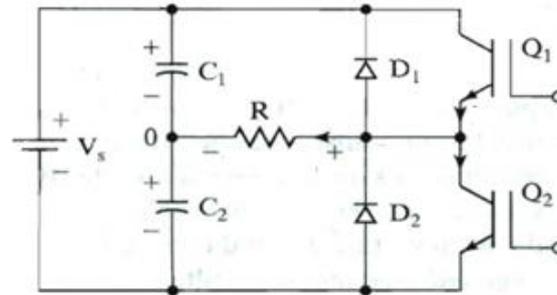


Figura 12. Inversor monofásico. (RASHID, 2004)

Inversores trifásicos.

Los inversores trifásicos invierten la corriente continua en alterna en tres fases. El principio de funcionamiento es similar al de los inversores monofásicos y su configuración lógica se puede lograr con tres de estos inversores. Las señales de control que utilizan estos inversores se desfasan 120° y 180° para obtener voltajes trifásicos balanceados.

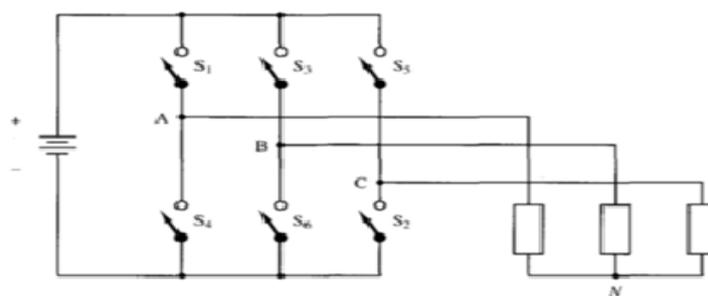


Figura 13. Esquema inversor Trifásico de 6 pasos. (Hart, 2001)

Estos sistemas inversores usan dispositivos controlados de encendido y apagado como transistores bipolares de unión (BJT), transistores de efecto de campo, de metal óxido semiconductor (MOSFET), transistores bipolares de compuerta aislada (IGBT), tiristores

controlados por compuerta (GTO). Las señales de control que usan los inversores en general son señales de control por modulación por ancho de pulso (PWM) para producir un voltaje de salida de corriente alterna.

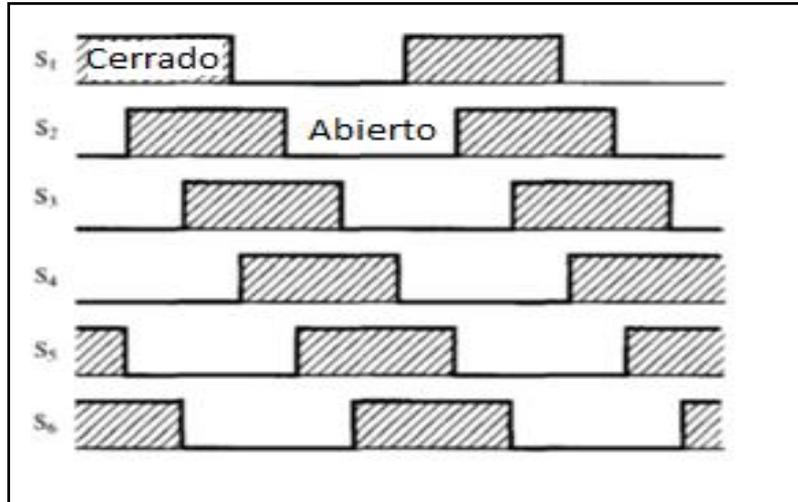


Figura 14. Esquema de conmutación para salida de 6 pulsos. (Hart, 2001)

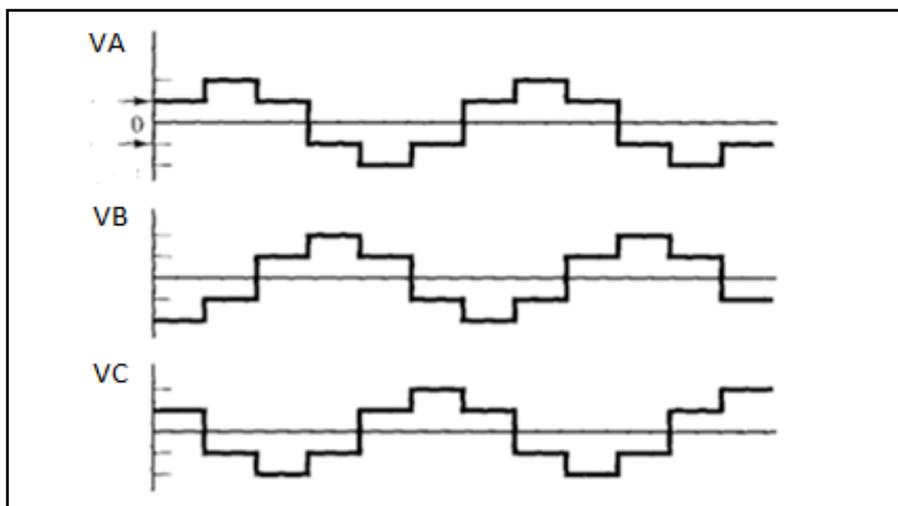


Figura 15. Tensiones línea-neutro para una carga conectada en estrella. (Hart, 2001)

Transistores IGBT.

“Son transistores de potencia de voltaje controlado. En forma inherente, son más rápidos que los BJT, pero no tan rápidos como los MOSFET. Sin embargo, ofrecen características muy superiores de activación y de salida que las de los BJT. Los IGBT son adecuados para alto voltaje, gran corriente y frecuencias y se consiguen hasta para 1700 V y 2400 A.” (RASHID, 2004)

Convertidores de corriente continua (DC-DC)

“Los convertidores de modo de conmutación de CC a CC se usan para convertir la entrada de CC no regulada en una salida de CC controlada en el nivel de voltaje deseado.” (MOHAN, UNDELAND, & ROBBINS, 2009)

Convertidor elevador (Boost).

El convertidor tipo Boost es un circuito elevador de tensión, que usa las características del inductor y el capacitor como elementos almacenadores de energía para elevar la corriente proveniente de la fuente de alimentación y usarla para inyectarla al condensador, produciendo así niveles de voltaje mayores en la carga que los de la fuente.

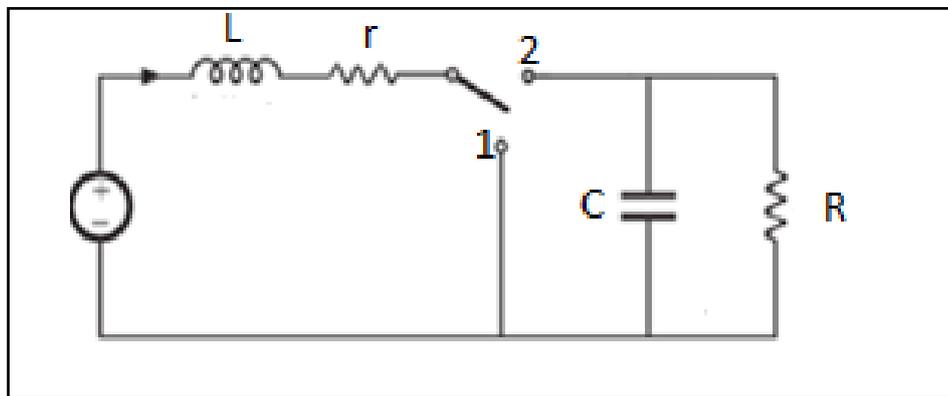


Figura 16. Diagrama convertidor elevador Boost. (Valderrama, Moreno, & Vega, 2011)

El interruptor en el esquema, consiste de dos elementos: un elemento de conmutación rápida como un transistor BJT, un Mosfet o el más comúnmente usado el IGBT y el otro, un diodo con un tiempo de recuperación mucho menor que el periodo de la señal de control; la función de éste último, es impedir que la corriente de descarga del condensador se devuelva, ya que se desea que cuando la fuente se desconecta del condensador y de la resistencia de carga para almacenar energía en la bobina, se suministre corriente a la carga mediante la descarga del condensador. (Valderrama, Moreno, & Vega, 2011)

Análisis con el interruptor cerrado

Cuando el interruptor está cerrado el diodo esta polarizado en inversa. El ritmo de variación de la corriente es una constante por lo que la corriente aumenta linealmente.

Análisis con el interruptor abierto

Cuando el interruptor está abierto, la corriente en la bobina no puede variar de forma instantánea por lo que el diodo se polariza en directa para proporcionar un camino para la corriente de la bobina. (Hart, 2001)

Convertidor reductor Buck

Se denomina convertidor reductor, porque la tensión de salida es menor que la de entrada. El principio de funcionamiento es el mismo que el de los convertidores elevadores.

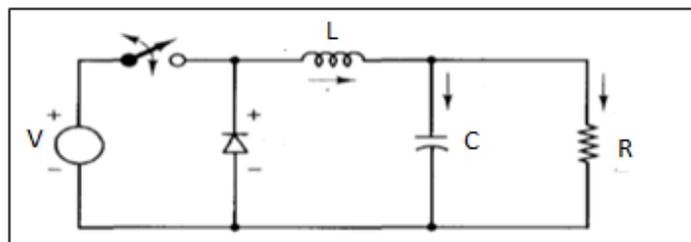


Figura 17. (a) Convertidor CC-CC reductor. (Hart, 2001)

Modulación por ancho de pulso (PWM)

En muchas aplicaciones industriales es necesario controlar el voltaje de salida, para hacer frente a las variaciones de corriente continua, para la regulación del voltaje y para los requisitos de control del voltaje y la frecuencia. La forma más eficiente de control para inversores y convertidores es la modulación del ancho de pulso (PWM).

La modulación por ancho de pulso (PWM) proporciona un método para disminuir el factor de distorsión armónica en la corriente.

“La salida de un inversor con PWM con algo de filtrado, cumple las regulaciones de distorsión armónica total más fácilmente que un inversor con salida mediante ondas cuadrada.

Si bien la salida con PWM posee un contenido alto de armónicas, estas son de frecuencias elevadas lo cual facilita su filtrado y atenuación por parte de la carga.” (González, 2012)

La modulación PWM tiene como ventajas, reducir los requerimientos de filtrado y el control de la amplitud de la salida. Las desventajas de la modulación PWM son que el incremento de pérdidas en el interruptor y una mayor complejidad de los circuitos de control.

En la figura 18, se puede observar las dos formas en las que se realiza la modulación PWM, bipolar y unipolar.

