



**EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO
DE UN INVERSOR DE POTENCIA DEL TIPO FUENTE DE
IMPEDANCIA, EN UN SISTEMA FOTOVOLTAICO**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRO EN
MANUFACTURA AVANZADA**

PRESENTA

**ING. FABIÁN SAID ALTAMIRANO ROLDÁN
ASESOR: DR. FERNANDO MARTELL CHÁVEZ**

AGUASCALIENTES, AGS; ENERO DE 2021.

CARTA DE LIBERACIÓN DEL ASESOR



INGENIERÍA MECATRÓNICA, S.A. DE C.V.
Córdova No. 204, Fracc. El Dorado, Aguascalientes, Ags.
México, C.P. 20235, Tel./Fax: (449) 9134226
www.ingmt.com

Aguascalientes, Ags., 23 de Octubre del 2019.

Mtro. Geovany González Carlos
Coordinador Académico de Posgrado
CIATEQ, A.C.

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial del Ing. Fabián Said Altamirano Roldán, una vez revisado su Proyecto Terminal de tesis/tesina, titulado "EVALUACION DE LOS PARAMETROS DE FUNCIONAMIENTO DE UN INVERSOR DE POTENCIA DEL TIPO FUENTE DE IMPEDANCIA, EN UN SISTEMA FOTOVOLTAICO" **autorizamos** que el citado trabajo sea presentado por el alumno para su revisión, con el fin de alcanzar el grado de **Maestro en Manufactura Avanzada**.

Sin otro particular por el momento, agradecemos la atención prestada.

Firma

Dr. Fernando Martell Chávez
Asesor Académico

Firma

Dra. Irma Yolanda Sánchez Chávez
Asesor en Planta

CARTA DE LIBERACIÓN DEL REVISOR



Tepeji del Río de Ocampo, Hidalgo, 21 de Enero del 2020.

Dra. María Guadalupe Navarro Rojero
Directora de Posgrado
CIATEQ, A.C.

Por medio de la presente me dirijo a usted en calidad de Revisor del proyecto terminal del alumno **Ing. Fabián Said Altamirano Roldán**, cuyo título es:

"EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO DE UN INVERSOR DE POTENCIA DEL TIPO FUENTE DE IMPEDANCIA, EN UN SISTEMA FOTOVOLTAICO"

Después de haberlo leído, corregido e intercambiado información con el alumno, y realizado los cambios que le fueron sugeridos, puede ser autorizada su impresión, a fin de que se inicien los trámites correspondientes para su defensa.

Sin otro particular por el momento, y en espera de que mis sugerencias sean tomadas en cuenta en beneficio del estudiante y la Institución, agradezco la atención prestada.

Atentamente,

M. en C. Edgar Alfredo Juárez Balderas

Tepeji Park
Calle Norte Tres No. 21
Col. Parque Industrial Tepeji, C.P. 42884
Tepeji del Río de Ocampo, Hidalgo.
T. +52 55 6252 7420
edgar.juarez@arteché.com
www.arteché.com.mx

DEDICATORIA

A mis padres Heriberto Fabián Altamirano Modad + y Adela Eugenia Roldán Lavariega, por su confianza, apoyo y formación incondicional para lograr los frutos de este esfuerzo.

A mi esposa Sandra, hijas Ximena y Victoria, por su comprensión en todo momento de mi ausencia, ya que son el motor de mi vida.

A mis hermanos, por crecer junto conmigo, por creer que no importan los obstáculos, siempre es posible superarlos.

A mis compañeros, docentes de cátedra, administradores académicos del programa de maestría en manufactura avanzada, ya que de manera incondicional me ofrecieron su apoyo.

Correspondo a la empresa Ingeniería Mecatrónica, S.A. de C.V., por proveer el foro para ejecutar el proyecto y por facilitar los recursos necesarios para el prototipo.

Mi admiración al Dr. Fernando Martell Chávez, siempre dispuesto, por su infinita paciencia, por transmitir sus conocimientos, por compartir su experiencia y por su gran espíritu de servicio.

Con gratitud a Félix E. Saucedo Serrano, Sergio I. Silva Márquez, Miguel Ángel Salazar Pinto y Julio Humberto Rosales Sandoval, estudiantes del Centro de Investigaciones en Óptica (CIO) y del Instituto Tecnológico de Aguascalientes respectivamente, por su valiosa colaboración en la investigación preliminar y diseño del prototipo.

Mi reconocimiento al CONACYT y a los centros públicos de investigación, como lo es el Centro de Tecnología Avanzada (CIATEQ) y el Centro de Investigaciones en Óptica (CIO), por proveer los espacios, los equipos y los recursos para la realización de esta iniciativa.

Al MC. Edgar Alfredo Juárez Balderas, ya que gracias a su aportación fue posible mejorar la calidad de este documento.

A todas las personas que formaron parte de este proyecto, muchas gracias, el objetivo se ha cumplido.

RESUMEN

La utilización de la tecnología solar fotovoltaica para la generación de electricidad de uso residencial, es conveniente evaluar nuevas topologías de convertidores electrónicos de potencia, que puedan presentar ventajas en la eficiencia u otros parámetros de desempeño. El trabajo de tesis reporta el diseño, construcción y puesta en marcha de un convertidor CD/CA, de topología, "Cuasi Fuente de Impedancia (QZSI)", la cual es capaz de invertir y elevar el voltaje en una sola etapa de potencia. Se confirma que, para los rangos de potencia del micro-inversor, la topología QZSI proporciona la amplificación e inversión de voltaje de manera eficiente, y además se compara el funcionamiento del prototipo utilizando dispositivos de potencia como MOSFET e IGBT. Se realiza una evaluación técnica comparativa de parámetros de entrada y salida como voltaje, corriente, potencia y eficiencia, para ambos dispositivos MOSFET e IGBT en el prototipo experimental.

El análisis de los resultados indica que es más conveniente la selección de MOSFET dada la variación natural de la radiación solar a lo largo del día, sobre todo en horas de baja radiación solar, ya que usando estos dispositivos en la topología QZSI, se obtiene un mejor desempeño en eficiencia, principalmente en bajos niveles de potencia.

Las aportaciones del trabajo, fueron la implementación y evaluación de un convertidor QZSI, la comprobación de la de amplificación e inversión de voltaje en una sola etapa de potencia y con un valor aceptable de eficiencia. Así mismo se desarrolló la experiencia en el diseño e integración de convertidores electrónicos de potencia, utilizando una metodología soportada en la simulación PSIM. Además, se publicó los resultados en el Congreso Regional de Energías Renovables (CRER) 2018, a través de la publicación de un poster y un artículo de investigación.

Palabras clave: Energía solar fotovoltaica, Inversor QZSI, Micro inversores.

ABSTRACT

The use of solar photovoltaic technology for the generation of electricity for residential use, it is convenient to evaluate new topologies of electronic power converters, which may present advantages in efficiency or other performance parameters. The thesis work reports the design, construction and commissioning of a DC/AC converter, topology, "Quasi Impedance Source (QZSI)", which is capable of inverting and raising the voltage in a single power stage. It is confirmed that, for the power ranges of the micro-inverter, the QZSI topology provides the amplification and voltage inversion in an efficient manner, and furthermore compares the operation of the prototype using power devices such as MOSFET and IGBT. A comparative technical evaluation of input and output parameters such as voltage, current, power and efficiency are made for both MOSFET and IGBT devices in the experimental prototype.

The analysis of the results indicates that the selection of MOSFETs is more convenient given the natural variation of solar radiation throughout the day, especially at times of low solar radiation, since using these devices in the QZSI topology, a better performance in efficiency is obtained, mainly at low power levels.

The contributions of the work were the implementation and evaluation of a QZSI converter, the verification of the amplification and voltage inversion in a single power stage and with an acceptable value of efficiency. Likewise, experience was developed in the design and integration of electronic power converters, using a methodology supported by PSIM simulation. In addition, the results were published at the Regional Renewable Energy Congress (CRER) 2018, through the publication of a poster and a research paper.

