

Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Tesis de Maestría

Diseño de un sistema fotovoltaico e inversor trifásico de
alta eficiencia para aplicaciones de bombeo de agua

presentada por

Ing. Luis Mauricio Carrillo Santos

como requisito para la obtención del grado de
Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica

Director de tesis

Dr. Gabriel Calzada Lara

Codirector de tesis

Dr. Jesús Aguayo Alquicira

Cuernavaca, Morelos, México. Enero de 2019.



SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Cuernavaca, Mor., 13 de diciembre de 2018.

OFICIO No. DIE/0193/2018

Asunto: Aceptación de documento de tesis

DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del **C. Luis Mauricio Carrillo Santos**, con número de control **M16CE094** de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado **"Diseño de un Sistema Fotovoltaico e Inversor Trifásico de Alta Eficiencia para Aplicaciones de Bombeo de Agua"** y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Gabriel Calzada Lara
Doctor en Ingeniería Eléctrica
Cédula profesional 7599980

CODIRECTOR DE TESIS

Dr. Jesús Aguayo Alquicira
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 4706315

REVISOR 1

Dr. Jorge Hugo Calleja Gjumlich
Doctor en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 4033213

REVISOR 2

Dr. Jesús Darío Mina Antonio
Doctor en Ingeniería
Cédula profesional 6094069

C. p. M. T. I. María Elena Gómez Torres - Jefa del Departamento de Servicios Escolares
Estudiante
Expediente
RFE/ltt.





SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Cuernavaca, Morelos, **19/Diciembre/2018**

OFICIO No. SAC/596/2018

Asunto: Autorización de impresión de tesis

ING. LUIS MAURICIO CARRILLO SANTOS
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
PRESENTE

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado "Diseño de un Sistema Fotovoltaico e Inversor Trifásico de Alta Eficacia para Aplicaciones de Bombeo de Agua", ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el ingreso del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo

ATENTAMENTE

Experiencia en Educación Tecnológica
"Conocimiento y tecnología al servicio de México"

DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



Cp. M.TI. María Elena Gómez Torres- Jefa del Departamento de Servicios Escolares,
Expediente

CVCAR/micr

Dedicatorias

A Dios

Por otorgarme sabiduría para tomar las decisiones que me condujeron a este momento importante en mi vida.

A mi madre, Maribel Santos Reyes

Por su inmenso e incondicional amor, el cual me motiva cada instante a ser mejor tanto en lo personal como en lo profesional.

A mi padre, Mauricio Carrillo Zárate

Por su amor y apoyo incondicional a lo largo de mi vida.

A mi abuelo, Aureliano Santos y a mi primo, Daniel López

Que desde el cielo me motivan a seguir creciendo en todos los aspectos de mi vida.

A mi abuela, Elba Reyes

Por sus enseñanzas de respeto, compromiso y trabajo que me inculcó desde pequeño, los cuales me rigen actualmente.

A mi hermana, Grisel Carrillo y a mi sobrina, Anna Paula

Por su apoyo y cariño que me daban siempre que las visitaba.

A mi novia, Yesenia Reyes

Por todo el apoyo que me ha brindado tanto en lo personal como en lo profesional desde hace casi ocho años, en los cuales hemos logrado terminar todos los proyectos propuestos, reforzando y aumentando nuestro gran amor.

Agradecimientos

Al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) por darme la oportunidad de llevar a cabo mis estudios de posgrado en el área de maestría en ciencias en ingeniería electrónica.

Al Dr. Gabriel Calzada Lara, por el apoyo y comprensión brindados a lo largo de la maestría tanto de manera personal como académica.

Al Dr. Jesús Aguayo Alquicira por su apoyo y accesibilidad en todo momento para la solución de dudas. Además de las grandes cátedras de manejo del osciloscopio.

A mis revisores, el Dr. Jorge Hugo Calleja Gjumlich y el Dr. Jesús Darío Mina Antonio por sus consejos, aportaciones y correcciones, los cuales enriquecieron el trabajo de tesis.

A todo el personal del departamento de Electrónica, por el apoyo brindado durante mi estancia en CENIDET.

A la Lic. Lorena Ruiz Ramírez por su paciencia, dedicación y apoyo durante el proceso de titulación.

Al laboratorio de Electrónica de Potencia y Energías Renovables por proporcionarme los recursos requeridos por el trabajo de tesis y permitirme llevar a cabo todas las pruebas necesarias.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por brindarme apoyo económico para realizar la maestría.

Resumen

Actualmente, el uso de los sistemas fotovoltaicos para suministrar energía eléctrica a sistemas de bombeo ubicados en poblaciones aisladas, se encuentra en aumento. La razón principal es que estas poblaciones no disponen de la red eléctrica nacional debido a que para la Comisión Federal de Electricidad (CFE) no resulta favorable la inversión para extender su red eléctrica para abastecer a dichas comunidades alejadas, ya sea por su difícil acceso o reducido número de habitantes.

Aunado a lo anterior, el bombeo de agua para uso en el sector agrícola cuenta con sistemas sobredimensionados, aumentando el precio de los dispositivos que conforman al mismo. Lo anterior conlleva a un incremento en el costo de la producción de energía originada por este sector, que en 2017 representó el 3.4% del consumo total energético en México.

Es por ello, que en esta tesis se desarrolla el diseño de un sistema fotovoltaico autónomo que resuelva las necesidades de un alto consumo de energía en poblaciones retiradas de la red eléctrica nacional, cuya aplicación final es el uso en sistema de riego y abastecimiento de bebederos en el sector agropecuario.

El diseño del sistema se lleva a cabo sin perder de vista que uno de los principales objetivos es seleccionar los componentes adecuados para el mismo, esto para asegurar que sea capaz de arrancar y controlar el motor eléctrico de la bomba con el fin de evitar un sobredimensionamiento debido a la corriente de arranque, lo que lleva al incremento del costo del sistema fotovoltaico.

Abstract

Currently, the use of photovoltaic systems to supply electric power to pumping systems located in isolated populations is increasing. The main reason is that these populations are not connected to the national electricity network because the Federal Electricity Commission (CFE) does not favor the investment of extending its electricity network to supply these remote communities, either because of its difficult access or low number of inhabitants.

In addition to the previous, the pumping of water usage in the agricultural sector has oversized systems, increasing the price of the devices that make up the system. The foregoing leads to an increase in the cost of energy production caused by this sector, which in 2017 represented 3.4% of total consumption of energy in Mexico.

For this reason, this thesis develops the design of an autonomous photovoltaic system that solves the needs of a high consumption of energy in populations away from the national electrical network, whose final application is the use in irrigation system and supply of dumps in the agricultural sector.

The design of the system is carried out without losing sight of the fact that one of the main objectives is to select the components adapted for the same system; this to ensure that the system is able to start and control the electric motor of the pump in order to avoid oversizing due to the starting current which leads to an increase in the cost of the photovoltaic system.

Contenido

Dedicatorias	i
Agradecimientos.....	ii
Resumen	iii
Abstract	iv
Contenido	v
Índice de figuras	vii
Índice de tablas	x
Nomenclatura	xi
Acrónimos	xii
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Planteamiento del problema.....	3
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo general.....	3
1.3.2. Objetivos específicos.....	4
1.4. Alcances.....	4
1.5. Estado del arte	4
1.6. Propuesta de solución.....	9
CAPÍTULO 2: SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	10
2.1. Sistemas fotovoltaicos interconectados a la red	10
2.2. Sistemas fotovoltaicos autónomos.....	11
2.3. Sistema fotovoltaico autónomo en aplicaciones de bombeo de agua	13
2.3.1. Componentes	14
2.3.1.1. Panel fotovoltaico.....	15
2.3.1.2. Regulador de carga.....	17
2.3.1.3. Baterías.....	18
2.3.1.4. Convertidor CD-CD	20
2.3.1.5. Inversor	21
CAPÍTULO 3: DISEÑO DE ELEMENTOS DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO	24
3.1. Diseño de arreglo de banco de baterías	27

3.2.	Diseño de arreglo de paneles fotovoltaicos.....	28
3.2.1.	Base de datos de irradiación solar consultadas	29
3.2.1.1.	Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).....	29
3.2.1.2.	Centro de datos de ciencia atmosférica de la NASA (por sus siglas en inglés de National Aeronautics and Space Administration)	29
3.2.1.3.	Sistema de información geográfica para las energías renovables en México (SIGER).....	30
3.2.2.	Cálculo de paneles fotovoltaicos	31
3.3.	Selección de controlador de carga.....	32
3.4.	Diseño de convertidor CD-CD.....	34
3.5.	Diseño de inversor trifásico	36
CAPÍTULO 4: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SEÑALES DE CONMUTACIÓN		38
4.1.	Descripción general.....	38
4.2.	ARM Mbed Compiler®	38
4.3.	MatLab Simulink®	39
4.4.	Microcontroladores STM32	40
4.2.1.	Tarjeta Nucleo-32 STM32L4.....	40
4.2.2.	Tarjeta Nucleo-144 STM32F767.....	41
4.5.	Señales de conmutación para convertidor Boost multifase.....	42
4.5.1.	Simulación	43
4.5.2.	Implementación	44
4.6.	Señales de conmutación para inversor trifásico.....	46
4.6.1.	Simulación	46
4.6.2.	Implementación	52
CAPÍTULO 5: RESULTADOS EN SIMULACIÓN Y EXPERIMENTALES		57
5.1.	Descripción general.....	57
5.1.	Resultados en simulación	57
5.2.	Resultados experimentales	65
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS		73
6.1.	Conclusiones.....	73
6.2.	Trabajos futuros	75
Referencias		76
Anexos		81

Índice de figuras

Figura 1. 1. Mapa de irradiación solar	1
Figura 1. 2. Distribución del consumo de energía total en México, 2017	2
Figura 1. 3. Métodos de dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos.....	4
Figura 1. 4. Modelos obtenidos por el método analítico a) panel fotovoltaico b) batería	5
Figura 1. 5. Topología de inversor trifásico tipo puente completo	6
Figura 1. 6. Señales moduladora y portadora de técnica SPWM	6
Figura 1. 7. Curvas de par-velocidad para velocidades inferiores a la velocidad nominal.....	7
Figura 1. 8. Curvas de par-velocidad para velocidades superiores a la velocidad nominal.....	8
Figura 1. 9. Esquema de propuesta de solución	9
Figura 2. 1. Esquema de sistema fotovoltaico interconectado a la red	11
Figura 2. 2. Esquema general de sistema fotovoltaico autónomo	11
Figura 2. 3. Principales aplicaciones de sistemas fotovoltaicos autónomos	12
Figura 2. 4. Esquema de sistema fotovoltaico de bombeo	14
Figura 2. 5. Esquema de celda, panel y arreglo fotovoltaico	15
Figura 2. 6. Curvas características IV y PV	16
Figura 2. 7. Variación de porcentaje de capacidad disponible vs temperatura	20
Figura 2. 8. Topología de convertidor Boost	20
Figura 2. 9. Topología de convertidor Boost multifase	21
Figura 2. 10. Inversor monofásico medio puente	22
Figura 2. 11. Inversor convencional tipo puente completo monofásico	22
Figura 2. 12. Inversor convencional tipo puente completo trifásico	23
Figura 3. 1. Esquema de aplicación de sistema de bombeo fotovoltaico	24
Figura 3. 2. Conexión de banco de baterías diseñado	28
Figura 3. 3. Esquema de conexión de paneles fotovoltaicos	32
Figura 3. 4. Módulo de potencia FP30R06W1E3	36
Figura 4. 1. Aplicación ARM Mbed Compiler.....	39
Figura 4. 2. Componentes principales de microcontroladores	40
Figura 4. 3. Tarjeta nucleo STM32L4	41
Figura 4. 4. Tarjeta nucleo STM32F767	42
Figura 4. 5. Simulación de señales de conmutación Boost multifase.....	43
Figura 4. 6. Señales de conmutación simuladas en MatLab Simulink ®.....	44
Figura 4. 7. Código para generación de señales de conmutación de Boost multifase	45
Figura 4. 8. Señales de conmutación implementadas en STM32L432	46
Figura 4. 9. Esquema de funcionamiento de estrategia SPWM	46

Figura 4. 10. Principio de comparación de señal moduladora y señal portadora, estrategia de modulación SPWM	47
Figura 4. 11. Diagrama esquemático de simulación de estados de conmutación para régimen a tensión constante	48
Figura 4. 12. Señales de conmutación en simulación. Técnica SPWM para régimen a tensión constante.	49
Figura 4. 13. Señales de conmutación complementarias con tiempos muertos simuladas	50
Figura 4. 14. Diagrama esquemático de simulación de estados de conmutación para régimen a par constante.....	51
Figura 4. 15. Escalones de variación de la amplitud y frecuencia de la señal moduladora	52
Figura 4. 16. Librería de soporte para tarjetas de desarrollo STM®.....	53
Figura 4. 17. Diagrama esquemático para implementación de estados de conmutación para régimen a tensión constante	54
Figura 4. 18. Diagrama esquemático para implementación de estados de conmutación para régimen a par constante	54
Figura 4. 19. Estados de conmutación implementados en Nucleo-144 STM32F767	55
Figura 4. 20. Generador de señales complementarias con tiempos muertos. a) Diagrama esquemático, b) Circuito implementado.....	55
Figura 4. 21. Señales de conmutación complementarias con tiempos muertos implementadas	56
Figura 5. 1. Diagrama esquemático de sistema fotovoltaico completo en simulación	57
Figura 5. 2. Curvas IV y PV características del panel fotovoltaico empleado.....	58
Figura 5. 3. Diagrama esquemático de convertidor Boost a) Convencional b) Multifase	59
Figura 5. 4. Corriente del inductor	59
Figura 5. 5. Rizo de corriente a la salida	60
Figura 5. 6. Rizo de tensión a la salida	60
Figura 5. 7. Señales de tensión y corriente a la salida del convertidor CD-CD	61
Figura 5. 8. Forma de onda de tensión a la salida del inversor obtenida en simulación	62
Figura 5. 9. Corriente de arranque de motor de inducción de 10 hp obtenida en simulación, empleando técnica SPWM para régimen a tensión constante	63
Figura 5. 10. Corriente de arranque de motor de inducción de 10 hp obtenida en simulación, empleando técnica SPWM para régimen a par constante.....	64
Figura 5. 11. Torque del motor de inducción de 10 hp obtenido en simulación, régimen a tensión constante	65
Figura 5. 12. Torque del motor de inducción de 10 hp obtenido en simulación, régimen a par constante.....	65
Figura 5. 13. Velocidad de motor de inducción de 10 hp obtenida en simulación, régimen a tensión constante	65
Figura 5. 14. Velocidad de motor de inducción de 10 hp obtenida en simulación, régimen a par constante.....	65

Figura 5. 15. Circuito implementado del inversor trifásico con impulsores.....	66
Figura 5. 16. Forma de onda de tensión a la salida del inversor obtenida en implementación	67
Figura 5. 17. Inversor trifásico en conjunto con el motor de inducción de 1 hp.....	67
Figura 5. 18. Inversor trifásico en conjunto con el banco de resistencias empleado.	68
Figura 5. 19. Diagrama de conexión de carga resistiva, para potencia de 800 W.....	68
Figura 5. 20. Diagrama de conexión de cada rama, para potencia de 2827 W.....	69
Figura 5. 21. Diagrama de conexión de cada rama, para potencia de 2827 W.....	69
Figura 5. 22. Diagrama de conexión de cada rama, para potencia de 5400 W.....	69
Figura 5. 23. Diagrama de conexión de carga resistiva, para potencia de 5400 W...	69
Figura 5. 24. Corriente de arranque del motor de 1 hp, régimen a tensión constante	70
Figura 5. 25. Corriente de arranque del motor de 1 hp, régimen a par constante	70
Figura 5. 26. Corriente de arranque del motor de 3 hp, régimen a tensión constante	70
Figura 5. 27. Corriente de arranque del motor de 3 hp, régimen a par constante	70
Figura 5. 28. Corriente a la salida del inversor, teniendo carga resistiva de 800 W..	71
Figura 5. 29. Corriente a la salida del inversor, teniendo carga resistiva de 2827 W	71
Figura 5. 30. Corriente a la salida del inversor, teniendo carga resistiva de 5400 W	71
Figura A. 1. Disipador WAKEFIELD 392-300AB	85
Figura A. 2. Diagrama esquemático de componentes de inversor trifásico e impulsores.....	86
Figura A. 3. PCB de inversor trifásico e impulsores	86
Figura A. 4. Circuito generador de tiempos muertos	87
Figura A. 5. Convertidor Boost multifase simulado en Simulink®.....	88
Figura A. 6. Convertidor Boost multifase simulado en Simetrix®	88
Figura A. 7. Convertidor Boost multifase simulado en PSim®	88

Índice de tablas

Tabla 2. 1. Ventajas y desventajas de la energía solar fotovoltaica	10
Tabla 2. 2. Ventajas y desventajas de aplicaciones en CD y CA de sistemas fotovoltaicos autónomos.....	12
Tabla 2. 3. Funciones del regulador de carga según la zona de trabajo	17
Tabla 2. 4. Clasificación de reguladores de carga.....	18
Tabla 3. 1. Especificaciones de batería seleccionada.....	27
Tabla 3. 2. Irradiación anual para Cuernavaca, Morelos. CONAGUA.....	29
Tabla 3. 3. Irradiación anual para Cuernavaca, Morelos. Centro de datos de ciencia atmosférica de la NASA.	30
Tabla 3. 4. Irradiación anual para Cuernavaca, Morelos. SIGER.....	30
Tabla 3. 5. Especificaciones de panel fotovoltaico empleado	31
Tabla 3. 6. Especificaciones de controladores de carga comerciales	33
Tabla 3. 7. Especificaciones de diseño de convertidor Boost.....	34
Tabla 3. 8. Especificaciones de diseño de inversor.....	36
Tabla 3. 9. Especificaciones generales del módulo FP30R06W1E3.....	36
Tabla 4. 1. Especificaciones de diseño de señales de conmutación Boost cinco fases	43
Tabla 4. 2. Especificaciones de técnica de modulación SPWM	47
Tabla 4. 3. Variaciones de tensión-frecuencia.....	51
Tabla 5. 1. Comparación entre Boost convencional y multifase en simulación	61
Tabla 5. 2. Especificaciones generales de motor de inducción empleado en simulación	61
Tabla 5. 3. Cargas utilizadas en implementación	66
Tabla 5. 4. Comparación de corriente de arranque en motores de inducción empelados obtenidas experimentalmente	70
Tabla 5. 5. Eficiencia calculada para las diferentes cargas empleadas	72
Tabla 5. 6. Comparación de resultados de corriente de arranque obtenidos en simulación y experimentalmente	72

Nomenclatura

H	Altura
e	Carga del electrón
Q	Caudal
K_a	Coeficiente de autodescarga diario (baterías)
K_c	Coeficiente de pérdidas en el inversor
K_b	Coeficiente de pérdidas por rendimiento de banco de baterías
K_v	Coeficiente de pérdidas varias
K	Constante de Boltzmann
I_{sc}	Corriente de cortocircuito
I_{mp}	Corriente en el punto de máxima potencia
I_L	Corriente fotogenerada
I_{od}	Corriente inversa de saturación del diodo
η	Eficiencia
FF	Factor de forma
m	Factor de la idealidad del diodo
R	Factor de rendimiento del sistema fotovoltaico
PR	Factor global de funcionamiento de panel fotovoltaico
N	Número de horas de autonomía
γ	Peso específico del agua, 9.81 kN/m ³
P	Potencia a instalar
$P_{máx}$	Potencia máxima del panel empleado en condiciones estándar de medición (STC)
P_R	Potencia real consumida
P_d	Profundidad de descarga diaria de la batería
P_{mp}	Punto de máxima potencia
T_d	Temperatura del diodo
V	Tensión aplicada en el diodo; $V_t = kT/e$
V_{oc}	Tensión de circuito abierto
V_{mp}	Tensión en el punto de máxima potencia
V_t	Tensión térmica

Acrónimos

CFE	<i>Comisión Federal de Electricidad</i>
CONAGUA	<i>Comisión Nacional del Agua</i>
CA	<i>Corriente Alterna</i>
CD	<i>Corriente Directa</i>
SVM	<i>Estrategia de modulación de espacio vectorial</i>
SPWM	<i>Estrategia de modulación senoidal por ancho de pulso</i>
HDL	<i>Lenguaje de descripción para circuitos integrados de alta velocidad</i>
PWM	<i>Modulador de Ancho de Pulso</i>
SMN	<i>Servicio Meteorológico Nacional</i>
SIG	<i>Sistema de Información Geográfica</i>
SIGER	<i>Sistema de Información Geográfica para las Energías Renovables</i>

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

En la actualidad, México al igual que otros países, se ha sumado a la producción de electricidad mediante fuentes renovables de energía; en el primer semestre de 2016 se generó por esta vía el 19.68% del total de la energía eléctrica producida [1]. El objetivo a mediano plazo sería alcanzar lo realizado por países como Noruega o Suecia; que en 2016 generaron por medio de fuentes de energía renovable más del 50% de su producción total de electricidad.

De las fuentes renovables de energía, la solar fotovoltaica ha aumentado su popularidad, debido a que es una tecnología que ha madurado a lo largo de más de 30 años. El aumento del uso de la energía solar fotovoltaica se puede atribuir a que el costo de esta tecnología ha ido disminuyendo (en 1977 el precio por watt de los paneles fotovoltaicos era de 76.67 dólares mientras que en 2015 disminuyó a 0.74 dólares). Debido a lo anterior los sistemas fotovoltaicos se han convertido en una opción atractiva en aplicaciones tanto en el ámbito residencial como en el industrial.

De acuerdo con la Asociación Europea de la Industria Fotovoltaica (EPIA, por sus siglas en inglés), México se encuentra entre los primeros 5 países con mayor potencial de energía solar en el mundo debido a que los países ubicados entre -35° y $+35^{\circ}$ respecto al Ecuador son los que tienen mayor irradiación solar, como se puede apreciar en la Figura 1. 1.

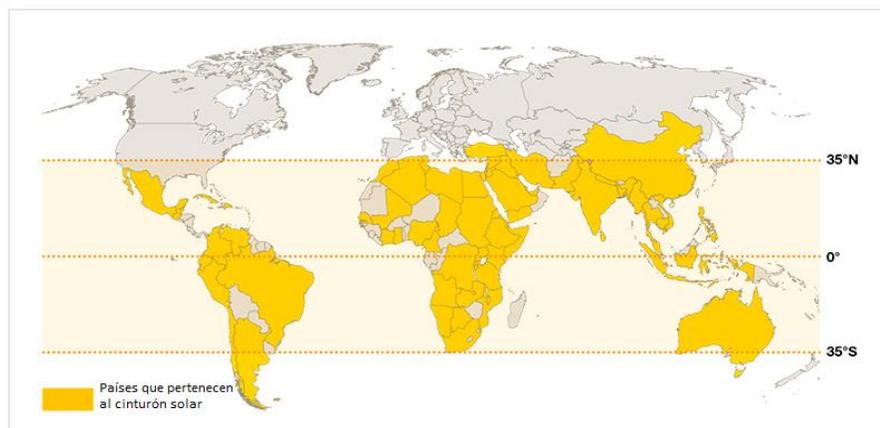


Figura 1. 1. Mapa de irradiación solar

El 70% del territorio nacional en México presenta una irradiación superior a 4,5 kWh/m²/día, lo que lo convierte en un país con enorme potencial de generar grandes cantidades de energía eléctrica por medio de la energía solar [2].

La producción de electricidad mediante la conversión de energía solar fotovoltaica en México se ha incrementado en los últimos años. En 2004 la producción fue de 8.8 GWh mientras que en el año 2016 la producción se elevó hasta los 215 GWh, lo que se traduce en un incremento de más de 25 veces [1, 3] . Asimismo existe un creciente interés en que el aprovechamiento de la energía durante el proceso de conversión sea eficiente, desde el punto de inicio hasta la aplicación final en diferentes sectores económicos en México. En la Figura 1. 2 se muestra la distribución del consumo de energía total en México.

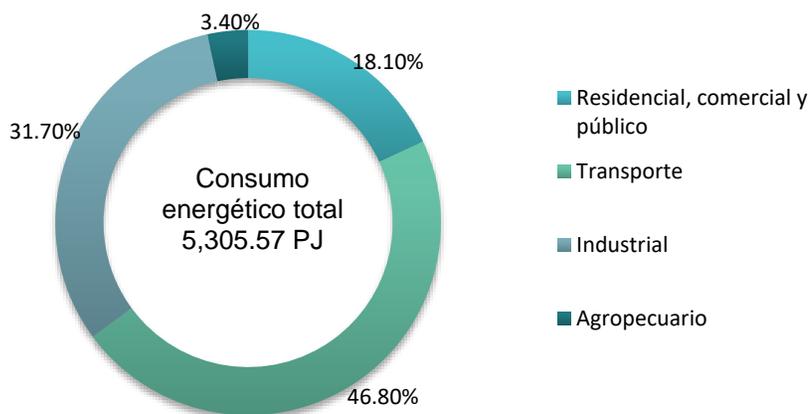


Figura 1. 2. Distribución del consumo de energía total en México, 2017

Atendiendo al sector agropecuario, de acuerdo a la información proporcionada en el Balance Nacional de Energía por la Secretaría de energía, este sector en 2017 representó el 3.4% del consumo energético total [4]. Las actividades consideradas para determinar el consumo de energía en este sector son las relacionadas con la agricultura y ganadería, tales como combustibles para la agricultura mecanizada, bombeo de agua para bebederos o riego, etc.

En el caso de bombeo de agua, existen aproximadamente 132 mil pozos para uso agrícola en México, de los cuales se considera que el 65% cuenta con sistemas de bombeo sobredimensionados, lo que conlleva a un consumo de energía excesivo en esta actividad. El no sobredimensionar un sistema de bombeo trae como beneficios el reducir el consumo de energía eléctrica, lo que representa ahorros económicos de hasta 18% de su costo actual [5].

1.2. Planteamiento del problema

En los sistemas de bombeo fotovoltaico se encuentra que el principal inconveniente es la baja capacidad de bombeo, debido a que el motor utilizado para tal fin es de corriente directa funcionando a 12 V en la mayoría de los casos y de baja potencia para la mayoría de las aplicaciones [6, 7]. Aunado a lo anterior, no es costeable la relación de inversión inicial y capacidad de bombeo para la mayoría de las aplicaciones, ya que en muchos casos no se logra el caudal requerido con una bomba de corriente directa que además de bajo caudal, genera costos de mantenimiento constante.

Debido a lo anterior, se propone una transformación intermedia de la energía eléctrica para pasar de corriente directa a corriente alterna por medio de un inversor y poder así alimentar a un motor de características industriales como los que se usan comúnmente en el bombeo agrícola conectados a la red eléctrica convencional. Ahora bien, el principal inconveniente si se ve la solución desde este punto de vista, es que los inversores mayormente comercializados van desde 500 W hasta 2 kW, dejando imposibilitada la opción de utilizar bombas con motores de corriente alterna de gran potencia y por ende también generan un caudal intermedio, que si bien es mayor al de las bombas de corriente directa, resulta poco para la mayoría de las aplicaciones agrícolas.

Por lo tanto, se pretende proponer una solución por medio de un inversor que alimente a un motor de inducción de corriente alterna con una potencia de 10 hp. Cabe mencionar que se pretende diseñar el inversor a 10 kW, para que el mismo pueda accionar bombas de mediana potencia utilizadas en aplicaciones agrícolas de al menos 10 hp; esto para que sea capaz de soportar los transitorios de corriente de las mismas.

Todo lo anterior sin perder de vista que en estos sistemas es importante seleccionar los componentes adecuados, esto para asegurar que el sistema sea capaz de arrancar y controlar el motor eléctrico de la bomba con el fin de evitar un sobredimensionamiento debido a la corriente de arranque, lo que conlleva al incremento del costo del sistema fotovoltaico [4, 5, 8, 9] .

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

- Diseñar un sistema fotovoltaico que resuelva las necesidades de un alto consumo de potencia (al menos 10 kW), para aplicaciones de bombeo de agua.

1.3.2. Objetivos específicos

- Dimensionar el arreglo de paneles fotovoltaicos adecuado para la densidad de energía requerida por el sistema.
- Dimensionar el arreglo de baterías óptimo, de tal manera que almacene la cantidad de energía requerida tomando en cuenta su período de utilización.
- Diseñar y construir un inversor trifásico de alta eficiencia de 10 kW para accionar un motor de inducción.
- Diseñar y construir la etapa de modulación del inversor trifásico de alta eficiencia de 10 kW.

1.4. Alcances

Se pretende realizar el diseño de un sistema fotovoltaico integral para aplicaciones de bombeo de agua en mediana potencia (al menos de 10 hp), el cual será útil para pequeños productores agrícolas o en lugares donde no se cuenta con un servicio de agua potable. El desarrollo, estará enfocando en la etapa del inversor trifásico de alta eficiencia, implementando técnicas de modulación que resuelvan problemas asociados al funcionamiento de la misma aplicación.