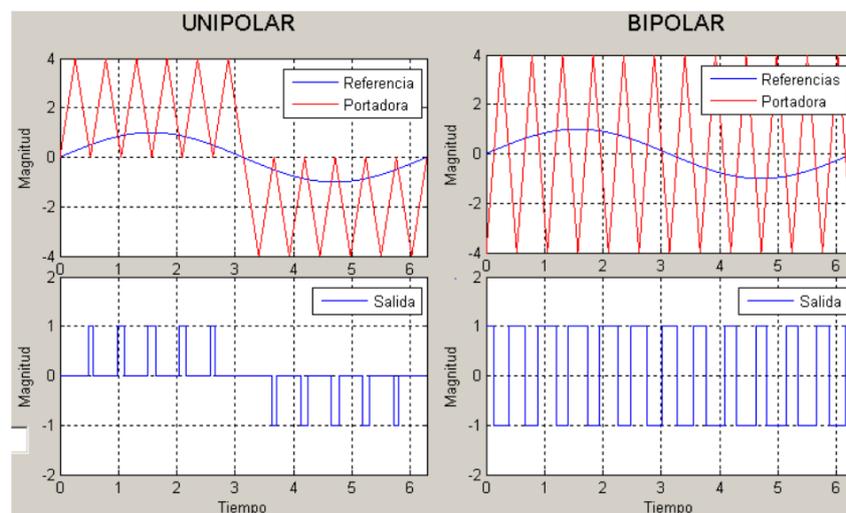


Figura 18 Modulación PWM unipolar y bipolar. (González, 2012)

Controlador de modos deslizante avanzado (ASMC).

En la actualidad, dada la relevancia que han alcanzado los vehículos eléctricos en la lucha contra el cambio climático; los avances tecnológicos en el campo del control de los convertidores e inversores, se han enfocado en los controladores de modos deslizantes avanzados.

El principal uso de los controladores deslizantes, se basa en el método de eliminación de las vibraciones o chattering, mediante un retraso de tiempo adaptable, en el esquema de control convencional de estos controladores, Para de esta manera, reducir el rizado del voltaje de

salida de los convertidores y de las corrientes de entrada, y conseguir mayor rapidez de convergencia y conmutación de los transistores. En la figura 19, se puede observar una comparación entre un controlador deslizante convencional con uno avanzado.

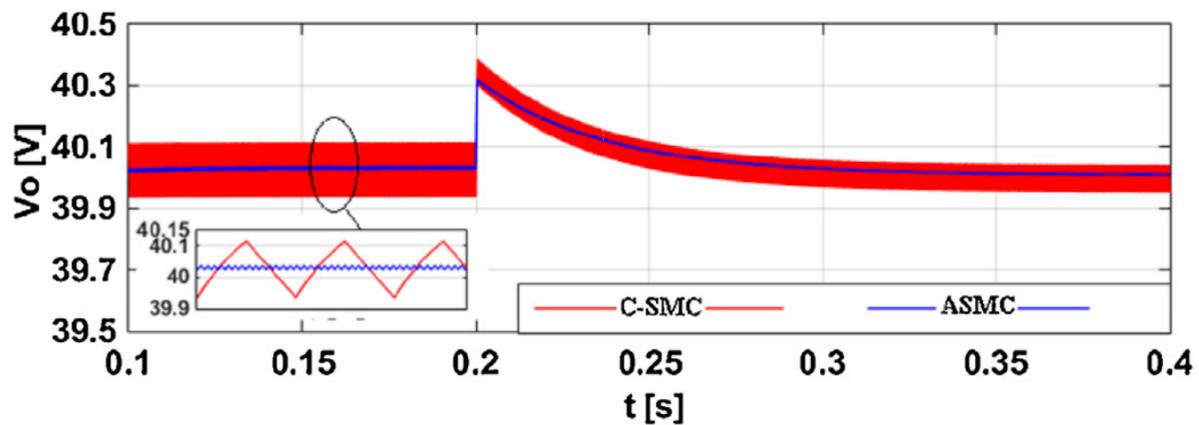


Figura 19 Comparación controlador deslizante C-SMC y ASMC (Ayoubi et al, 2015)

Según Ayoubi (2015), “El controlador propuesto basado en el método de eliminación de chattering es exitoso para disminuir el contenido de la ondulación de la tensión de salida del convertidor y de entrada de la corriente esto aumentará el tiempo de vida de la tensión de alimentación de entrada.” Lo que quiere decir, que la aplicación de este método de control puede alargar la vida de las baterías de alto voltaje en los vehículos eléctricos.

METODO

En este trabajo de investigación se analiza el funcionamiento del módulo inversor-convertidor una vez conocidos sus componentes y características, por medio del diseño y la simulación en el programa Simulink, de un sistema que eleve la tensión de 12V CC a 48 V CC, para ser transformados en 48 V CA y finalmente reducido de 48V CC a 12V CC. Analizando así los procesos principales de un módulo inversor.

Análisis del diseño

Una vez determinados los componentes del sistema inversor-convertidor, se analiza los procesos principales del sistema inversor como son el de elevar la tensión, invertir la corriente y reducir la corriente; para esto se llevó acabo el análisis de los convertidores Boost, Buck y de un inversor trifásico de 6 pasos.

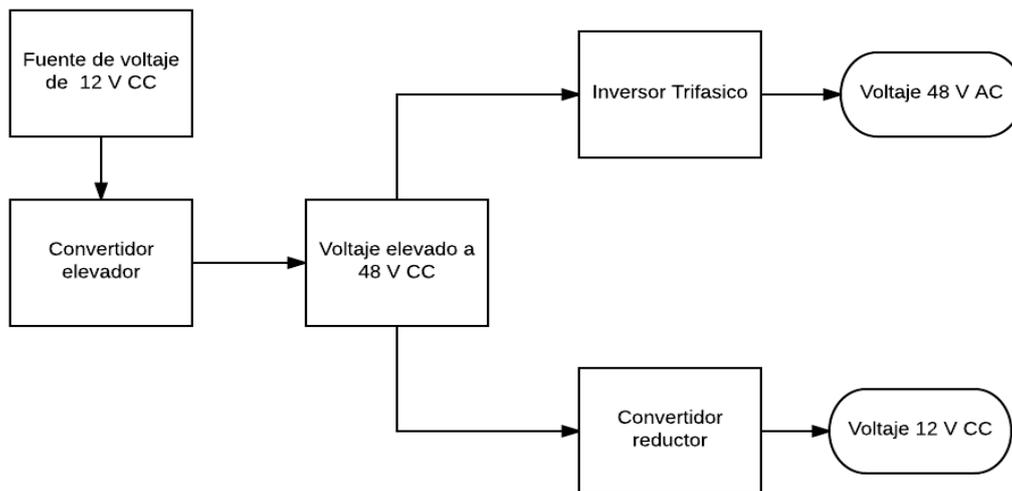


Figura 20. Diagrama del diseño.

El diseño se divide en tres etapas. Primero en un convertidor elevador CC/CC, que tiene como entrada una tensión de 12V, de una batería de voltaje Bosch D126 (ver anexo A), y una tensión de salida esperada de 48V con una potencia de salida esperada igual a 100 W. Los transistores a utilizar serán IGBTs de alta frecuencia del tipo IRG4BC30K con tiempo máximo de soporte

de $10\mu s$ (ver anexo B), lo que en Hertz es una frecuencia máxima de 100 kHz; por lo que se la utilizara como frecuencia de conmutación para el diseño. La carga a alimentar es resistiva y por diseño, el rizado de corriente debe ser menor al 2% para evitar que la señal resultante genere un zumbido molesto. Posteriormente se invertirá la corriente proveniente del convertidor elevador de 48 VCC A 48 VCA mediante un inversor trifásico de 6 pasos. Finalmente se reducirá el voltaje de 48 VCC a 12 VCC mediante un convertidor reductor CC/CC.

Convertidor tipo Boost

El proceso que lleva acabo el convertidor elevador Boost para elevar la tensión se resume en la figura 21.

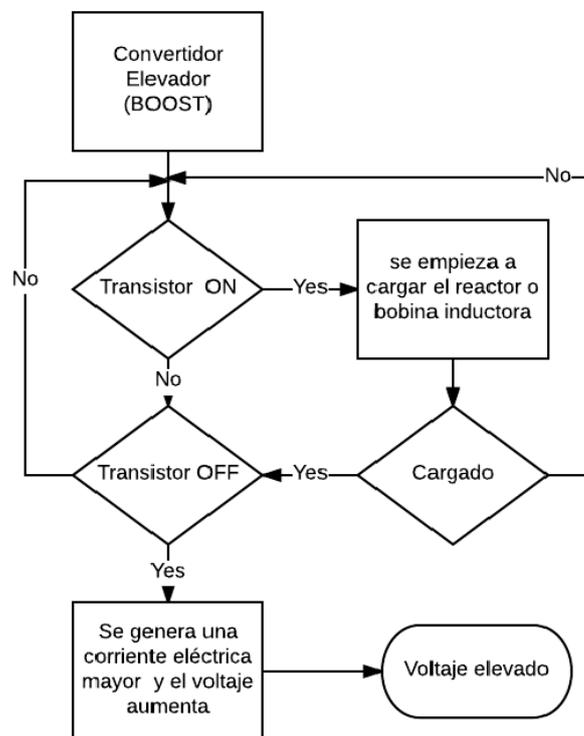


Figura 21. Diagrama de flujo del convertidor elevador (Boost).

El transistor IGBT se enciende y apaga de acuerdo a su ciclo de trabajo. Una vez encendido dirige el voltaje de entrada de la batería de alto voltaje, a un reactor o bobina inductora, la cual empieza acumular energía.

Cuando el transistor IGBT se apaga, provoca que el reactor que se encontraba cargado genere una fuerza electromotriz; la cual es mayor a la de la batería y en este caso alcance la tensión esperada. Al tratarse de un convertidor elevador, la tensión de salida siempre va a ser mayor a la de entrada. Para el presente análisis se diseñó un convertidor tipo boost.