Key words: Photovoltaic solar energy, QZSI Inverter, Micro inverters.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CARTA DE LIBERACIÓN DEL ASESOR	I
CARTA DE LIBERACIÓN DEL REVISOR.....	II
DEDICATORIA.....	III
RESUMEN.....	IV
ABSTRACT	V
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	VI
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	2
1.3 OBJETIVO DE LA TESIS	3
1.4 JUSTIFICACIÓN	4
1.5 HIPÓTESIS.....	6
1.6 ESTADO DEL ARTE.....	6
CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	9
2.1 ENERGÍA SOLAR	9
2.2 IRRADIACIÓN SOLAR.....	9
2.3 INSOLACIÓN.....	11
2.4 GEOMETRÍA SOLAR.....	12
2.5 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA	13
2.6 SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO	15
2.7 PANEL SOLAR.....	16
2.8 EFICIENCIA DE UN PANEL SOLAR	18
2.9 SEÑAL PERIÓDICA.....	21
2.10 DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS DE POTENCIA	22
2.10.1 MOSFET	22

2.10.2 IGBT.....	24
2.11 CONVERTIDOR ELECTRÓNICO DE POTENCIA	25
2.12 CONVERTIDOR CON SEGUIMIENTO DE PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA MPPT	26
2.13 CONVERTIDOR CON MODULACIÓN DE ANCHO DE PULSO PWM.....	27
2.14 INVERSOR DE POTENCIA DEL TIPO FUENTE DE IMPEDANCIA ZSI	29
2.15 INVERSOR DE POTENCIA DEL TIPO CUASI FUENTE DE IMPEDANCIA QZSI	31
2.16 PRUEBA ESTADÍSTICA	33
2.17 MEDIDAS DE DISPERSIÓN	33
2.18 PRUEBAS DE HIPÓTESIS.....	36
CAPÍTULO 3: PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN	39
3.1 DISEÑO DEL CIRCUITO DE INTERFASE.....	39
3.2 ALGORITMO DE CONTROL DEL QZSI	40
3.3 SIMULACIÓN EN PSIM	45
3.4 IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO DE CONVERTIDOR QZSI	46
CAPÍTULO 4: RESULTADOS	50
4.1 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS	49
4.1.1 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS CON 5 VOLTS A 30 KHZ	49
4.1.2 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS CON 30 VOLTS A 30 KHZ	50
4.2 EVALUACIÓN E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS	51
4.3 PRUEBA DE HIPÓTESIS PARA UN VALOR DE ENTRADA DE 5 VOLTS	55
4.4 PRUEBA DE HIPÓTESIS PARA UN VALOR DE ENTRADA DE 30 VOLTS	57
CONCLUSIONES	59
APORTACIÓN DE LA TESIS	60
APORTACIÓN SOCIAL DE LA TESIS	61
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
Figura 1.1: Diagrama del convertidor QZSI	2
Figura 1.2: Temperatura media mundial en superficie.....	4
CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS	9
Figura 2.1: Zonas con mayor recurso solar en el mundo	10
Figura 2.2: Zonas con mayor recurso solar en México	10
Figura 2.3: Representación de la transformación de la energía solar fotovoltaica	11
Figura 2.4: Insolación global horizontal por la NASA 2016 - 2017.....	11
Figura 2.5: Insolación global horizontal por la NASA.....	12
Figura 2.6: Trayectoria solar diaria y anual	13
Figura 2.7: Evolución de la potencia fotovoltaica instalada en el mundo.....	14
Figura 2.8: Reporte de la capacidad global de energía renovable 2018.....	14
Figura 2.9: Elementos de un sistema Solar Fotovoltaico	15
Figura 2.10: Estructura básica de una celda fotovoltaica	16
Figura 2.11: Arreglo de múltiples celdas fotovoltaicas interconectadas entre sí	17
Figura 2.12: Unión N – P en una celda fotovoltaica	18
Figura 2.13: Eficiencia de los paneles solares a través del tiempo	19
Figura 2.14: Panel solar con sistema de seguimiento solar de un eje	20
Figura 2.15: Panel solar fijo	20
Figura 2.16: Energía producida por un sistema fotovoltaico con instalación fija.....	21
Figura 2.17: a) Señal sinusoidal Figura 2.17: b) Señal cuadrada	21
Figura 2.18: Símbolos de dispositivos básicos utilizables en Electrónica de Potencia ...	22
Figura 2.19: Símbolo y curvas V-I de un MOSFET	23
Figura 2.20: a) Estructura de un IGBT V-I b) curva de estado de bloqueo, c) curva de estado de conducción	24

Figura 2.21: Diagrama a bloques de un sistema de electrónica de potencia	25
Figura 2.22: P-V I-V Curva de operación de una celda solar.....	27
Figura 2.23: Representación de la modulación de una señal cuadrada con PWM	28
Figura 2.24: Modulación de pulsos a partir de una señal cuadrada para generar señal sinusoidal	28
Figura 2.25: Modulación de pulsos para la disminución de la frecuencia Hz	29
Figura 2.26: Estructura básica de la topología ZSI	30
Figura 2.27: Estructura básica de la topología QZSI	31
Figura 2.28: Estado de corto circuito y conmutación.....	32
Figura 2.29: Representación gráfica de la media aritmética	33
Figura 2.30: Representación de conjunto de datos y su media aritmética muestra 1..	34
Figura 2.31: Representación de conjunto de datos y su media aritmética muestra 2..	34
Figura 2.32: Nivel de significancia de la distribución de probabilidades	38
CAPÍTULO 3: PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN	39
Figura 3.1: Circuitos de disparos para el prototipo	40
Figura 3.2: Patrón de pulsos para la etapa de potencia	41
Figura 3.3: Comparación de señales del sistema	41
Figura 3.4: Puente H	42
Figura 3.5: Esquema de la técnica SPWM	44
Figura 3.6: Implementación del SPWM en PSIM	45
Figura 3.7 Circuito del QZS para simulación en PSIM	45
Figura 3.8: Gráfico del voltaje de salida en el circuito QZSI.....	46
Figura 3.9: Circuito del QZSI simulado en el software PSIM	46
Figura 3.10: Prototipo de convertidor QZSI con foco de 60W	47
CAPÍTULO 4: RESULTADOS	49
Figura 4.1: Forma de onda del voltaje de salida del convertidor.....	52

Figura 4.2 Evaluación comparativa del resultado de la eficiencia entre MOSFET e IGBT con 5 y 10 volts.....	53
Figura 4.3: Evaluación comparativa del resultado de la eficiencia entre MOSFET e IGBT con 15 y 20 volts.....	54
Figura 4.4: Evaluación comparativa del resultado de la eficiencia entre MOSFET e IGBT con 25 y 30 volts.....	54
Figura 4.5: Prueba de hipótesis H_0 con los promedios de las eficiencias obtenidas en la tabla 4.1 y tabla 4.2	55
Figura 4.6: Comparación de los promedios de las eficiencias obtenidas en la tabla 4 y tabla 4.2.....	56
Figura 4.7: Prueba de hipótesis comparación de las eficiencias obtenidas en la tabla 4.3 y tabla 4.4	57
Figura 4.8: Comparación de los promedios de las eficiencias obtenidas en la tabla 4 y tabla 4.4.....	58

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 4: RESULTADOS	49
<i>Tabla 4.1: Parámetros de prueba obtenidos con una tensión de 5 volts para IGBT</i>	49
<i>Tabla 4.2: Parámetros de prueba obtenidos con una tensión de 5 volts para MOSFET</i>	50
<i>Tabla 4.3: Parámetros de prueba obtenidos con una tensión de 30 volts para IGBT</i>	51
<i>Tabla 4.4: Parámetros de prueba obtenidos con una tensión de 30 volts para MOSFET</i>	51

GLOSARIO Y ABREVIATURAS

Amplificación:	Incremento de la intensidad de corriente, la tensión o la potencia de la señal que se le aplica a su entrada, aumento en la señal de salida.
Amplitud de una señal:	Es el valor máximo que tiene una señal, considerada desde el valor "0".
Arduino:	Placas de desarrollo de software, compuestas por micro controladores, elementos pasivos y activos.
CA:	Corriente Alterna, se refiere al flujo de carga eléctrica en la que la magnitud y el sentido varían cíclicamente.
CC:	Corriente continua, se refiere al flujo continuo de carga eléctrica a través de un conductor.
Ciclo de una señal:	La onda se repite con un mismo orden se dice que ha completado un patrón. El ciclo está formado por un semi ciclo positivo y otro negativo.
CompactRIO:	Controlador integrado de procesamiento en tiempo real para comunicación y procesamiento de señales con matrices de compuertas programables.
Corriente:	El flujo de carga eléctrica o electrones que recorre un material, siendo la relación del voltaje entre la resistencia eléctrica.
Eficiencia:	La producción de más con menos energía, es la relación de la potencia de salida entre la potencia entrada.
Energía Solar Fotovoltaica:	Es una fuente de energía que produce electricidad de origen renovable, obtenida directamente a partir de la radiación solar

mediante un dispositivo semiconductor denominada celda o modulo fotovoltaico.