1.5. Estado del arte

La revisión del estado del arte acorde a este trabajo de investigación se encuentra dividido de la siguiente manera:

- Métodos para el dimensionamiento del arreglo de paneles fotovoltaicos y baterías.
- Topologías de convertidor CD-CD e inversor trifásico
- Técnicas de modulación y control del inversor

En [10-15] se abordan distintos métodos para realizar el dimensionamiento de los elementos que pertenecen a un sistema fotovoltaico. En la Figura 1. 3 se presentan dichas metodologías.

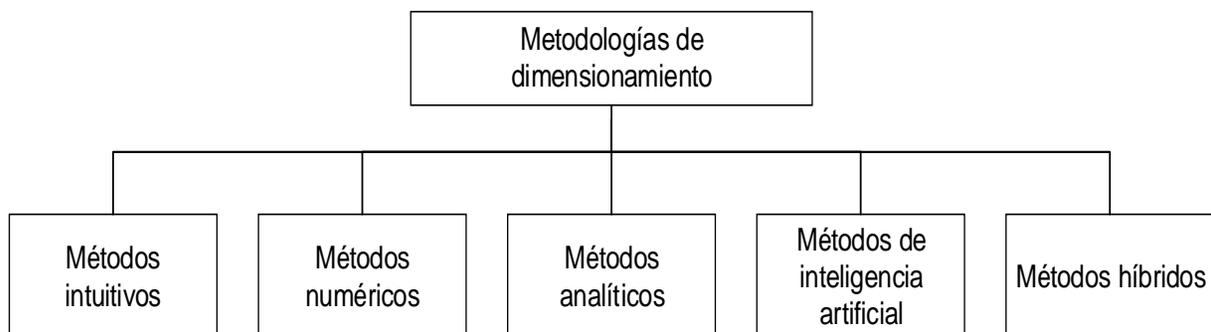


Figura 1. 3. Métodos de dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos

A continuación se describen los diferentes métodos de dimensionamiento que se emplean en sistemas fotovoltaicos:

- Métodos intuitivos: Estos utilizan cálculos simples por ende ignoran las relaciones entre los subsistemas incluida la irradiancia, además utiliza factores de seguridad y estimaciones de energía que pueden llegar a sobredimensionar los componentes del sistema.
- Métodos numéricos: Estos obtienen los resultados mediante aproximaciones determinísticas o estocásticas.
- Métodos analíticos: Estos caracterizan los componentes con modelos matemáticos.
- Métodos de inteligencia artificial: Son utilizados para reemplazar la falta de datos mediante algoritmos de predicción.
- Métodos híbridos: Estos se forman de la combinación de dos o más métodos anteriores.

De los métodos anteriores se pueden obtener como resultado los modelos de elementos del sistema, tales como paneles y baterías. En la Figura 1. 4 se muestran los modelos obtenidos empleando el método analítico [16-19] .

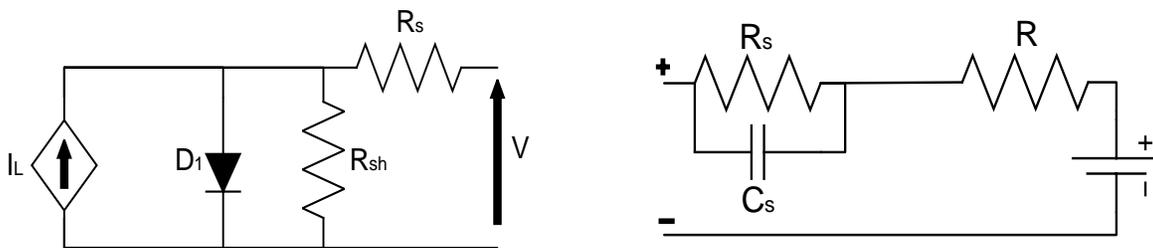


Figura 1. 4. Modelos obtenidos por el método analítico a) panel fotovoltaico b) batería

Abordando el siguiente punto de investigación del estado del arte. En la mayoría de los casos revisados en la literatura se observa una tendencia al utilizar la topología de puente completo trifásico basado en transistores tipo MOSFET o IGBT utilizados como interruptores [17, 20-22], la cual se muestra en la Figura 1. 5 .

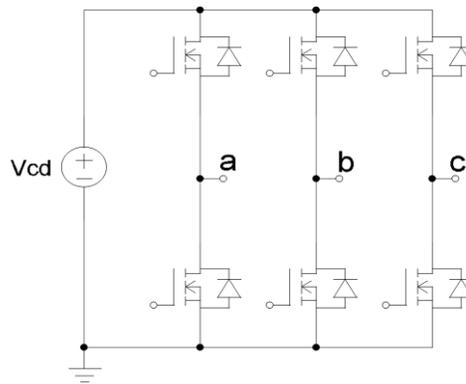


Figura 1. 5. Topología de inversor trifásico tipo puente completo

En cuanto al convertidor CD-CD que se requiere para acondicionar la tensión proveniente del banco de baterías hacia la entrada del inversor, en la literatura se encontró que la topología más utilizada para el convertidor CD-CD es el convertidor Boost (elevador) y, dependiendo de la potencia de la aplicación y sus características se puede emplear la topología Boost multifase. Sin embargo, en [22] se encuentra como excepción el uso de la topología Push-pull, así como topologías modificadas que emplean tanques resonantes [17, 19].

Por último, en lo que se refiere a técnicas de modulación del inversor trifásico; la técnica de modulación SPWM (por sus siglas en inglés Switching Pulse Width Modulation), es de las técnicas más ampliamente estudiadas y empleadas en la industria [23-25]. La modulación SPWM consiste en la comparación de señales senoidales denominadas moduladoras, con una señal, por lo general triangular, de alta frecuencia denominada portadora, dando como resultado los estados de conmutación de los dispositivos semiconductores de potencia. En la Figura 1. 6 se muestran la señal moduladora y portadora de esta técnica de modulación.

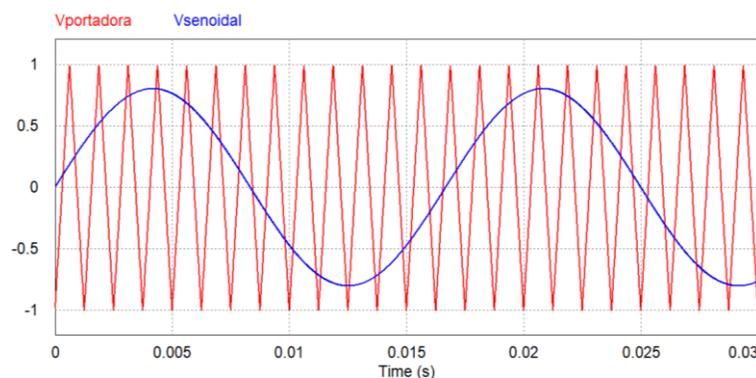


Figura 1. 6. Señales moduladora y portadora de técnica SPWM

Una aplicación común de esta técnica de modulación es el accionamiento de los motores de inducción, los cuales pueden operar bajo diferentes regímenes dependiendo del uso del mismo. Uno de ellos es a tensión constante, en el cual se

alimenta al motor a su tensión nominal desde el momento del arranque. Así como también existe el régimen a par constante en el que se utiliza la relación voltaje/frecuencia, en la cual la tensión varía proporcionalmente a la frecuencia. Si esta variación se mantiene constante entonces el flujo magnético se mantiene constante en régimen permanente [26]. En caso contrario, si esta relación no se mantiene constante, entonces el acero del núcleo del motor se satura provocando corrientes de magnetización elevadas en el motor.

En ocasiones, esta relación se emplea cuando el motor opera a velocidad inferior a su velocidad nominal. Ya que para su correcta operación en cuanto a flujo y torque nominal, se requiere reducir la tensión aplicada al estator.

En las siguientes figuras se muestran una serie de curvas características que relacionan el par y la velocidad del motor de inducción suponiendo que la tensión varía linealmente con la frecuencia; la Figura 1. 7 aplica para velocidades menores a la velocidad nominal del motor y la Figura 1. 8 para velocidades superiores a la nominal [25-27].

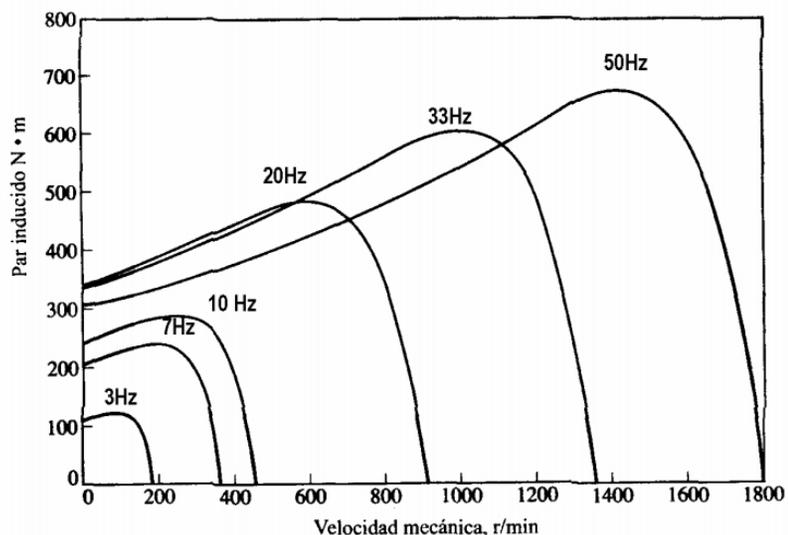


Figura 1. 7. Curvas de par-velocidad para velocidades inferiores a la velocidad nominal

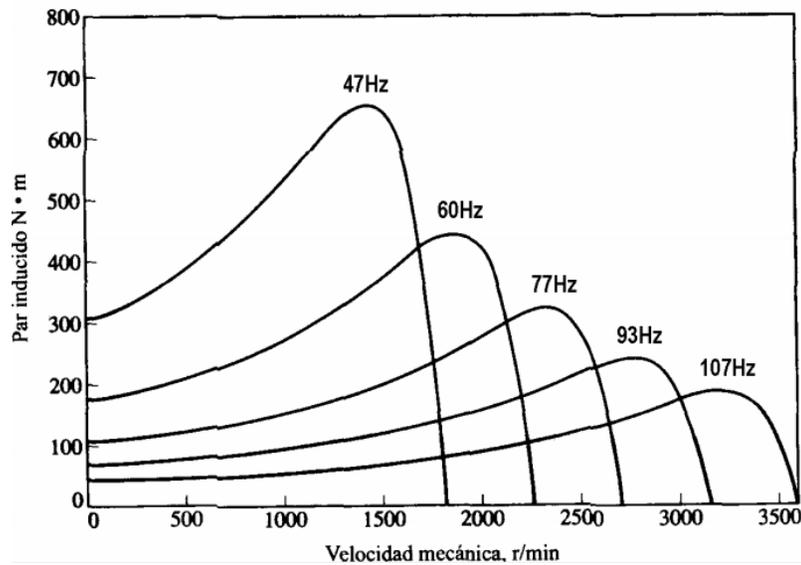


Figura 1. 8. Curvas de par-velocidad para velocidades superiores a la velocidad nominal

Otra técnica de modulación comúnmente empleada es la SVM (por sus siglas en inglés Space Vector Modulation), la cual consiste en la representación de los voltajes de fase V_a , V_b y V_c de un sistema trifásico, mediante un vector rotario $\sim V$ de amplitud constante que gira en el plano complejo con frecuencia angular ω . Asimismo, en [28] se propone una técnica PWM vectorial híbrida la cual es una combinación de las estrategias convencionales y especiales. Esta técnica propuesta reduce el efecto del rizo del torque a altas velocidades de un motor de inducción, en comparación de la técnica de modulación PWM vectorial convencional.

Conclusión de estado del arte

De la revisión del estado del arte se puede concluir lo siguiente:

- Se selecciona al método analítico para llevar a cabo el dimensionamiento de paneles fotovoltaicos y banco de baterías, así como para realizar las simulaciones y cálculos de potencia y energía requerida por el sistema.
- Se selecciona la topología de convertidor Boost en conjunto con el inversor trifásico tipo puente completo para llevar a cabo la conversión de energía CD-CA. En cuanto a la topología Boost se abordará también la topología multifase debido a la potencia del sistema.
- Para la etapa de modulación, se utilizará la técnica convencional SPWM para generar los estados de conmutación del inversor que alimentan al motor de inducción, el cual se operará en dos regímenes.
- Los regímenes de operación del motor de inducción son a tensión constante y a par constante, con la finalidad de observar el comportamiento de la corriente de arranque.

1.6. Propuesta de solución

Para el desarrollo eficiente de un sistema de bombeo fotovoltaico que cubra las necesidades energéticas requeridas por el inversor trifásico que implica el arranque y control de un motor de inducción trifásico, se propone partir de las necesidades de la carga, que en su caso puede ser el requerimiento de un caudal de agua constante o variable; lo que podría modificar la forma en la que se realiza la operación del inversor por medio de una técnica de modulación específica y/o una técnica de control para motores de inducción.

La potencia requerida por la carga también definirá la selección de la configuración paneles-baterías adecuada para asegurar un tiempo determinado de operación de la bomba. El procesamiento adecuado de la potencia eléctrica, también dependerá de la topología utilizada en todo el sistema; por lo que ahora se propone emplear un convertidor CD-CD en conjunto con un inversor trifásico tipo puente completo eficiente, empleando una técnica de control que sea capaz de reducir la corriente de arranque de la carga para con ello no sobredimensionar el sistema fotovoltaico. En la Figura 1. 9 se muestra el esquema de la propuesta de solución.

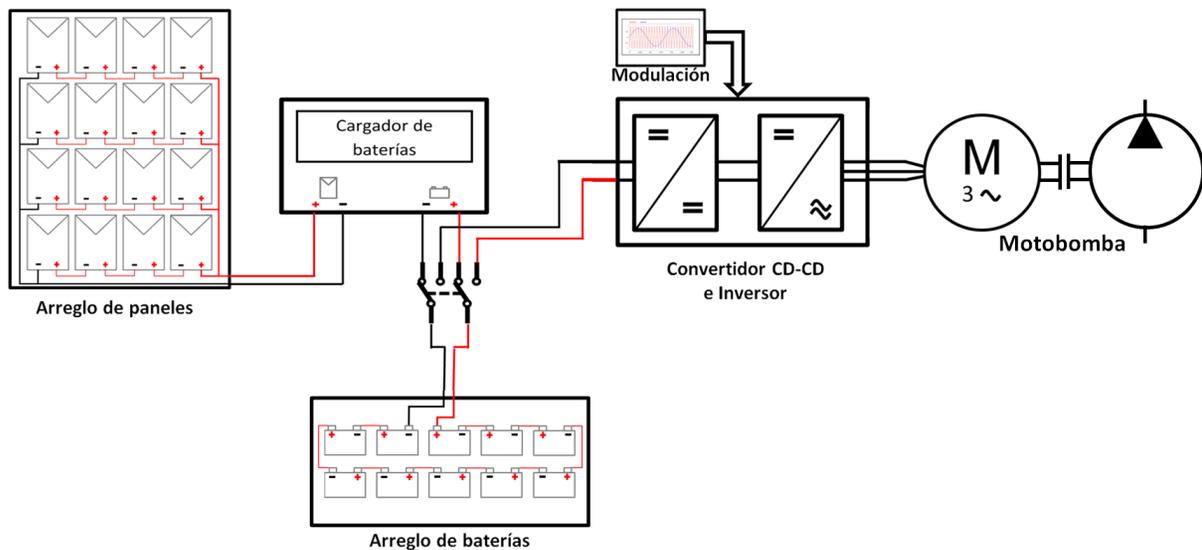


Figura 1. 9. Esquema de propuesta de solución

CAPÍTULO 2: SISTEMA FOTOVOLTAICO

La energía solar fotovoltaica consiste en la conversión de la radiación solar en electricidad [29, 30]. En la Tabla 2. 1 se muestran las ventajas y desventajas que presenta este tipo de energía con respecto a los diferentes tipos de energías empleadas para la generación de electricidad.

Tabla 2. 1. Ventajas y desventajas de la energía solar fotovoltaica

Ventajas	Desventajas
- Energía limpia, renovable, ilimitada y silenciosa	- Alto costo inicial
- Es modular	- Capacidad reducida de producción
- Los paneles solares tienen una larga vida	- Producción variable, debido a cambios climáticos y épocas del año
- Mantenimiento mínimo	- Requiere de un programa de recuperación y manejo de baterías usadas
- Fácil transporte e instalación	
- No requiere combustible	

Un sistema fotovoltaico es el conjunto de componentes eléctricos y electrónicos desarrollados e integrados entre sí para realizar las siguientes funciones principales [30, 31]:

- Transformar la energía solar en eléctrica (Panel fotovoltaico)
- Controlar y regular la carga de las baterías (Regulador de carga)
- Almacenar la energía eléctrica generada (Baterías)
- Acondicionar la energía almacenada (Convertidor CD-CD)
- Suministrar la energía generada (Inversor)
- Utilizar la energía generada (Carga)

Los sistemas fotovoltaicos se pueden clasificar en dos grupos, según su conexión a la red: sistemas fotovoltaicos interconectados a la red y sistemas fotovoltaicos autónomos.

2.1. Sistemas fotovoltaicos interconectados a la red

Este tipo de sistemas fotovoltaicos se encuentran conectados a la red eléctrica nacional [32]. La energía producida por estos sistemas puede ser utilizada por los usuarios y lo que resulte como excedente enviarlo a la red. Asimismo, cuando el sistema no produce energía, el usuario puede recibir energía eléctrica de la red

nacional. Para conocer el consumo de energía por parte del usuario se emplea el medidor bidireccional, el cual gira de manera convencional al momento de que el usuario consume energía eléctrica de la red nacional y de manera contraria cuando se genere energía por el sistema fotovoltaico interconectado, es por ello que su principal aplicación es el reducir la facturación por consumo de energía eléctrica [33].

Los sistemas fotovoltaicos interconectados a la red no requieren de un sistema de almacenamiento de energía (baterías), tal como se puede ver en la Figura 2. 1, en ella se puede apreciar los componentes de este tipo de sistemas.

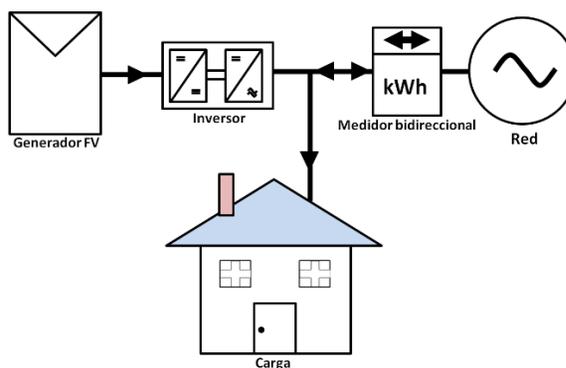


Figura 2. 1. Esquema de sistema fotovoltaico interconectado a la red

2.2. Sistemas fotovoltaicos autónomos

Este tipo de sistemas fotovoltaicos también son denominados como sistemas aislados, ya que no se encuentran conectado a la red eléctrica nacional, y por lo tanto operan de manera autónoma [33, 34]. La finalidad de estos sistemas es el brindar energía eléctrica a la zona donde se encuentren ubicados, bajo una demanda energética determinada.

En la Figura 2. 2 se muestra el esquema general de este tipo de sistemas fotovoltaicos, aunque puede presentar la variante del uso de un convertidor CD-CD entre el regulador de carga y el inversor según sea la aplicación.

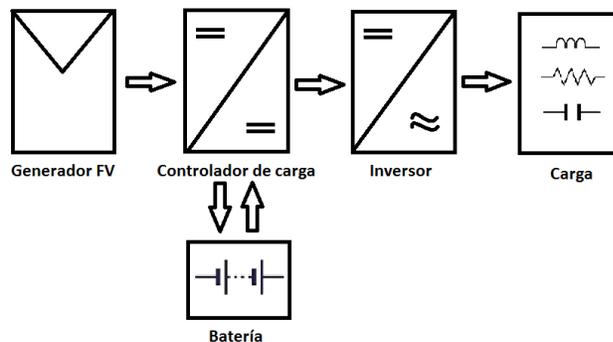


Figura 2. 2. Esquema general de sistema fotovoltaico autónomo

A continuación, en la Figura 2. 3 se muestran las principales aplicaciones de los sistemas fotovoltaicos autónomos tanto en corriente directa como en corriente alterna, para posteriormente mencionar las ventajas y desventajas entre ellas (ver Tabla 2. 2)

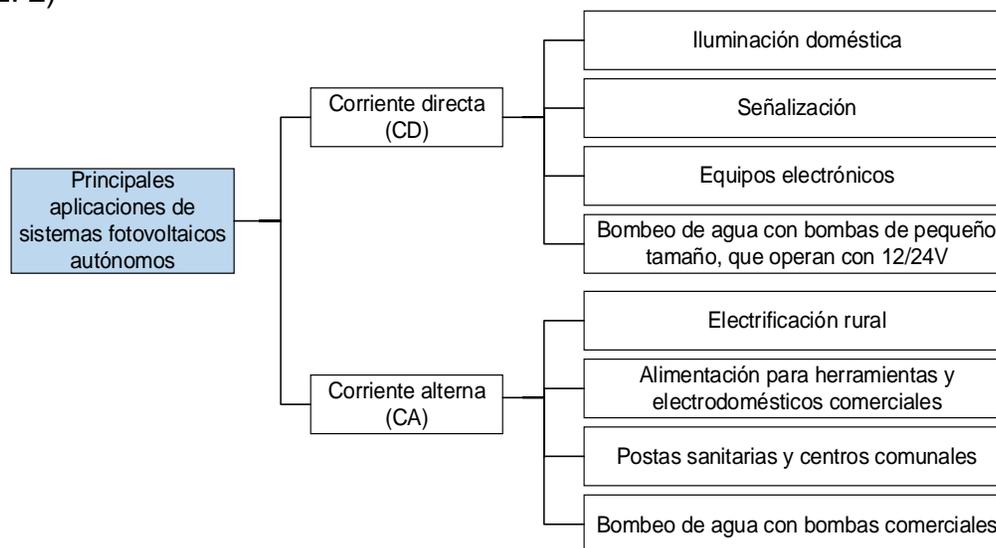


Figura 2. 3. Principales aplicaciones de sistemas fotovoltaicos autónomos

Tabla 2. 2. Ventajas y desventajas de aplicaciones en CD y CA de sistemas fotovoltaicos autónomos

Aplicaciones	Ventajas	Desventajas
CD	<ul style="list-style-type: none"> No requiere de inversor 	<ul style="list-style-type: none"> Baja potencia Herramientas costosas ya que se diseñan especialmente para operar a baja tensión En sistemas de bombeo ofrecen bajos caudales y mantenimiento constante de las bombas
CA	<ul style="list-style-type: none"> Mayor potencia de trabajo Amplio abanico de herramientas y electrodomésticos comerciales En sistemas de bombeo ofrecen mayores caudales 	<ul style="list-style-type: none"> Limitación de potencia, ya que el rango de los inversores es de 500 W a una par de kW En sistemas de bombeo se suele sobredimensionar el sistema, debido a su corriente de arranque

Este tipo de sistemas es de gran utilidad mayoritariamente en regiones aisladas en donde se encuentran las comunidades indígenas en nuestro país. Este trabajo de investigación se centra en la aplicación en sistemas de bombeo de corriente alterna, y en solucionar las desventajas que presenta esta aplicación.

Normalmente, los sistemas fotovoltaicos de bombeo emplean bombas de pequeñas potencias debido a que al aumentar la potencia de trabajo de la bomba se incrementa el costo del resto de los componentes del sistema debido principalmente a la corriente de arranque del motor y, el trabajar con rango de potencias bajas conlleva a limitar la aplicación del sistema de bombeo fotovoltaico.

Es por ello que el sistema fotovoltaico de bombeo presentado se encuentra diseñado para soportar motobombas de mediana potencia de al menos 10 hp. Todo esto sin perder de vista un parámetro importante como lo es la corriente de arranque del motor, debido a que contribuir a su reducción ayuda a que el tamaño de los componentes del sistema se reduzca y con esto, evitar sobredimensionamiento y reducir el costo total del sistema fotovoltaico. A continuación, se describe detalladamente la aplicación, así como cada uno de sus componentes.

2.3. Sistema fotovoltaico autónomo en aplicaciones de bombeo de agua

En la actualidad existen comunidades que no disponen de la red eléctrica nacional, debido a que para la comisión federal de electricidad (CFE) no resulta favorable la inversión de extender la red eléctrica, ya sea por el bajo número de habitantes o por el difícil acceso a la comunidad. Al no tener acceso a electricidad, estas comunidades enfrentan diversos desafíos y, uno de ellos es el fácil abastecimiento de agua. Una alternativa que brinda la oportunidad de abastecer de agua a estas comunidades, ya sea para uso personal o para el ámbito ganadero y agrícola, es el sistema de bombeo fotovoltaico [35].

Los sistemas de bombeo fotovoltaicos facilitan la extracción de agua en las comunidades alejadas; y tienen diferentes aplicaciones, entre ellas:

- Riego de cultivos.
- Uso doméstico.
- Bebederos para ganado.

En este tipo de sistemas es importante seleccionar los componentes adecuados, esto para asegurar que el sistema sea capaz de arrancar y controlar el motor eléctrico de la bomba con el fin de evitar un sobredimensionamiento del mismo [8, 9]. Así como también, es necesario el uso de baterías que almacenen la energía. Esto para garantizar la puesta en marcha del motor eléctrico en un lapso de tiempo específico o cuando no haya disponibilidad de radiación solar.

2.3.1. Componentes

En los últimos años, la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), ha realizado diversas acciones a favor del uso de la energía sustentable en el sector agropecuario, donde las energías renovables toman un papel muy importante. Una de estas acciones es el impulso del desarrollo de proyectos de bombeo fotovoltaico autónomo, para mejorar el desempeño energético de este sector en poblaciones aisladas.

Como se mencionó anteriormente, la principal aplicación de los sistemas de bombeo fotovoltaico autónomos empleados en el sector agropecuario, es el bombeo de agua para bebederos y riego de cultivos en poblaciones aisladas de la red eléctrica nacional [6]. Presentando los siguientes beneficios:

- Suministro de agua suficiente para abreviar al ganado.
- Establecer pequeñas áreas de riego de hasta tres hectáreas, con cultivos forrajeros que complementen la alimentación del ganado.
- Regar huertos para la producción de hortalizas, flores o árboles frutales, cuyos frutos se puede comercializar localmente.
- Abastecer a invernaderos con cultivos de alta rentabilidad.

En la Figura 2. 4 se muestra el esquema general de un sistema de bombeo fotovoltaico, donde se pueden apreciar sus componentes, desde la generación (panel fotovoltaico) hasta la aplicación seleccionada (riego agrícola y bebederos).

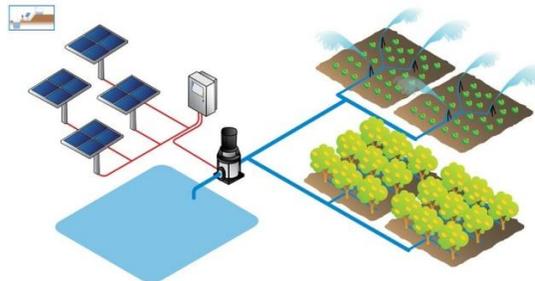


Figura 2. 4. Esquema de sistema fotovoltaico de bombeo

El sistema fotovoltaico de bombeo, emplea un arreglo de paneles fotovoltaicos para la generación de energía eléctrica, la cual se almacena a lo largo del día en el banco de baterías, con la finalidad de utilizarla (cuando no haya radiación solar, debido a que la mayoría de las aplicaciones de riego se llevan a cabo con esa especificación porque la aplicación lo requiere y para evitar pérdidas por evaporación). Esta energía almacenada se emplea en la alimentación de una motobomba, la cual lleva a cabo la función de distribuir el agua a la aplicación final.

Es conveniente mencionar que la finalidad de la aplicación del sistema fotovoltaico de bombeo diseñado en esta tesis es diseñar un sistema capaz de operar de forma segura motobombas de al menos 10 hp.

2.3.1.1. Panel fotovoltaico

Las celdas fotovoltaicas son dispositivos eléctricos capaces de convertir la luz solar en corriente eléctrica directa; están compuestas principalmente por silicio. Las características eléctricas de una celda fotovoltaica no son suficientes para alimentar una determinada carga, por ello que es necesario llevar a cabo conexiones en serie o en paralelo con la finalidad de producir tensión y corriente requeridos por la misma, dependiendo de la aplicación.