Diseño del convertidor elevador tipo Boost

Datos:

- Voltaje de entrada(Ve) : 12V
- Voltaje de Salida(Vs): 48V
- Potencia de Salida(P):100W
- Frecuencia de conmutación(f): 100kHz

Resistencia de carga convertidor elevador(R)

Se considera una resistencia de carga a todo elemento eléctrico que realiza una función y por ende consume cierta energía. Para el cálculo en convertidores la resistencia de carga es igual al voltaje de salida dividido para la potencia de salida, como se muestra en la ecuación 1.

$$R = \frac{V_s^2}{P} \tag{1}$$

$$R = \frac{48^2}{100W} = 23\Omega$$

Intensidad convertidor elevador (I)

La intensidad es la cantidad de corriente que percibe la carga resistiva que en el caso del vehículo eléctrico es la cantidad de amperios que consumiría los moto generadores. Para el cálculo de la intensidad se aplicara la ley de ohm, representada en la ecuación 2.

$$I = \frac{V_s}{R} \tag{2}$$

$$I = \frac{48V}{23\Omega} = 2,09A$$

Ciclo de trabajo convertidor elevador (D)

Ciclo de trabajo es la relación que existe entre el tiempo en que la señal se encuentra en estado activo y el periodo de la misma. El ciclo de trabajo para un convertidor elevador tipo boost es la relación entre el voltaje de entrada y de salida definida por la ecuación 3:

$$D: 1 - \frac{V_e}{V_s} \tag{3}$$

$$D = 1 - \frac{12V}{48V} = 0,75$$

Inductancia mínima convertidor elevador (Lmin)

Es la medida mínima de la oposición a un cambio de corriente de un inductor o bobina, que almacena energía en presencia de un campo magnético. Para los convertidores elevadores, la inductancia mínima se describe como la relación entre la resistencia de carga, ciclo de trabajo y la frecuencia de la ecuación 4:

$$L_{Min} = \frac{RD(1 - D)^2}{2f} \tag{4}$$

$$L_{Min} = \frac{23\Omega * 0,75(1 - 0,75)^2}{2 * 100kHz} = 5,4\mu H$$

Corriente máxima en el inductor del convertidor elevador (Imax)

Es la cantidad máxima de amperios que van a circular por el inductor. Esta corriente máxima va a ser la misma que en el diodo y en el transistor. La corriente máxima es la relación entre el voltaje de entrada, la inductancia, la frecuencia, el ciclo de trabajo y la resistencia de carga definida por la ecuación 5:

$$I_{max} = \frac{V_e}{R(1 - D)^2} + \frac{VeD}{2L_{Min}f} \tag{5}$$

$$I_{max} = \frac{12V}{23\Omega(1 - 0,75)^2} + \frac{207,2V * 0,75}{2 * (5,4)100kHz} = 16,67 A$$

Capacidad eléctrica o capacitancia en el convertidor elevador

La capacidad eléctrica es la propiedad que tienen los cuerpos para mantener una carga eléctrica. La capacitancia se puede definir como la relación del voltaje de salida, el ciclo de trabajo, la frecuencia, el rizado y la resistencia de carga descrita en la ecuación 6:

$$C = \frac{V_s * D}{f_s R * V_s * rizado} \tag{6}$$

$$C = \frac{48 * 0,75}{100kHz * 23\Omega * 48 * 0,02} = 6,522 \mu F$$

Diseño del convertidor elevador Boost en Simulink

Para el diseño y simulación se utiliza la aplicación Simulink del programa Matlab. Los datos introducidos fueron redondeados a su valor nominal más cercano para facilidades de diseño como se muestra en la figura 22.

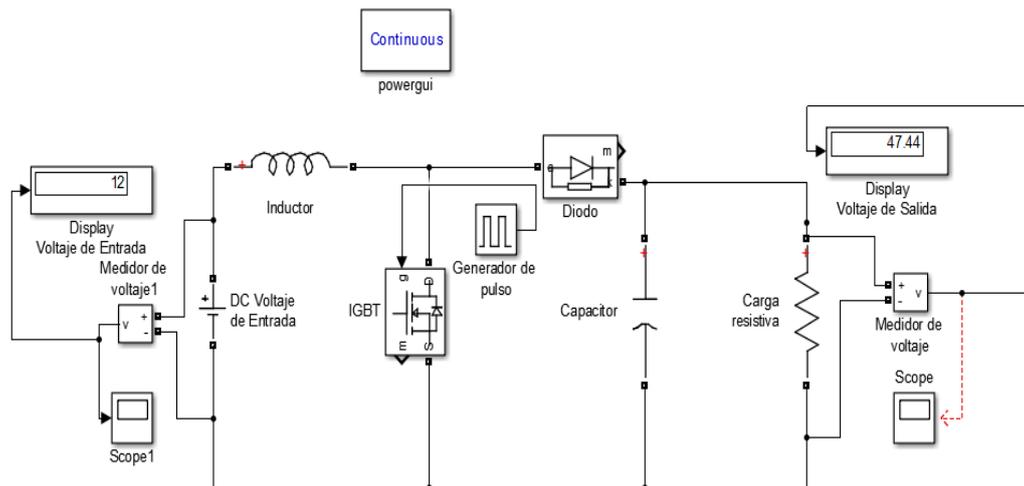


Figura 22. Convertidor elevador Boost en Simulink

Inversor trifásico de 6 pasos desfasado a 120°

Para el análisis de este sistema, se emplea un inversor trifásico de seis pasos con un desfase de 120° y con transistores IGBT, similar al empleado en el campo automotor. Dentro del sistema inversor se encuentra un módulo inteligente de potencia (IPM).

El control de la conmutación para llevar a cabo la inversión de corriente lo realiza la ECU, la cual conmuta los transistores IGBTs de tal forma que se logre la inversión de corriente. En este análisis el encargado de gestionar este proceso será un controlador PWM.

Para explicar el proceso de inversión a las fases de los moto generadores trifásicos, se denomina cada fase como u, v y w; como se muestra en figura 23. “En cada una de ellas debe existir un flujo de corriente que cambie de sentido con relación al tiempo, la operación de generar la corriente alterna y desfazarla en el momento correcto la gestiona la ECU HV pero la potencia de este mecanismo está dada por el Inversor utilizando los transistores IGBT.”
 (CALDERÓN, 2015)

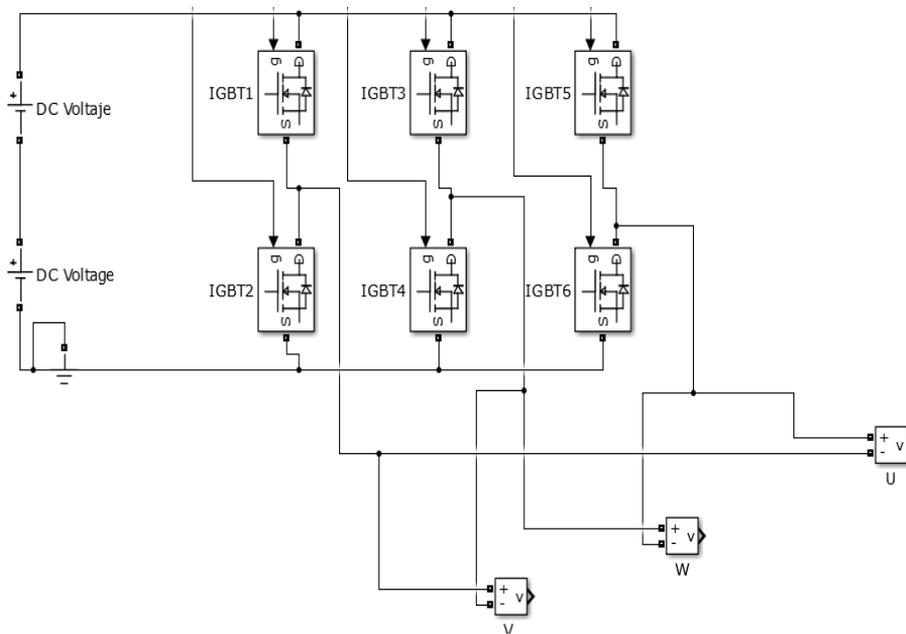


Figura 23. Inversor Trifásico de 6 pasos.

El proceso que lleva a cabo el inversor trifásico para invertir la corriente se resume en la figura 24.

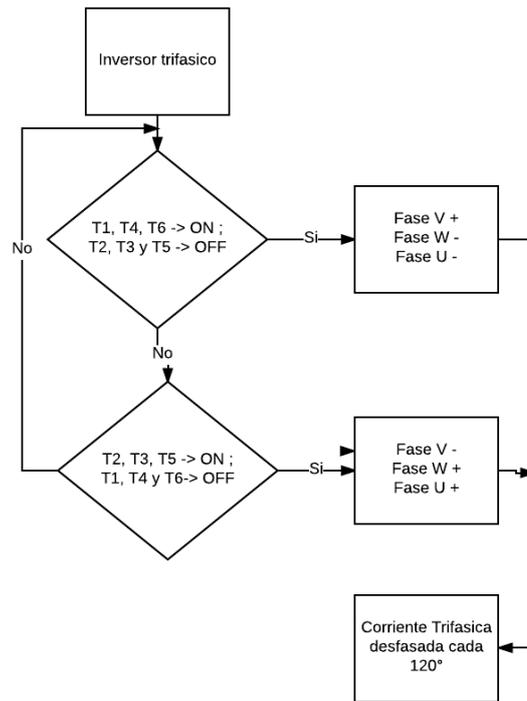


Figura 24. Diagrama de flujo del inversor trifásico.

Primero los transistores IGBT 1,4 y 6 van a estar activados, por lo que el transistor 1 va a conmutar positivo llevando la corriente proveniente del elevador de tensión (boost) directamente a la fase V. Posteriormente, el transistor 4 conmutara negativo a la fase W lo mismo que el transistor 6 con la fase U.

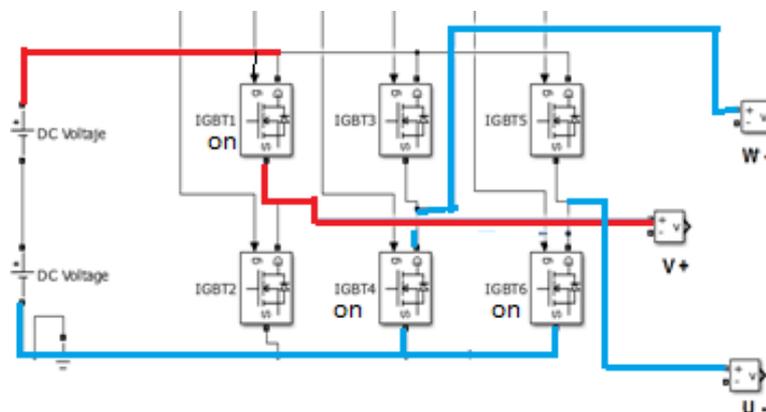


Figura 25. Primer paso de funcionamiento del inversor trifásico.