- Fase:** Describe la posición de la forma de onda relativa al instante de tiempo 0.
- Frecuencia (f):** Es la cantidad de periodos o ciclos en un segundo cuya magnitud son los Hz. La frecuencia es la inversa del periodo. $f=1/T$.
- IGBT:** Del inglés Insulated Gate Bipolar Transistor, es un transistor bipolar de puerta aislada que se aplica como interruptor controlado de circuitos eléctricos.
- Impedancia:** Es la medida de oposición que presenta un circuito a una corriente cuando se aplica una tensión.
- Micro Inversor:** Es un dispositivo fotovoltaico que convierte la corriente directa a corriente alterna.
- MOSFET:** De inglés (Metal- Oxide- Semiconductor Field- Effect transistor) es un transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor, es un transistor utilizado para amplificar o conmutar señales electrónicas.
- Período (T):** Es la cantidad de tiempo que necesita una señal para completar un ciclo; se mide en "segundos", $T=1/f$.
- Potencia:** Cantidad de energía eléctrica o trabajo que se transporta o consume en una determinada unidad de tiempo.
- Prototipo:** Modelo diseñado para la demostración, prueba y análisis, antes de su implementación final o en serie.
- PSIM:** Es un software para simulación de circuitos electrónicos de potencia.

- PYME:** Acrónimo para la Pequeña y Mediana Empresa.
- QZSI:** Del inglés Quazi- Z- Source Inverter, dispositivo electrónico que permite convertir la corriente continua en corriente alterna, el cual es capaz de invertir y elevar el voltaje en una sola etapa de potencia a través de su red Cuasi fuente de impedancia.
- Tensión Eléctrica:** Es una magnitud física que cuantifica la diferencia de potencial eléctrico entre 2 puntos (Volts).

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

En el mundo, más de 1000 millones de personas viven sin electricidad, y otros 3000 millones utilizan combustibles contaminantes como leña u otra biomasa para cocinar o proveer calefacción sus viviendas (1). Además el crecimiento de la población ha incrementado el requerimiento energético global, generando una fuerte competencia por suplirla, a través de soluciones rápidas y económicas, lo que ha llevado a utilizar inconscientemente combustibles fósiles de forma no apropiada, lo que genera contaminación del aire en espacios abiertos y cerrados con impactos generalizados en la salud y medio ambiente (2). En la actualidad es necesario hacer frente a la problemática y al cambio climático (3), por lo tanto, se plantea la energía solar fotovoltaica como una alternativa sustentable para la generación de energía eléctrica, considerando los avances tecnológicos y el estudio de algunos de sus elementos esenciales como paneles fotovoltaicos o convertidores de corriente directa a corriente alterna (CD/CA).

La energía fotovoltaica se ha convertido en una fuente de energía renovable prometedora, dado que los costos para adquirir paneles fotovoltaicos se han vuelto más accesibles en el mercado, ya que los avances tecnológicos han logrado mejorar su desempeño, peso estructural y flexibilidad. Sin embargo, la variabilidad de la entrega de voltaje de una celda fotovoltaica sigue siendo un reto debido a la temperatura y a la irradiación solar. Los convertidores tradicionales "fuente de voltaje" (VSI), no son capaces manejar de forma eficiente la conversión de la energía, lo cual convierte a ésta topología poco factibles por costos elevados de implementación (4).

Este proyecto consiste en diseñar y construir un convertidor de potencia de topología QZSI (figura 1.1), para la conversión de energía solar fotovoltaica, con el propósito de evaluar su funcionamiento utilizando MOSFET e IGBT como dispositivos electrónicos de potencia. Se realiza una evaluación técnica comparativa de parámetros de entrada y salida como voltaje, corriente, potencia y eficiencia, para ambos dispositivos, con la finalidad de validar el diseño del QZSI y seleccionar con cuales componentes se logra un mejor desempeño.

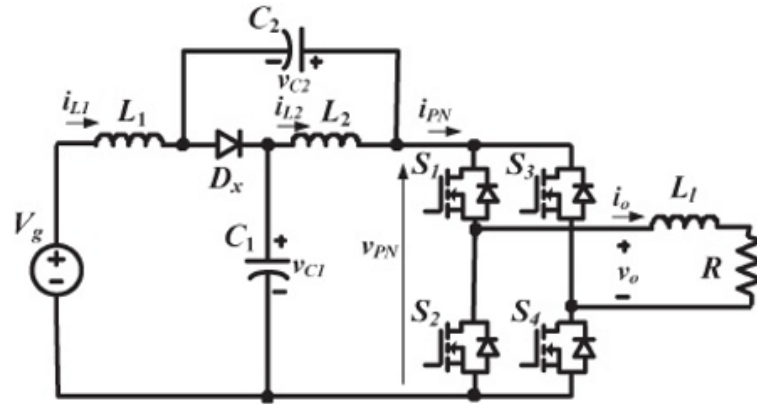


Figura 1.1: Diagrama del convertidor QZSI (5)

La investigación realizada, describe los objetivos, diseño metodológico y las consideraciones requeridas para la evaluación de los parámetros de funcionamiento, que distinguen a un Inversor de Potencia del tipo Cuasi Fuente de Impedancia QZSI (6).

El objetivo es evaluar la relación entrada – salida en el prototipo en términos de eficiencia y de esta forma evaluar las pérdidas de energía tanto estáticas como dinámicas. La evaluación tiene lugar realizando pruebas y análisis a un prototipo QZSI diseñado para aplicaciones fotovoltaicas, como fuente de energía renovable.

1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Se debe contar con convertidores más robustos, confiables que impacten el costo y retorno de inversión de los sistemas fotovoltaicos, de ahí que se tienen pérdidas en la conversión energética por la conmutación y la interacción de sus elementos pasivos que integran al convertidor. Las restricciones en la calidad de la señal de salida de estos convertidores afectan su rendimiento por lo que se ve reducida la confianza de los usuarios y la proliferación de los sistemas fotovoltaicos como fuente de energía.

Ante ésta deficiencia comparada contra las redes eléctricas habituales o convencionales, se tiene la necesidad de evaluar la eficiencia en la etapa de potencia, además de generar conocimiento en la disciplina y coadyuvar en líneas de

investigación relacionadas al desarrollo de productos de conversión de la energía aportando tecnología al país.

1.3 OBJETIVO

1.3.1 Objetivo general

Diseñar, construir y evaluar un prototipo de inversor del tipo fuente de impedancia QZSI, para la conversión de energía solar fotovoltaica, que logre un buen desempeño en términos de eficiencia y validar la topología sea base de futuros desarrollos tecnológicos.