Al conjunto de celdas fotovoltaicas conectada en serie o en paralelo se le denomina panel fotovoltaico. Ahora bien, la conexión en serie o en paralelo de paneles fotovoltaicos se conoce como arreglo. En la Figura 2. 5 se muestra el esquema de lo antes descrito.

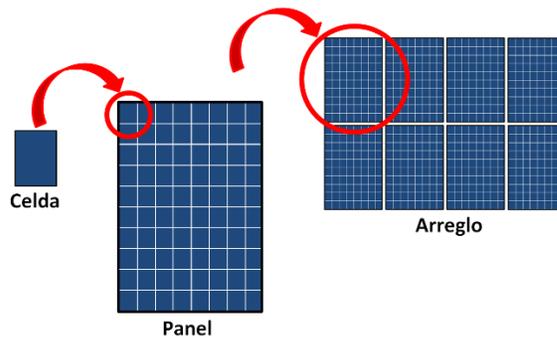


Figura 2. 5. Esquema de celda, panel y arreglo fotovoltaico

El principio de funcionamiento de un panel fotovoltaico se basa en el efecto fotovoltaico, en el cual la luz solar que incide sobre un dispositivo semiconductor de dos capas produce una diferencia de tensión entre estas, capaz de conducir una corriente eléctrica a través de un circuito externo para producir energía. Existen dos curvas características que representan el comportamiento eléctrico de los paneles fotovoltaicos, las cuales están relacionadas entre sí y, representan la relación entre corriente (I) o potencia (P) generada contra la tensión en las terminales. Estas curvas características se muestran en la Figura 2. 6, pertenecientes al panel fotovoltaico JKM265PP-60 empleado en esta tesis.

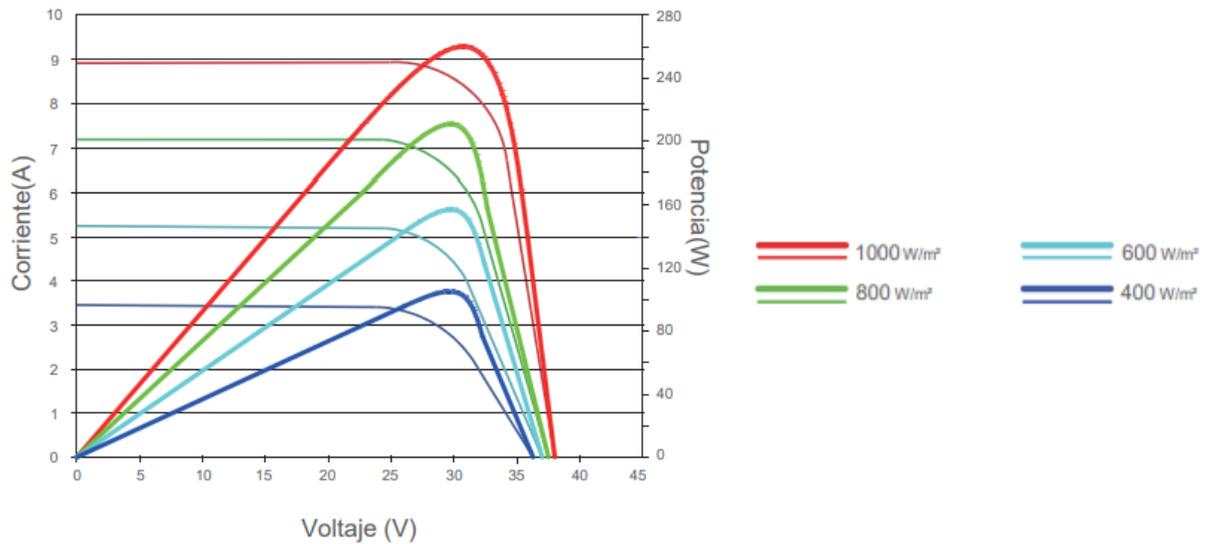


Figura 2. 6. Curvas características IV y PV

Los principales parámetros que engloban estas curvas características son los siguientes:

- Punto de máxima potencia (Pmp)
Es el producto del valor de la tensión (V_{mp}) e intensidad (I_{mp}) máximas para los que la potencia entregada es máxima, dada por (2.2).

$$FF = (V_{mp})(I_{mp}) \quad (2. 1)$$

- Corriente en el punto de máxima potencia (I_{mp})
Es el valor de la corriente en el punto de máxima potencia, en condiciones determinadas
- Tensión en el punto de máxima potencia (V_{mp}):
Es el valor de la tensión en el punto de máxima potencia, en condiciones determinadas
- Tensión de circuito abierto (V_{oc}):
Es el valor máximo de tensión del panel bajo condiciones determinadas, correspondiente a una corriente igual a cero, ver (2. 2)

$$V_{oc} = m \left(\frac{k * T}{e} \right) \left(\ln \left(\frac{I_l}{I_0} + 1 \right) \right) \quad (2. 2)$$

- Corriente de cortocircuito (I_{sc}):
Es el valor máximo de corriente que producirá el panel fotovoltaico bajo condiciones determinadas, correspondiente a una tensión igual a cero, ver (2. 3)

$$I_{sc} = I_l \quad (2. 3)$$

- Factor de forma (FF, por sus siglas en inglés Fill Factor):
Define la eficacia del panel solar; y está relacionado con el punto de máxima potencia (P_{mp}), dividido por el producto entre la tensión a circuito abierto (V_{oc}) y la corriente de cortocircuito (I_{sc}), ver (2. 4).

$$FF = \frac{P_{mp}}{(V_{oc})(I_{sc})} \quad (2. 4)$$

- Eficiencia (η):
Se expresa en porcentaje y, es la relación entre la potencia entregada por el panel y la potencia de la radiación solar que incide sobre él.

2.3.1.2. Regulador de carga

El sistema de regulación de carga se ubica entre los paneles fotovoltaicos y el banco de baterías y, tienen como función principal el realizar un proceso óptimo de carga de las baterías, evitando situaciones de sobrecarga y sobredescarga, lo anterior con el fin de alargar su vida útil. Por lo tanto, el regulador de carga trabaja en la descarga y en la carga; en la Tabla 2. 3 se encuentran las funciones respectivas en cada zona.

Tabla 2. 3. Funciones del regulador de carga según la zona de trabajo

Zona	Función
Carga	<ul style="list-style-type: none"> • Reducir la intensidad de corriente producida por los paneles fotovoltaicos hacia las baterías en función del nivel de carga • Desconectar las baterías si éstas han logrado su ciclo de carga • Garantizar una carga suficiente al acumulador y evitar situaciones de sobrecarga.
Descarga	<ul style="list-style-type: none"> • Cortar el suministro de consumo desde las baterías si se detecta niveles bajos de carga

A continuación se mencionan los parámetros generales de un regulador de carga:

- Tensión máxima admitida o tensión máxima de regulación.

Es el valor de tensión máxima que el regulador permite aplicar a la batería.

- Intervalo de histéresis superior.

Es el valor de la diferencia entre la tensión máxima de regulación y la tensión a la que el regulador permite el paso de la corriente producida por los paneles fotovoltaicos.

- Tensión de desconexión.

Es el valor de la tensión a la que las cargas de consumo se desconectan automáticamente, con la finalidad de evitar una sobredescarga de la batería.

- Intervalo de histéresis inferior.

Es el valor de la diferencia entre la tensión de desconexión y la tensión al que se permite que la carga de consumo se conecte nuevamente a la batería.

En la Tabla 2. 4 se muestra clasificación de los reguladores de carga según la tecnología del interruptor, la estrategia de desconexión del consumo, la forma de conmutación con la batería, el tipo de regulación.

Tabla 2. 4. Clasificación de reguladores de carga

Clasificación	Tipo de regulador
Tecnología del interruptor	<ul style="list-style-type: none"> • Relé electromecánico • Estado sólido
Desconexión del consumo	<ul style="list-style-type: none"> • Por tensión • Por algoritmos de cálculo del estado de carga • Por otro algoritmos de gestión de energía
Forma de conmutación con la batería	<ul style="list-style-type: none"> • Serie • Paralelo
Tipo de regulación	<ul style="list-style-type: none"> • MPPT o máxima potencia • PWM o convencional

2.3.1.3. Baterías

El sistema de acumulación, emplea baterías para almacenar la energía generada por los paneles fotovoltaicos. Las baterías suministran la energía eléctrica al convertidor CD-CD, el cual acondiciona la tensión para alimentar al inversor.

Las principales funciones de las baterías en el sistema fotovoltaico son las siguientes:

- Almacenar energía durante un tiempo determinado
- Proporcionar una potencia instantánea elevada
- Fijar la tensión de trabajo y alimentar al resto de convertidores

A continuación se mencionan los parámetros generales de un sistema de acumulación:

- Autodescarga

Es la pérdida de capacidad de una batería que ocurre cuando no está en uso.

- Profundidad de descarga

Es la cantidad de energía que se obtiene de la batería durante una determinada descarga, partiendo de la batería totalmente cargada.

- Ciclado de batería

Se refiere al proceso de carga y descarga en una batería. Si los ciclos de descargas son cortos (alrededor de 20%), el tiempo de vida útil de la batería es mayor a que si se le somete descargas profundas (alrededor de 80%).

- Capacidad de batería

Se define como la cantidad de energía eléctrica que puede almacenar o suministrar una batería en una descarga completa partiendo de un estado de carga total de la misma, y se expresa comúnmente en amperios-hora (Ah).

La capacidad se especifica a un determinado régimen de descarga, el cual depende de factores de diseño y de operación. En cuanto a los factores de diseño se encuentran la cantidad de material activo, el diseño de placas y la densidad de electrolito; en cuanto a los factores de operación se encuentran el régimen de descarga, profundidad de descarga y la temperatura de operación.

En la Figura 2. 7 se muestra cómo afecta la temperatura en la capacidad de la batería, en la cual se puede ver que a mayor temperatura aumenta el porcentaje de capacidad disponible para una batería Trojan J150. Es decir, cuando menor es la temperatura menor es la capacidad, ya que la viscosidad del ácido aumenta y los procesos de difusión iónica se vuelven más lentos.

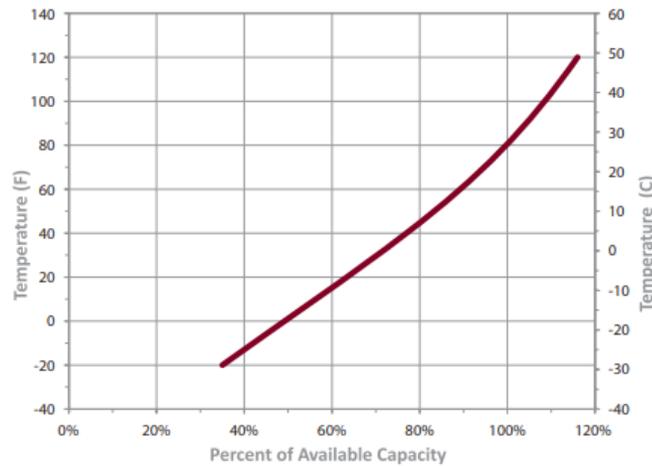


Figura 2. 7. Variación de porcentaje de capacidad disponible vs temperatura

La gran mayoría de las baterías existentes en el mercado son de Plomo-Ácido (Pb-a), aunque también existen de Plomo-Calcio (Pb-Ca), Plomo-Antimonio (Pb-Sb) y Níquel-Cadmio (Ni-Cd). Para aplicaciones fotovoltaicas las baterías de Plomo-Ácido y Níquel-Cadmio son las más utilizadas, siendo la primera de ellas la empleada más habitualmente, debido a su bajo costo [2, 3, 29, 30, 33].

2.3.1.4. Convertidor CD-CD

Los convertidores CD-CD en los sistemas fotovoltaicos tienen diferentes funciones, entre ellas convertir una potencia de entrada en una potencia de salida con diferentes parámetros y con la mayor eficiencia posible, así como para cambiar la tensión de entrada a valores requeridos por la carga del sistema.

Este convertidor cumple con la función de elevar la tensión proveniente del banco de baterías, para que se utilice en la alimentación del convertidor inversor y, posteriormente a la carga.

El convertidor empleado en este trabajo de tesis es el convertidor Boost; en la Figura 2. 8 se muestra la topología convencional de este convertidor. En el capítulo siguiente se encuentra el diseño del mismo.

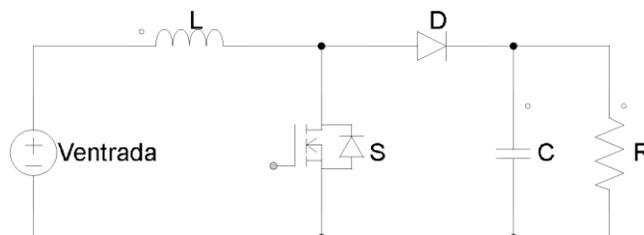


Figura 2. 8. Topología de convertidor Boost

En ocasiones, si la potencia de trabajo del convertidor es alta, al momento de realizar el diseño del convertidor Boost se encuentra el inconveniente de que el tamaño de los dispositivos semiconductores de potencia es grande y por lo tanto su costo aumenta. Es por ello, que se opta por la topología conocida como multifase (ver Figura 2. 9), para con ello evitar que el interruptor y el inductor soporten una corriente elevada, y con ello garantizar una eficiencia mayor [36, 37]. Esta topología se logra agregando ramas en paralelo al convertidor convencional.

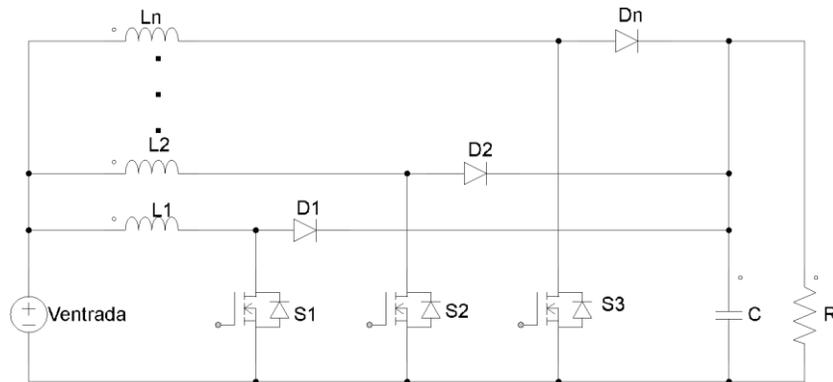


Figura 2. 9. Topología de convertidor Boost multifase

Para realizar el control del convertidor Boost multifase se requiere desfasar las señales de control de tal manera que se logre una secuencia de conmutación intercalada. Debido al desfase, las corrientes del inductor tienden a cancelarse entre sí, lo que implica que el rizo de corriente sea menor en comparación a la topología convencional [38]. La tensión de salida es la misma que la que se obtiene con la topología convencional, pero la corriente que soporta el inductor de entrada se reduce dependiendo del número de fases del convertidor, dado por (2. 5).

$$I_{L\phi} = \frac{V_o}{(n)(R)(D)} \quad (2. 5)$$

Donde:

- $I_{L\phi}$ = Corriente en el inductor por fase
- V_o = Tensión de salida
- n = número de fase
- R = resistencia de carga
- D = ciclo de trabajo

2.3.1.5. Inversor

En los sistemas fotovoltaicos autónomos de bombeo de agua, los inversores son los dispositivos encargados de convertir la corriente directa proveniente del convertidor CD-CD en corriente alterna, la cual tiene como finalidad alimentar cargas específicas, en este caso una motobomba.

En cuanto a características deseables en los inversores se destacan el tener alta eficiencia, alta fiabilidad, bajo niveles de distorsión armónica, contar con protección contra cortocircuito, bajo consumo en vacío y tener una buena regulación de tensión y frecuencia de salida.

Existen diferentes clasificaciones de los inversores, entre ellas se encuentran la clasificación según su topología de construcción, según la forma de onda de señal de salida y según las fases de trabajo. En la primera clasificación se encuentran la topología medio puente y puente completo; en la segunda pueden ser inversores de onda cuadrada, de onda modificada y de onda senoidal pura; por último en la tercer clasificación pueden ser monofásicos y trifásicos.

En la Figura 2. 10 se muestra la topología medio puente, la cual genera una tensión de salida igual a $\pm \frac{V_{CD}}{2}$, por la conmutación de sus dos interruptores.

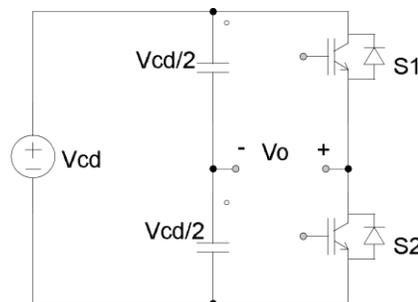


Figura 2. 10. Inversor monofásico medio puente

La topología de puente completo presenta ventajas con respecto a la de medio puente, esta proporciona una tensión alterna a la carga y la alimentación del inversor se realiza a través de una sola fuente de cd; generando una tensión de salida igual a V_{cd} .

En las siguientes figuras se muestra la topología convencional puente completo en su versión monofásica (ver Figura 2. 11) y trifásica (ver Figura 2. 12). Esta última, es la topología empleada en este trabajo de investigación por los motivos mencionados en el capítulo anterior.

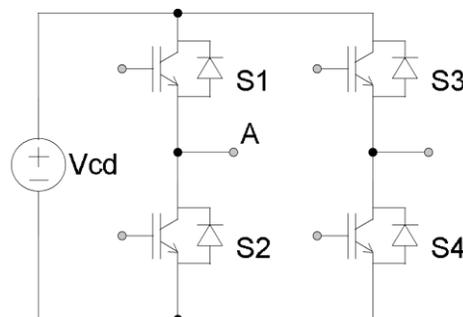


Figura 2. 11. Inversor convencional tipo puente completo monofásico

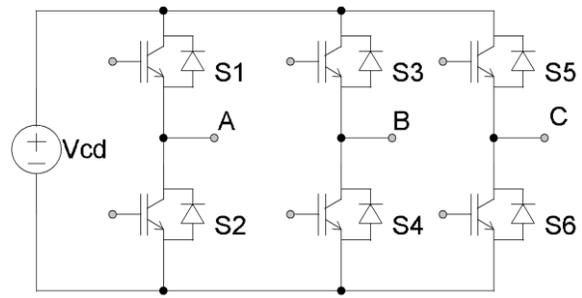


Figura 2. 12. Inversor convencional tipo puente completo trifásico

CAPÍTULO 3: DISEÑO DE ELEMENTOS DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO

En este capítulo se lleva a cabo el diseño y la selección de los elementos que pertenecen al sistema fotovoltaico autónomo, tales como banco de baterías, paneles fotovoltaicos, controlador de carga, convertidor CD-CD e inversor.

Lo anterior se realiza partiendo de que la carga para la cual se diseña el sistema fotovoltaico autónomo es una bomba centrífuga de mediana potencia, ya que la aplicación final del sistema es el uso en el sector agrícola, para abastecer bebederos y sistemas de riego; tal como se muestra en el esquema presentado en la Figura 3. 1.

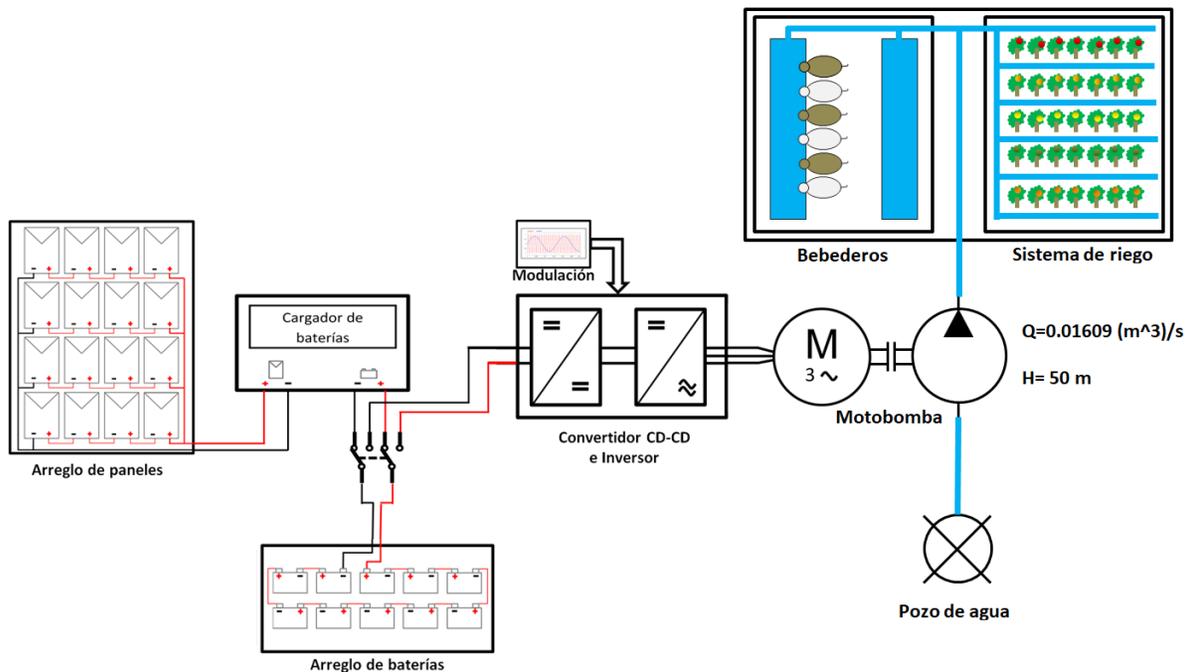


Figura 3. 1. Esquema de aplicación de sistema de bombeo fotovoltaico

Los valores de caudal y altura presentados en la Figura 3. 1 se establecieron tomando como base valores existentes en casos reales en poblaciones aisladas, según [2, 5, 30].

De igual manera basándose en tiempos establecidos comúnmente en sistemas de bombeo con aplicaciones en sistema de riego se establece el tiempo de funcionamiento del sistema fotovoltaico de bombeo sea de 1.5 h en horario nocturno.

Existen diferentes motivos por los cuales se selecciona que el sistema opere en horario nocturno. El primero de ellos es que existen diversos estudios en los que se menciona que el riego nocturno resulta ser más eficiente con respecto al riego diurno ya que existen menos pérdidas por evaporación y el agua se distribuye de manera más uniforme [39-43]. Por ejemplo en [43], las pérdidas de agua generadas con el riego diurno resultan ser de 10% y con el riego nocturno dieron como resultado 3%, lo cual además conlleva a generar ahorro económico para el agricultor.

En general, la irrigación nocturna es necesaria, sobre todo en lugares cálidos, secos y aquellos lugares en los que las lluvias son escasas, para ahorrar pérdidas por evaporación.

Tomando en cuenta lo anterior mencionado, así como los datos establecidos de caudal y altura se procede a calcular la potencia para la cual se diseña el sistema fotovoltaico de bombeo, empleando (3. 1).

$$P = (\gamma)(Q)(H)(\eta) \quad (3. 1)$$

Dónde:

- P: potencia a instalar, en kW
- γ : peso específico del agua, 9.81 kN/m³
- Q: caudal, en m³/s
- H: altura, en m
- η : eficiencia, en sistemas con bombas de mediana potencia este parámetro se encuentra entre 75% y 90% [44, 45].

Posteriormente, en (3. 2) se sustituyen en (3. 1) los datos establecidos anteriormente y se determina la potencia a instalar, la cual resulta ser de 6.7 kW o su equivalente 9 hp.

$$P = \left(9.81 \frac{kN}{m^3}\right) \left(0.01609 \frac{m^3}{s}\right) (50 m)(0.85) = 6.70 kW \quad (3. 2)$$

Del resultado anterior de potencia a instalar se realiza un ajuste a 10 hp (7.46 kW) con la finalidad de abarcar un mayor rango de operación del sistema fotovoltaico de bombeo y así poder emplear bombas centrífugas de mayor potencia.

Una vez que se cuenta con la potencia de diseño a instalar, se debe calcular y conocer la potencia real demandada, la cual representa el consumo total tomando en cuenta las pérdidas ocasionadas por los elementos pertenecientes al sistema fotovoltaico, lo anterior se lleva a cabo por medio de (3. 3) [46].

$$P_R = \frac{P}{R} ; \quad R = (1 - k_b - K_c - K_v) \left(1 - \left(\frac{(K_a)(N)}{P_d} \right) \right) \quad (3. 3)$$

Dónde:

- P_R : potencia real demandada
- P : potencia teórica demandada
- R : factor de rendimiento del sistema fotovoltaico
- K_a : coeficiente de autodescarga diario (baterías).
Se utiliza 0.005 para baterías plomo-ácido
- K_b : coeficiente de pérdidas por rendimiento de banco de baterías.
Se utiliza 0.1 en sistemas con descargas profundas.
- K_c : coeficiente de pérdidas en el inversor.
Se utiliza 0.05 para inversores senoidales.
- K_v : coeficiente de pérdidas varias.
Se utilizan valores entre el rango de 0.05 y 0.15, dependiendo de la cantidad de conductores y distancia del panel hacia la carga. Para este trabajo de investigación se emplea 0.05.
- P_d : profundidad de descarga diaria de la batería
No debe exceder el 80% de su capacidad nominal, esto es para no acortar la vida útil de la batería. El valor de P_d empleado en este trabajo es del 80%.
- N : número de horas de autonomía
Horas en que la instalación trabajará bajo condiciones de irradiación mínimas. En este caso se toman 1.5 h como se había mencionado anteriormente.

Los valores de los coeficientes utilizados se seleccionan con base a [47]. Ahora bien, se emplean los valores anteriormente descritos en (3. 3). En primera instancia, se obtiene el valor del factor de rendimiento; posteriormente, se realiza la división de la potencia teórica demandada entre el resultado de dicho factor. Lo anterior da como resultado una potencia real demandada de **9.383 kW**. El resultado de potencia real demandada es la potencia para la cual se diseñan los elementos del sistema fotovoltaico de bombeo, tal como lo es el banco de baterías.

3.1. Diseño de arreglo de banco de baterías

Tomando en cuenta el tiempo de operación del sistema de bombeo fotovoltaico, se procede a obtener la configuración adecuada de baterías, de tal manera que esta asegure el funcionamiento con autonomía del sistema en el tiempo definido de operación. Para ello, se debe conocer la capacidad del banco de baterías que es requerido por el sistema, la cual se calcula con (3. 4).

$$C_{baterías} = ((P_R)(N))/((V_{batería})(P_d)) \quad (3. 4)$$

Dónde:

- $C_{baterías}$: Capacidad de banco de baterías
- P_R : potencia real demandada
- P_d : profundidad de descarga diaria de la batería
- N : número de horas de autonomía
- $V_{batería}$: Tensión eléctrica de batería empleada

Como se puede observar en (3. 4) para conocer la capacidad del banco de baterías se necesita contar con datos relacionados a la batería a utilizar en el sistema fotovoltaico. Es por ello, que se procede a seleccionar el tipo de batería a utilizar en el sistema.

Para aplicaciones fotovoltaicas, el tipo de batería mayormente utilizado es el de ciclo profundo [22, 34]. Lo anterior se debe a que las baterías de ciclo profundo se construyen de tal manera que pueden otorgar corriente casi constante en períodos más largos que los que puede otorgar una batería de arranque. Además, este tipo de baterías pueden descargarse hasta en un 80% de su capacidad total sin perder propiedades físicas ni eléctricas [47, 48].

Entonces, tomando en cuenta lo anterior la batería seleccionada para el sistema fotovoltaico es de la marca Trojan, modelo J150, ya que cumple con dicha característica y, en la Tabla 3. 1 se encuentran sus principales características de operación.

Tabla 3. 1. Especificaciones de batería seleccionada

Parámetro	Valor
Construcción	Plomo-ácido de ciclo profundo
Capacidad Ampere-Horas	150 Ah
Tensión	12 V

Una vez que se cuenta con las especificaciones de la batería a emplear en el sistema fotovoltaico se procede a sustituir los valores correspondientes en (3. 4), resultando lo establecido en (3. 5).

$$C_{baterias} = \frac{(9383 W)(1.5h)}{(12V)(0.8)} = 1466 Ah \quad (3.5)$$

Para obtener la energía aparente del banco de baterías se multiplica la capacidad calculada (1466 Ah) por la tensión de la batería (12 V), lo cual da como resultado 17592 VAh. Posteriormente, para conocer el número de baterías TROJAN J150 necesarias para el sistema se divide la energía aparente total obtenida entre la energía aparente de cada batería, la cual es 1800 VAh según la Tabla 3. 1. Lo anterior da como resultado un total de 9.77 baterías. Ajustando este valor se concluye que se requiere un banco con 10 baterías TROJAN J150.

La tensión a la salida del banco de baterías se emplea en la alimentación del convertidor CD-CD, el cual tiene la función de acondicionar la tensión de entrada al inversor y debe recibir una tensión de alimentación de 120 V. En la Figura 3. 2 se muestra el diagrama de conexión en serie de las 10 baterías resultantes del diseño del banco.