Una vez completada la conmutación, para invertir la corriente va a ser necesario apagar los transistores 1, 4 y 6 y encender los transistores 2, 3 y 5. Ya encendido el transistor 3 conmutara positivo a la fase W, lo mismo que el transistor 5 que conmutara positivo con la fase U, mientras el transistor 2 conmutara negativo a la fase V.

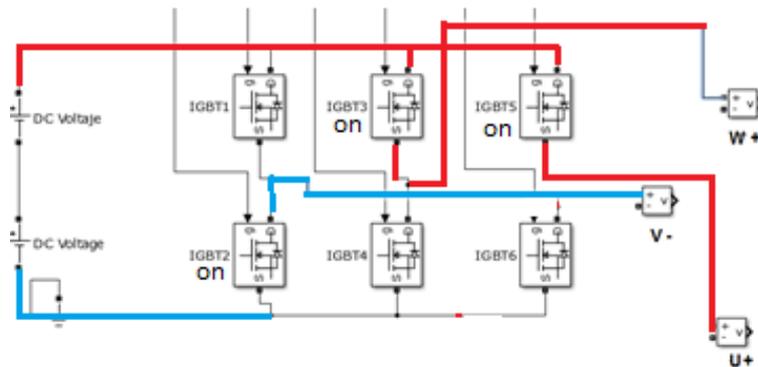


Figura 26. Segundo paso de funcionamiento del inversor trifásico.

Esta operación genera corriente alterna y el desfase en el momento correcto la gestiona el controlador PWM como se indicó previamente.

Diseño del Inversor Trifásico en Simulink

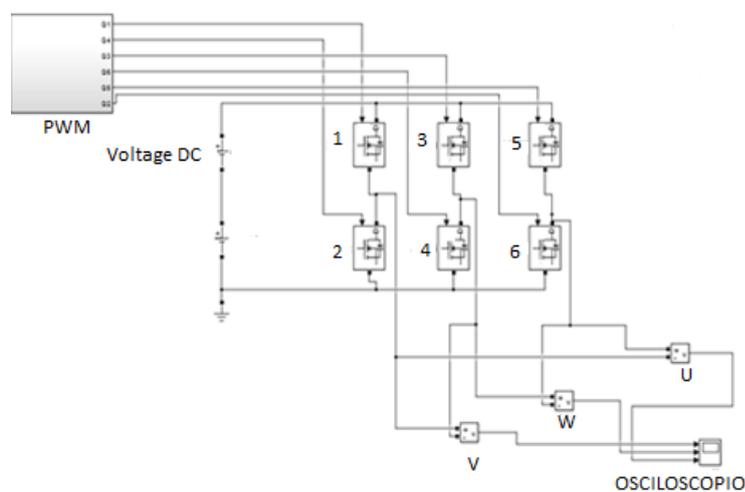


Figura 27. Inversor Trifásico con controlador de ancho de pulso (PWM) en Simulink

Convertidor Reductor (Buck)

El proceso para dejar caer la tensión por parte del sistema inversor-convertidor; se logra por medio de un convertidor reductor o tipo Buck; el cual posee un transistor IGBT, que se enciende y se apaga de forma intermitente, provocando que se interrumpa la energía que llegue al reactor de acuerdo a la cantidad de tensión que requiera la batería. Este proceso se describe en el diagrama de flujo de la figura 28.

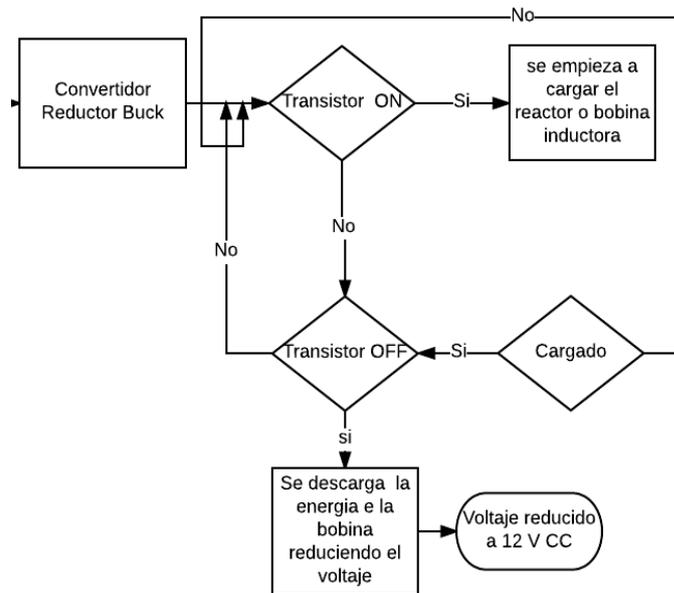


Figura 28. Diagrama de flujo convertidor reductor Buck.

Condiciones de diseño convertidor reductor tipo Buck.

Datos:

- Voltaje de entrada(Ve) : 48V
- Voltaje de Salida(Vs): 12V
- Potencia de Salida(P): 33W
- Frecuencia de conmutación(f): 100kHz

Resistencia de carga convertidor reductor (R)

Para la resistencia de carga del convertidor Buck se utiliza la formula (1) por lo que sería igual a:

$$R = \frac{12^2V}{33W} = 4,364\Omega$$

Ciclo de trabajo convertidor reductor (D^1)

El ciclo de trabajo para un convertidor reductor se define como la relación del voltaje de salida y el voltaje de entrada de la ecuación 7:

$$D^1: \frac{Vs}{Ve} \tag{7}$$

$$D^1 = \frac{12V}{48V} = 0,25$$

Inductancia mínima convertidor reductor (L_{min}^1)

Se asume que el circuito opere en modo permanente por ello se debe calcular el valor de la inductancia mínima para lo que se utilizara la ecuación 8:

$$L_{Min}^1 = \frac{R(1 - D)}{2f} \tag{8}$$

$$L_{Min}^1 = \frac{4,36\Omega(1 - 0,25)}{2 * 100kHz} = 16,364 \mu H$$

Corriente media en el inductor del convertidor reductor (Im)

La corriente media en el inductor es el valor promedio de amperios que circulara en el inductor. La corriente media es igual a la relación del voltaje de salida con la resistencia de carga y se expresa en la ecuación 9:

$$Im_L = \frac{Vs}{R} \tag{9}$$

$$Im_L = \frac{12}{4,36} = 2,75A$$

Variación de la corriente en el inductor del convertidor reductor

La variación de corriente se define como el cambio simultaneo de la corriente pudiendo aumentar o disminuir en un periodo de tiempo. La variación de corriente en el inductor de los convertidores reductores se calcula con la ecuación 10:

$$\Delta I_L = \frac{(V_e - V_s) * D}{L * f} \tag{10}$$

$$\Delta I_L = \frac{(48 - 12) * 0,25}{16,364 * 100kHz} = 5,5A$$

Corriente máxima en el inductor del convertidor reductor (Imax)

Es la cantidad máxima de amperios que circulan por el inductor. La corriente mínima del inductor es igual a la relación de la intensidad media con la variación de la corriente en el inductor y se expresa con la ecuación 11:

$$I_{max} = I_{m_L} + \frac{\Delta I_L}{2} \tag{11}$$

$$I_{max} = 2,75A + \frac{5,5}{2} = 5,5A$$

Corriente mínima en el inductor del convertidor reductor (Imin)

Es la cantidad mínima de amperios que circulan por el inductor. La corriente mínima del inductor es igual a la relación de la intensidad media con la variación de la corriente en el inductor y se expresa con la ecuación 12:

$$I_{min} = I_{m_L} - \frac{\Delta I_L}{2} \tag{12}$$

$$I_{min} = 2,75A - \frac{5,5}{2} = 0A$$

Capacitancia del convertidor reductor (C^1)

Para el cálculo de la capacitancia del convertidor tipo Buck, se establece la relación entre el ciclo de trabajo, la inductancia, la frecuencia y el rizado con la ecuación 13:

$$C^1 = \frac{1 - D}{8 * L * f^2 * r} \tag{13}$$

$$C^1 = \frac{1 - 0,25}{8 * 16,36 * 100kHz^2 * 0,02} = 28,646 \mu F$$

Diseño Convertidor Reductor Buck Simulink

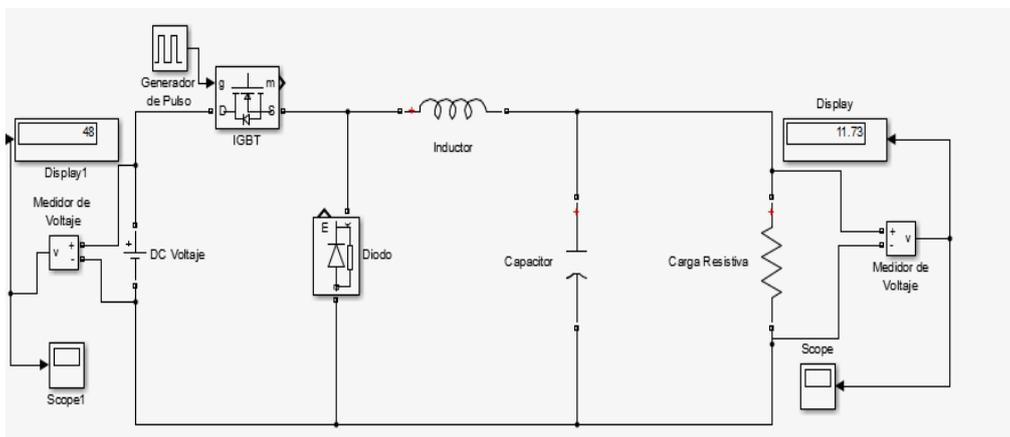


Figura 29. Convertidor reductor Buck en Simulink.

RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados obtenidos de los cálculos y diseño del convertidor elevador tipo Boost, del inversor trifásico y del convertidor reductor Buck.

Convertidor elevador tipo Boost.

Los resultados obtenidos y aplicados para el diseño del convertidor elevador tipo Boost son expuestos en la tabla 1. Estos resultados son los necesarios para elevar el voltaje a 48 V. El resultado de “R” de 23 ohms corresponde a la resistencia de la carga resistiva a la cual se conecta el convertidor. El valor de “I” de 2,083 amperios representa la intensidad media en el circuito, calculada por ley de ohm. La “D” representa el ciclo de trabajo, en el circuito es de 0,75 y tiene que ver con el ancho de pulso para los transistores. La “Lmin” igual 5 μ H representa el valor mínimo de la inductancia en el convertidor que vendría a ser el valor mínimo de la bobina inductora. La “C” representa la capacitancia, el valor calculado es de 16,276, es el valor del condensador para el convertidor.