1.3.2 Objetivos específicos

- 1) El desarrollo de un prototipo de inversor del tipo fuente de impedancia, que tenga un nivel de madurez tecnológica 4, que implica una validación del sistema en un ambiente de laboratorio.
- 2) Evaluar la topología QZSI en el convertidor electrónico de potencia CC/CA, para verificar su eficiencia u otros parámetros de desempeño.
- 3) Validar el diseño del QZSI y seleccionar los componentes electrónicos de potencia con el que se logra un mejor desempeño, para un nivel de potencia de hasta 150W.
- 4) Verificar la capacidad del QZSI de Invertir y elevar el voltaje en una sola etapa de potencia, a través de una red de impedancia, así como evaluar técnicas vigentes de modulación de ancho de pulso.
- 5) Documentar la investigación, redactar un artículo científico y exponerlo en un foro Nacional e internacional.
- 6) Desarrollar experiencia en el diseño e integración de convertidores electrónicos de potencia.
- 7) Reunir a un equipo de trabajo multidisciplinario para el desarrollo del proyecto o varios proyectos.
- 8) Realizar una aportación social a la comunidad
- 9) Obtener el grado de Maestro en Manufactura Avanzada.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Es evidente contribuir en la investigación, análisis de métodos y aplicación de herramientas, así como en prototipos que permitan evaluar topologías de convertidores electrónicos de potencia, que sean viables de desarrollar a nivel nacional. Modelos que aporten conocimiento en forma en que son diseñados y construidos para aprovechar los recursos del sol y lograr que la conversión de la energía sea más eficiente.

El calentamiento global es un tema muy discutido en los principales foros de líderes mundiales. La advertencia es clara o el calentamiento global producirá daños irreversibles en nuestro planeta. El aumento en la temperatura global podría llegar hasta los 4.5°C para el 2100, si los países no actúan (7). En el 2018 el calentamiento global de la superficie terrestre registró valores hasta de 1.2 °C mostrando aspectos ambientales catastróficos. En la figura 1.2 se puede apreciar la temperatura media mundial en la superficie global durante el 2017, comparada contra la media de los períodos de 1850 a 1900. La década de 2008 a 2017 aparece en rojo como se muestra en la figura 1.2 (8).

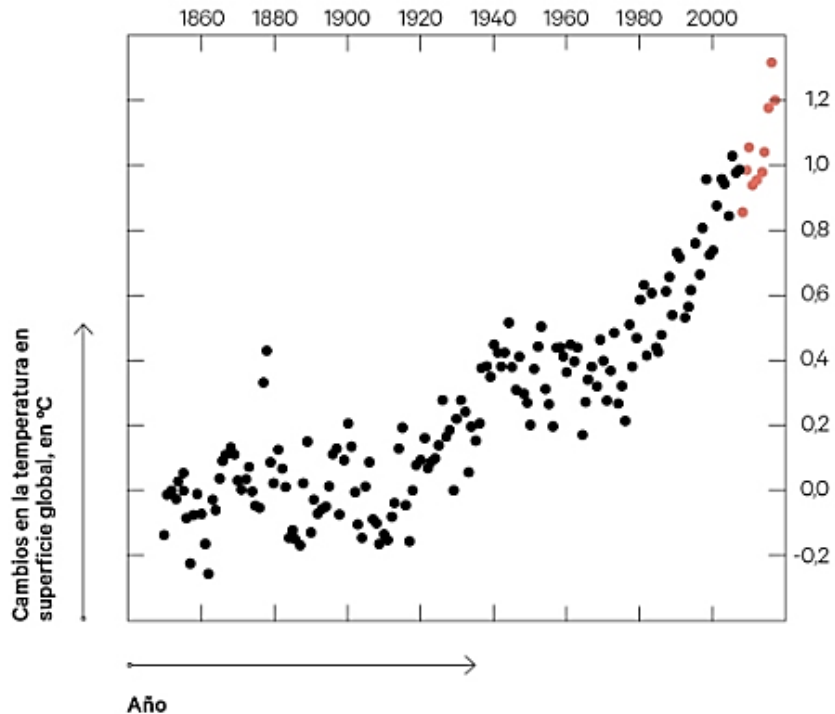


Figura 1.2: Temperatura media mundial en superficie (8).

Por consiguiente, la urgencia ha aumentado para muchos países y organismos no gubernamentales, las acciones para evitar una catástrofe que amenace a la civilización están muy por debajo de lo requerido.

El proyecto pretende ofrecer conocimiento y opciones para aprovechar de manera más eficiente las iniciativas actuales de uso de energías renovables, como una manera activa de ayudar a disminuir el cambio climático en el planeta. Permite a individuos y/o poblaciones que se encuentran aisladas o alejadas del suministro energético convencional como gas, electricidad, combustible, etc., de manera que busquen alternativas para alimentar los aparatos eléctricos en un entorno doméstico.

La legislación energética mexicana tiene una alta prioridad en la explotación de hidrocarburos para la generación de electricidad. El uso de fuentes renovables está desplazada a un segundo nivel de prioridad, sin embargo, se planteó la meta en México de que para el 2024, el 35% de la electricidad se generó con fuentes limpias. La Comisión Federal de Electricidad (CFE), distribuye en México menos del 40% de sus ventas de electricidad a 37 millones de casa habitación y casi 4 millones en Pymes (9).

El sistema que se evalúa en el trabajo de investigación es para uso interconectado a la red, sin embargo, en los sistemas aislados, lo más conveniente es utilizar un controlador para inversores que se usan para alimentar cargas de AC.

Por lo tanto, se tiene una gran oportunidad si el mercado fuera sustituido por suministros de energía a través de paneles solares fotovoltaicos que se interconectarán a la red eléctrica. Debido a esto el incremento en la eficiencia energética durante la etapa de conversión de la energía, la inversión y amplificación, es de vital importancia para que sea factible.

La gran mayoría de Micro inversores, son poco accesibles en términos de costo, sin embargo muchos de estos dispositivos tienen costos elevados, mismos que son de mayor durabilidad, más eficientes y con pocos gastos de mantenimiento, muy pocos de origen nacional (10). En el trabajo de investigación se construye un prototipo de alta eficiencia.

Al diseñar y fabricar micro inversores para el uso de energía solar fotovoltaica, se apoya al mercado en crecimiento y se favorece la creación de nuevos empleos en el sector de energías renovables.

Los hidrocarburos o combustibles fósiles se agotan, pero también existen riesgos muy elevados, derivados de la distribución asimétrica, la sobre producción y el consumo en las próximas décadas, sobre todo por la tendencia a ser sustituidos por tecnologías alternas más limpias y efectivas en costo (11).

Las energías renovables serán uno de los pilares del desarrollo económico y social en todos los países en el futuro cercano.

1.5 Hipótesis

En sistemas fotovoltaicos con niveles de potencia de hasta 150W, un Micro inversor de CC/CA de topología QZSI, utilizando dispositivos MOSFET, es más eficiente que con dispositivos IGBT.

1.6 ESTADO DEL ARTE

En el mercado existe una gran variedad de convertidores y dispositivos electrónicos de potencia, en diferentes topologías para aplicaciones fotovoltaicas, dentro del campo residencial.

Uno de los convertidores más utilizados y con grandes promesas en el campo de la electrónica de potencia, para la generación de energía solar fotovoltaica residencial, son los de topología Z, que se distinguen por tener dos etapas de conversión en un solo dispositivo, acoplando la etapa de conversión de entrada, con la etapa de conversión de salida de corriente alterna (12).

La topología ZSI, es una topología emergente, que permite la conversión de corriente directa a alterna, con la característica de convertir la energía en una sola etapa, con propiedades interesantes, que permite en comparación con otras topologías, reducir el costo de fabricación, reducir el volumen del dispositivo e incrementar la eficiencia, debido a la cantidad limitada de componentes. La topología QZSI, además de las

características del ZSI, permite acoplar acumuladores de energía, o la interconexión con bancos de baterías (6).

La comparación entre estas topologías, o entre sí misma, con variantes en su estructura de "hardware" o "software", ha llevado a los investigadores a la búsqueda de mejorar su eficiencia, desempeño y costo.