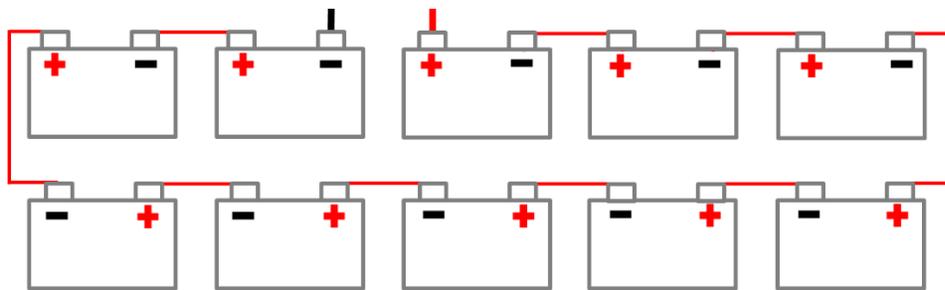


Figura 3. 2. Conexión de banco de baterías diseñado

3.2. Diseño de arreglo de paneles fotovoltaicos

El arreglo de paneles fotovoltaicos en este trabajo tiene la única función de generar la energía eléctrica necesaria para cargar al banco de baterías diseñado en el apartado anterior. Para conocer la cantidad y la conexión entre los paneles fotovoltaicos requeridos por el sistema fotovoltaico de estudio, primeramente se requiere contar con la información de irradiación solar anual del sitio para el cual se diseña el sistema fotovoltaico. Para este trabajo de investigación el sitio para el cual se diseña el sistema fotovoltaico es Cuernavaca, Morelos.

Existen diversas bases de datos en las cuales se puede consultar la irradiación solar del sitio deseado [49, 50]. Con la finalidad de corroborar que los datos de irradiación solar encontrados de Cuernavaca, Morelos fueran los adecuados se consultaron diferentes fuentes, las cuales se describen a continuación, así como se presentan dichos datos encontrados para el lugar de estudio.

3.2.1. Base de datos de irradiación solar consultadas

3.2.1.1. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)

La base de datos que proporciona la CONAGUA en conjunto con el Sistema Meteorológico Nacional (SMN) cuentan con alrededor de 5500 estaciones climatológicas que registran diversos parámetros, entre ellos se encuentra la irradiación solar y las HSP. En la Tabla 3. 2 se encuentran los datos resultantes de esta base de datos para el sitio de estudio.

Tabla 3. 2. Irradiación anual para Cuernavaca, Morelos. CONAGUA.

Mes	Irradiación (kW/m ²)día	Hora Solar Pico (h)
Enero	5.22	5.22
Febrero	6.13	6.13
Marzo	6.84	6.84
Abril	7.10	7.10
Mayo	6.54	6.54
Junio	6.12	6.12
Julio	6.25	6.25
Agosto	5.98	5.98
Septiembre	5.38	5.38
Octubre	5.14	5.14
Noviembre	5.47	5.47
Diciembre	4.98	4.98
Anual		5.92

3.2.1.2. Centro de datos de ciencia atmosférica de la NASA (por sus siglas en inglés de National Aeronautics and Space Administration)

Esta fuente de información se puede encontrar en la página oficial de la NASA, cuya dirección electrónica es <https://eosweb.larc.nasa.gov/>, ya que es patrocinado por el programa de Ciencias de la tierra de la misma institución. En ella se presentan datos de diversos parámetros de energía solar y se presentan en forma de tabla de datos para cada localidad en particular. En la Tabla 3. 3 se muestran los datos de irradiación solar y de hora solar pico (HSP) para Cuernavaca encontrados en esta fuente de información.

Tabla 3. 3. Irradiación anual para Cuernavaca, Morelos. Centro de datos de ciencia atmosférica de la NASA.

Mes	Irradiación (kW/m ²)día	Hora Solar Pico (h)
Enero	5.19	5.19
Febrero	6.10	6.10
Marzo	6.96	6.96
Abril	7.06	7.06
Mayo	6.66	6.66
Junio	6.01	6.01
Julio	6.28	6.28
Agosto	6.00	6.00
Septiembre	5.43	5.43
Octubre	5.37	5.37
Noviembre	5.26	5.26
Diciembre	4.9	4.9
Anual		5.93

3.2.1.3. Sistema de información geográfica para las energías renovables en México (SIGER).

Este sistema hace uso del sistema de información geográfica (SIG), el cual permite estudios de prospección energética con base en las energías renovables [50-52]. Este sistema cuenta con información de mapas de recursos renovables, así como sus variables correspondientes. En la Tabla 3. 4 se muestran las variables de irradiación y HSP encontradas en este sistema para Cuernavaca.

Tabla 3. 4. Irradiación anual para Cuernavaca, Morelos. SIGER.

Mes	Irradiación (kW/m ²)día	Hora Solar Pico (h)
Enero	5.42	5.42
Febrero	6.18	6.18
Marzo	7.10	7.10
Abril	7.18	7.18
Mayo	6.5	6.5
Junio	6.13	6.13
Julio	6.22	6.22
Agosto	6.09	6.09
Septiembre	5.45	5.45
Octubre	5.42	5.42
Noviembre	5.39	5.39
Diciembre	4.9	4.9
Anual		6.09

Tomando en cuenta los datos de irradiación anual arrojados por las tres bases de datos consultadas se observa que la diferencia entre ellas es del ± 0.5 %. Por lo tanto, se pueden emplear indistintamente los datos de cualquiera de las tres bases de datos.

Sin embargo, se seleccionan los datos proporcionados por el Centro de datos de ciencia atmosférica de la NASA para realizar el cálculo del arreglo de paneles fotovoltaicos presentado a continuación.

3.2.2. Cálculo de paneles fotovoltaicos

Una vez que se cuenta con los datos de HSP se requiere conocer las especificaciones del modelo de panel fotovoltaico utilizado en esta tesis para emplearlas en (3. 6) y así con ellos obtener el número de paneles necesarios para generar la potencia requerida por el sistema.

$$N_{\text{paneles}} = \frac{P_{\text{bancobaterías}}}{(P_{\text{máx}})(HSP)(PR)} \quad (3. 6)$$

Dónde:

- $P_{\text{bancobaterías}}$: potencia total en banco de baterías
- $P_{\text{máx}}$: potencia máxima del panel empleado en condiciones estándar de medición (STC)
- HSP: horas solar pico
- PR: factor global de funcionamiento que varía entre 0.65 y 0.90.

El panel fotovoltaicos empleado en este sistema fotovoltaico pertenece al fabricante Jinko Solar, cuyas especificaciones se encuentran en la Tabla 3. 5.

Tabla 3. 5. Especificaciones de panel fotovoltaico empleado

Panel fotovoltaico JKM265PP-60, Jinko Solar	
Modelo de panel fotovoltaico	JKM265PP60
Potencia máxima ($P_{\text{máx}}$)	265 W
Voltaje de máxima potencia (V_{mp})	31.4 V
Corriente de máxima potencia (I_{mp})	8.44 A
Voltaje de circuito abierto (V_{oc})	38.6 V
Corriente de corto circuito (I_{sc})	9.03 A
Temperatura de operación nominal de la célula (NOCT)	45±2 °C
Condiciones estándares de prueba (STC)	1000W/m ² , 25 °C

Para obtener el número de paneles fotovoltaicos se emplea (3. 6) y se llevan a cabo cálculos empleando tres valores diferentes de HSP, debido a que es conveniente observar condiciones en donde las HSP sean favorables (3. 7), promedio (3. 8) y críticas (3. 9); y con ello se selecciona el arreglo adecuado de paneles fotovoltaicos. Asimismo, se emplea un factor de funcionamiento de 0.9 para considerar máxima operación del panel.

$$N_{\text{paneles}} = \frac{18000}{(265)(4.9)(0.9)} = 15.4 \approx 16 \quad (3.7)$$

$$N_{\text{paneles}} = \frac{18000}{(265)(5.9)(0.9)} = 12.79 \approx 13 \quad (3.8)$$

$$N_{\text{paneles}} = \frac{18000}{(265)(7.06)(0.9)} = 10.69 \approx 11 \quad (3.9)$$

Finalmente, de acuerdo a los resultados respecto al número de paneles obtenidos para las tres condiciones de HSP se selecciona el número de 16 paneles fotovoltaicos, debido a que son los obtenidos para la condición de HSP crítica, es decir el mes menos favorable; para con ello garantizar la producción de energía necesaria en cualquier época del año. La conexión de los 16 paneles fotovoltaicos se muestra en la Figura 3. 3, en la cual se observa que consta de cuatro ramas en paralelo y, cada rama cuenta con cuatro paneles conectados en serie.

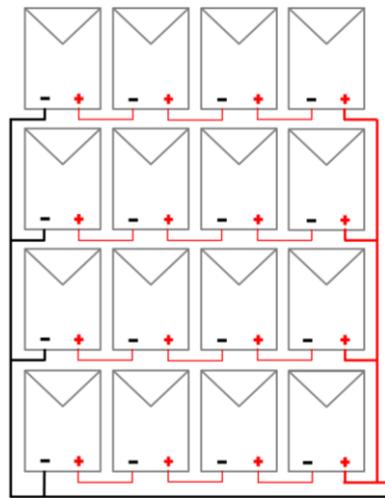


Figura 3. 3. Esquema de conexión de paneles fotovoltaicos

3.3. Selección de controlador de carga

La función del controlador de carga en el sistema fotovoltaico de estudio es controlar el flujo de energía que circula entre el arreglo de paneles fotovoltaicos y el banco de baterías. El regulador de carga se selecciona en función de la corriente máxima de salida que manejará el regulador.

Para calcular la corriente máxima, primeramente se necesita suponer dos aspectos, el primero que el regulador de carga tiene una eficiencia del 100% y el segundo, que el regulador de carga no presente pérdidas en los conductores. Posteriormente, se emplea la ecuación (3. 10).

$$I_{m\acute{a}xsalida} = \frac{(P_{m\acute{a}x})(N_{paneles})(F_{atmosf\acute{e}rico})}{V_{bancobater\acute{i}as}} \quad (3.10)$$

$$I_{m\acute{a}xsalida} = \frac{(265\text{ W})(16)(1.25)}{120\text{ V}} = 44.2\text{ A} \quad (3.11)$$

Dónde:

- $I_{m\acute{a}xsalida}$: corriente máxima de salida del regulador de carga
- $P_{m\acute{a}x}$: potencia máxima del panel fotovoltaico
- $N_{paneles}$: número de paneles utilizados
- $F_{atmosf\acute{e}rico}$: factor atmosférico de 1.25, establecido en [47]
- $V_{bancobater\acute{i}as}$: tensión del banco de baterías

Entonces, conociendo las especificaciones tanto de corriente como de tensión requeridas por el sistema, en la Tabla 3. 6 se muestran cuatro controladores de carga que cumplen con dichas características. Se selecciona al controlador de carga HX50120 por su bajo costo en comparación con los restantes.

Tabla 3. 6. Especificaciones de controladores de carga comerciales

JND-X 50A	HX50120	ALLRUN-ARCP50	SC-MH 50A
Tensión de carga 96-240 V	Tensión de carga 110-120 V	Tensión de carga 96-120 V	Tensión de carga 96-120 V
Corriente de carga 50 A	Corriente de carga 50 A	Corriente de carga 50 A	Corriente de carga 60 A
Voltaje de entrada 150-250V	Voltaje de entrada 240-260 V	Voltaje de entrada 150-190 V	Voltaje de entrada 150-220V
Potencia de entrada 12000 W	Potencia de entrada 6000 W	Potencia de entrada 6500 W	Potencia de entrada 6720 W
Modo de carga PWM	Método de carga MPPT	Método de carga PWM	Método de carga MPPT
Precio US \$400	Precio US \$310	Precio US \$380	Precio US \$380
			

3.4. Diseño de convertidor CD-CD

El convertidor CD-CD acondiciona la tensión del banco de baterías hacia el inversor. Como se mencionó en el capítulo anterior la topología seleccionada para esta etapa del sistema es la del convertidor Boost multifase debido a las características que presenta con respecto a la topología convencional.

El convertidor Boost cumple con la función de elevar la tensión de corriente directa proveniente del banco de baterías hacia el bus de corriente directa a la entrada del inversor, esto para que exista una tensión que permita obtener una tensión línea-línea a la salida del inversor de 220 V_{RMS}.

Con la finalidad de comparar los esfuerzos de tensión y corriente en los dispositivos semiconductores de potencia se presenta el diseño tanto de la topología convencional como la multifase, la cual consta de cinco fases. En la Tabla 3. 7 se muestran las especificaciones para las cuales se diseña el convertidor Boost, tanto el convencional como el multifase. Solamente se presenta como variante que en el convertidor Boost de cinco fases el valor de la potencia total se divide entre el número de fases del convertidor.

Tabla 3. 7. Especificaciones de diseño de convertidor Boost

Especificaciones de diseño		
Generales	Convencional	Multifase (5 fases)
$f_s=50$ kHz	P=10000 W	P=2000 W (por fase)
$V_o=320$ V	$I_{in}=83.34$ A	$I_{in}=16.67$ A
$V_{in}=120$ V	$\Delta i_L=20\%(I_{in})=16.67$ A	$\Delta i_L=20\%(I_{in})=3.34$ A
$\Delta V_c=3\%(V_o)$		
$I_o=31.25$ A		

Con las especificaciones ya establecidas, se procede al cálculo de los elementos pertenecientes al convertidor Boost convencional y al multifase, por medio de las ecuaciones (3.12) a la (3.18).

- Ganancia, M

$$M = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{320 \text{ V}}{120 \text{ V}} = 2.667 \quad (3.12)$$

- Ciclo de trabajo, D

$$D = \frac{M - 1}{M} = \frac{2.667 - 1}{2.667} = 0.625 \quad (3.13)$$

- Inductor, L

- De Boost convencional

$$L = \frac{(V_{in})(D)}{(\Delta iL)(f_s)} = \frac{(120V)(0.625)}{(16.67 A)(50000 Hz)} = 90 \mu H \quad (3. 14)$$

- De Boost multifase

$$L = \frac{(V_{in})(D)}{(\Delta iL)(f_s)} = \frac{(120V)(0.625)}{(3.34 A)(50000 Hz)} = 450 \mu H \quad (3. 15)$$

- Capacitor, C

- De Boost convencional

$$C = \frac{(I_o)(D)}{(\Delta Vc)(f_s)} = \frac{(31.25 A)(0.625)}{(9.6 V)(50000 Hz)} = 40.69 \mu F \quad (3. 16)$$

- De Boost multifase

$$C = \frac{(I_o)(D)}{(\Delta Vc)(f_s)} = \frac{(31.25 A)(0.625)}{(9.6 V)(250000 Hz)} = 8.13 \mu F \quad (3. 17)$$

Dónde:

- M: ganancia del convertidor
- V_o : tensión a la salida del convertidor CD-CD
- V_{in} : tensión a la entrada del convertidor CD-CD
- D: ciclo de trabajo
- R: resistencia de carga
- L: inductor
- C: capacitor
- Δi_L : rizo de corriente del inductor
- ΔV_c : rizo de tensión del capacitor

De los valores obtenidos del diseño de los elementos del convertidor CD-CD se puede recalcar que el resultado de la ganancia es favorable debido a que lo reportado en la literatura indica que a ganancias mayores el convertidor tiene un comportamiento inestable [24, 53, 54]. Así como, se comprueba que con la topología multifase se reduce la corriente que pasa por los componentes del convertidor, lo que conlleva a obtener dispositivos de menor tamaño en comparación con la topología convencional.

3.5. Diseño de inversor trifásico

El diseño del inversor trifásico se lleva a cabo partiendo de los datos de la potencia para la que está diseñado el sistema fotovoltaico, la cual es de 10 kW. En la Tabla 3. 8 se muestran las especificaciones generales de diseño para el inversor. La topología seleccionada para el inversor es la convencional tipo puente completo trifásico, tal como se menciona en el capítulo 2 de esta tesis.

Tabla 3. 8. Especificaciones de diseño de inversor

Parámetro	Valor
Potencia	10 kW
Número de fases	3
Tensión del bus de CD	320 V _{CD}
Tensión de salida entre fases	220 V
Frecuencia de conmutación (Fs)	3.3 kHz
Modulación	SPWM

Entonces, para la selección de los interruptores de potencia que integran dicha topología se toma en consideración parámetros como la tensión, corriente, así como también los datos de la carga para la que se emplea este convertidor. Por lo tanto, se seleccionó el módulo de potencia FP30R06W1E3, el cual tiene las especificaciones principales presentadas en la Tabla 3. 9, y en el Anexo 1 se encuentra la hoja de datos completa.

Tabla 3. 9. Especificaciones generales del módulo FP30R06W1E3

Parámetro	Valor
V _{CES}	600 V
V _{GES}	± 20 V
V _{CE sat}	2 V
I _o	30 A
I _{CRM}	60 A
T _{on}	20ns
T _{off}	140 ns



Figura 3. 4. Módulo de potencia FP30R06W1E3

Para su correcta operación este módulo requiere la elaboración de circuitos impulsores que amplifican la entrada de baja potencia proveniente de un controlador para la compuerta del IGBT.

En el Anexo 2 se encuentra el diseño térmico para el módulo de potencia, así como en el Anexo 3 se encuentra el diseño de PCB para esta etapa del sistema.

Para la modulación de los interruptores de potencia pertenecientes a esta topología se emplea la técnica SPWM, la cual varía según el régimen de operación utilizado; ya sea a tensión constante o par constante. Con el fin de seleccionar cuál de ellos tiene mejor comportamiento con respecto a la corriente de arranque del motor, ya que esta es determinante al momento de dimensionar los elementos del inversor del sistema fotovoltaico de bombeo.

CAPÍTULO 4: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SEÑALES DE CONMUTACIÓN

4.1. Descripción general

En este capítulo se encuentra el diseño, simulación e implementación de las etapas de modulación del convertidor Boost multifase y del inversor trifásico. La simulación de cada etapa se lleva a cabo en el programa MatLab Simulink® por medio de bloques existentes en el mismo, los cuales se describen en este apartado. En cuanto a la implementación de las señales de conmutación para cada convertidor, se emplean tarjetas de desarrollo de la marca STMicroelectronics® y se realiza de la siguiente manera:

- Modulación Boost multifase. La generación de las señales de conmutación del Boost de cinco fases se realiza mediante código en lenguaje C, con el programa ARM Mbed Compiler®.
- Modulación de inversor trifásico. La generación de los estados de conmutación del inversor trifásico se lleva a cabo por medio de la colaboración en conjunto del programa MatLab Simulink® y el paquete de soporte de código embebido para tarjetas STMicroelectronics®.

4.2. ARM Mbed Compiler®

ARM Mbed Compiler® es una aplicación web, que no requiere ser instalada y con ella se puede realizar tareas como escritura, compilación y ejecución de programas para microcontroladores mbed.

Esta aplicación web utiliza el motor de compilación ARMCC y trabaja con lenguaje C/C++. ARM Mbed Compiler® se centra en la elaboración de prototipos y experimentación accesible y rápida. Sin embargo, se pueden exportar los programas y así escalar a proyectos de mayor tamaño. En la Figura 4. 1 se muestra la vista del compilador desde el navegador de internet.

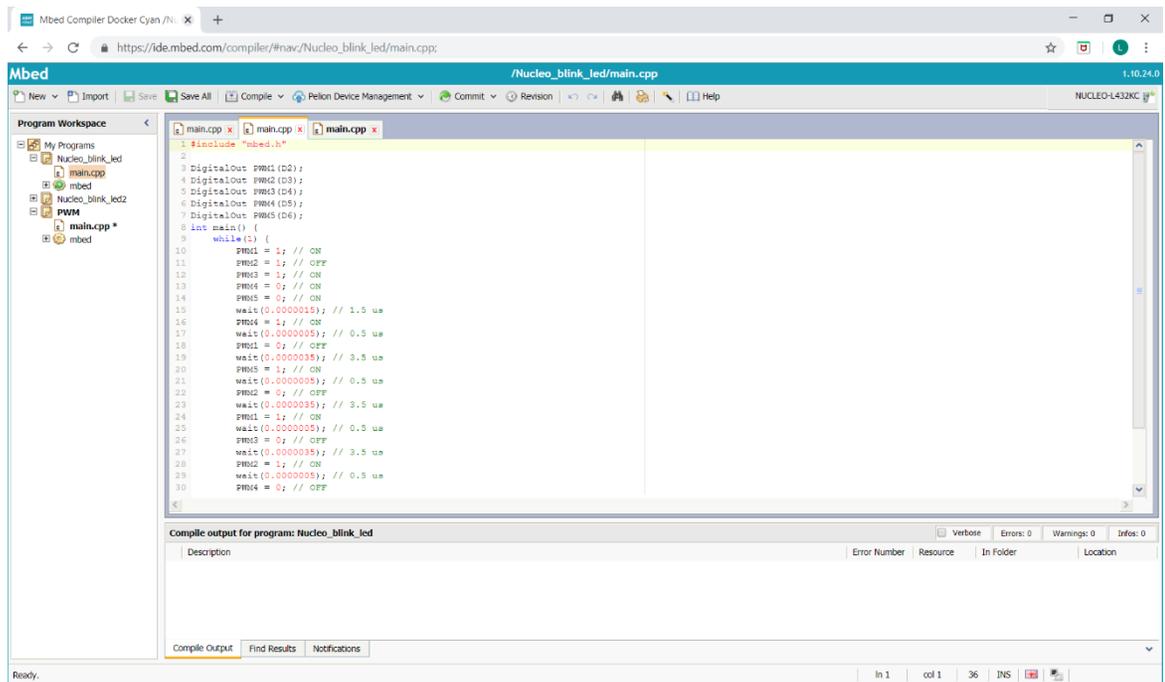


Figura 4. 1. Aplicación ARM Mbed Compiler

4.3. MatLab Simulink®

Matlab Simulink® es un entorno de diagramas de bloques y gráficos que funciona en conjunto con la programación de MatLab® con el que puede modelar, simular y analizar sistemas dinámicos desde cero. Con este programa se pueden realizar principalmente las siguientes actividades:

- Modelado y simulación de un sistema. Permite modelar sistemas lineales y no lineales en tiempo continuo y discreto. Así como combinar modelos y de la lógica secuencial utilizando otras herramientas dentro de su mismo entorno.
- Pruebas de sistemas de forma anticipada y frecuente. Ayuda a verificar y validar sistemas embebidos, mediante la realización de pruebas en simulación que hacerlas en implementación resulta ser peligroso o lento.
- Generar código automáticamente. Una vez realizado el modelado de un sistema se genera el código en lenguaje C y HDL automáticamente, evitando escribir manualmente las líneas de código de dicho sistema.
- Vinculación. Cuenta con esquemas de compatibilidad que permite colaborar con otros programas de simulación y diferentes tarjetas de programación.

4.4. Microcontroladores STM32

Un microcontrolador es un circuito integrado capaz de realizar procesos lógicos para llevar a cabo una determinada tarea. El uso de microcontroladores agiliza el diseño de sistemas de control y están constituidos principalmente por cuatro elementos: unidad central de procesamiento (CPU, por sus siglas en inglés de Central Processing Unit), unidades de memoria, periféricos y puertos de entrada/salida[55], ver Figura 4. 2.

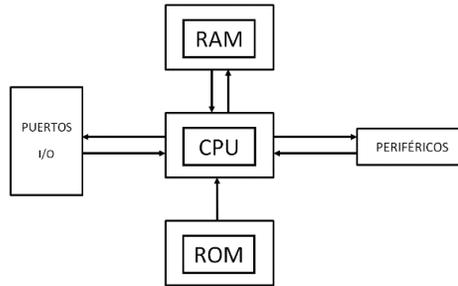


Figura 4. 2. Componentes principales de microcontroladores

Los microcontroladores STM32 son producidos por la empresa ST Microelectronics® y se basan en el uso del procesador ARM® Cortex®-M y poseen como características importantes que tienen un rendimiento muy alto, permite modificaciones en tiempo real, procesan señales digitales, funcionan a baja potencia y baja tensión [56-58]. Añadido a lo anterior, estos microcontroladores tienen como característica su bajo costo en comparación con otros microcontroladores existentes en el mercado con características similares.

La familia de microcontroladores STM32 tienen una amplia gama de dispositivos que dependiendo de sus características pueden ser empleados en trabajos de diferentes tamaños. Se encuentran divididos en diez principales series, las cuales son H7,F7, F4, F3, F2, F0, L4, L1 y L0; estas series incluyen núcleos o microprocesadores ARM® Cortex®-M (M0, M0+,M3,M4 y M7).

La programación de estas tarjetas se puede hacer mediante el programa que proporciona directamente el fabricante, pero también existen diferentes programas de trabajo que permiten la vinculación para embeber los códigos o trabajar en tiempo real en las tarjetas de programación.

4.2.1. Tarjeta Nucleo-32 STM32L4

Las tarjetas STM32L4 pertenecen a la categoría de ultra baja potencia de consumo de la familia STM32. Cuentan con un núcleo ARM®Cortex®-M4 de 32 bits RISC que opera a frecuencia de hasta 80 MHz. Esta categoría de microcontroladores presenta las siguientes principales características:

- CPU: Cortex-M4 de 32 bits.
- Memoria: Hasta 2MB Flash, 2 bancos de lectura mientras escribe, protección de lectura de código patentada.
- Oscilador de cristal de 4 a 48MHz.
- Oscilador de cristal de 32 kHz para RTC (LSE).
- Temporizadores 16x: control avanzado de motor de 2x16 bits, propósito general de 2x32 bits y 5x16 bits, básico de 2x16 bits, temporizadores de 16 bits de baja potencia de 16 bits (disponibles en el modo de parada).
- Hasta 24 canales de detección capacitivos.
- Hasta 114 E / S rápidas, la mayoría tolerantes a 5 V.

Con esta tarjeta de programación se realiza la modulación del convertidor Boost, detallada más adelante en el apartado 4.5. En la Figura 4. 3 se encuentra la tarjeta de programación STM32L4 utilizada.

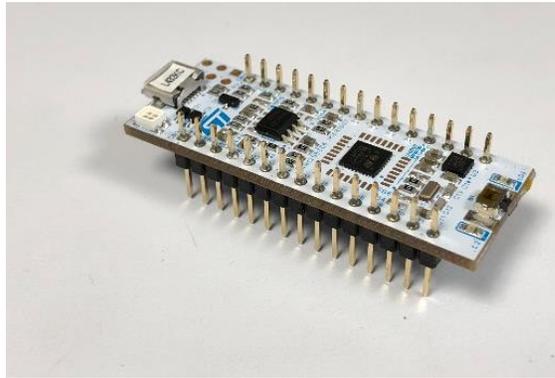


Figura 4. 3. Tarjeta nucleo STM32L4

4.2.2. Tarjeta Nucleo-144 STM32F767

Esta tarjeta de programación se emplea en el desarrollo de los pulsos para modular al inversor trifásico del sistema fotovoltaico. (ver Figura 4. 4). Los dispositivos STM32F767 emplean un núcleo ARM®CORTEX® M7, el cual soporta frecuencia de hasta 216 MHz y cuenta con una unidad de punto flotante, lo cual ofrece mayor exactitud y permite la representación de un rango de magnitudes mucho más amplio que en los que cuentan únicamente con unidades de punto fijo [59].

Pertenece a la categoría de alto rendimiento de la familia STM32 y cuenta con las siguientes características principales:

- CPU: Arm® de 32 bits Cortex®-M7
- Memorias: hasta 2 Mbytes de memoria Flash organizados en dos bancos que permiten la lectura mientras se escribe
- Alimentación por USB

- Oscilador de cristal de 4 a 26 MHz
- Control interno de fábrica de 16 MHz (1% de precisión)
- Oscilador de 32 kHz para RTC con calibración
- Baja potencia
- Hasta 18 temporizadores
- Interfaces SWD y JTAG
- Hasta 168 puertos de E / S con capacidad de interrupción
- Hasta 164 E / S rápidas hasta 108 MHz
- Hasta 166 5 E / S tolerantes a V
- Hasta 28 interfaces de comunicación.
- Hasta 4 USARTs / 4 UARTs (12.5 Mbit / s, interfaz ISO7816, LIN, IrDA, control de módem)

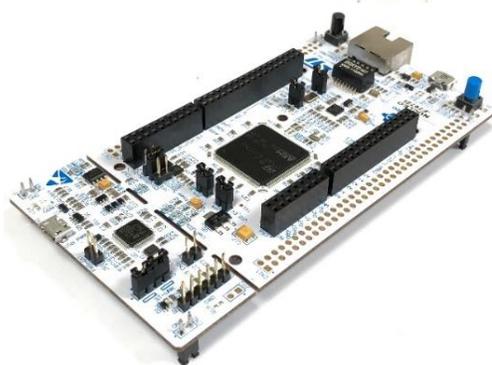


Figura 4. 4. Tarjeta nucleo STM32F767

Con la ayuda de estas características de trabajo se lleva a cabo la colaboración entre este programa y el microcontrolador STM32F767 para la generación de los pulsos requeridos para activar/desactivar los interruptores de potencia del inversor trifásico.