Tabla 1. Resultados del diseño del Convertidor Boost

Datos	
R	23 Ω
I	2,083 A
D	0,75
Lmin	5,4 μ H
Imax	16,667 A
C	16,276 μ F

Nota: Resistencia en ohms, intensidades en amperios, inductancia en micro henrios, capacitancia en microfaradios.

Resultados Simulación Simulink

La figura 30, representa el diseño del convertidor elevador del tipo Boost; el cual eleva la corriente de 12V a 48V. En el diseño de Simulink se ubicó dos displays; uno en la fuente de voltaje y otro en la salida del convertidor respectivamente; para así observar cómo se eleva el voltaje. Ya ingresado los datos y los resultados del diseño, Se logró obtener un voltaje cercano a los 48 V esperados.

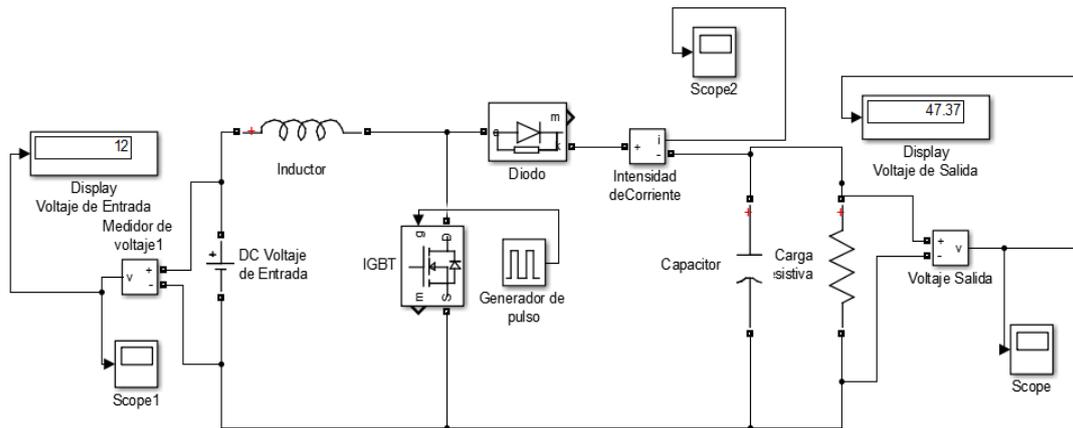


Figura 30. Convertidor Boost

Medición de Voltaje Salida

Una vez elaborado el diseño teórico del convertidor elevador tipo Boost en el simulador Simulink, se midió el voltaje de salida del convertidor elevador siendo de 47,44 V CC, voltaje que es muy cercano al esperado, por lo que se puede establecer que los valores teóricos son correctos. Esto se presenta en la figura 31, donde se puede observar un pico de voltaje instantáneo el cual se debe al arranque de la simulación.

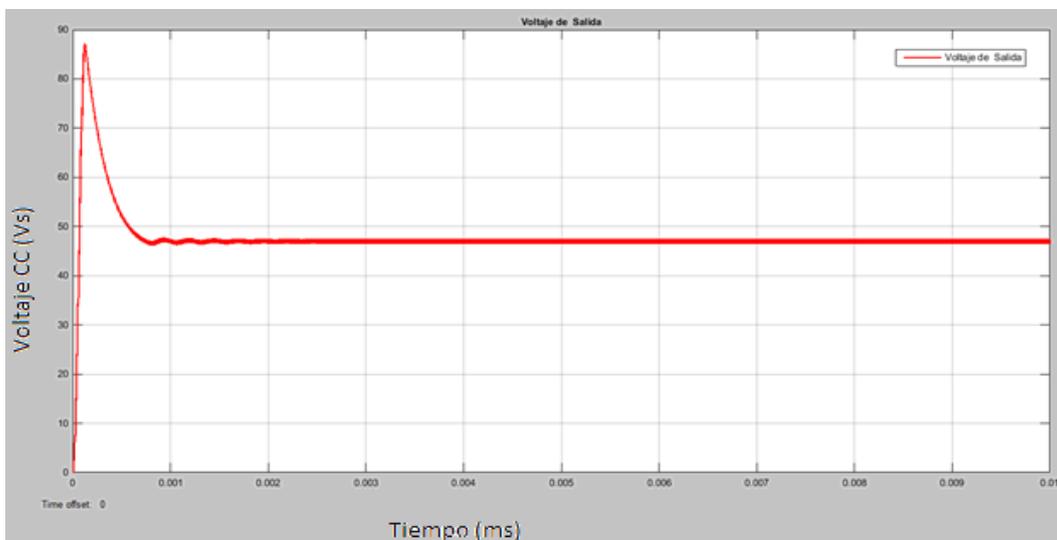


Figura 31. Gráfica Osciloscópica del Voltaje de salida del convertidor tipo Boost. El eje “y” representa el voltaje en voltios, el eje “x” representa el lapso de tiempo en milisegundos que duro la simulación.

Inversor Trifásico

Los resultados para el inversor trifásico son presentados en la tabla 2. El voltaje de salida esperado es de 48 V en corriente alterna.

Tabla 2. Resultados del diseño del inversor Trifásico

Resultados	
V _s	48 VAC

Nota: El voltaje esperado a la salida es de 48V de corriente alterna.

La figura 32 representa el diseño del inversor trifásico de seis pasos, el cual invierte la corriente de 48V CC a 48V CA. En el diseño de Simulink se ubicó un módulo PWM para un desfase de 120° como se estableció en el diseño.

Resultados Simulación Simulink

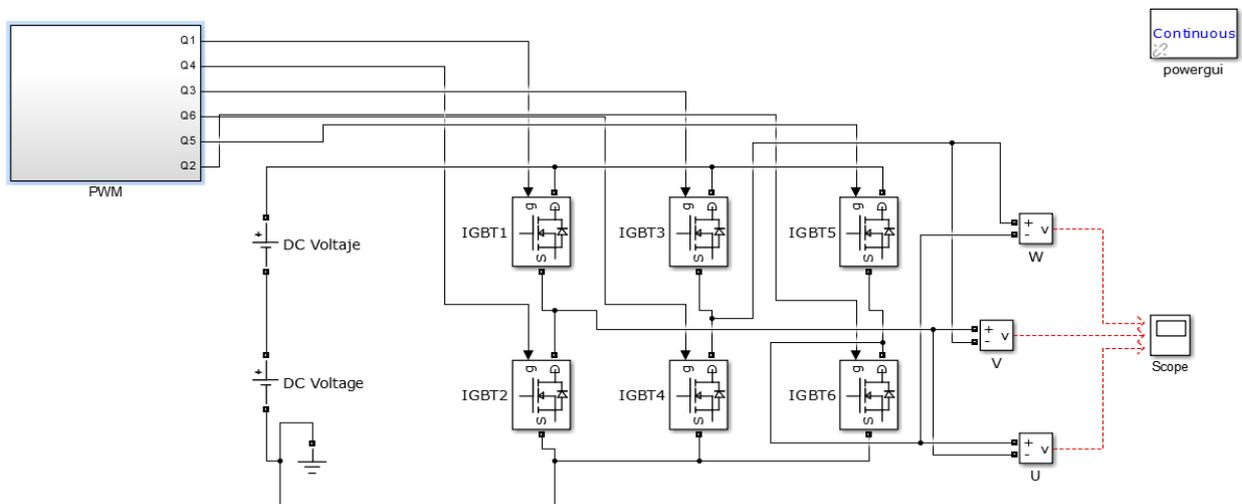


Figura 32. Diseño inversor trifásico Simulink

Esquema de conmutación desfase cada 120°

Una vez elaborado el diseño teórico del inversor trifásico en el simulador Simulink, se realizó la medición de cada una de las fases, conectándolas a medidores de voltaje, de manera que permita observar el esquema de conmutación. En la figura 33, se puede apreciar el esquema de conmutación y el desfase de 120° que existe entre las fases U, V y W.

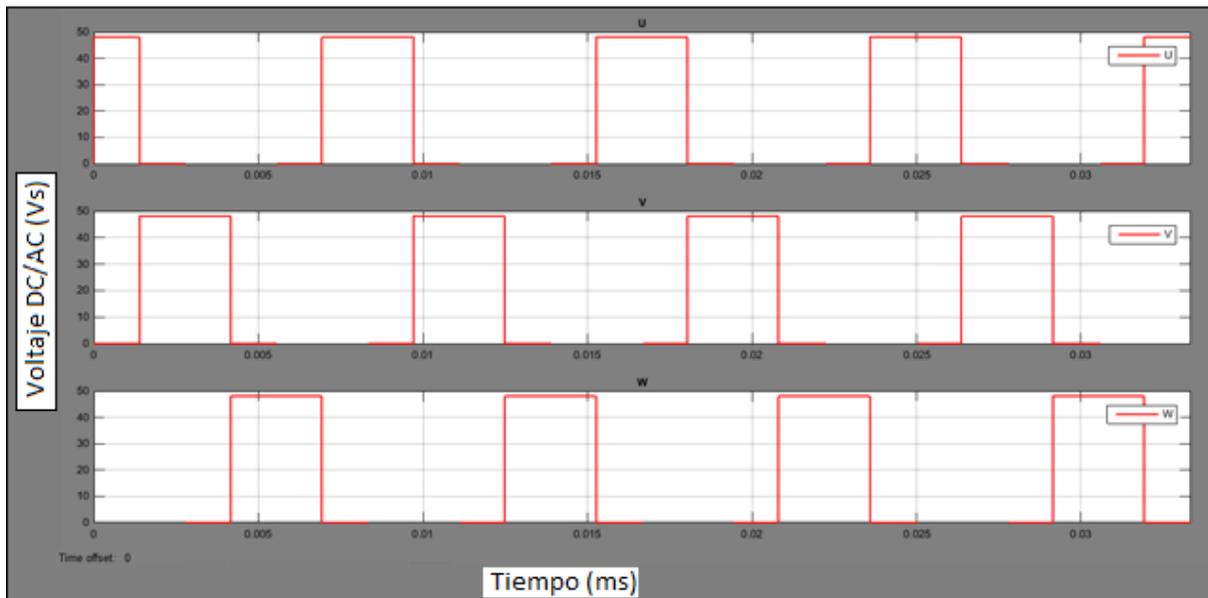


Figura 33. Esquema de conmutación de las fases U, V y W del inversor trifásico.