En marzo de 2019, la revista internacional IJRTE (*International Journal of Recent Technology and Engineering*), publicó en la India, un artículo en donde se compara el desempeño de un QZSI (*Quazi Z-source inverter*), con un BSL-QZSI (*Boost Switched based – QZSI*). Este tipo de inversor, se utiliza como interfaz, principalmente para conectarse en aplicaciones de conversión de corriente de entrada CC de bajo voltaje, a corriente de salida CA de alto voltaje, para reducir las etapas de la conversión y la cantidad de componentes. Ambos circuitos fueron simulados utilizando una técnica PWM para comparar su desempeño, en donde se concluye que el QZSI tiene mejor desempeño que el BSL-QZSI, en términos de conversión de corriente. (13).

También en enero de 2019, la revista "MDPI Journal", publicó un artículo, en donde se presenta la evaluación del desempeño de un inversor del tipo QZSI modernizado, para un sistema de acondicionamiento de energía fotovoltaica, en donde se busca mejorar el desempeño del sistema, a través de la alta capacidad de amplificación durante la etapa de conversión, debido a la variación de la irradiación solar y la temperatura (14).

Un artículo publicado en octubre de 2019 por la IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), muestra una nueva estrategia de control, para minimizar los requerimientos de capacitancia, en un sistema fotovoltaico que utiliza la topología QZSI. En un sistema fotovoltaico convencional, los capacitores son utilizados para este propósito, sin embargo son considerados como uno de los componentes más propensos a fallas en un inversor, por lo tanto se busca minimizar la demanda en el requerimiento de capacitancia, para reducir el estrés en el dispositivo y por consecuencia disminuir la probabilidad de falla (15).

Como es de apreciarse, se encuentran publicados en la red mundial, artículos muy recientes sobre la topología QZSI, tiene gran demanda en las principales revistas científicas y tecnológicas, y se pretende mejorar la eficiencia en la conversión de la energía de la tecnología actual, así mismo reducir el costo de su implementación.

Cabe señalar que, en la literatura, México cuenta con escasa participación, en el desarrollo e investigación de aplicaciones tecnológicas, en el campo de la generación y conversión de energía solar fotovoltaica.

CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 ENERGÍA SOLAR

El sol por excelencia es una fuente de energía renovable y limpia, una de las más abundantes del planeta. La energía del sol llega a la tierra por 2 vías; de forma directa o indirecta. Además, la energía solar no es uniforme en la tierra, es variable de acuerdo a la zona geográfica y al horario.

La emisión de la radiación solar es llamada constante solar, sin embargo el término empleado en este trabajo de investigación será el de irradiación solar (16).

2.2 IRRADIACIÓN SOLAR

La energía solar llega a la tierra a través de los rayos de luz que incide en la tierra en forma de energía electromagnética (luz, calor y rayos ultravioleta). Se tiene en la superficie atmosférica una radiación solar de aproximadamente unos $1,366 \pm 7 \text{ W/m}^2$, según lo medido por múltiples satélites durante los últimos 30 años (17). Emite de manera continua 62,600 kilowatts por cada metro cuadrado de la superficie terrestre (18).

En las siguientes imágenes (Figuras 2.1 y 2.2) se muestran las regiones más favorecidas por este recurso natural en el mundo, se puede observar que México es un país que tiene este beneficio entre 3.5 a 6.4 KWh/m². En la ciudad de Aguascalientes debido a su posición geográfica, se tiene una irradiación media por día de entre 5.2 a 5.8 KWh/día (16).

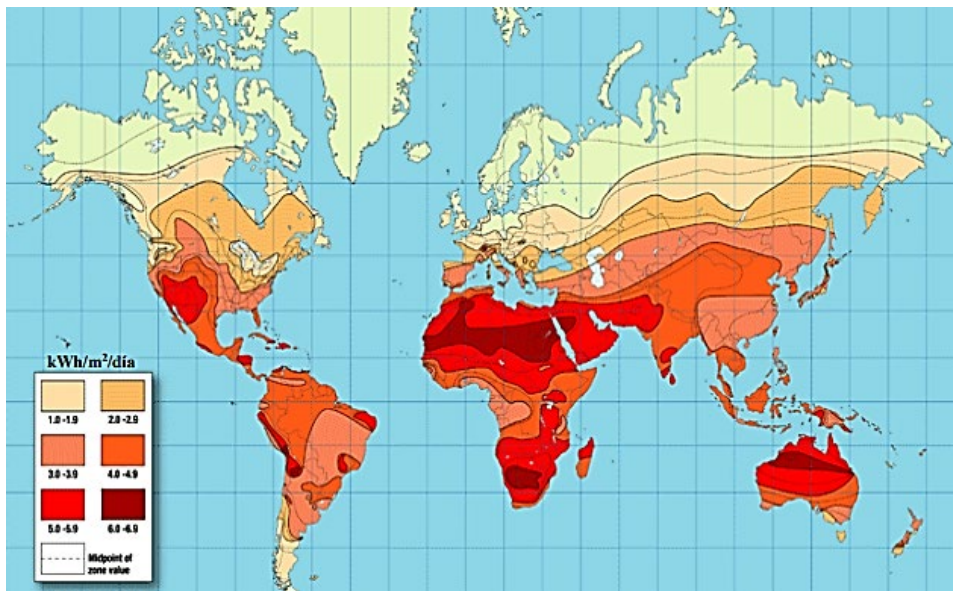


Figura 2.1: Zonas con mayor recurso solar en el mundo (16)

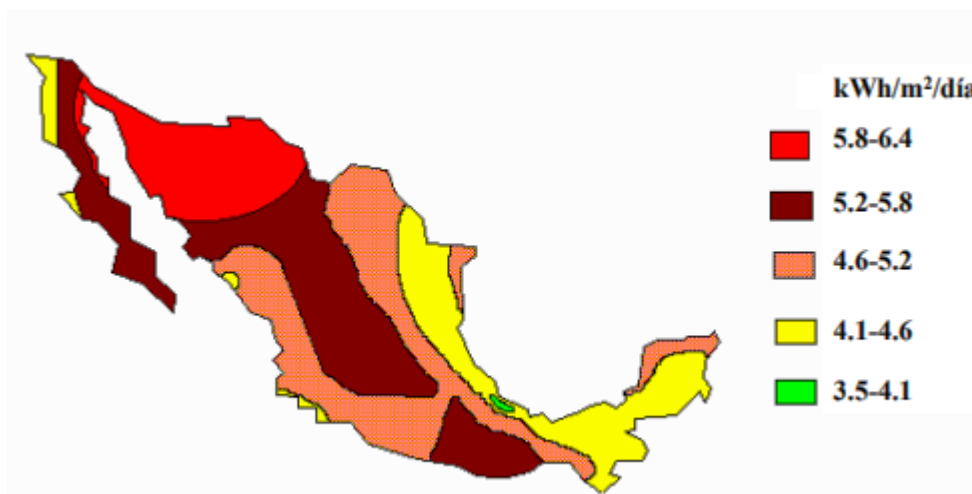


Figura 2.2: Zonas con mayor recurso solar en México (16)

La energía solar puede transformarse en energía solar térmica, a través de la radiación electromagnética genera calor por medio de colectores solares.

Es posible transformar la energía solar a energía solar fotovoltaica, a través de paneles solares, los cuales transforman la radiación electromagnética de la energía del sol en electricidad.



Figura 2.3: Representación de la transformación de la energía solar fotovoltaica (19)

2.3 INSOLACIÓN

La insolación es el número de horas en un periodo determinado de tiempo durante el cual una superficie recibe la luz del sol en kWh/m²/día. En México el potencial solar es enorme de acuerdo a lo que se observa en la Figura 2.2, dependiendo de la zona geográfica y el periodo mensual, la insolación normal directa (DNI) va de los 3.5 hasta los 7.7 kWh/m²/día (figura 2.4). En Aguascalientes un promedio anual de 5.9 kWh/m²/día (figura 2.5) (20).