4.5. Señales de conmutación para convertidor Boost multifase

Las señales de conmutación para los interruptores de potencia del convertidor Boost de cinco fases tienen que cumplir con las especificaciones presentadas en la Tabla 4. 1. Estas señales se simularon en el programa MatLab Simulink® e implementadas en la tarjeta de desarrollo STM32L4. A continuación se presenta el desarrollo de estas actividades.

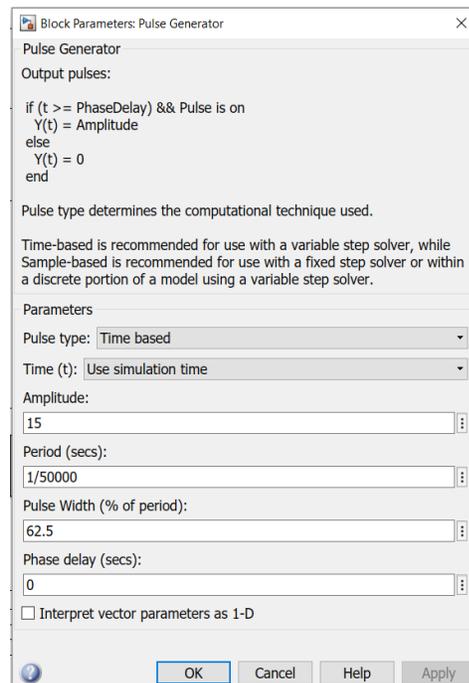
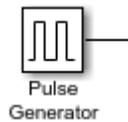
Tabla 4. 1. Especificaciones de diseño de señales de conmutación Boost cinco fases

Parámetro	Valor
Frecuencia de conmutación (f_s)	50 kHz
Ciclo de trabajo (D)	62.5%
Período	20 us
Desfasamiento entre fases	4us

4.5.1. Simulación

Las especificaciones de diseño de las señales de conmutación para los interruptores del convertidor Boost de cinco fases se encuentran en la Tabla 4. 1.

Para realizar la simulación de la generación de las señales de conmutación en MatLab Simulink® se emplean cinco bloques denominados “generador de pulsos” (ver Figura 4. 5 a), a los cuales se les introducen parámetros relacionados a la amplitud, período, ciclo de trabajo y retraso de fase (ver Figura 4. 5 b). La diferencia entre los cinco bloques empleados es el parámetro de retardo de fase, el cual representa el desfase de 4 μ s entre cada uno de las cinco fases del convertidor.



a) Bloque de generador de pulsos

b) Especificaciones de parámetros de simulación

Figura 4. 5. Simulación de señales de conmutación Boost multifase

En la Figura 4. 6 se muestra las señales de conmutación resultantes, con los respectivos retrasos entre cada señal para los cinco interruptores de potencia de la topología Boost de cinco fases.

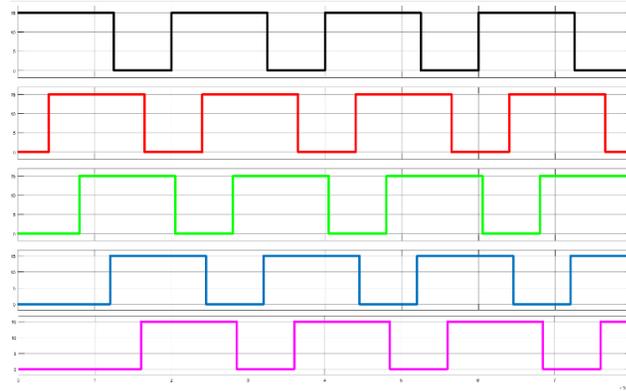


Figura 4. 6. Señales de conmutación simuladas en MatLab Simulink ®

4.5.2. Implementación

Para llevar a cabo la implementación de la etapa de modulación del convertidor CD-CD se emplea la tarjeta de desarrollo STM32L4, la cual se programa por medio del compilador ARM Mbed Compiler® mediante código en lenguaje C. Este código tiene la función de generar las cinco señales de conmutación para los interruptores que pertenecen a la topología del Boost de cinco fases, todas ellas desfasadas $4\mu\text{s}$ debido a que el período es $20\mu\text{s}$ y se debe obtener un desfase en partes iguales a lo largo de él.

En la Figura 4. 7 se encuentra el código desarrollado que cumple con las especificaciones antes descritas así como presentadas en la Tabla 4. 1.

```

DigitalOut PWM1(D2);
DigitalOut PWM2(D3);
DigitalOut PWM3(D4);
DigitalOut PWM4(D5);
DigitalOut PWM5(D6);
int main() {
  while(1) {
    PWM1 = 1; // ON
    PWM2 = 1; // OFF
    PWM3 = 1; // ON
    PWM4 = 0; // ON
    PWM5 = 0; // ON
    wait(0.0000015); // 1.5 us
    PWM4 = 1; // ON
    wait(0.0000005); // 0.5 us
    PWM1 = 0; // OFF
    wait(0.0000035); // 3.5 us
    PWM5 = 1; // ON
    wait(0.0000005); // 0.5 us
    PWM2 = 0; // OFF
    wait(0.0000035); // 3.5 us
    PWM1 = 1; // ON
    wait(0.0000005); // 0.5 us
    PWM3 = 0; // OFF
    wait(0.0000035); // 3.5 us
    PWM2 = 1; // ON
    wait(0.0000005); // 0.5 us
    PWM4 = 0; // OFF
    wait(0.0000035); // 3.5 us
    PWM3 = 1; // ON
    wait(0.0000005); // 0.5 us
    PWM5 = 0; // OFF
  }
}

```

Figura 4. 7. Código para generación de señales de conmutación de Boost multifase

En la Figura 4. 8 se muestran las señales implementadas en la tarjeta de programación STM32L432. En ella se puede observar que se cumple con la frecuencia establecida de 50 kHz, así como también se puede apreciar que el tiempo de desfase entre cada fase es de 4 μ s, tal como se establece en el diseño de las señales de conmutación.

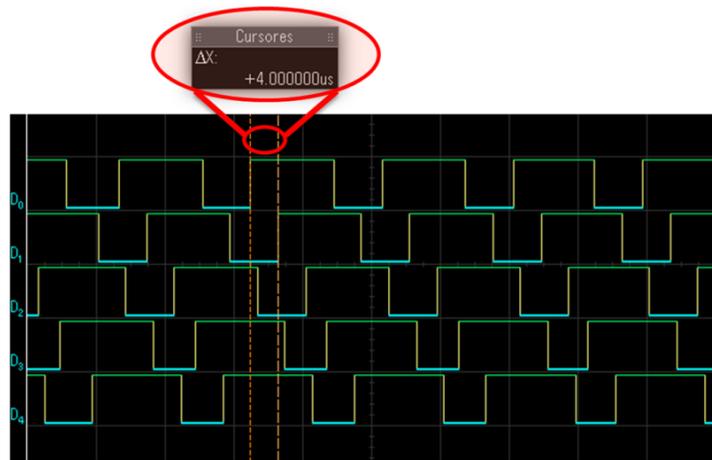


Figura 4. 8. Señales de conmutación implementadas en STM32L432

4.6. Señales de conmutación para inversor trifásico

Como se mencionó anteriormente, en este trabajo de investigación se abordan dos regímenes de operación (tensión constante y par constante) del motor de inducción que se tiene como carga del inversor trifásico. Para la generación de las señales de conmutación del inversor se emplea la técnica de modulación SPWM, la cual varía dependiendo del modo de operación de la máquina.

4.6.1. Simulación

A continuación se aborda la técnica de modulación SPWM, así como se describe la simulación de la misma empleada en los dos regímenes de operación del motor de inducción (tensión constante y par constante).

La estrategia de modulación SPWM se caracteriza por la comparación de una señal portadora con respecto a señales moduladoras de referencia (ver Figura 4. 9), de las cuales resultan las señales de conmutación que activarán y desactivarán a los interruptores de potencia.

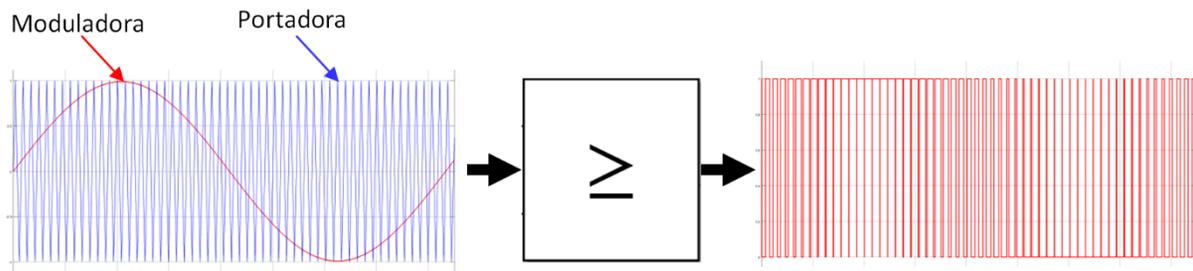


Figura 4. 9. Esquema de funcionamiento de estrategia SPWM

En esta estrategia el ancho de pulso varía dependiendo de la amplitud de la onda moduladora sinusoidal, la cual se compara con una onda portadora triangular para determinar los instantes de conmutación. En la Figura 4. 10 se muestra dicha comparación, la cual ocurre de la siguiente manera: cuando la señal moduladora es mayor que la señal portadora, entonces da como resultado un pulso alto (A), y cuando la señal moduladora es menor que la señal portadora el resultado es un pulso bajo (B).

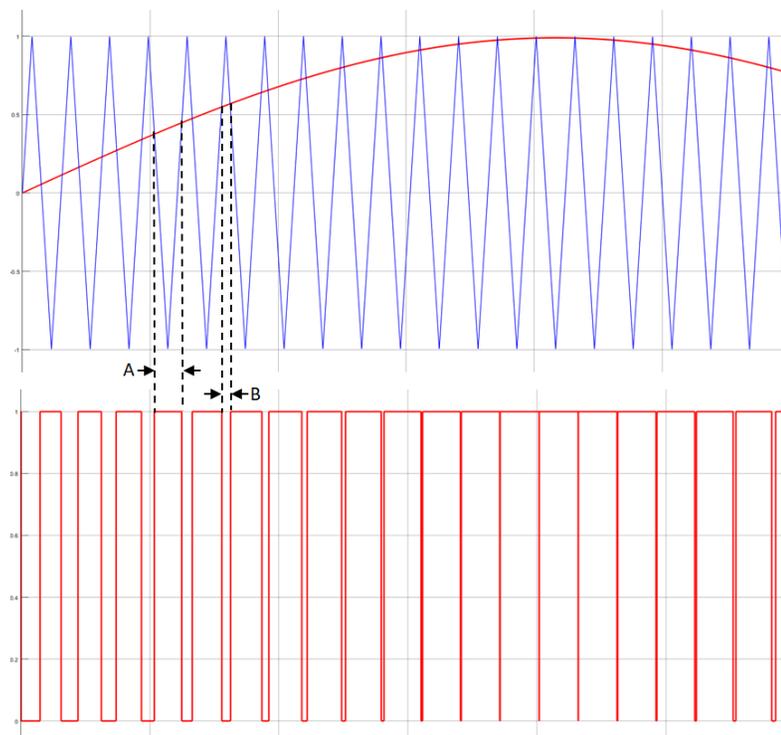


Figura 4. 10. Principio de comparación de señal moduladora y señal portadora, estrategia de modulación SPWM

En la Tabla 4. 2 se encuentran las especificaciones generales de la técnica SPWM empleada en esta tesis.

Tabla 4. 2. Especificaciones de técnica de modulación SPWM

Parámetro	Valor
Frecuencia de señal moduladora	60 Hz
Frecuencia de señal portadora	3.3 kHz
Índice de modulación	1
Frecuencia de conmutación	3.3kHz

- SPWM para régimen de operación a tensión constante

En la Figura 4. 11 se muestra el diagrama esquemático de simulación con el cual se generan los estados de conmutación que activan y desactivan los interruptores de potencia de la topología trifásica del inversor convencional para operar el motor de inducción a tensión constante, empleando la técnica de modulación SPWM.

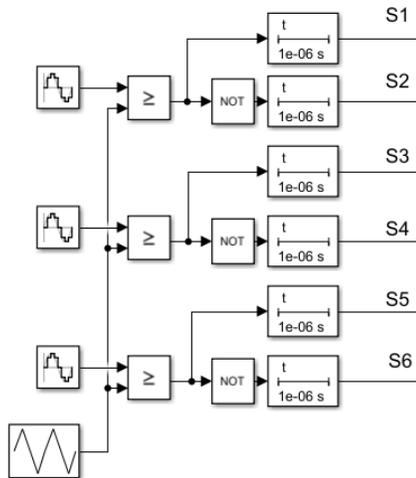


Figura 4. 11. Diagrama esquemático de simulación de estados de conmutación para régimen a tensión constante

A continuación se enlistan los elementos que conforman el esquema de la etapa de modulación SPWM elaborado en Matlab Simulink®, así como se mencionan la función de cada uno de ellos.

- Generador de senoidal. Este bloque genera la onda senoidal o en este caso, señal moduladora. Al ser un sistema trifásico existen tres señales moduladoras desfasada 120° entre ellas.
- Generador de triangular. Este bloque genera la onda triangular, o en este caso, señal portadora, cuya amplitud es de ± 1 .
- Operador relacional, \geq . Este bloque compara las señales moduladoras y portadora. Es decir, cuando la señal moduladora es mayor a la portadora la salida es un nivel alto o 1, y cuando la señal moduladora es menor, la salida es un nivel bajo ó 0.
- Operador lógico NOT. Este bloque se comporta como una compuerta not. Con él se obtienen las tres salidas negadas, de los interruptores complemento de la topología del inversor.
- Retraso al encendido. Este bloque retarda la señal de salida en un determinado tiempo. Lo anterior se emplea debido a que las señales de conmutación entre los interruptores deben contener un tiempo muerto para evitar que exista un traslape entre ellas.

Una vez realizada la comparación de señales moduladoras y portadora, en la Figura 4. 12 se muestran las señales de conmutación trifásica obtenidas en simulación. Cabe mencionar que únicamente se muestran tres de las seis señales para los interruptores de potencia pertenecientes del inversor trifásico, debido a que las tres señales restantes son complementarias a estas.



Figura 4. 12. Señales de conmutación en simulación. Técnica SPWM para régimen a tensión constante.

Es decir, el inversor puente completo trifásico está compuesto de tres ramas en paralelo y cada una cuenta con dos interruptores en serie; el comando de los interruptores se lleva a cabo con un desfase de 120° entre las ramas en paralelo y 180° entre los interruptores de cada rama. Esto, en condiciones reales provocaría que en un instante los interruptores, al no ser ideales, conduzcan al mismo tiempo, provocando que la fuente de alimentación entre en corto circuito y con ello generar pérdidas de conmutación, afectando la eficiencia, además de acortar la vida de los dispositivos interruptores.

Es por ello, que es necesario un circuito que otorgue un espacio entre flancos, también denominados como tiempos muertos. Este tiempo muerto entre señales debe ser suficiente para que los dispositivos no conduzcan simultáneamente. En simulación, se emplea el bloque de retardo al encendido para generar estos tiempos muertos, tal como se mencionó anteriormente.

En la Figura 4. 13 se muestran los resultados obtenidos en simulación de las señales complementarias con tiempo muerto de $1\mu\text{s}$ para esta estrategia de modulación.

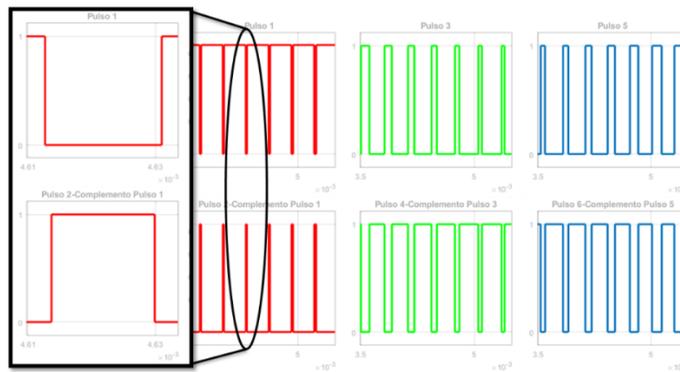


Figura 4. 13. Señales de conmutación complementarias con tiempos muertos simuladas

- SPWM para régimen de operación a par constante

Este régimen de operación del motor se basa en la relación voltaje-frecuencia y principalmente sirve para variar la velocidad de un motor, variando proporcionalmente la tensión y la frecuencia manteniendo constante el par del mismo.

La proporción tensión/frecuencia, se obtiene dividiendo la tensión nominal entre la frecuencia nominal del motor empleado. Una vez obtenido este dato, se debe asegurar que en todo momento de operación esta relación se mantenga constante, ya que de esta manera se asegura que el motor entregue el par nominal en todo momento.

Es importante resaltar que cuando se emplean velocidades entre el 25% y el 100% de la velocidad nominal del motor de inducción empleado, el flujo magnético del motor depende únicamente de la relación de la tensión-frecuencia, pero en velocidades inferiores esta técnica garantiza que el motor opere correctamente debido a que el par inducido es inversamente proporcional a la frecuencia [26, 60]. Esta técnica de control se basa en modelos estáticos del motor de inducción para la operación a flujo constante [61, 62].

Para realizar la simulación de los estados de conmutación de este régimen de operación, primeramente se toma como base los parámetros nominales de tensión y frecuencia de la carga del sistema, en este caso 220 V y 60 Hz, respectivamente. Posteriormente, se establecen cuatro escalones de variación tensión-frecuencia, tal como se observa en la Tabla 4. 3.

Tabla 4. 3. Variaciones de tensión-frecuencia

Tiempo (s)	Tensión (V) RMS	Frecuencia (Hz)	Proporción tensión-frecuencia
0	102	28	3.64
15	125	34	3.67
25	145	40	3.62
35	220	60	3.66

Con los datos proporcionados en la Tabla 4. 3 se lleva a cabo el diagrama esquemático que cumple con dichas características. La diferencia entre el esquemático elaborado para el régimen a tensión constante y el presentado en la Figura 4. 14, el cual pertenece a este régimen, es en la generación de las señales moduladoras. Lo anterior debido a que en esta variante estas señales se requieren modificar a lo largo del ciclo.

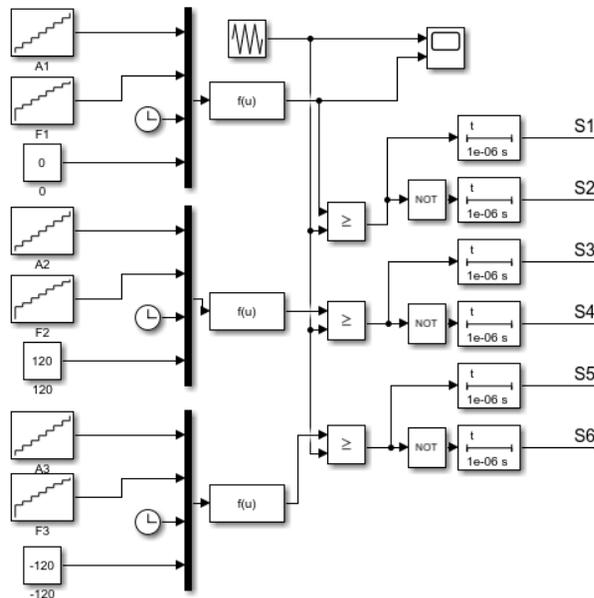


Figura 4. 14. Diagrama esquemático de simulación de estados de conmutación para régimen a par constante

A continuación se describen los bloques empleados para la generación y modificación de las señales moduladoras pertenecientes esta variante.

- Generador de función. Este bloque contiene la función seno, la cual tiene como entradas a los bloques generadores de rampa, quienes modifican la función en cuanto a amplitud, frecuencia y fase.
- Generador de rampa. Este bloque modifica la amplitud y la frecuencia de la función seno.
- Constante. Este bloque modifica la fase de la función seno.

En la Figura 4. 15 se pueden observar los escalones de variación tensión-frecuencia diseñados para el sistema, obtenidos en simulación. Así como en la misma figura se muestra un acercamiento, a la señal portadora y moduladora.

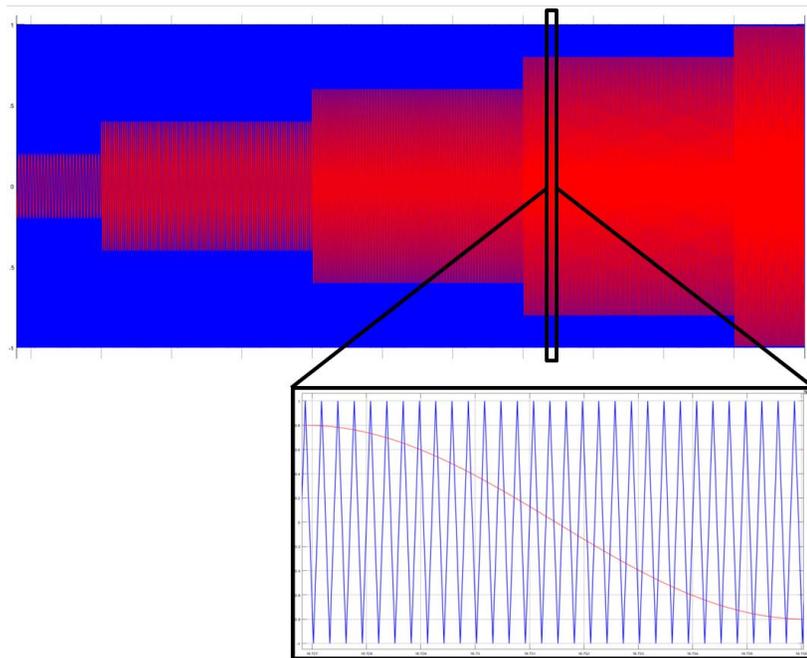


Figura 4. 15. Escalones de variación de la amplitud y frecuencia de la señal moduladora

4.6.2. Implementación

Como se mencionó anteriormente, la tarjeta de desarrollo empleada para implementar la modulación del inversor trifásico es la STM32F767. Esta implementación se realiza mediante la colaboración del programa MatLab Simulink® y el paquete de soporte de código embebido para tarjetas STMicroelectronics®.

La colaboración del programa MatLab Simulink® con las tarjetas de desarrollo Nucleo STM, facilitan la implementación de prototipos, ya que genera un código en lenguaje C y C++ a partir de modelos, los cuales se encuentran dentro de la librería de bloques (ver Figura 4. 16).

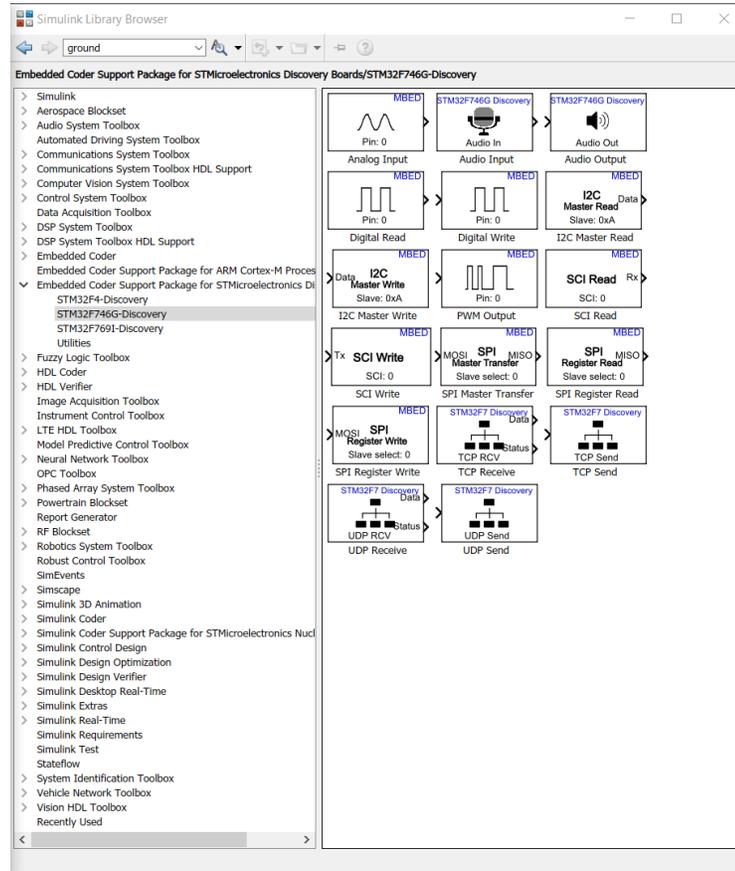


Figura 4. 16. Librería de soporte para tarjetas de desarrollo STM®

Para ejecutar el código, el programa MatLab Simulink® utiliza su compilador de terceros, la cual se puede llevar a cabo de las siguientes formas:

- Embebida. En esta ejecución no es necesaria la conexión al periférico de la computadora, ya que se lleva a cabo desde la memoria de la tarjeta de desarrollo STM®.
- En tiempo real. En esta ejecución la computadora realiza el procesamiento en tiempo real, y la tarjeta de desarrollo funciona únicamente como acondicionador de señales y como enlace entre el código realizado en el programa y la potencia implementada.

A continuación se muestran los diagramas esquemáticos de la técnica de modulación SPWM para el régimen a tensión constante (Figura 4. 17) y a par constante (Figura 4. 18) en conjunto con los bloques MBED de programación para la tarjeta de programación.

La configuración de los bloques MBED únicamente se realiza seleccionando el pin de salida de las señales de conmutación dentro de la tarjeta STM32F767.

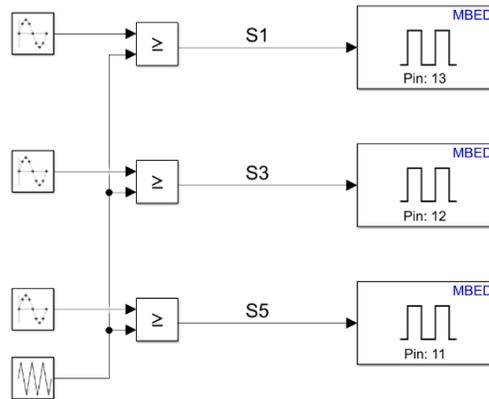


Figura 4. 17. Diagrama esquemático para implementación de estados de conmutación para régimen a tensión constante

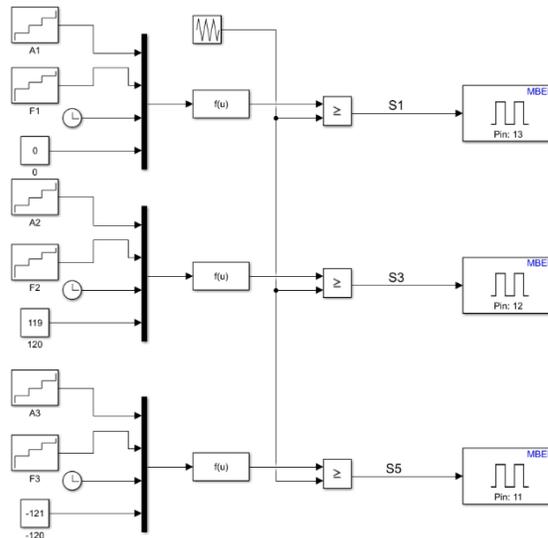


Figura 4. 18. Diagrama esquemático para implementación de estados de conmutación para régimen a par constante

Como se puede observar en los diagramas de las figuras anteriores únicamente se generan tres de las seis señales de conmutación requeridas por la topología trifásica del inversor. Esto es debido a que las tres señales restantes son complementarias a estas, y a parte deben contener tiempos muertos entre las primeras tres para evitar un traslape de señales.

En la Figura 4. 19 se muestran las primeras tres señales de conmutación implementadas en la tarjeta STM32F767 empleando los bloques de comunicación existentes en MatLab Simulink® y esta tarjeta.