Diagrama y Medición de tensión línea-neutro para una carga en estrella sin toma de tierra.

Al inversor se lo conectó en salida a una carga en estrella, como se lo muestra en la figura 34,

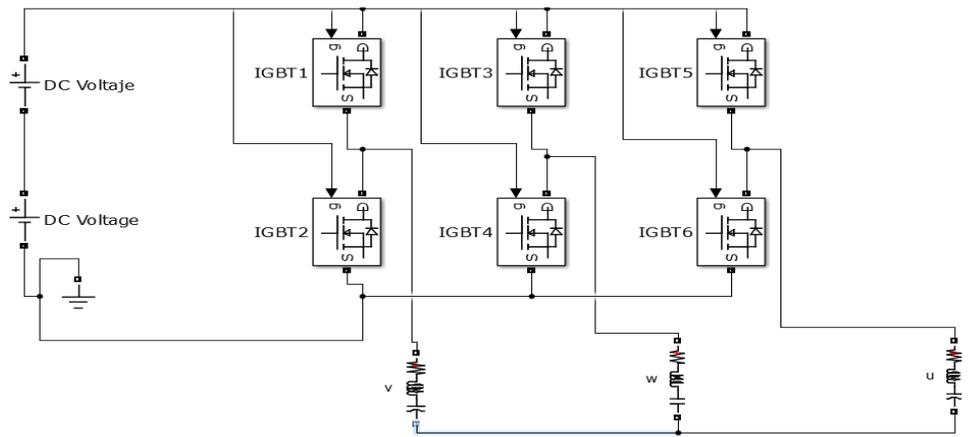


Figura 34. Diagrama del inversor trifásico para una carga conectada en estrella

En la figura 35, se presenta el resultado de la medición de la tensión de las fases para el diseño del inversor conectado a una carga estrella, el cual dio como resultado graficas

similares a las teóricas, para este tipo de conexión, expuestas en la figura 15, por lo que el inversor es satisfactorio.

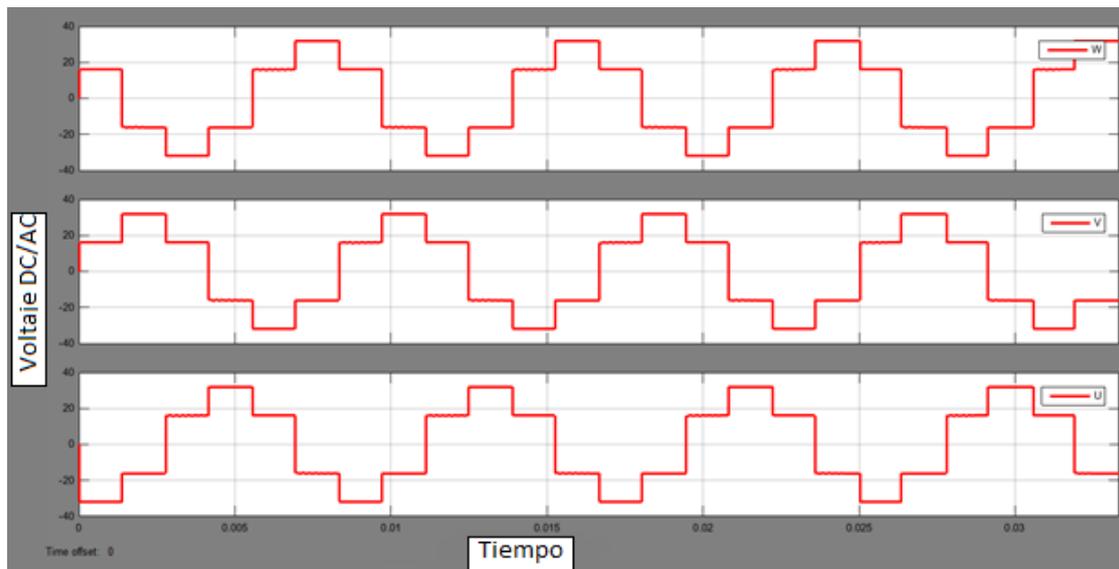


Figura 35. Medición de la tensión línea-neutro para una carga en estrella sin toma de tierra de las fases V, W, U.

Convertido Buck

Los resultados obtenidos de los cálculos del convertidor reductor Buck son expuestos en la tabla 3. Estos valores son los correspondientes para que el voltaje se reduzca a 12 V. Siendo “R” igual a 4,364 ohms que es la resistencia de la carga resistiva. La intensidad media calculada es de 2,75 amperios y la intensidad máxima es 5,5 amperios en el circuito. El ciclo de trabajo para el convertidor reductor es de 0,25 que tiene que ver con el ancho de pulso para la conmutación del transistor. La inductancia mínima para la bobina inductora del convertidor debe ser de 16,364 μ H. Finalmente, el capacitor calculado es de 28,646 μ F.

Tabla 3. Resultados del diseño del Convertidor Buck

Datos	
R	4,364 Ω
Imed	2,75 A
D	0,25
Lmin	16,364 μ H
Imax	5,5 A
C	28,646 μ F

Nota: Resistencia en ohms, intensidades en amperios, inductancia en micro henrios, capacitancia en microfaradios.

Resultados y Simulación Simulink

La figura 34, representa el diseño del convertidor reductor del tipo Buck; el cual reduce el voltaje de 48V a 12V. En el diseño de Simulink se ubicó dos displays; uno en la fuente de voltaje y otro en la salida del convertidor; para observar la reducción del voltaje.

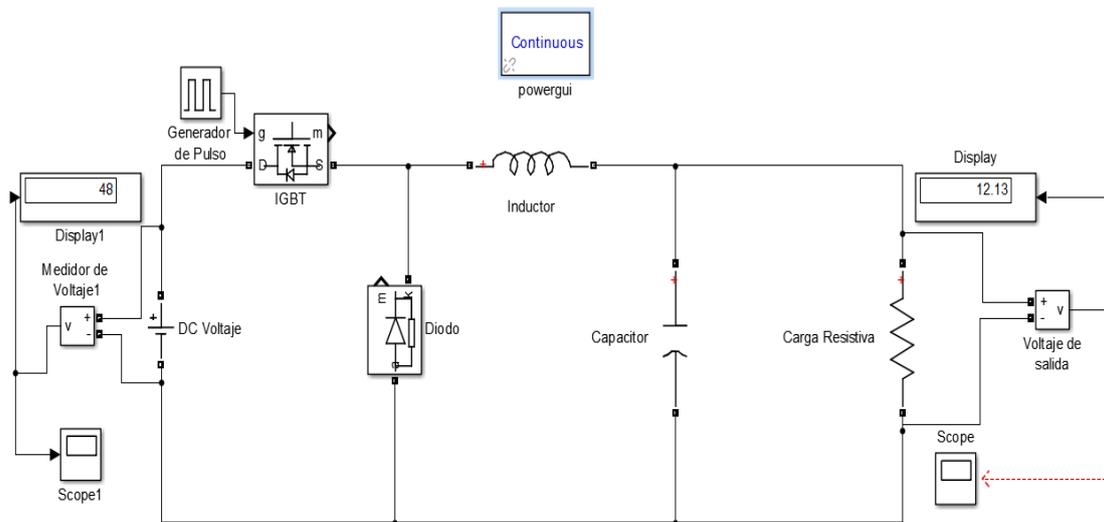


Figura 36. Convertidor reductor Buck.

Medición voltaje de salida

Una vez elaborado el diseño teórico del convertidor reductor tipo Buck en el simulador Simulink, se tomó la medida del voltaje de salida del convertidor reductor siendo de 12,13 V CC, voltaje que es muy cercano al esperado de 12 V, por lo que se puede establecer que los valores teóricos son correctos comparándolos con los simulados.

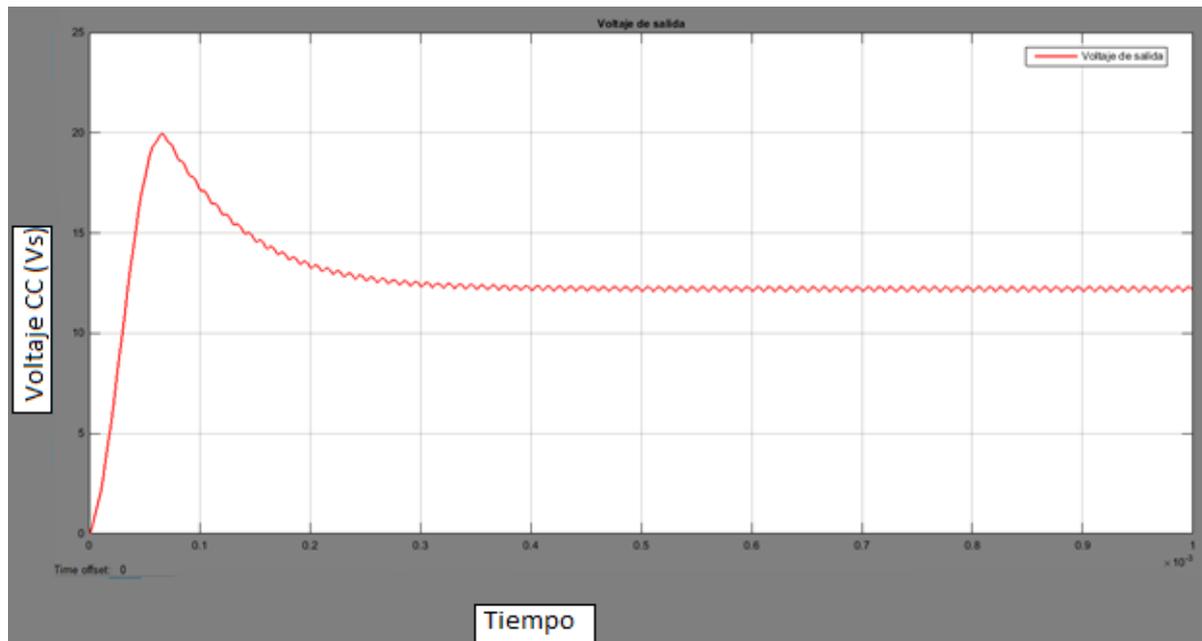


Figura 37. Grafica Osciloscopica del Voltaje de salida del convertidor Buck.