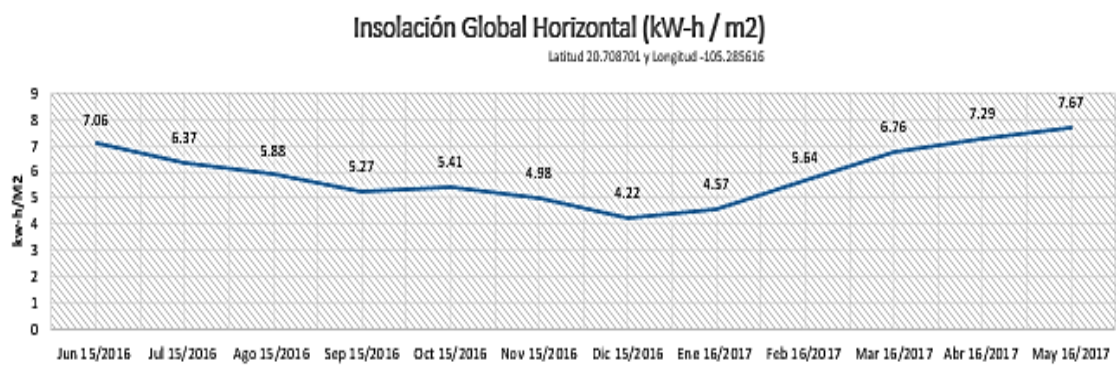


Figura 2.4: Insolación global horizontal por la NASA 2016 - 2017. (20).

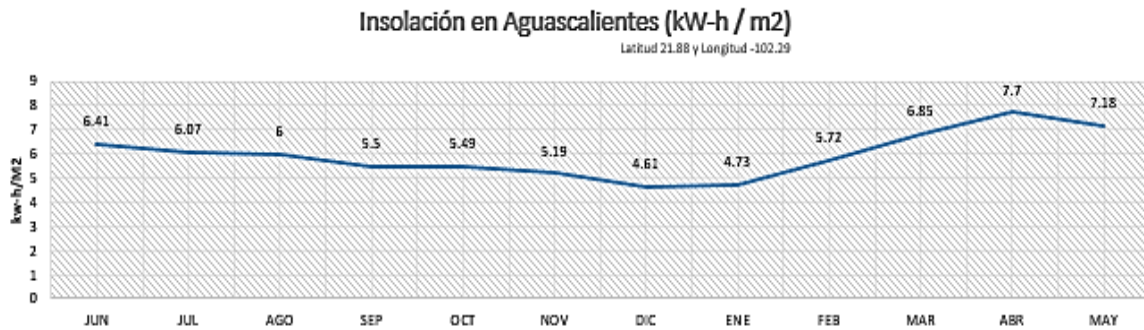


Figura 2.5: Insolación global horizontal por la NASA (20).

2.4 GEOMETRÍA SOLAR

La tierra gira sobre su propio eje polar durante 24 horas y alrededor del sol durante 365 días en una trayectoria elíptica de baja excentricidad. Entre el eje polar y el plano de la elipse hay un ángulo de 23.45° (21) . En esta trayectoria la tierra se encuentra en 4 estaciones en el año con las siguientes características:

- **Solsticio de junio:** Declinación máxima, días más largos en verano, el sol nace por el noreste y se pone por el noroeste en el hemisferio norte.
- **Solsticio de diciembre:** Declinación mínima, días más cortos en invierno, el sol nace en el sureste y se pone por el suroeste en el hemisferio norte.
- **Equinoccio de marzo y septiembre:** Declinación nula, la duración del día y la noche coinciden, el sol nace por el este y se pone por el oeste.

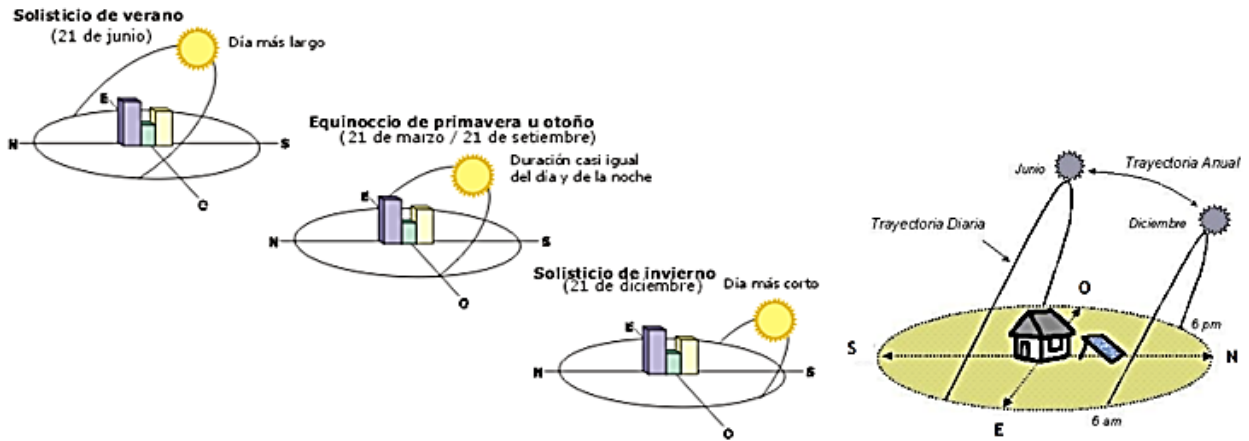


Figura 2.6: Trayectoria solar diaria y anual (22)

2.5 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

La energía solar no tiene costo, sin embargo, transformarla en energía eléctrica ha sido un reto en los últimos años para la ciencia y la tecnología. La energía solar fotovoltaica ha estado en evolución constante y estudios recientes afirman que la producción de energía fotovoltaica va en aumento y que los costos de producción resultan similares y en algunos casos inferiores al de otras energías renovables como la eólica e hidráulica o convencionales.

De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (*IEA por sus siglas en inglés International Energy Agency*) para finales del 2017 se tenían instalados 402 GW de energía fotovoltaica en el mundo, con estimaciones de costo de energía producida (*conocido como LCOE, siglas del término inglés Levelized Cost of Electricity*) de 0.10 a 0.27 Euros/KWh para plantas en tejado residencial. (23)

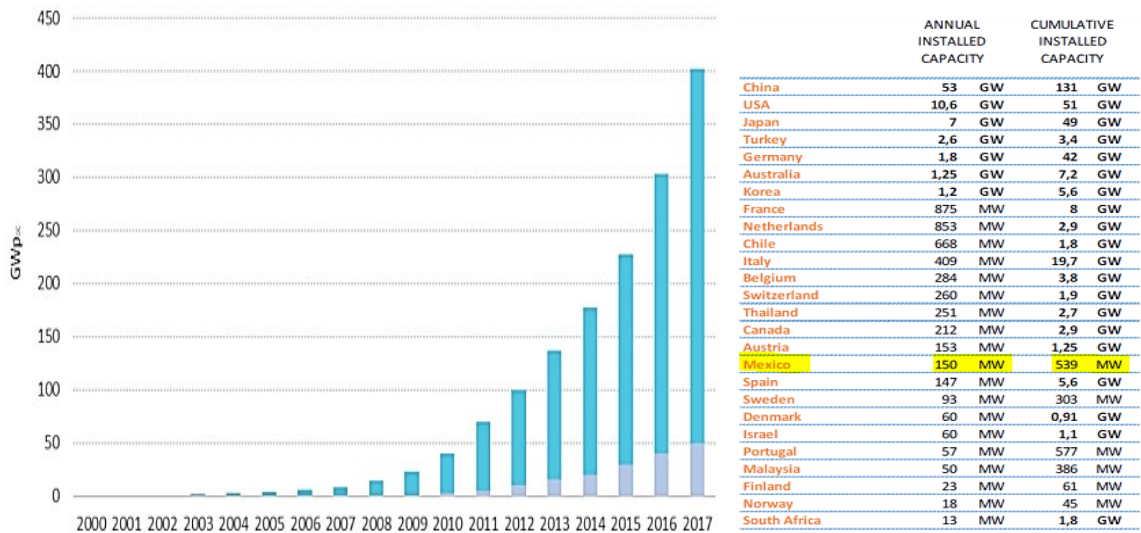


Figura 2.7: Evolución de la potencia fotovoltaica instalada en el mundo (24).