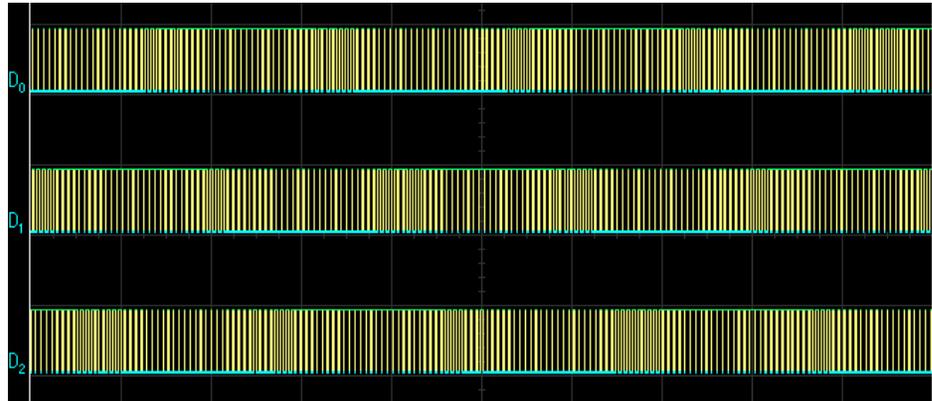


Figura 4. 19. Estados de conmutación implementados en Nucleo-144 STM32F767

Para la generación de las tres señales complementarias con tiempos muertos se implementa un circuito de manera externa. En la Figura 4. 20a se muestra el diagrama esquemático de dicho circuito. Así como en la Figura 4. 20b se muestra el circuito implementado, con el cual se generan las señales complementarias con $1 \mu\text{s}$ de tiempo muerto. En el Anexo 4 se encuentra el cálculo de los valores de la resistencia (R) y el capacitor (C) del circuito.

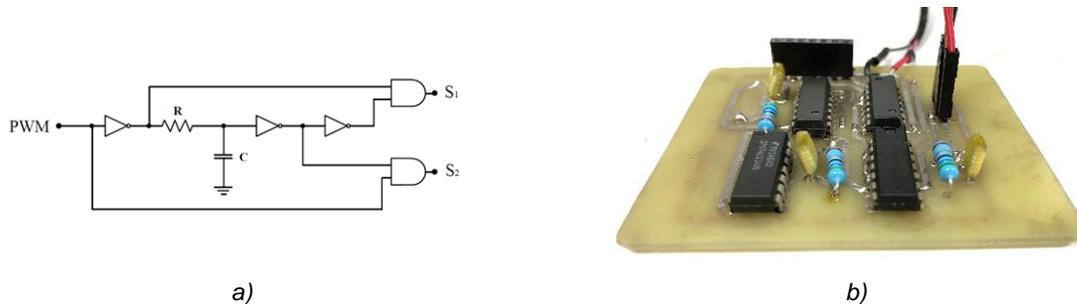


Figura 4. 20. Generador de señales complementarias con tiempos muertos. a) Diagrama esquemático, b) Circuito implementado

En la Figura 4. 21 se encuentran las señales de conmutación ya implementadas en el microcontrolador STM32F767. En ella también se puede observar un acercamiento de una señal de conmutación con su señal complementaria, en la cual se aprecia que incluye un tiempo muerto entre ellas.

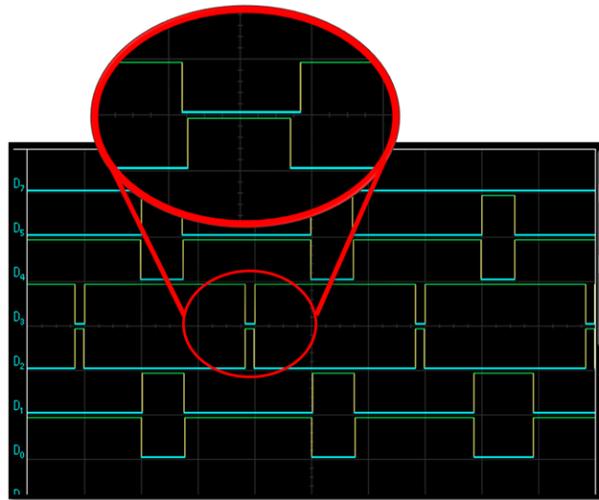


Figura 4. 21. Señales de conmutación complementarias con tiempos muertos implementadas

CAPÍTULO 5: RESULTADOS EN SIMULACIÓN Y EXPERIMENTALES

5.1. Descripción general

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos en simulación del conjunto de los elementos que integran el sistema fotovoltaico diseñado en esta tesis. Lo anterior con la finalidad de corroborar el correcto funcionamiento del diseño de las etapas que integran al sistema fotovoltaico autónomo. También, se presentan los resultados obtenidos en la implementación del inversor trifásico en conjunto con la técnica de modulación SPWM, empleando motores de inducción trifásicos operando en los dos regímenes abordados y cargas resistivas de diferentes potencias.

5.1. Resultados en simulación

Tomando como base las especificaciones y los resultados obtenidos en el diseño de las etapas del sistema fotovoltaico, así como el desarrollo de la generación de los estados de conmutación del inversor trifásico abordado en el capítulo anterior se lleva a cabo la simulación de todos los elementos del sistema fotovoltaico en conjunto en diferentes programas de simulación, tales como PSim®, Simetrix® y MatLab Simulink®. En la Figura 5. 1 se muestra el diagrama esquemático de simulación en MatLab Simulink®.

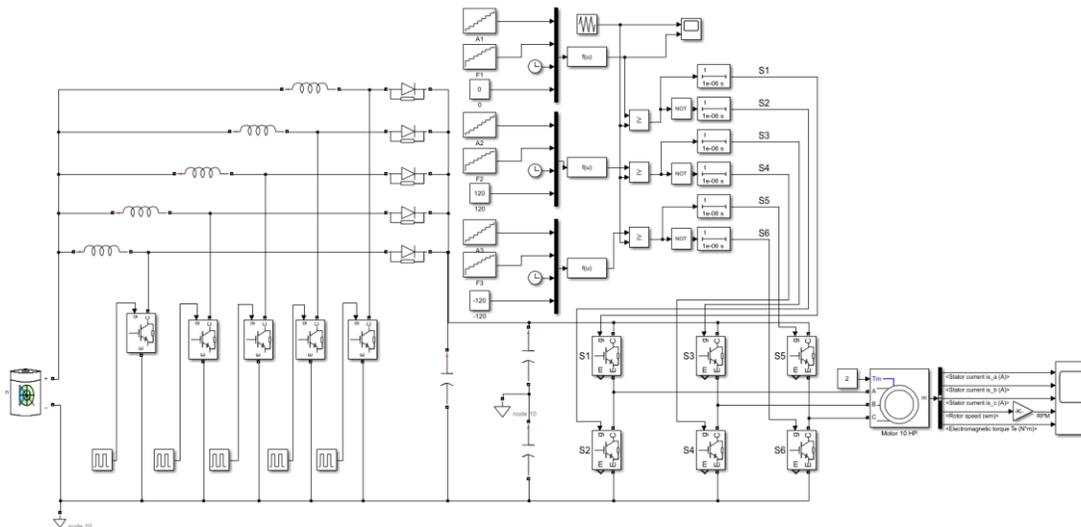


Figura 5. 1. Diagrama esquemático de sistema fotovoltaico completo en simulación

Utilizando las condiciones estándares de prueba del panel fotovoltaico, presentadas anteriormente en la Tabla 3. 5, se obtuvieron las curvas de corriente vs tensión (IV) y potencia vs tensión (PV) pertenecientes al panel empleado en esta tesis, las cuales establecen el comportamiento eléctrico del panel seleccionado. En la Figura 5. 2 se muestran ambas curvas obtenidas en simulación, empleando el programa MatLab Simulink®.

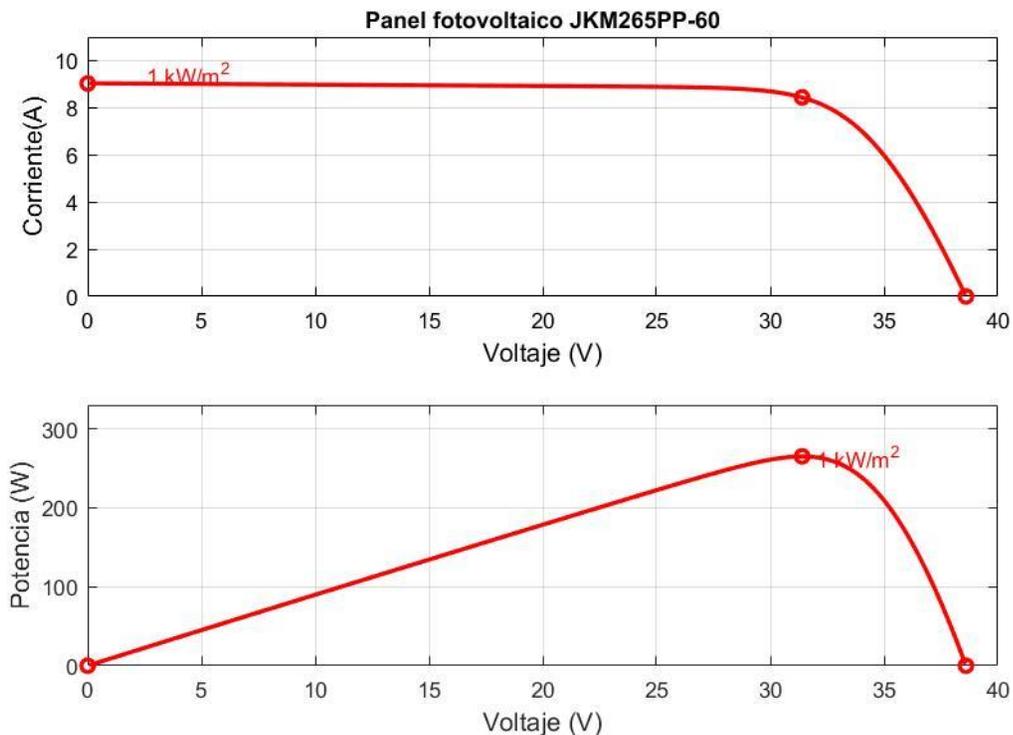


Figura 5. 2. Curvas IV y PV características del panel fotovoltaico empleado

Para la etapa del convertidor CD-CD se simularon las topologías convencional (ver Figura 5. 3a) y multifase (ver Figura 5. 3b) del convertidor Boost, para así establecer la diferencia entre los valores de parámetros que influyen en el diseño del mismo, y con ello comprobar el comportamiento de ambas topologías. En el Anexo 5 se encuentran los diagramas esquemáticos simulados en los programas de simulación restantes.

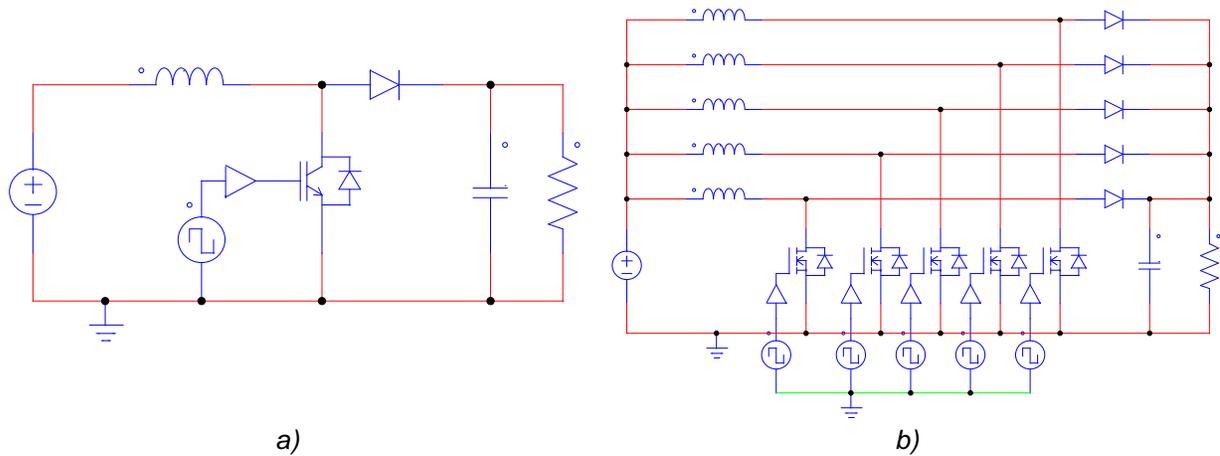


Figura 5. 3. Diagrama esquemático de convertidor Boost a) Convencional b) Multifase

Analizando lo obtenido en simulación entre ambas topologías se verifica que el convertidor Boost multifase presenta mejoras respecto a la topología convencional. Las mejoras más representativas son las siguientes:

- Disminución de la corriente del inductor, ver Figura 5. 4 . La corriente del inductor que pertenece al Boost convencional se encuentra de color rojo, mientras que la corriente de cada uno de los cinco inductores de la topología multifase se encuentra de color azul.

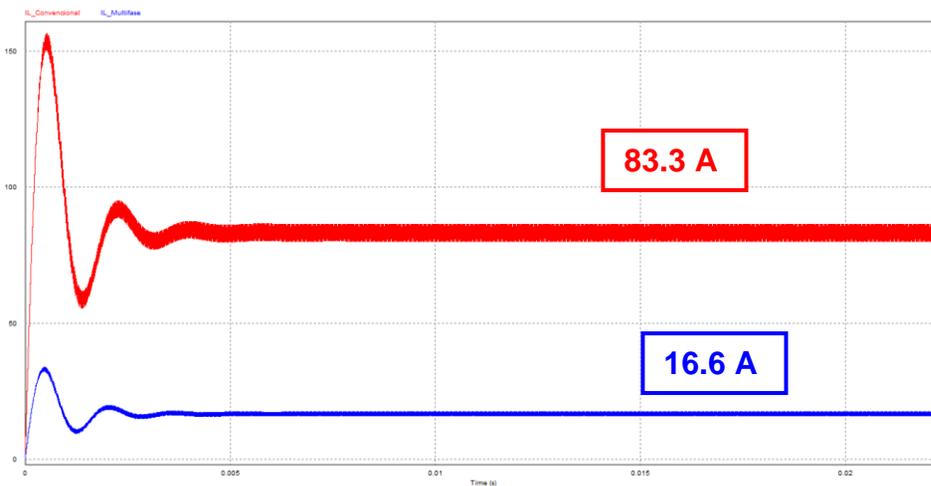


Figura 5. 4. Corriente del inductor

- Disminución del rizo de corriente de salida, ver Figura 5. 5. El rizo de corriente de salida del boost convencional se encuentra de color rojo, mientras que el rizo de tensión de salida del boost multifase se encuentra en azul.

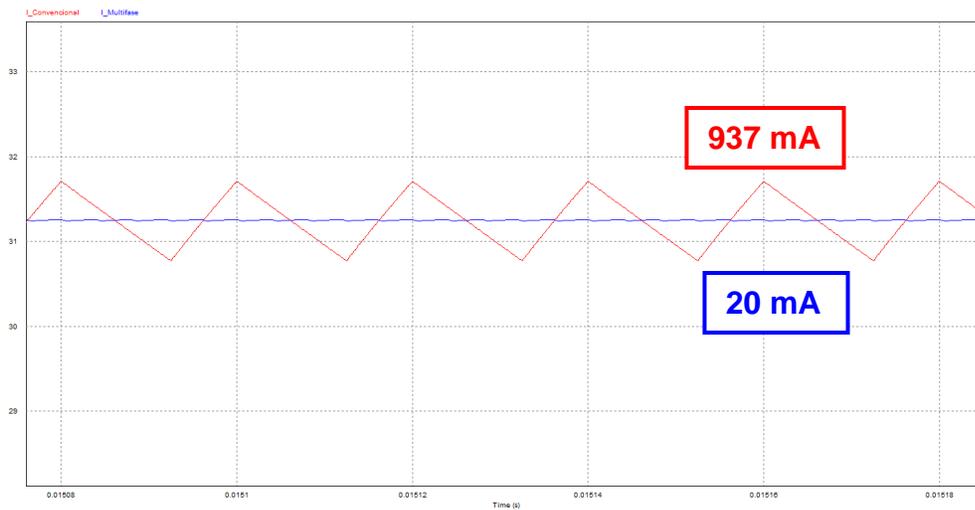


Figura 5. 5. Rizo de corriente a la salida

- Disminución del rizo de tensión de salida, ver Figura 5. 6. El rizo de tensión de salida del Boost convencional se encuentra de color rojo, mientras que el rizo de tensión de salida del Boost multifase se encuentra en azul.

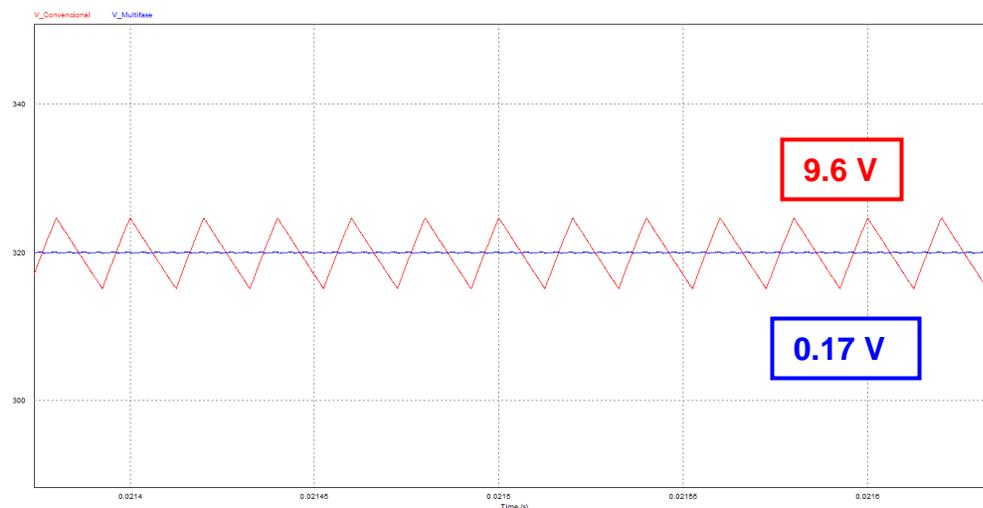


Figura 5. 6. Rizo de tensión a la salida

En la Tabla 5. 1 se muestra un resumen de los resultados obtenidos, en los cuales se puede apreciar que existe una disminución en los valores de los parámetros obtenidos utilizando la topología multifase.

Tabla 5. 1. Comparación entre Boost convencional y multifase en simulación

Elemento	Boost convencional	Boost multifase
I_{inductor}	83.3 A	16.6 A
Rizo de I_o	937 mA	20mA
Rizo de V_o	9.6 V	0.17 V

En la Figura 5. 7 se muestra las señales de tensión (azul) y corriente (rojo) a la salida del convertidor CD-CD, el cual alimenta al inversor.

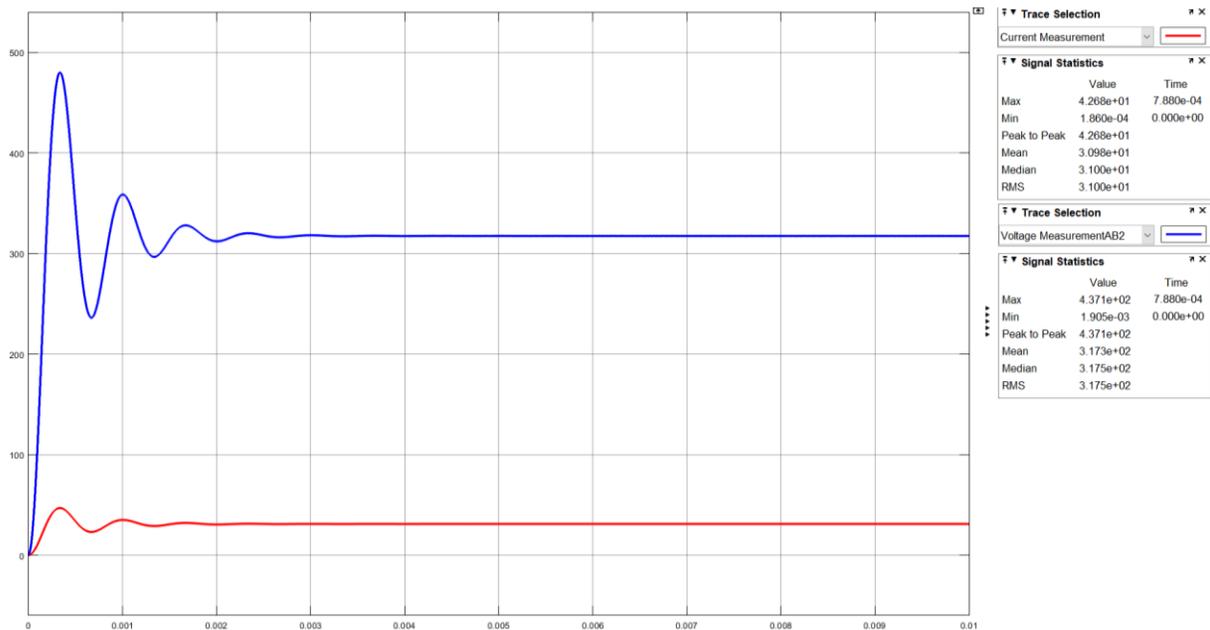


Figura 5. 7. Señales de tensión y corriente a la salida del convertidor CD-CD

En cuanto a lo relacionado con el inversor trifásico, se empleó la técnica de modulación SPWM en conjunto con un motor de inducción de 10 hp como carga del sistema trabajando en vacío, bajo los regímenes de operación a tensión constante y par constante. En la Tabla 5. 2 se encuentran las especificaciones del motor de inducción empleado en simulación.

Tabla 5. 2. Especificaciones generales de motor de inducción empleado en simulación

Parámetro	Valor
Potencia nominal	10 hp
Tensión nominal	220 V
Frecuencia nominal	60 Hz
Velocidad nominal	1770 rpm
Corriente en vacío	8.7 A
Corriente a plena carga	28.2
Número de polos	4
Número de fases	3

En la Figura 5. 8 se encuentra la forma de onda de tensión a la salida del inversor empleando la modulación SPWM, cuya amplitud es 220 V_{RMS} con una frecuencia de 60 Hz, aproximadamente. Las especificaciones anteriores se establecen debido a que la carga del sistema es un motor trifásico con esos valores nominales.

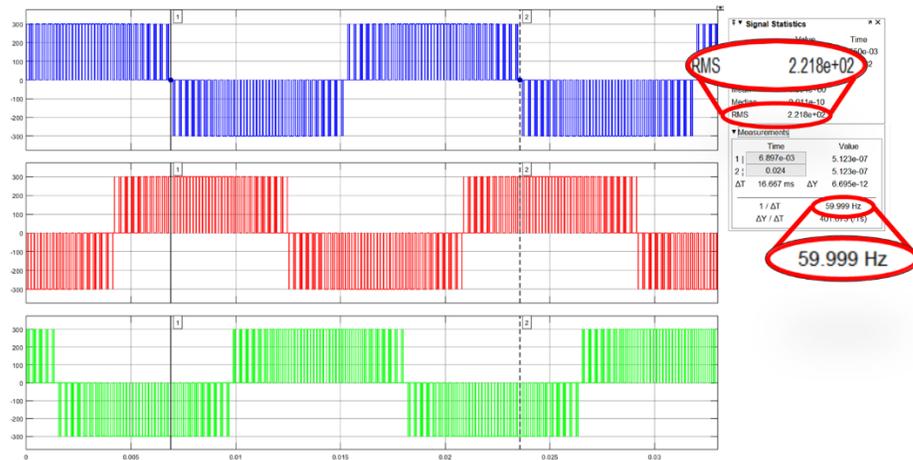


Figura 5. 8. Forma de onda de tensión a la salida del inversor obtenida en simulación

Un parámetro de comparación entre los dos regímenes de operación es la amplitud de la corriente de arranque del motor de inducción empleado como carga, ya que esta representa ser un parámetro importante para evitar el sobredimensionamiento del inversor.

En la Figura 5. 9 se muestra la corriente de arranque obtenida en las tres fases del motor de inducción trifásico de 10 hp empleando la técnica de modulación SPWM para el régimen a tensión constante. Se puede observar que la amplitud de la corriente de arranque llega a tener valores de 45 A.

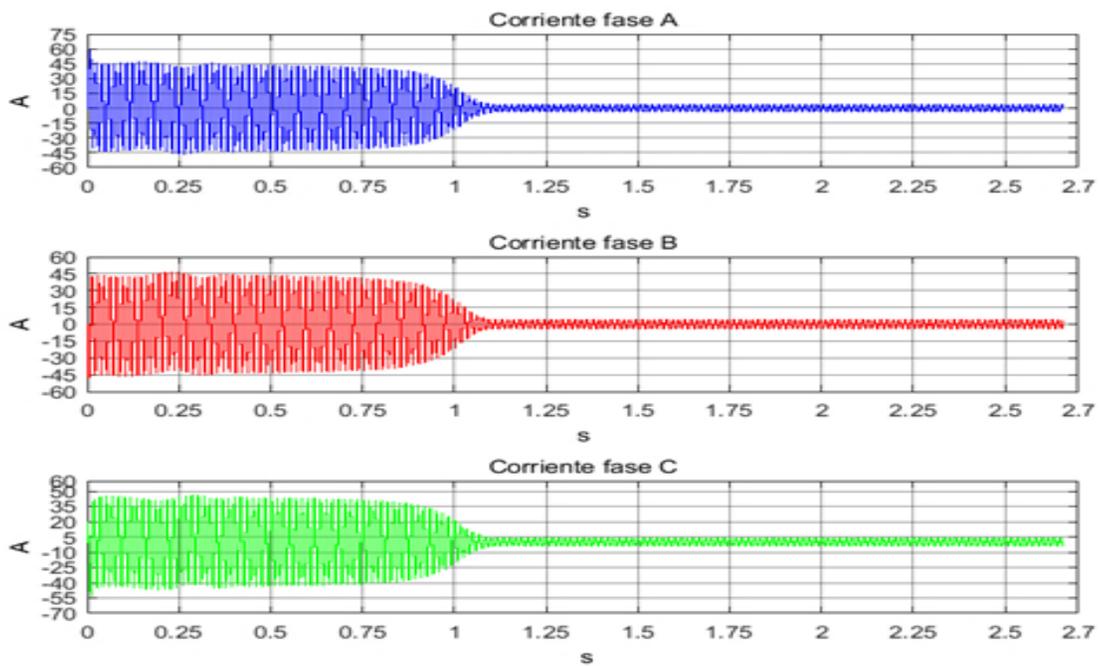


Figura 5. 9. Corriente de arranque de motor de inducción de 10 hp obtenida en simulación, empleando técnica SPWM para régimen a tensión constante

Ahora, en la Figura 5. 10 se muestra la corriente de arranque en las tres fases obtenida del mismo motor de inducción pero para el régimen a par constante. En ella se puede apreciar que a diferencia que con el resultado obtenido con el régimen a tensión constante, la amplitud de la corriente de arranque tiene un valor de 10 A.

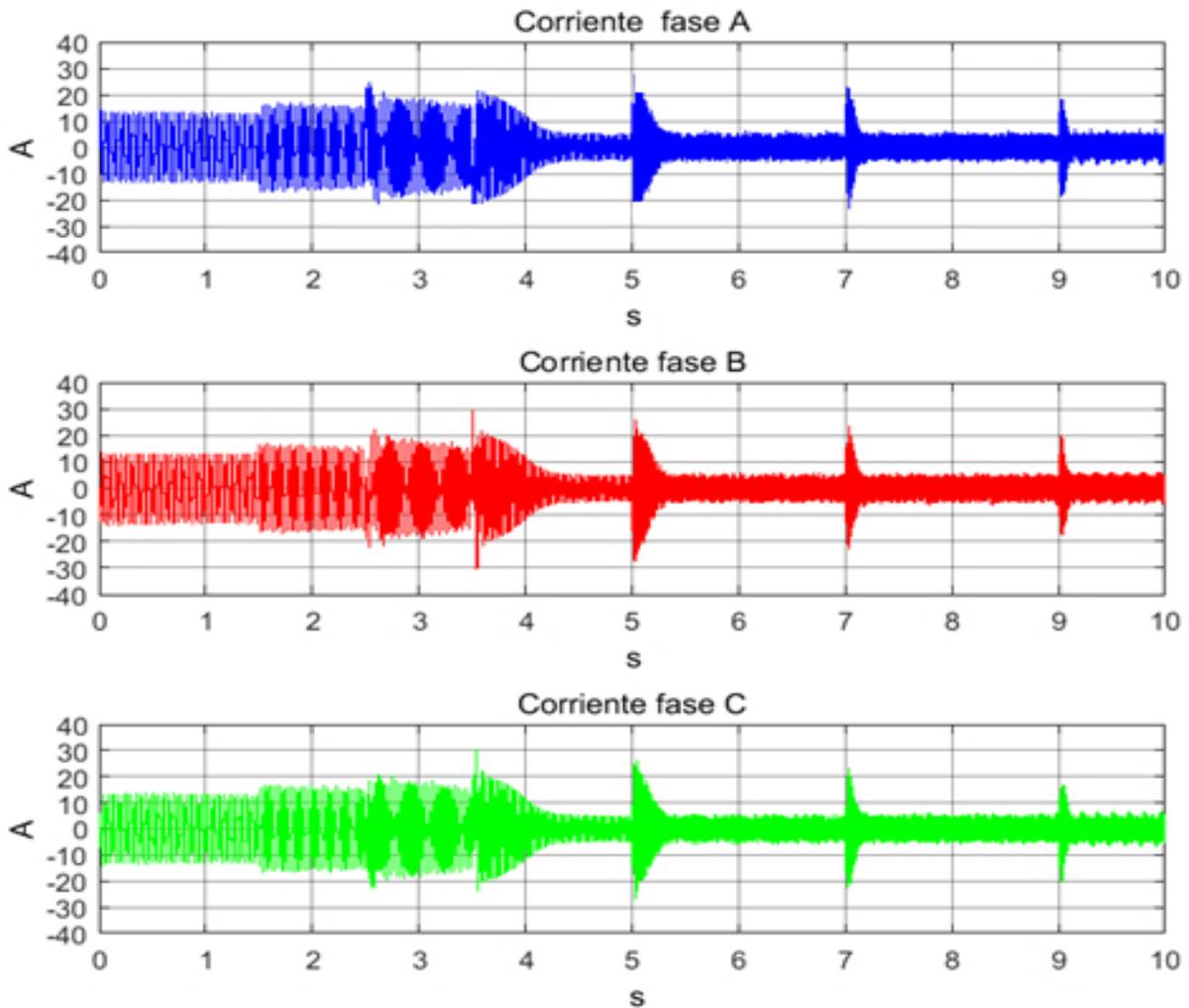


Figura 5. 10. Corriente de arranque de motor de inducción de 10 hp obtenida en simulación, empleando técnica SPWM para régimen a par constante

Comparando las corrientes presentadas en las figuras anteriores, se puede observar que existe una considerable diferencia entre la amplitud de la corriente de arranque operando en el régimen a tensión constante y en la corriente de arranque en el régimen a par constante. La diferencia entre estas amplitudes es de 35 A.