Diagrama de flujo del módulo inversor

La figura 38, describe el diagrama de flujo de todo el diseño conectado del módulo inversor-convertidor diseñado. El diseño consiste en una fuente de voltaje de 12V, la cual representaría la batería de alto voltaje de los vehículos eléctricos. Este voltaje es conducido al convertidor elevador tipo boost, donde se eleva hasta alcanzar los 48 V deseados. Posteriormente, con el voltaje elevado, se elige si se desea invertir la corriente o reducir el voltaje.

Para invertir la corriente, se conecta a un inversor trifásico desfasado a 120° , el cual mediante transistores IGBT, invierte los 48 V CC a 48 V AC, en el caso de los vehículos eléctricos, este voltaje de corriente alterna sería el de funcionamiento de los moto generadores.

Para reducir el voltaje, se llevó acabo por medio de un convertidor reductor tipo Buck, que reduce los 48 V CC a 12 V CC, en los vehículos eléctricos, este voltaje reducido sirve para recargar la batería de alto voltaje.

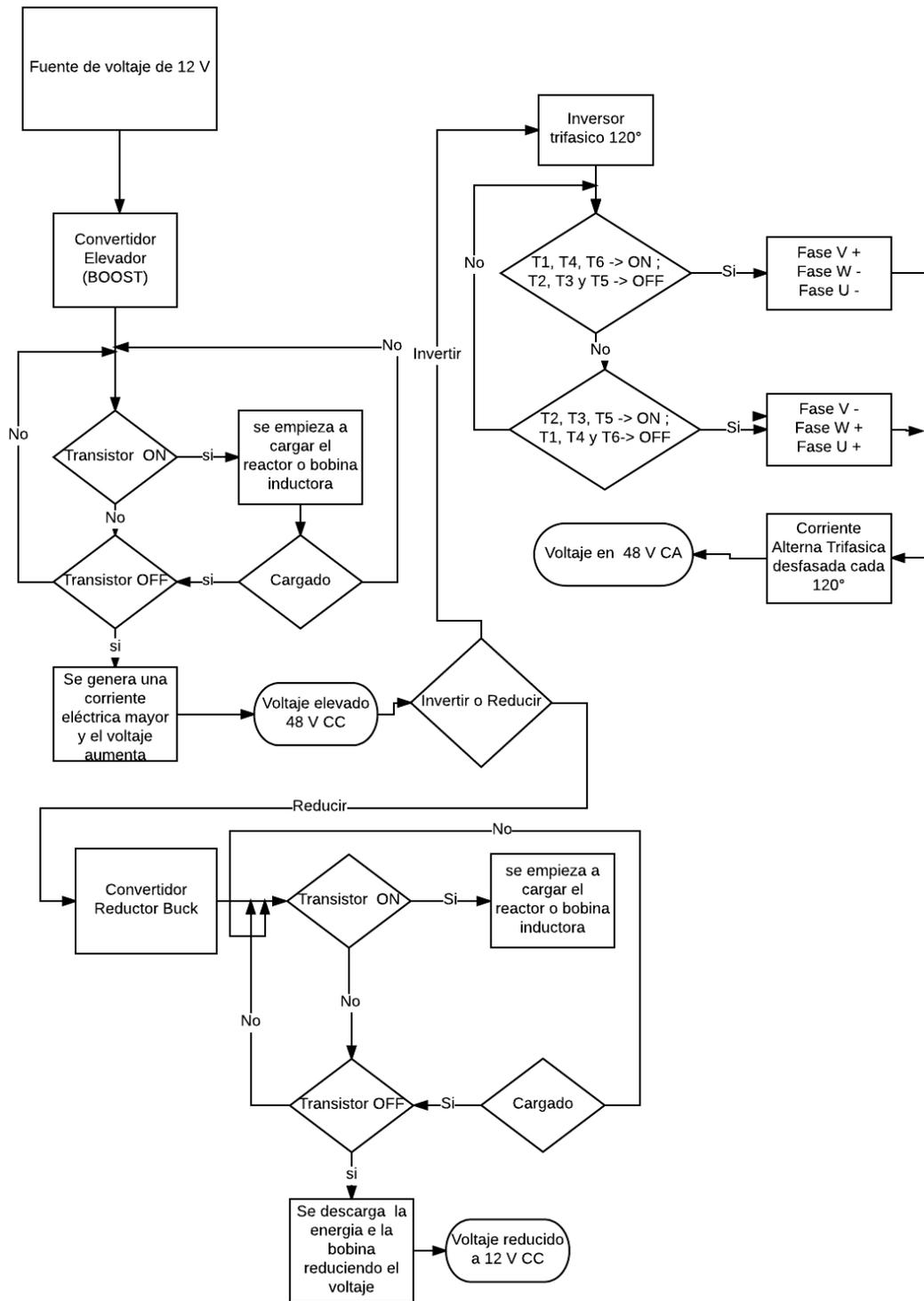


Figura 38. Diagrama de flujo del diseño del módulo inversor

DISCUSION

Análisis del diseño

El diseño del módulo inversor planteado en este proyecto de investigación se basa en el del Toyota Prius híbrido y sus tres funciones principales que son:

Aumentar el voltaje de la batería de alto voltaje de 201,7 V, por medio de un convertidor elevador tipo Boost con transistores IGBTs a 500 V. Invertir estos 500V CC, mediante un inversor trifásico conformado por IGBTs a 500 V AC, para el funcionamiento de los moto generadores. Reducir los 500 V CC por medio de un convertidor reductor tipo Buck a 201,7 CC, para recargar la batería.

Se puede establecer una comparación con el diseño planteado, puesto que eleva el voltaje de 12 V CC proveniente de la batería, por medio de un convertidor elevador tipo Boost con transistores IGBT similares a los usados en el Toyota Prius a 48 V CC. Invierte los 48 V CC, por medio de un inversor trifásico con transistores IGBTs y desfasado a 120°, a 48 V CA. Reduce los 48 V CC, mediante un convertidor reductor tipo Buck con transistores IGBTs a 12 V CC.

De manera que, se representa el elevamiento, la inversión, y la reducción en el diseño, de forma que se permitió apreciar las tres principales funciones del módulo inversor, estableciéndose de esta manera un análisis exitoso.

Análisis de los convertidores Boost y Buck

La tabla 1 y 3, expone los resultados del convertidor elevador Boost y convertidor reductor Buck respectivamente. Cuando se trata de convertidores, los datos preponderantes son la inductancia mínima, el ciclo de trabajo, la frecuencia, la capacitancia, la intensidad máxima y la intensidad mínima.

El diseño y cálculo de los convertidores fue llevado a cabo en condiciones ideales y con un régimen de corriente permanente, por lo que podría darse el caso, de que llevado a la realidad el circuito pueda presentar pérdidas.

En los convertidores, la frecuencia, la inductancia y la capacitancia están relacionadas. Los valores de la inductancia mínima y de la capacitancia que se calcularon en el convertidor Boost son de 5,4 micros Henry y 16,276 micros Faradios; mientras que en el convertidor Buck son de 16,364 micros Henry y 28,646 micros Faradios. Si se aumentará la frecuencia estos valores se reducirían. Cabe recalcar que las altas frecuencias limitan el comportamiento de los transistores, aumentando la pérdida de potencia en los mismos.

Los hilos de la bobina deben tener un valor nominal que tolere la corriente eficaz, el valor que deben soportar en el diseño es: en el convertidor Boost de 2,083 Amperios y en el convertidor Buck de 2,75 Amperios.

En el diseño el valor máximo calculado de la corriente en el convertidor Boost es de 16,667 A y en el convertidor Buck es de 5,5 Amperios. El núcleo de la bobina debe soportar este valor pico de la corriente y no saturarse.

El transistor debe soportar el valor máximo de la corriente cuando este activado y el valor máximo de la tensión cuando este desactivado, ya que de lo contrario el sistema no funcionara correctamente.

El capacitor a usarse debe ser capaz de limitar el rizado de salida según las especificaciones de diseño, y soportar la tensión pico de salida y conducir la corriente eficaz necesaria. En el diseño el rizado que se especificado tenía que ser menor al 2 % para ambos convertidores.

Una vez establecidas estas condiciones, se puede determinar que los datos calculados para los convertidores son correctos.

Conclusiones

- Se analizó la aplicación de la electrónica de potencia en los inversores de los vehículos eléctricos, describiendo los componentes de un sistema inversor-convertidor.
- Se logró calcular y simular las tres funciones principales del módulo inversor que son: elevar la corriente proveniente de la batería, a través de un convertidor elevador Boost con transistores IGBTs, invertir la corriente continua elevada en corriente alterna, gracias a un inversor trifásico con transistores IGBTs y reducir el voltaje, mediante un convertidor reductor Buck igualmente con transistores IGBTs.
- Se realizó el cálculo y diseño de un módulo inversor – convertidor, mediante un sistema convertidor elevador boost que eleva, de 12 V CC a 48 V CC, además de un inversor trifásico, que invierte el voltaje de, 48 V CC a 48 V AC y de un convertidor reductor Buck que reduce, de 48 V CC a 12 V CC; para representar de forma semejante, como funciona un sistema inversor de un vehículo híbrido eléctrico. Se logró realizar los diagramas eléctricos en el software Simulink para mostrar la simulación del sistema.
- Se estableció que el cálculo y diseño del convertidor Boost, del inversor trifásico de 6 pasos y del convertidor Buck eran correctos, puesto que los cálculos propuestos en la teoría, al momento de la simulación resultaron satisfactorios ya que dieron los resultados esperados.

Recomendaciones

- Se recomienda que previo al manejo del sistema inversor de un vehículo híbrido o eléctrico tomar en cuenta los principales componentes y establecer las principales funciones.

- Se recomienda que en los convertidores tanto elevador Boost como reductor Buck determinar que el flujo de corriente sea permanente para facilidad al momento de cálculo, por lo que se debe establecer una inductancia mínima mayor a 0 H.
- Se recomienda para el diseño en el software Simulink de Matlab añadir desde la librería el componente “powergui” el cual es necesario para realizar las simulaciones.