La IEA coloca a China en el liderato con una capacidad instalada y acumulada de energía solar fotovoltaica de 53/131GW, 10.6/51 GW en E.U.A y 7/49 GW en Japón. México figura en el lugar 17 con 150/530 MW.

Por otro lado, las energías renovables representaron el 70% de la ganancia neta de capacidad mundial de generación de energía en el 2017. Según el informe sobre la situación mundial REN21 el GSR (25), la nueva capacidad solar fotovoltaica PVs alcanzó niveles record en el 2017, 29% más que en el 2016, se añadieron al sistema de suministro eléctrico 98 GW a nivel mundial.

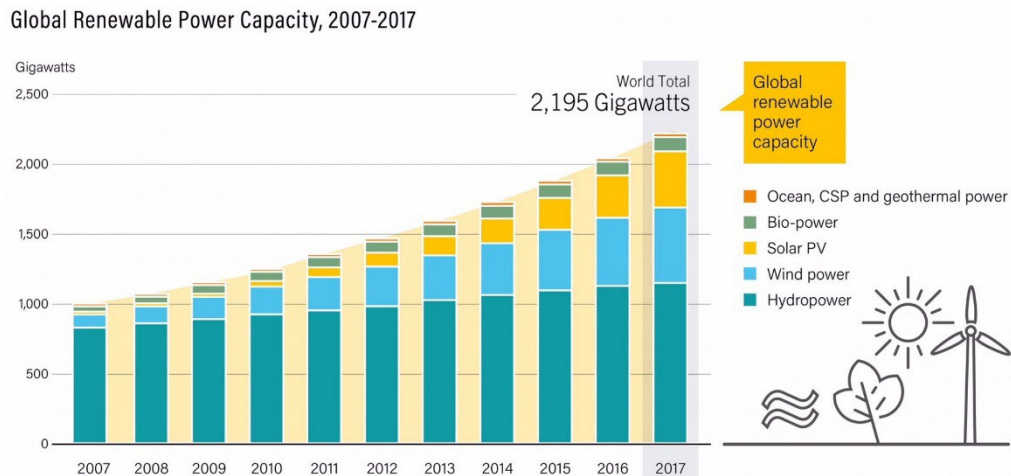


Figura 2.8: Reporte de la capacidad global de energía renovable 2018 (25).

La utilización de energía solar en el suministro de energía eléctrica es una alternativa para reducir el consumo de energía eléctrica obtenida de materiales fósiles (26).

2.6 SISTEMA SOLAR FOTOVOLTACO

Consiste en la integración de elementos que juntos convierten los rayos del sol en energía eléctrica.

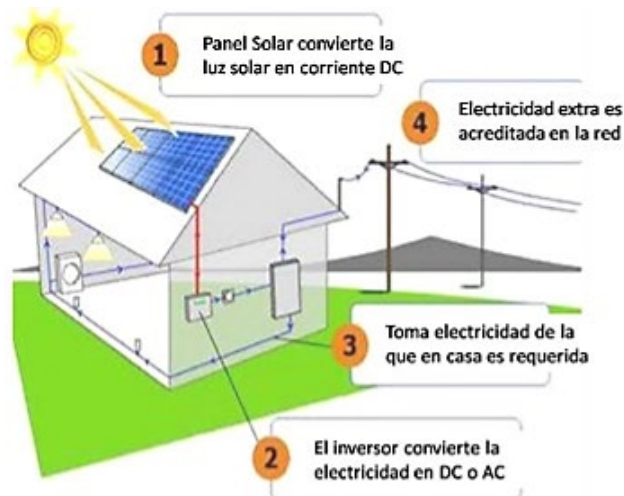


Figura 2.9: Elementos de un sistema Solar Fotovoltaico (2)

Esta tecnología consiste en convertir la irradiación solar en energía eléctrica, corriente continua. La transformación se realiza por medio de módulos o celdas solares en la que se produce el efecto fotovoltaico.

La energía solar fotovoltaica tiene muchas aplicaciones donde se necesite utilizar electricidad, desde aplicaciones industriales o residenciales, interconectados a la red eléctrica convencional (sistemas fotovoltaicos conectados a la red), o aquellos que no disponen de la red eléctrica (sistemas fotovoltaicos autónomos), los cuales dependen de la irradiación solar, de un sistema de almacenamiento energético como baterías o acumuladores para suministrar energía por la noche o en momentos donde la irradiación del sol sea escasa y de un sistema de conversión de corriente continua a alterna, dependiendo del tipo de equipo que requiera ser alimentado (27).

2.7 PANEL SOLAR

En un sistema solar fotovoltaico, el panel representa el 57% de la inversión total del sistema, los bancos de almacenamiento o baterías el 30% y el resto de los componentes del sistema tales como los dispositivos electrónicos de potencia, y los sistemas de control contribuyen con el 7% (28).

La conversión de luz a energía se realiza a través de las celdas fotovoltaicas, la esencia de un panel solar, en la que se produce el efecto fotovoltaico. La celda solar está construida a partir de materiales semiconductores como el silicio, las cuales absorben los rayos del sol cargados de fotones. Los fotones inciden en el semiconductor, sobre los electrones sueltos presentes para ser excitados y cargarlos de energía, misma que los libera de sus posiciones y podrán moverse libremente.

La fuerza motriz que genera el voltaje por la unión de 2 semiconductores P-N, propicia que los electrones migren de un lado a otro. El semiconductor tipo N es capaz de ceder sus electrones, mientras que el semiconductor tipo P los acepta fácilmente, lo que permite un flujo constante de electrones entre semiconductores, esto produce energía en forma de corriente directa (figura 2.10) (29)

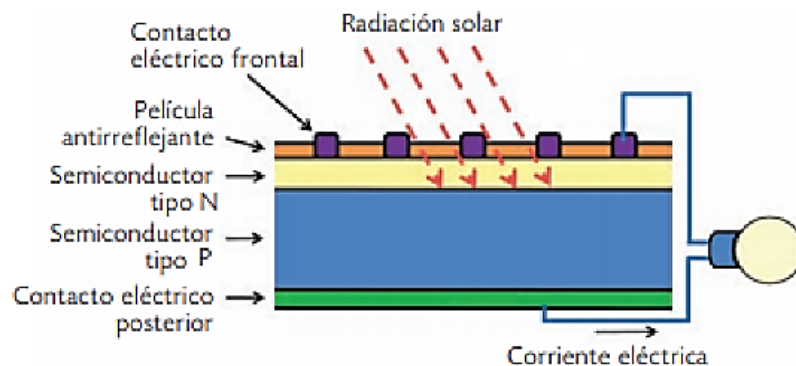


Figura 2.10: Estructura básica de una celda fotovoltaica (29)

El poder de conversión de una celda solar no es suficiente por lo que es indispensable conectar varias entre sí para aumentar el voltaje. Generalmente son fabricadas para generar voltajes de 12 o 24 volts de corriente directa. A un arreglo de estas celdas conectadas entre sí se le conoce como panel solar o fotovoltaico (figura 2.11).

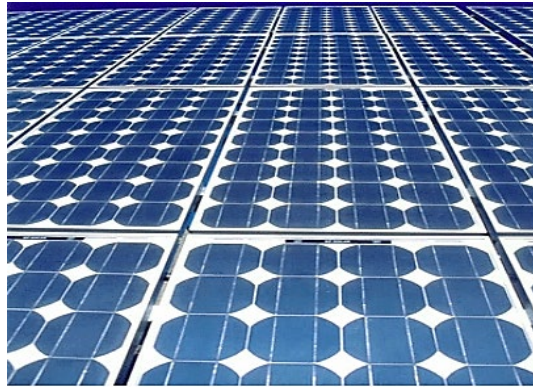


Figura 2.11: Arreglo de múltiples celdas fotovoltaicas interconectadas entre sí (30).