Recordando que una de las características del sistema es poder soportar cargas de mediana potencia evitando el sobredimensionamiento, se puede decir que la técnica de modulación SPWM en régimen a par constante presentó mejores resultados al disminuir un 77% la corriente de arranque del motor empleado.

En la Figura 5. 11 se muestra el torque de motor para el régimen a tensión constante y en la Figura 5. 12 para el régimen a par constante.

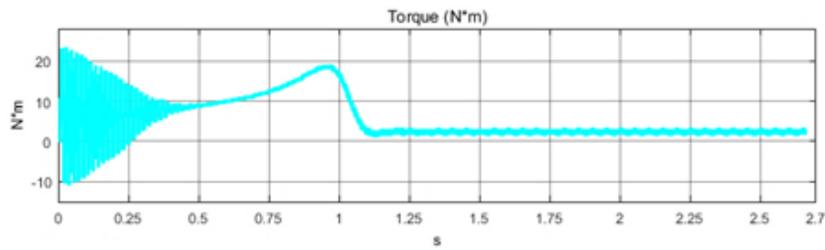


Figura 5. 11. Torque del motor de inducción de 10 hp obtenido en simulación, régimen a tensión constante

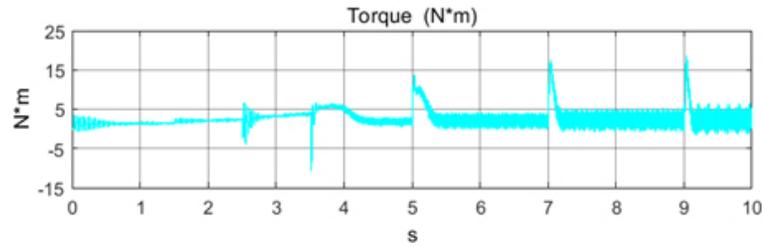


Figura 5. 12. Torque del motor de inducción de 10 hp obtenido en simulación, régimen a par constante

Por último, en las siguientes figuras se muestran los resultados obtenidos de velocidad nominal de motor de inducción empleado en simulación para el régimen a tensión constante (ver Figura 5. 13) y a par constante (ver Figura 5. 14). La diferencia entre ambos es que debido a que la técnica SPWM para el régimen a par constante introduce escalones de tensión y frecuencia, la velocidad nominal se eleva gradualmente de manera proporcional a ellos.

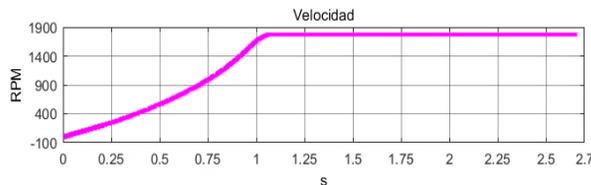


Figura 5. 13. Velocidad de motor de inducción de 10 hp obtenida en simulación, régimen a tensión constante

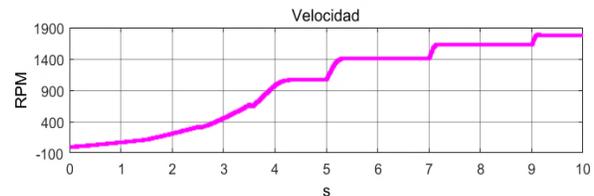


Figura 5. 14. Velocidad de motor de inducción de 10 hp obtenida en simulación, régimen a par constante

5.2. Resultados experimentales

A pesar de que esta tesis abarca únicamente el diseño de los elementos del sistema fotovoltaico se llevó a cabo la implementación de la etapa de inversión, con la finalidad de observar el comportamiento que presenta en conjunto con la técnica de modulación SPWM en ambos regímenes de operación y diferentes cargas trifásicas de mediana potencia.

En la Figura 5. 15 se muestra el circuito implementado del inversor trifásico en conjunto con los circuitos impulsores, que amplifican la salida de potencia proveniente de la tarjeta STM32F67.

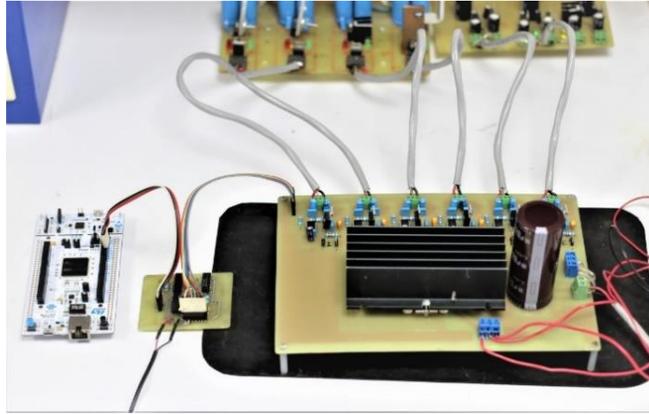


Figura 5. 15. Circuito implementado del inversor trifásico con impulsores

La finalidad de las pruebas experimentales se enfoca en el cumplimiento de los siguientes objetivos:

- Comprobar el correcto funcionamiento del inversor trifásico en conjunto con las dos técnicas de modulación seleccionadas teniendo como carga diferentes motores de inducción de mediana potencia.
- Comprobar que el inversor trifásico seleccionado soporta la potencia de diseño.

A continuación, en la Tabla 5. 3 se enlistan las diferentes cargas empleadas en las pruebas. Cabe mencionar que debido a que no se cuenta con un motor de inducción de 10 hp en CENIDET, se emplearon diferentes cargas con el material existente en laboratorio, logrando obtener como mayor potencia de prueba 5400 W.

Tabla 5. 3. Cargas utilizadas en implementación

Carga	Potencia nominal
Motor de inducción	1 hp (746 W)
	3 hp (2238 W)
Resistencia	800 W
	2827 W
	5400 W

Primeramente, para verificar el correcto funcionamiento del inversor en conjunto con las modulaciones implementadas se muestra la forma de onda de tensión de corriente alterna a la salida del inversor en la Figura 5. 16. En ella se puede observar que la tensión y frecuencia de diseño se cumplen, ya que tiene un período de 16.67 ms, es decir 60 Hz; y una tensión nominal de 220 V_{RMS} entre fases. Lo anterior a raíz de las especificaciones nominales de los motores empleados en las pruebas experimentales.

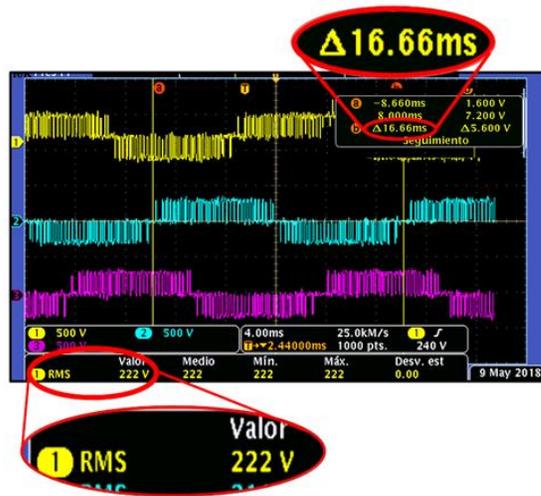


Figura 5. 16. Forma de onda de tensión a la salida del inversor obtenida en implementación

En las siguientes figuras se muestran el inversor trifásico implementado, en conjunto con el motor de inducción de 1 hp (ver Figura 5. 17) y con el banco de resistencias (ver Figura 5. 18) utilizados como carga en implementación.



Figura 5. 17. Inversor trifásico en conjunto con el motor de inducción de 1 hp

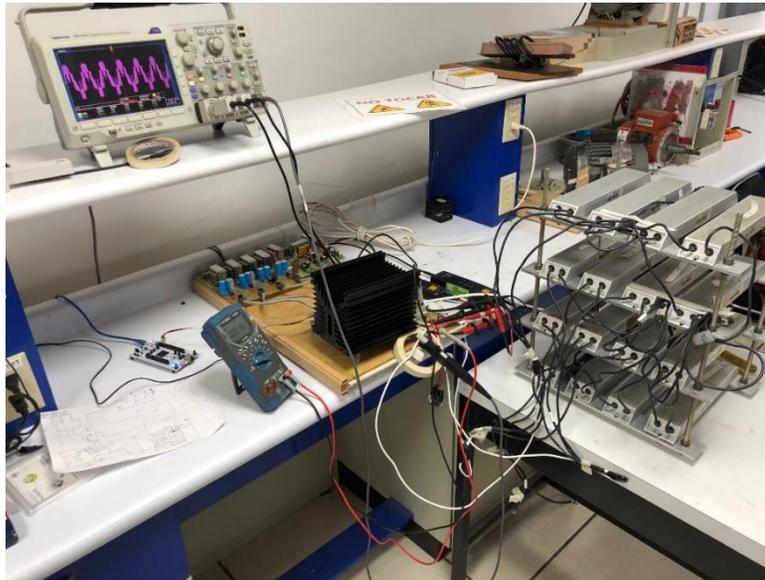


Figura 5. 18. Inversor trifásico en conjunto con el banco de resistencias empleado

La conexión del banco de resistencias empleado, se modifica según la potencia nominal requerida para las pruebas. A continuación, se describen los diagramas de conexión con los cuales se demandan las potencias presentadas en la Tabla 5. 3, presentada anteriormente.

- Para demandar la potencia de 800 W, se emplean tres resistencias de 100 Ω conectadas en delta a la salida del inversor, ver Figura 5. 19 .

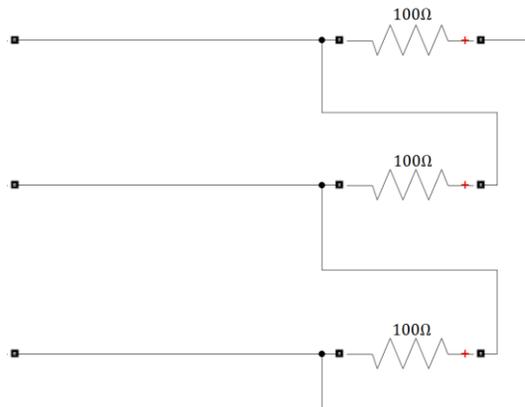


Figura 5. 19. Diagrama de conexión de carga resistiva, para potencia de 800 W

- Para demandar la potencia de 2827 W se diseñó un arreglo de resistencias, el cual consta de tres ramas conectadas en delta (ver Figura 5. 20). Cada rama contiene cinco resistencias conectadas en serie de 10 Ω , obteniendo una resistencia equivalente de 50 Ω , tal como se observa en la Figura 5. 21.

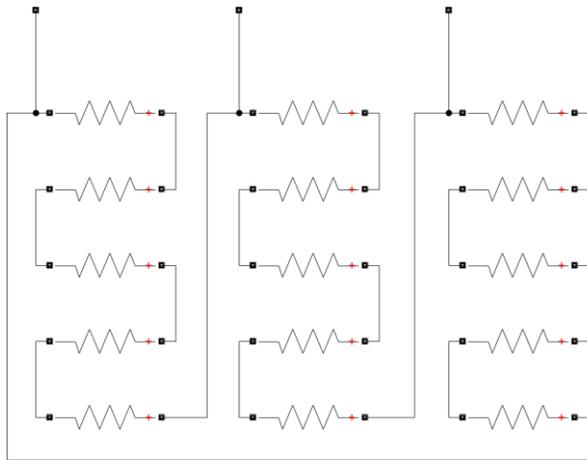


Figura 5. 20. Diagrama de conexión de cada rama, para potencia de 2827 W

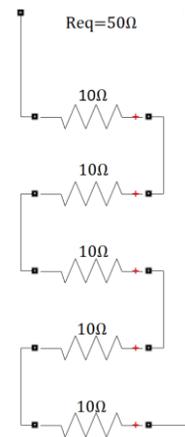


Figura 5. 21. Diagrama de conexión de cada rama, para potencia de 2827 W

- Para demandar la potencia de 5400 W se diseñó un arreglo de resistencias, el cual consta de tres ramas conectadas en estrella (ver Figura 5. 22). Cada rama contiene tres resistencias de 10 Ω en paralelo, y estas en serie con otras dos resistencias de 10 Ω en paralelo, obteniendo una resistencia equivalente de 8.33 Ω, tal como se observa en la Figura 5. 23.

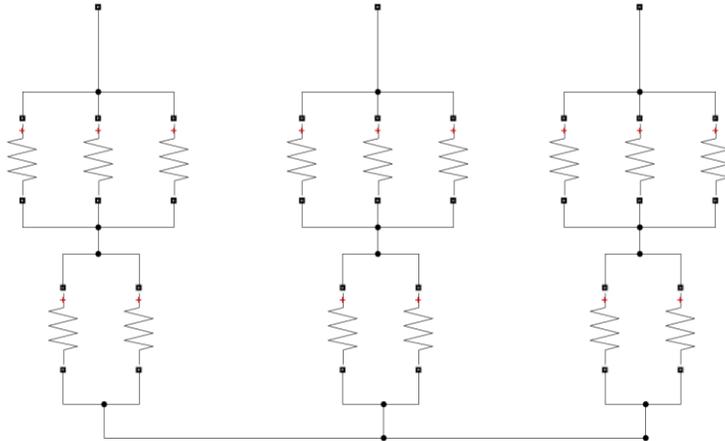


Figura 5. 22. Diagrama de conexión de cada rama, para potencia de 5400 W

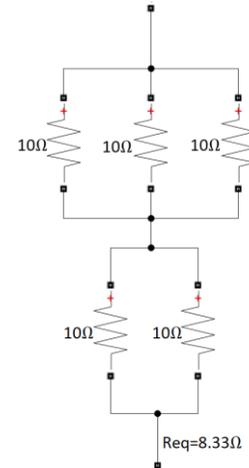


Figura 5. 23. Diagrama de conexión de carga resistiva, para potencia de 5400 W

Posteriormente, en las Figuras 5.24 y 5.25 se puede observar la corriente de arranque obtenida del motor de 1 hp en los regímenes a tensión constante y par constante, respectivamente. Asimismo, en las Figuras 5.26 y 5.27 se encuentra la corriente de arranque para el motor de inducción de 3 hp obtenida experimentalmente.

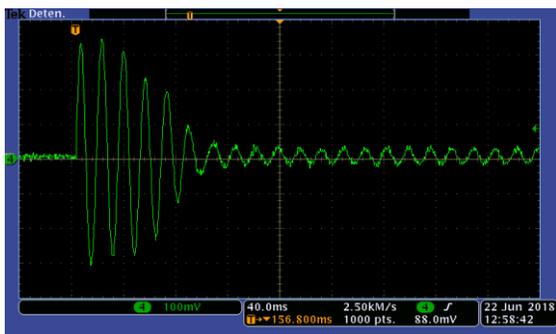


Figura 5. 24. Corriente de arranque del motor de 1 hp, régimen a tensión constante

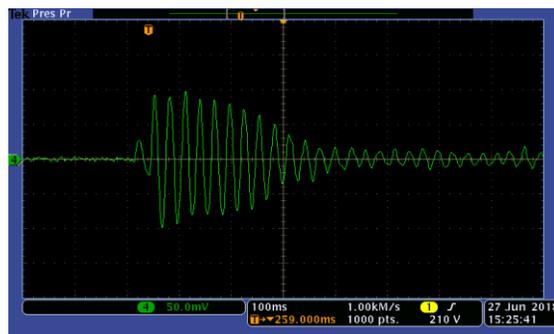


Figura 5. 25. Corriente de arranque del motor de 1 hp, régimen a par constante

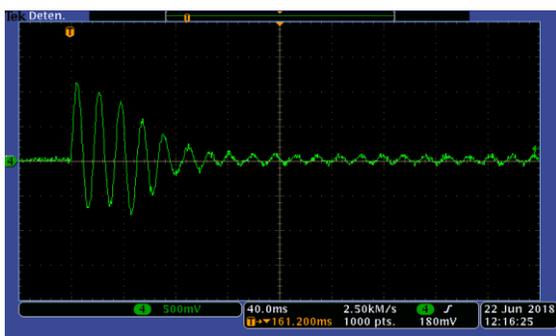


Figura 5. 26. Corriente de arranque del motor de 3 hp, régimen a tensión constante

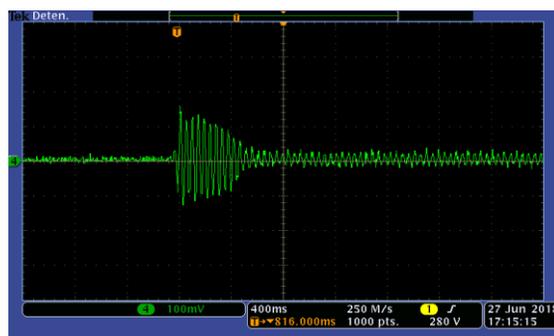


Figura 5. 27. Corriente de arranque del motor de 3 hp, régimen a par constante

Analizando las figuras anteriores se comprueba que al igual que en simulación los resultados obtenidos reflejan que el régimen a par constante se reduce el valor de la corriente de arranque en los motores de inducción empleados. Los resultados obtenidos se concentran en la Tabla 5. 4 .

Tabla 5. 4. Comparación de corriente de arranque en motores de inducción empelados obtenidas experimentalmente

	Corriente de arranque obtenida	
	Régimen a tensión constante	Régimen a par constante
Motor de inducción 3 ϕ , 1Hp	32 A	9 A
Motor de inducción 3 ϕ , 3Hp	113 A	16 A

El porcentaje de disminución de la amplitud de la corriente de arranque en el régimen a par constante resultante para el motor de inducción de 1 hp es de 71.87% y para el motor de inducción de 3 hp es de 85.84%. Lo anterior representa ser una ventaja debido a que al reducir la corriente de arranque del motor contribuye a una evidente disminución en el tamaño de los componentes del sistema fotovoltaico debido a que disminuye el esfuerzo de corriente total del mismo y con ello se reduce el costo total del sistema.

Añadido a lo anterior, el disminuir la corriente de arranque evita sobredimensionar innecesariamente el sistema, ya que comúnmente esto ocurre debido a que la corriente de arranque puede llegar a ser hasta seis veces la corriente nominal de los motores de inducción de mediana potencia.

Continuando con las pruebas experimentales, en las siguientes figuras se muestran las formas de onda de corriente a la salida del inversor trifásico con las cargas resistivas. Lo anterior para abordar el punto de comprobar que el inversor trifásico seleccionado soporta medianas potencias de trabajo, las cuales son fracciones de la potencia nominal de diseño debido a que no se obtuvieron cargas de mayor potencia existentes en CENIDET.

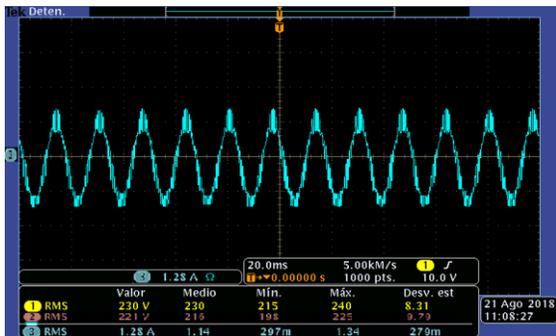


Figura 5. 28. Corriente a la salida del inversor, teniendo carga resistiva de 800 W

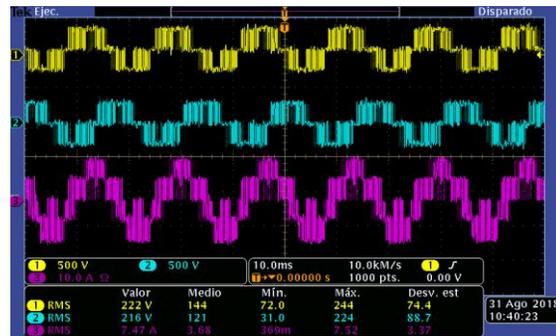


Figura 5. 29. Corriente a la salida del inversor, teniendo carga resistiva de 2827 W

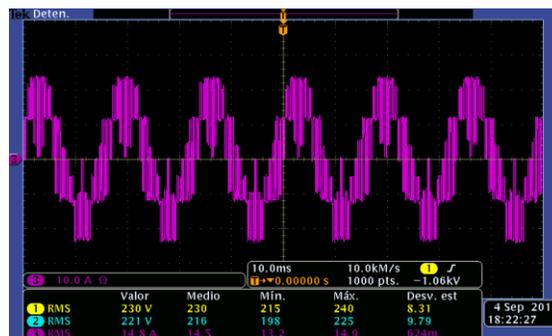


Figura 5. 30. Corriente a la salida del inversor, teniendo carga resistiva de 5400 W

En la Tabla 5. 5 se encuentran los datos referentes a la eficiencia del inversor con las diferentes cargas resistivas.

Tabla 5. 5. Eficiencia calculada para las diferentes cargas empleadas

Tipo de Carga	Potencia nominal (P)	Eficiencia calculada (η)
Resistiva (100 Ω) conectado en delta	800 W	95%
Resistiva (50 Ω) conectada en delta	2827 W	98%
Resistiva (8.33 Ω) conectada en estrella	5400 W	97%

Finalmente, se realizaron simulaciones con los mismos valores y tipos de cargas que las que se emplearon en implementación, con el fin de comparar los resultados de corriente de arranque obtenidos de simulación y experimentalmente.

En la Tabla 5. 6 se presentan dichos resultados, y en ella se puede observar que el mayor porcentaje de diferencia entre los resultados es de 8.75 %.

Tabla 5. 6. Comparación de resultados de corriente de arranque obtenidos en simulación y experimentalmente

Potencia de motor de inducción	Régimen a tensión constante			Régimen a par constante		
	Implementación	Simulación	Diferencia	Implementación	Simulación	Diferencia
1 Hp	32 A	29.2 A	8.75%	9 A	8.75 A	2.77%
3 Hp	113 A	104 A	7.96%	16 A	15.27 A	4.56%

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6.1. Conclusiones

En este trabajo se encuentran los cálculos para obtener los elementos pertenecientes a un sistema fotovoltaico autónomo con aplicación en bombas de c.a. de mediana potencia utilizadas en el sector agrícola para el abastecimiento de vertederos y sistemas de riego. Así mismo, se validan dichos resultados por medio de la simulación del sistema fotovoltaico completo teniendo como aplicación diferentes motores de inducción de mediana potencia.

En cuanto a los resultados obtenidos de cada una de las etapas que integran al sistema fotovoltaico se concluye lo siguiente:

Del arreglo de paneles fotovoltaicos:

En este sistema fotovoltaico autónomo con aplicaciones de bombeo agrícola, el arreglo de paneles fotovoltaicos tiene la única función de cargar al banco de baterías durante la presencia de irradiancia, ya que este la almacena y la provee cuando hay ausencia de irradiancia a la carga del sistema.

El arreglo de paneles fotovoltaicos resultante del diseño elaborado en esta tesis, el cual garantiza la producción de energía en cualquier época del año, consta de cuatro ramas de paneles fotovoltaicos JKM265PP-60 ($P_{\text{máx}}=265 \text{ W}$) conectados en paralelo y, cada rama consta de cuatro paneles en serie. Es decir, un total de 16 paneles fotovoltaicos de dicho modelo.

Del cargador de baterías:

Se presentaron cuatro alternativas comerciales de controladores de carga que cumplen con las especificaciones requeridas por el sistema fotovoltaico con aplicaciones en bombeo. Sin embargo, se destaca que el controlador de carga JND-X 50A presenta una mejor relación en cuanto a prestaciones ofrecidas y bajo costo en comparación con los tres modelos restantes.

Del arreglo de baterías:

Principalmente, se debe destacar que la función que tiene el banco de baterías en este sistema fotovoltaico autónomo es almacenar la energía eléctrica proporcionada por los paneles para posteriormente aportarla al sistema durante la noche, que es el momento en el cual el sistema de bombeo lo requiere debido a la aplicación agrícola para la cual es empleado.

El banco de baterías resultante para cumplir con estas condiciones está conformado por diez baterías con energía aparente de 1800 VAh conectadas en serie, las cuales generan una tensión de salida de 120 V. esta tensión de salida es empleada para la alimentación del convertidor Boost multifase.

Del convertidor CD-CD:

El convertidor adecuado para desarrollar esta etapa del sistema fotovoltaico es el convertidor Boost, debido a que su función es elevar la tensión de entrada proveniente del banco de baterías a una tensión de salida acondicionada para abastecer al inversor convencional trifásico.

Entre las topologías del convertidor Boost se analizaron la convencional y la multifase, resultando que la topología de multifase tiene grandes ventajas frente a la convencional gracias a que presenta una reducción en los esfuerzos de tensión y corriente que soportan los dispositivos semiconductores de potencia. La razón por la que ocurre lo anterior es debido a que la potencia se divide entre el número de fases empleadas. En el caso del convertidor de esta tesis se contemplaron cinco fases de diseño.

Del inversor:

La etapa de inversión del sistema fotovoltaico se realizó tanto en simulación como en implementación con la finalidad de corroborar los resultados. La topología convencional trifásica es la empleada en esta etapa del sistema. Los interruptores de potencia que conforman a esta topología requieren de técnicas de modulación para realizar su activación y desactivación y con ello generar la onda de salida de corriente alterna. Para realizar lo anterior se empleó la técnica de modulación SPWM, la cual varió dependiendo del régimen de operación empleado (tensión constante o par constante).

La diferencia de resultados entre ambos regímenes se enfoca en la amplitud de la corriente de arranque en los motores de inducción empleados como carga; resultando que en el régimen a par constante la corriente de arranque disminuyó un 71.87% en el motor de 1 Hp y 85.84% en el motor de 3 Hp, en comparación con el régimen a tensión constante, lo que resulta ser una ventaja debido a que esto evita en gran manera un sobredimensionamiento de los componentes.

Por último, se puede aseverar que considerando los alcances y limitaciones pertenecientes a este trabajo de investigación, se llevaron a cabo distintas actividades, con la finalidad de cumplir con el objetivo general del mismo, el cual es elaborar el diseño de un sistema fotovoltaico autónomo que resuelva necesidades de alto consumo de potencia, que se emplee en aplicaciones de bombeo de agua.

Dentro del desarrollo de actividades se abordaron en totalidad los objetivos específicos establecidos, ya que se llevó a cabo el diseño de cada uno de los elementos que conforman el sistema fotovoltaico autónomo, los cuales abarcan desde el arreglo de paneles fotovoltaicos adecuado para la densidad de energía requerida por el sistema, arreglo de baterías óptimo, controlador de carga, convertidor CD-CD, inversor trifásico, hasta el desarrollo de técnicas de modulación para realizar los estados de conmutación del inversor.

Además, cabe mencionar que añadido a lo establecido en el tema de tesis, el cual únicamente abarca el diseño del sistema fotovoltaico autónomo, se llevó a cabo la implementación del inversor trifásico con la finalidad de verificar los resultados obtenidos en simulación de la etapa medular del sistema fotovoltaico. De manera que se comprueba que con los datos de diseño obtenidos en esta tesis se puede interconectar cada una de las etapas del sistema diseñado, ya que se cuenta con todos los componentes físicos del sistema fotovoltaico.