BIBLIOGRAFIA

- Anderson, C., & Anderson, J. (2005). *Electric and Hybrid Cars: A History*. Londres: McFarland & Company, Inc.
- Ayoubi, Elsieda, Oukaour, Chaoui, Slamani, & Gualous. (8 de Julio de 2015). *ELSEVIER*.
Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/294884829_Four-Phase_Interleaved_DCDC_Boost_Converter_Interfaces_for_Super-Capacitors_in_Electric_Vehicle_Application_based_on_Advanced_sliding_mode_Control_design
- BARRERA, L., & CANACUÁN, L. (2012). <http://www.utn.edu.ec/web/uniportal/>. Obtenido de repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/1597/1/FECYT%201242%20TESIS.pdf
- CALDERÓN, A. V. (Agosto de 2015). *uide.edu.ec*. Obtenido de <http://repositorio.uide.edu.ec/bitstream/37000/841/1/T-UIDE-17.pdf>
- Cancela, C. (19 de Febrero de 2016). <http://www.elconfidencial.com>. Obtenido de http://www.elconfidencial.com/multimedia/album/motor/2016-02-19/nuevo-prius-mas-comodo-y-eficiente_1154082/#6
- Clavero, D. (s.f.). Toyota Prius. *Nuevo Toyota Prius a prueba: las 4 claves detrás del Prius más revolucionario*. Diariomotor.
- Gonzales, G. D. (24 de Marzo de 2009). <http://www.mailxmail.com/>. Obtenido de <http://www.mailxmail.com/curso-electronica-potencia/electronica-potencia-introduccion>
- González, W. (2012). <http://dSPACE.ups.edu.ec/>. Obtenido de <http://dSPACE.ups.edu.ec/bitstream/123456789/3280/1/UPS-CT002536.pdf>

Hart, D. W. (2001). *ELECTRONICA DE POTENCIA*. MADRID: PEARSON EDUCACION S.A.

Jiménez, J. E. (2013). <http://repositorio.uide.edu.ec/>. Obtenido de <http://repositorio.uide.edu.ec:8080/bitstream/37000/149/1/T-UIDE-0146.pdf>

MOHAN, N., UNDELAND, T. M., & ROBBINS, W. P. (2009). *ELECTRÓNICA DE POTENCIA Convertidores, aplicaciones y diseño*. MEXICO: McGraw-Hill Companies Inc.

Parra, L. E. (Diciembre de 2011). www.uc.cl. Obtenido de <https://repositorio.uc.cl/bitstream/handle/11534/2865/579677.pdf?sequence=1>

Pauta, E., & Miotto, A. (2014). <http://dspace.uazuay.edu.ec/>. Obtenido de <http://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/4252/1/10811.pdf>

RASHID, M. (2004). *Electronica de Potencia*. Mexico: Pearson Prentice Hall.

Toyota Motor Corporation. (2011). www.toyota-tech.eu. Obtenido de http://www.toyota-tech.eu/HYBRID/HVDM/ES/Prius%20Plugin_ES.pdf

Valderrama, F., Moreno, H., & Vega, H. (Septiembre de 2011). *Universidad de San Buenaventura*. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5038442.pdf>

ANEXOS

Anexo A. Data sheet Transistor IGBT IRG4BC30K

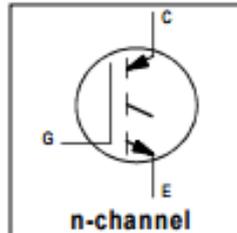
International
IR Rectifier
 INSULATED GATE BIPOLAR TRANSISTOR

PD - 91596A

IRG4BC30K
 Short Circuit Rated
 UltraFast IGBT

Features

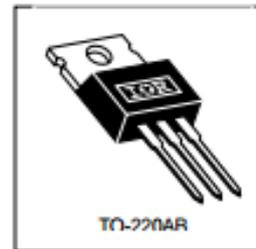
- High short circuit rating optimized for motor control, $t_{sc} = 10\mu s$, @360V V_{CE} (start), $T_J = 125^\circ C$, $V_{GE} = 15V$
- Combines low conduction losses with high switching speed
- Latest generation design provides tighter parameter distribution and higher efficiency than previous generations



$V_{CES} = 600V$
 $V_{CE(on)} \text{ typ.} = 2.21V$
 @ $V_{GE} = 15V, I_C = 16A$

Benefits

- As a Freewheeling Diode we recommend our HEXFRED™ ultrafast, ultrasoft recovery diodes for minimum EMI / Noise and switching losses in the Diode and IGBT
- Latest generation 4 IGBTs offer highest power density motor controls possible
- This part replaces the IRGBC30K and IRGBC30M devices



Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
V_{CES}	Collector-to-Emitter Voltage	600	V
$I_C @ T_C = 25^\circ C$	Continuous Collector Current	28	A
$I_C @ T_C = 100^\circ C$	Continuous Collector Current	16	
I_{CM}	Pulsed Collector Current $\text{\textcircled{Q}}$	58	
I_{LM}	Clamped Inductive Load Current $\text{\textcircled{Q}}$	58	
t_{sc}	Short Circuit Withstand Time	10	μs
V_{GE}	Gate-to-Emitter Voltage	± 20	V
E_{AV}	Reverse Voltage Avalanche Energy $\text{\textcircled{Q}}$	280	mJ
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	Maximum Power Dissipation	100	W
$P_D @ T_C = 100^\circ C$	Maximum Power Dissipation	42	
T_J	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to +150	$^\circ C$
	Soldering Temperature, for 10 sec.	300 (0.083 in. (1.6mm) from case)	
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw.	10 lbf-in (1.1N-m)	

Thermal Resistance

	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	1.2	$^\circ C/W$
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.5	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient, typical socket mount	—	80	
Wt	Weight	1.44	—	g

www.irf.com

1

4/24/2000

Anexo B. Data sheet batería Bosch D126



Batería de reserva D126 (12 V, 7 Ah)



- ▶ 12 VCC, ácido sellado
- ▶ Totalmente recargable
- ▶ No requiere mantenimiento
- ▶ Para usar como fuente de alimentación alternativa con módulos de accesorio
- ▶ Vida útil duradera

Fuente de alimentación de ácido sellado de reserva y auxiliar de tipo recargable que no necesita mantenimiento y proporciona muchas horas de servicio y fiabilidad.

La batería sólo puede utilizarse con circuitos de carga que se hayan calibrado para baterías de ácido sellado. Es adecuada para suministrar alimentación de reserva a sistemas de incendios, seguridad y control de acceso cuando se produzcan interrupciones en la red eléctrica.

El D126 se ajusta a cualquiera de las cajas de protección y se conecta a los dos cables con codificación de color de la batería que se suministran con el panel de control o el módulo. Utilice un arnés de batería dual D122 para conectar dos baterías D126 en paralelo y duplicar la capacidad en amperios-hora.

Certificados y homologaciones

Región	Certificación
Europa	CE Council Directive 89/336/EEC Electromagnetic Compatibility
EE.UU.	UL ALVY: Access Control Systems Units (UL294), APOU: Proprietary Alarm Units (UL1076), UEHX7: Signaling Appliances, Miscellaneous Certified for Canada (cUL)
	FM
	CSFM 7167-1615: 100, 7165-1615: 112, 7165-1615: 113, 7165-1615: 119, and 7167-1615: 124 Julio de 2008
	NYC/BSA 582-85-SA
	CDFM DSI

Planificación

Requisitos de alimentación de reserva

Consulte el manual de instalación del panel de control correspondiente para obtener información sobre los requisitos de la batería de reserva para el sistema. Los requisitos de corriente intermitente y continua total no deben exceder la capacidad en amperios-hora de la batería.

2 | Batería de reserva D126 (12 V, 7 Ah)

Especificaciones técnicas

Capacidad:	12 V, 7 Ah
Paneles compatibles:	Compatible con todos los paneles de control
Dimensiones:	15 m x 8 cm (6 pulg. x 3 pulg.)
Altura con terminales:	10 cm (4 pulg.)
Peso:	2,5 kg (5,5 libras)

Información sobre pedidos

Batería de reserva D126 (12 V, 7 Ah) **D126**
 Fuente de alimentación de ácido sellado de reserva y auxiliar recargable.

Anexo C

Cálculos realizados

Analisis convertidor Boost

Datos

$V_e := 12 \text{ V}$	Voltaje de entrada	$r := 0.02$	Risado
$V_s := 48 \text{ V}$	Voltaje de salida		
$P := 100 \text{ W}$	Potencia		
$f := 100 \text{ kHz}$	Frecuencia		

Cálculos

Resistencia de carga	Ciclo de Trabajo
$R := \frac{V_s^2}{P} = 23.04 \Omega$	$D := 1 - \frac{V_e}{V_s} = 0.75$
Intensidad	Inductancia mínima
$I := \frac{V_s}{R} = 2.083 \text{ A}$	$L_{min} := \frac{R \cdot D \cdot (1-D)^2}{2 \cdot f} = 5.4 \mu\text{H}$
	$L_{min} := 5.4 \mu\text{H}$
Intensidad máxima	
$I_{max} := \frac{V_e}{R \cdot (1-D)^2} + \frac{V_e \cdot D}{2 \cdot L_{min} \cdot f} = 16.667 \text{ A}$	
Capacitancia	
$C := \frac{V_s \cdot D}{f \cdot R \cdot r \cdot V_s} = 16.276 \mu\text{F}$	

Analisis convertidor buck

Datos

$V_e := 48 \text{ V}$	Voltaje de entrada	$r := 0.02$	Risado
$V_s := 12 \text{ V}$	Voltaje de salida		
$P := 33 \text{ W}$	Potencia		
$f := 100 \text{ kHz}$	Frecuencia		

Cálculos

Resistencia de Carga	Ciclo de Trabajo
$R := \frac{V_s^2}{P} = 4.364 \text{ } \Omega$	$D := \frac{V_s}{V_e} = 0.25$
Inductancia minima	
$L_{min} := \frac{R \cdot (1-D)}{2 \cdot f} = 16.364 \text{ } \mu\text{H}$	$L := L_{min} = 16.364 \text{ } \mu\text{H}$
Intensidad media	Variacion de la intensidad en el inductor
$I_{med_L} := \frac{V_s}{R} = 2.75 \text{ A}$	$\Delta i_L := \frac{(V_e - V_s) \cdot D}{L \cdot f} = 5.5 \text{ A}$
Intensidad maxima	Intensidad minima
$I_{max} := I_{med_L} + \frac{\Delta i_L}{2} = 5.5 \text{ A}$	$I_{min} := I_{med_L} - \frac{\Delta i_L}{2} = -4.441 \cdot 10^{-16} \text{ A}$
Capacitancia	
$C := \frac{1-D}{8 \cdot L \cdot f^2 \cdot r} = 28.646 \text{ } \mu\text{F}$	