6.2. Trabajos futuros

A continuación se enlistan los trabajos futuros que se consideran convenientes a realizar entorno a este trabajo de investigación:

- Implementar el sistema fotovoltaico completo incluyendo paneles, baterías y cargador de baterías, empleando los datos de diseño obtenidos en esta tesis.
- Implementar técnicas de control específicas para motores de inducción, las cuales representen un mejor desempeño del sistema de acuerdo al aprovechamiento de energía; y con ello llevar a cabo una comparación entre los mismos.

Referencias

- [1] P. J. Coldwell, "Reporte de avance de energías limpias, Primer semestre 2016," S. Secretaría de energía, Ed., ed. México, 2017.
- [2] M. P. Aparicio, *Energía solar fotovoltaica: cálculo de una instalación aislada*, 3 ed.: Marcombo, 2010.
- [3] H. O. Daniel Servitje. (2014, Julio 23). *Energía Solar Fotovoltaica*. Available: <http://www.aurasolar.com.mx/energia-solar-fotovoltaica.html>
- [4] R. A. R. Leonardo Beltrán Rodríguez, Francisco de Jesús Cafaggi Félix, Samuel Barrera Ríos, Berenice Hernández Miranda, "Balance Nacional de Energía, 2016," S. Secretaría de energía, Ed., 1 ed. México, Ciudad de México, 2017.
- [5] S. Secretaría de energía, "Promoción y capacitación para el aprovechamiento de la energía en el campo," vol. 1, ed. México, Ciudad de México, 2009, pp. 9-31.
- [6] D. A. González, "Prototipo de sistema de bombeo fotovoltaico para proyectos de cooperación al desarrollo con tecnologías apropiadas," Ingeniería, Departamento de ingeniería eléctrica, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, Madrid, 2010.
- [7] O. P. Lamingueiro. (2012, Septiembre 18). *Sistemas fotovoltaicos de bombeo: conceptos generales y componentes*. Available: <http://oscarperpinan.github.io/>
- [8] R. K. Rao, P. Srinivas, and S. Kranthikumar, "Simulation and analysis of electrical water pumping system using solar energy," in *2014 International Conference on Smart Electric Grid (ISEG)*, 2014, pp. 1-6.
- [9] B. N. Singh, B. Singh, B. P. Singh, A. Chandra, and K. Al-Haddad, "Optimized performance of solar powered variable speed induction motor drive," in *Proceedings of International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth*, 1996, pp. 58-66 vol.1.
- [10] W. E. Tamer Khatib, *Modeling of photovoltaic systems using matlab* Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2016.
- [11] E. Endo and K. Kurokawa, "Sizing procedure for photovoltaic systems," in *Proceedings of 1994 IEEE 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion - WCPEC (A Joint Conference of PVSC, PVSEC and PSEC)*, 1994, pp. 1196-1199 vol.1.
- [12] J. Swartz, A. Ghofrani, and M. Jafari, "Sizing methodology for combined renewable energy systems," in *2017 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, 2017, pp. 1-5.
- [13] A. Khare and S. Rangnekar, "Optimal sizing of a grid integrated solar photovoltaic system," *IET Renewable Power Generation*, vol. 8, pp. 67-75, 2014.
- [14] "Modelling of sizing the photovoltaic system parameters using artificial neural network," in *Proceedings of 2003 IEEE Conference on Control Applications, 2003. CCA 2003.*, 2003, pp. 353-357 vol.1.

- [15] P. G. Nikhil and D. Subhakar, "Approaches for Developing a Regression Model for Sizing a Stand-Alone Photovoltaic System," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 5, pp. 250-257, 2015.
- [16] M. Ceraolo, "New dynamical models of lead-acid batteries," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 15, pp. 1184-1190, 2000.
- [17] J. V. M. Caracas, G. d. C. Farias, L. F. M. Teixeira, and L. A. d. S. Ribeiro, "Implementation of a High-Efficiency, High-Lifetime, and Low-Cost Converter for an Autonomous Photovoltaic Water Pumping System," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, pp. 631-641, 2014.
- [18] N. Jantharamin and L. Zhang, "A new dynamic model for lead-acid batteries," in *2008 4th IET Conference on Power Electronics, Machines and Drives*, 2008, pp. 86-90.
- [19] F. Coupan, I. Sadli, I. Marie-Joseph, A. Primerose, and H. Clergeot, "New battery dynamic model: Application to lead-acid battery," in *2010 The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE)*, 2010, pp. 140-145.
- [20] R. J. Wai, W. H. Wang, and C. Y. Lin, "High-Performance Stand-Alone Photovoltaic Generation System," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, pp. 240-250, 2008.
- [21] J. H. Ugale and M. S. Pansé, "Single phase AC drive for isolated solar photovoltaic water pumping system," in *2015 International Conference on Green Computing and Internet of Things (ICGCIoT)*, 2015, pp. 1285-1287.
- [22] K. Ramya and S. R. Reddy, "Design and simulation of a photovoltaic induction motor coupled water pumping system," in *2012 International Conference on Computing, Electronics and Electrical Technologies (ICCEET)*, 2012, pp. 32-39.
- [23] B. K. Bose, *Modern power electronics and AC drives*, 1 ed.: Prentice Hall 2001.
- [24] T. M. U. Ned Mohan, William P. Robbins, *Power electronics: converters, applications, and design*, 3 ed.: John Wiley & Sons, 2007.
- [25] S. J. Chapman, *Máquinas eléctricas* 5a ed.: McGraw Hill 2012.
- [26] A. Álzate, D. M. Yarce, and M. G. Valencia, "Control de velocidad mediante relación voltajefrecuencia," *Scientia et technica*, vol. 3, pp. 19-24, 2011.
- [27] J. S. L. Pedro Ponce Cruz, *Máquinas eléctricas y técnicas modernas de control*, 2 ed.: Alfaomega, 2016.
- [28] V. S. S. P. K. Hari and G. Narayanan, "Space-Vector-Based Hybrid PWM Technique to Reduce Peak-to-Peak Torque Ripple in Induction Motor Drives," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, pp. 1489-1499, 2016.
- [29] A. F. D. José Ignacio Alonso Montes, Carlos Jiménez Suárez, Antonio Lecuna Ribot, Francisco Mellado García, José Fabián Plaza Fernández, "Energía solar fotovoltaica," ed. Madrid, España: Colegio oficial de Ingenieros de Telecomunicacion, 2002, pp. 14-23.
- [30] M. A. Abella, *Sistemas fotovoltaicos*. Madrid, España: Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), 2004.

- [31] M. S. Camilo Uzquiano, Ximena Sandy, "Capacitación e instalación de sistemas fotovoltaicos en las Comunidades de Carmen del Emero y Yolosani," C. i. d. p. tacana, Ed., 1 ed. Bolivia: Programa Alianza en Energía y Ambiente con la Región Andina Ministerio de Asuntos Exteriores de Finlandia., 2015, p. 40.
- [32] M. G. Vargas, *Manual de instalación y mantenimiento de sistemas solares fotovoltaicos*. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica, 2002.
- [33] B. U. Network, *Manuales sobre energía renovable: Solar fotovoltaica*, 1 ed. San José, Costa Rica: BUN-CA, 2002.
- [34] B. Mirshekarpour and S. A. Davari, "Efficiency optimization and power management in a stand-alone photovoltaic (PV) water pumping system," in *2016 7th Power Electronics and Drive Systems Technologies Conference (PEDSTC)*, 2016, pp. 427-433.
- [35] J. C. Herrejón, "Estudio de sistemas de bombeo fotovoltaicos," Maestría, Ingeniería electrónica, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, 2016.
- [36] S. Luo, Z. Ye, R.-L. Lin, and F. C. Lee, "A classification and evaluation of paralleling methods for power supply modules," in *Power Electronics Specialists Conference, 1999. PESC 99. 30th Annual IEEE*, 1999, pp. 901-908.
- [37] C. Wang, "Investigation on interleaved boost converters and applications," Ph. D. , Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 2009.
- [38] K. D. Coelho and I. Barbi, "A three level double-ended forward converter," in *Power Electronics Specialist Conference, 2003. PESC'03. 2003 IEEE 34th Annual*, 2003, pp. 1396-1400.
- [39] R. Salvador, "Estudio de las pérdidas por evaporación y arrastre en los sistemas de riego por aspersión: Diferencias entre riegos diurnos y nocturnos," Ingeniería, Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo, Universidad de Lleida Cataluña, España, 2003.
- [40] J. M. Tarjuelo, *El riego por aspersión: diseño y funcionamiento*, 2 ed. vol. 3: Caja de Albacete, 1992.
- [41] T. B. B. Stambouli, M. V. Zapata Ruiz, A. Martínez Cob, and J. M. Faci González, "Evaluación de las pérdidas por evaporación y arrastre y de los cambios microclimáticos durante el riego por aspersión de alfalfa," ed. Zaragoza, España: Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA), 2011, p. 11.
- [42] J. Cavero, J. M. Faci, and A. Martínez-Cob, "Relevance of sprinkler irrigation time of the day on alfalfa forage production," *Agricultural Water Management*, vol. 178, pp. 304-313, 2016.
- [43] J. Cavero Campo, J. M. Faci González, Y. F. Urrego Pereira, E. T. Medina Pueyo, M. Puig Basa, L. Jiménez, *et al.*, "El riego por aspersión nocturno y diurno en maíz," *Tierras de Castilla y León*, vol. 178, p. 5, 2012.

- [44] O. p. d. salud, "Normas de diseño para proyectos de abastecimiento de agua potable para poblaciones rurales," M. d. salud, Ed., ed. Lima, Perú, 2009, p. 26.
- [45] O. p. d. I. salud, "Guía para la selección de equipos de bombeo par sistemas de abastecimiento de agua y saneamiento para el medio rural," M. d. salud, Ed., ed. Lima, Perú, 2008, p. 39.
- [46] H. häberlin, *Photovoltaics System design and practice* 1ed. Leicester, Reino Unido: Jonh Wiley & Sons, 2012.
- [47] J. V. Roger A. Messenger *Photovoltaic Systems Engineering*, 2 ed. Boca Raton, Florida: CRC PRESS, 2005.
- [48] E. S. R. Shakya, *Training Manual for Engineers on Solar PV System* vol. 1. Kathmandu, Nepal: Alternative Energy Promotion Center, 2011.
- [49] V. A. Estrada-Cajigal, *Irradiaciones global, directa y difusa, en superficies horizontales e inclinadas, así como irradiación directa normal, en la República Mexicana*. Cuernavaca, Morelos: Solartronic, S.A. de C.V., 2005.
- [50] V. Olaya, *Sistemas de información geográfica*, 2 ed. vol. 2, 2014.
- [51] P. S. Olmos, *Sistemas de Información Geográfica (SIG)*. Madrid, España: Insituto Geológico y Minero de España, 2010.
- [52] J. I. B. C. Montserrat Gómez Delgado, *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*, 2 ed. Madrid, España: RA-MA S.A. , 2006.
- [53] M. N. P. Pravin D. Patel, Vinod P. Patel, "Design and implementation of 10 kW 6 kHz dc-dc boost converter using DSP," presented at the TENCON 2008 - 2008 IEEE Region 10 Conference, Hyderabad, India, 2009.
- [54] A. I. J. L. D. G. David R. López Flores. (2005) Diseño y consideraciones de un lazo de compensación para el convertidor tipo Boost CD-CD controldo en modo de voltaje. *Sociedad, cultura y desarrollo sostenible*. 349-362.
- [55] Á. P. Boscoda, "Introducción a los microcontroladores STM32," in *ARM Cortex-M práctico*, U. P. d. Valencia, Ed., ed Valencia,España: Departamento de sistemas e informática, 2017, p. 206.
- [56] Á. F. I. Perles, *Microcontroladores ARM Cortex-M. Salida digital en la familia STM32Fx de St. Valencia*, España: Escuela Técnica Superior de Ingeniería del diseño, 2013.
- [57] P. Y. Pérez, *Medición de tiempos con la familia de microcontroladores STM32*, 1 ed. Valencia, España: Escuela Técnica Superior de Ingeniería del diseño, 2016.
- [58] T. S. Zhang and Y. M. Li, "Data acquisition design based on the STM32," in *Advanced Materials Research*, 2012, pp. 1527-1530.
- [59] M. M. Mano, *Arquitectura de computadoras*, 3 ed.: Pearson, Prentice Hall, 1994.
- [60] R. Morales-Capora, G. Montiel-Gomez, A. Pérez-López, K. E. Hernández-Castañeda, and F. A. Vázquez-Tonix, "Diseño de un inversor trifásico e implementación del control escalar para accionar una máquina de inducción con aplicaciones en vehículos eléctricos," presented at the Congreso Internacional de Investigación Celaya, Guanajuato, México, 2016.

- [61] J. D. L. Mauricio Roldán Castro, Henry Felipe Ibañez Olaya. (2016) Diseño y Construcción de un Variador de Velocidad Aplicado a un Motor Asíncrono con Arranque Suave, para Formación Académica. *RUMBO, Red Universitaria Metropolitana de Bogotá*. 2-24.
- [62] H. R. Chamorro Vera, B. Vladimir Toro, and C. L. Trujillo Rodríguez. (2010) Diseño y simulación de un controlador PD difuso para el control de la velocidad de un motor de inducción. *Ingeniería y Desarrollo*. 62-92.

Anexos

Anexo 1. Hoja de datos FP30R06W1E3

Technische Information / Technical Information					
IGBT-Module IGBT-modules		FP30R06W1E3			
		Vorläufige Daten Preliminary Data			
IGBT, Wechselrichter / IGBT, Inverter					
Höchstzulässige Werte / Maximum Rated Values					
Kollektor-Emitter-Sperrspannung Collector-emitter voltage	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$	V_{CES}	600	V	
Kollektor-Dauergleichstrom Continuous DC collector current	$T_C = 65^{\circ}\text{C}, T_{vj\ max} = 175^{\circ}\text{C}$ $T_C = 25^{\circ}\text{C}, T_{vj\ max} = 175^{\circ}\text{C}$	$I_{C\ nom}$ I_C	30 37	A A	
Periodischer Kollektor-Spitzenstrom Repetitive peak collector current	$t_P = 1\ \text{ms}$	I_{CRM}	60	A	
Gesamt-Verlustleistung Total power dissipation	$T_C = 25^{\circ}\text{C}, T_{vj\ max} = 175$	P_{tot}	115	W	
Gate-Emitter-Spitzenspannung Gate-emitter peak voltage		V_{GES}	+/-20	V	
Charakteristische Werte / Characteristic Values					
			min.	typ.	max.
Kollektor-Emitter-Sättigungsspannung Collector-emitter saturation voltage	$I_C = 30\ \text{A}, V_{GE} = 15\ \text{V}$ $I_C = 30\ \text{A}, V_{GE} = 15\ \text{V}$ $I_C = 30\ \text{A}, V_{GE} = 15\ \text{V}$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	$V_{CE\ sat}$	1,55 1,70 1,80	2,00 V V
Gate-Schwellenspannung Gate threshold voltage	$I_C = 0,30\ \text{mA}, V_{CE} = V_{GE}, T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$		V_{GEth}	4,9	5,8 6,5
Gateladung Gate charge	$V_{GE} = -15\ \text{V} \dots +15\ \text{V}$		Q_G	0,30	μC
Interner Gatewiderstand Internal gate resistor	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$		R_{Gint}	0,0	Ω
Eingangskapazität Input capacitance	$f = 1\ \text{MHz}, T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}, V_{CE} = 25\ \text{V}, V_{GE} = 0\ \text{V}$		C_{ies}	1,65	nF
Rückwirkungskapazität Reverse transfer capacitance	$f = 1\ \text{MHz}, T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}, V_{CE} = 25\ \text{V}, V_{GE} = 0\ \text{V}$		C_{res}	0,051	nF
Kollektor-Emitter-Reststrom Collector-emitter cut-off current	$V_{CE} = 600\ \text{V}, V_{GE} = 0\ \text{V}, T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$		I_{CES}		1,0 mA
Gate-Emitter-Reststrom Gate-emitter leakage current	$V_{CE} = 0\ \text{V}, V_{GE} = 20\ \text{V}, T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$		I_{GES}		400 nA
Einschaltverzögerungszeit, induktive Last Turn-on delay time, inductive load	$I_C = 30\ \text{A}, V_{CE} = 300\ \text{V}$ $V_{GE} = \pm 15\ \text{V}$ $R_{Gon} = 15\ \Omega$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	$t_{d\ on}$	0,02 0,02 0,02	μs μs μs
Anstiegszeit, induktive Last Rise time, inductive load	$I_C = 30\ \text{A}, V_{CE} = 300\ \text{V}$ $V_{GE} = \pm 15\ \text{V}$ $R_{Gon} = 15\ \Omega$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	t_r	0,016 0,021 0,022	μs μs μs
Abschaltverzögerungszeit, induktive Last Turn-off delay time, inductive load	$I_C = 30\ \text{A}, V_{CE} = 300\ \text{V}$ $V_{GE} = \pm 15\ \text{V}$ $R_{Goff} = 15\ \Omega$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 150^{\circ}\text{C}$	$t_{d\ off}$	0,14 0,16 0,18	μs μs μs

Fallzeit, induktive Last Fall time, inductive load	$I_C = 30 \text{ A}$, $V_{CE} = 300 \text{ V}$ $V_{GE} = \pm 15 \text{ V}$ $R_{Goff} = 15 \Omega$	$T_{vj} = 25^\circ\text{C}$ $T_{vj} = 125^\circ\text{C}$ $T_{vj} = 150^\circ\text{C}$	t_f		0,045 0,06 0,065		μs μs μs
Einschaltverlustenergie pro Puls Turn-on energy loss per pulse	$I_C = 30 \text{ A}$, $V_{CE} = 300 \text{ V}$, $L_S = 45 \text{ nH}$ $V_{GE} = \pm 15 \text{ V}$, $di/dt = 2100 \text{ A}/\mu\text{s}$ ($T_{vj} = 150^\circ\text{C}$) $R_{Gon} = 15 \Omega$	$T_{vj} = 25^\circ\text{C}$ $T_{vj} = 125^\circ\text{C}$ $T_{vj} = 150^\circ\text{C}$	E_{on}		0,50 0,65 0,75		mJ mJ mJ
Abschaltverlustenergie pro Puls Turn-off energy loss per pulse	$I_C = 30 \text{ A}$, $V_{CE} = 300 \text{ V}$, $L_S = 45 \text{ nH}$ $V_{GE} = \pm 15 \text{ V}$, $du/dt = 4200 \text{ V}/\mu\text{s}$ ($T_{vj} = 150^\circ\text{C}$) $R_{Goff} = 15 \Omega$	$T_{vj} = 25^\circ\text{C}$ $T_{vj} = 125^\circ\text{C}$ $T_{vj} = 150^\circ\text{C}$	E_{off}		0,60 0,75 0,80		mJ mJ mJ
Kurzschlußverhalten SC data	$V_{GE} \leq 15 \text{ V}$, $V_{CC} = 360 \text{ V}$ $V_{CEmax} = V_{CES} - L_{sCE} \cdot di/dt$	$t_p \leq 8 \mu\text{s}$, $T_{vj} = 25^\circ\text{C}$ $t_p \leq 6 \mu\text{s}$, $T_{vj} = 150^\circ\text{C}$	I_{SC}		210 150		A A
Wärmewiderstand, Chip bis Gehäuse Thermal resistance, junction to case	pro IGBT / per IGBT		R_{thJC}		1,15	1,30	K/W
Wärmewiderstand, Gehäuse bis Kühlkörper Thermal resistance, case to heatsink	pro IGBT / per IGBT $\lambda_{paste} = 1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ / $\lambda_{grease} = 1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$		R_{thCH}		1,10		K/W
Temperatur im Schaltbetrieb Temperature under switching conditions			T_{vjop}	-40		150	$^\circ\text{C}$
prepared by: DK	date of publication: 2013-10-03						
approved by: MB	revision: 2.1						

Anexo 2. Diseño térmico para el inversor trifásico

Para calcular las pérdidas en los interruptores y diodos antiparalelo se utiliza los datos que se encuentran en la hoja de datos del módulo FP30R06W1E3. La ecuación ((A. 1) permite calcular la resistencia térmica disipador-ambiente, la cual es la variable de interés.

$$R_{\theta SA} = \frac{T_{JT} - (P_T + P_D)R_{\theta CS} - T_A - (P_T R_{\theta JC})}{4(P_T + P_D)} \quad (A. 1)$$

Dónde:

- $R_{\theta SA}$ = resistencia térmica disipador-ambiente
- $R_{\theta CS}$ = resistencia térmica encapsulado-disipador de los IGBT's
- $R_{\theta JC}$ = resistencia térmica unión-encapsulado (IGBT)
- $R_{\theta JD}$ = resistencia térmica unión-encapsulado (diodo)
- P_T = potencia disipada por cada IGBT
- P_D = potencia disipada por cada diodo
- T_A = temperatura ambiente
- T_{JT} = temperatura de unión en el IGBT

La mayoría de los parámetros de la ecuación anterior se pueden obtener de la hoja de datos del fabricante, teniendo como excepción las variables relacionadas con pérdidas en los dispositivos.

Cálculo de pérdidas en los dispositivos

- Pérdidas en IGBT

Para calcular las pérdidas totales en los IGBT se emplea ((A. 2).

$$P_T = P_{SS} + P_{SW} \quad (A. 2)$$

Dónde:

- P_T = Pérdidas totales
- P_{SS} = Pérdidas por conducción
- P_{SW} = Pérdidas por conmutación

La ecuación ((A. 3) se utiliza para calcular las pérdidas por conducción.

$$P_{SS} = I_P * V_{CEsat}(D \cos\theta) \quad (A. 3)$$

Dónde:

- I_P = Valor pico de la corriente senoidal en la salida
- V_{CEsat} = Tensión colector-emisor en saturación
- D = Ciclo de trabajo
- Θ = Ángulo de desfase entre tensión y corriente de salida

Sustituyendo los valores correspondientes y proponiendo un valor de 0.8 para el factor de potencia y ciclo de trabajo de 0.5, se obtienen las siguientes pérdidas por conducción:

$$P_{SS} = 30 A * 1.55 V(0.5 * 0.8) = 18.6 W \quad (A. 4)$$

La ecuación ((A. 5) se emplea para el cálculo de las pérdidas por conmutación

$$P_{SW} = (E_{SW(on)} + E_{SW(off)})F_{SW} \quad (A. 5)$$

Dónde:

- $E_{SW(on)}$ = Energía de conmutación en el encendido del IGBT
- $E_{SW(off)}$ = Energía de conmutación en el apagado del IGBT
- F_{sw} = Frecuencia de conmutación de los semiconductores

Sustituyendo los valores correspondientes obtenidos de la hoja de datos del módulo empleado, se obtienen las siguientes pérdidas por conmutación.

$$P_{SW} = (0.0005 J + 0.0006 J)3300Hz = 3.63 \quad (A. 6)$$

Ahora bien, empleando (A. 7) e obtienen las pérdidas totales.

$$P_T = 18.6 W + 3.63W = 22.23W \quad (A. 7)$$

- Pérdidas en diodos

La ecuación (A. 8) se emplea para el cálculo de las pérdidas de los diodos conectados en antiparalelo.

$$P_D = I_p * V_{FM}[(1 - \cos\theta) * 0.5] \quad (A. 8)$$

Dónde:

- V_{FM} = Caída de tensión del diodo en sentido directo
- Θ = Ángulo de desfase entre tensión y corriente de salida

Sustituyendo los valores correspondientes obtenidos de la hoja de datos del módulo empleado, se obtienen las siguientes pérdidas en los diodos.

$$P_D = 30 A * 1.6 V[(1 - 0.8) * 0.5] = 4.8W \quad (A. 9)$$

Una vez obtenidos los resultados de las pérdidas en los dispositivos se procede a calcular la resistencia disipador-ambiente, por medio de la (A. 4). Sustituyendo los valores correspondientes obtenidos de la hoja de datos del fabricante así como los calculados, se obtiene lo siguiente:

$$R_{\theta SA} = \frac{150 - (22.23 \text{ W} + 4.8 \text{ W})1.1 - 40 - (22.23 * 1.15)}{4(22.23 + 4.8)} = 0.337 \text{ K/W} \quad (\text{A. 10})$$

Para la selección del disipador se requiere que este tenga una resistencia térmica menor o igual a $0.3373 \text{ }^\circ\text{C/W}$. el disipador que se propone es uno marca WAKEFIELD modelo 392-300AB mostrado en la Figura A. 1. .



Figura A. 1. Disipador WAKEFIELD 392-300AB

Anexo 4. Cálculo de elementos de circuito de tiempos muertos

Para calcular los valores de los elementos del circuito generador de tiempos muertos (ver Figura A. 4) requerido por el inversor utilizado, se emplea (A. 11).

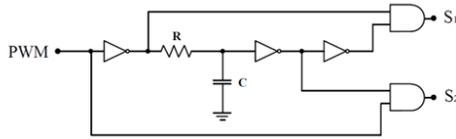


Figura A. 4. Circuito generador de tiempos muertos

$$td = (C)(R) \quad (A. 11)$$

Dónde:

- td = tiempo muerto
- C = capacitor
- R = resistencia

De acuerdo a los valores de tiempo de encendido y apagado proporcionados por el fabricante se propone un tiempo muerto (td) de $1 \mu s$ y un capacitor de 100 nF . Dando como resultado lo establecido en (A. 13).

$$R = \frac{1 \mu s}{(10 \text{ nF})} = 100 \Omega \quad (A. 12)$$

$$R = 100 \Omega \quad (A. 13)$$

Anexo 5. Diagramas esquemáticos de convertidor Boost multifase simulado en distintos programas

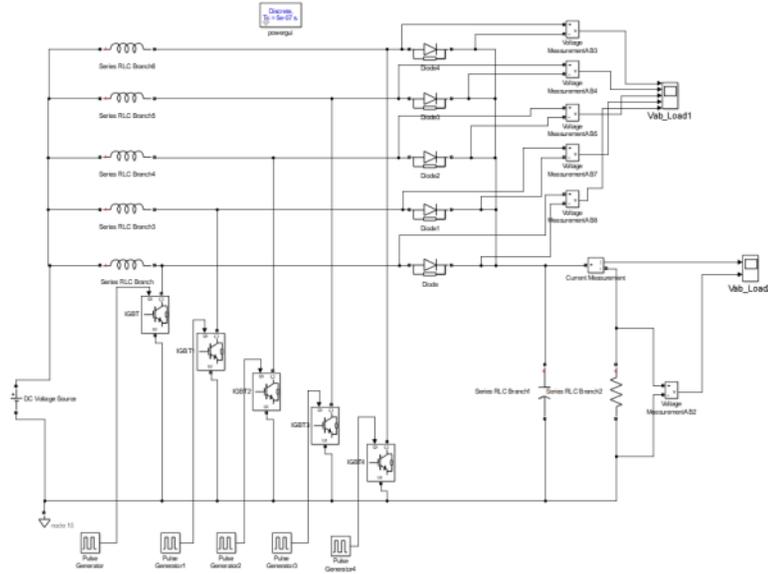


Figura A. 5. Convertidor Boost multifase simulado en Simulink®

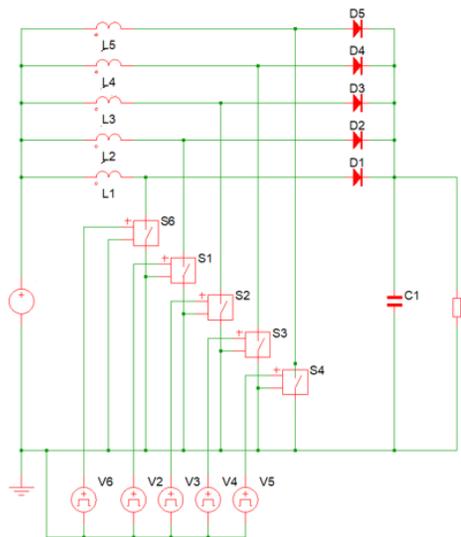


Figura A. 6. Convertidor Boost multifase simulado en Simetrix®

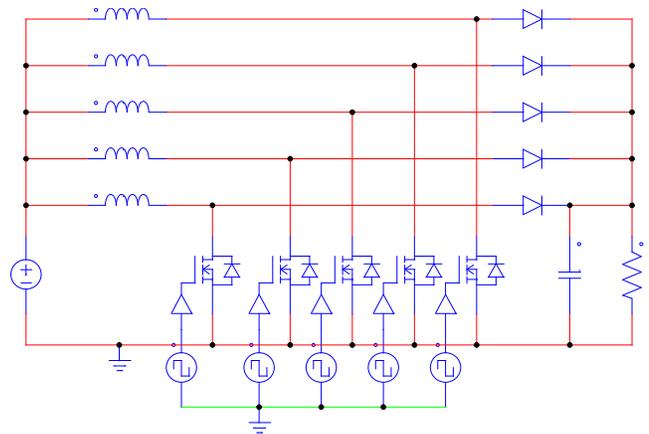


Figura A. 7. Convertidor Boost multifase simulado en PSpice®