Los científicos de los laboratorios Bell en Nueva Jersey inventaron la primera célula solar fotovoltaica de silicio cristalino aplicada a un caso práctico en 1954. Esta investigación revolucionó los avances científicos y tecnológicos que hoy se denotan en los techos residenciales o industriales con paneles fotovoltaicos. Las empresas en Japón, Estados Unidos y Alemania, se convirtieron en los países líderes en la fabricación de paneles para diferentes aplicaciones.

Los paneles solares son fabricados principalmente de silicio monocristalino, policristalino y amorfos o de capa fina y en la actualidad las celdas son utilizadas en calculadoras o hasta en satélites espaciales (26).

Los materiales semiconductores tipo "N" y tipo "P", se forman cuando en una base de silicio o germanio, se añaden o dopan de átomos con impurezas que cuentan con 5 o 3 electrones de valencia o composición molecular respectivamente. El antimonio, arsénico o el fósforo son elementos pentavalentes para el dopaje de materiales tipo "N"; el boro o galio dopan a materiales tipo "P", con tres electrones de valencia.

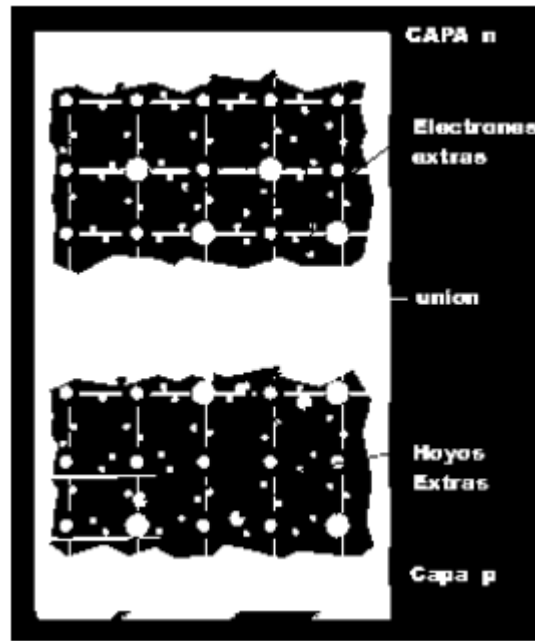


Figura 2.12: Unión N – P en una celda fotovoltaica (26)

Podemos encontrar en el mercado otros tipos de celdas solares con diferentes dopajes como con sulfuro de cadmio y sulfuro de cobre, celdas bifaciales, de doble unión P-N, de silicio en cinta, la selección del tipo va a depender de la eficiencia que se busque y la aplicación.

2.8 EFICIENCIA DE UN PANEL SOLAR

Una de las resultantes más importantes en un panel solar es su rendimiento, es decir, la eficiencia en la que un panel solar convierte la irradiación solar en energía eléctrica en función de su potencia pico de salida (W_p) o cantidad de energía que son capaces de producir, en condiciones estándar (STC: irradiación de $1000W/m^2$, temperatura de la celda de $25^\circ C$ y distribución espectral AM de 1.5 G). La eficiencia de una celda fotovoltaica no es igual a la de un panel. Un panel solar es menos eficiente que una celda debido a variables como el arreglo de interconexión de celdas serie – paralelo, o factores externos como la reflexión solar o la temperatura (31).

En el mercado hay disponibles paneles solares desde los 200W hasta los 350W y su rendimiento supera el 20%. En la figura 2.13 se presenta la evolución que ha tenido el rendimiento de paneles solares en términos de eficiencia.

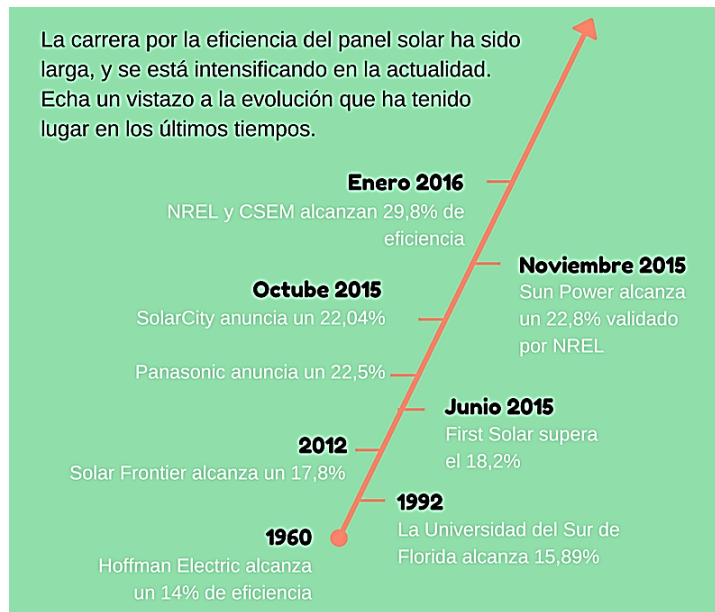


Figura 2.13: Eficiencia de los paneles solares a través del tiempo (32).

El parámetro de rendimiento en los paneles solares es clave ya que cuanto mayor sea su eficiencia, mayor es la cantidad de KW/h de energía se podrá generar.

Así mismo una fuerte de restricción en el rendimiento de los paneles solares es la temperatura, cuanto mayor sea el coeficiente de temperatura, menor la capacidad de captación de energía del panel. Cuando supera los 25°C, por cada aumento de 1°C, los paneles solares producen 1% menos de energía (32).

Otra restricción importante que influye en el rendimiento de un panel solar es el nivel de aprovechamiento de la radiación solar sobre la superficie del panel fotovoltaico, esto depende de la hora del día, estación del año, ubicación geográfica y situación ambiental (33).

El desempeño de un panel solar puede elevarse cuando sea empleado un sistema activo o seguidor solar hasta en 7% con respecto a uno Pasivo (34). El panel fotovoltaico con sistema de seguidor solar, permite posicionarse al sol durante toda su trayectoria (figura 2.14).

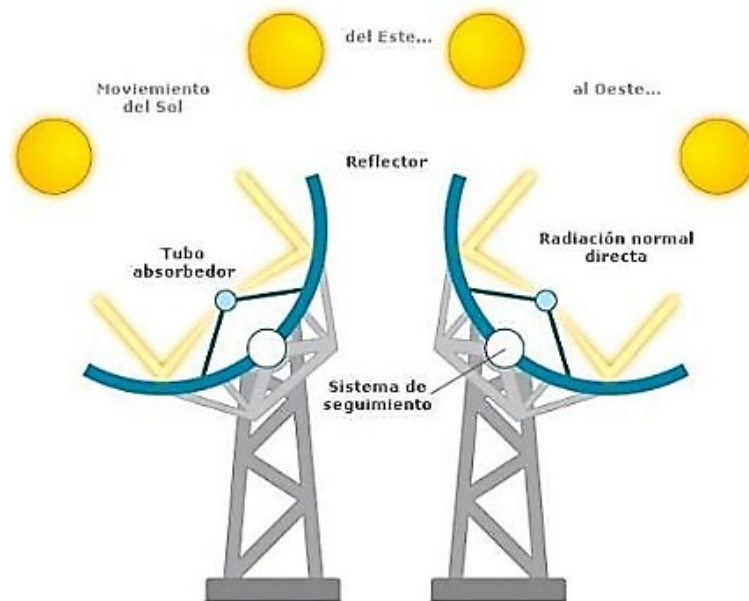


Figura 2.14: Panel solar con sistema de seguimiento solar de un eje (35)

En la figura 2.15 se muestra que un sistema pasivo es instalado en una plataforma fija de manera perpendicular a la radiación solar.



Figura 2.15: Panel solar fijo (36)

Se observar en la figura 2.16 la energía producida lo largo de un día con un sistema de captación solar fotovoltaico fijo y con seguidor solar en 2 ejes para este ejemplo. El rendimiento aumentó para esta aplicación alrededor de 40% con respecto a la instalación fija. El uso de estos sistemas dependerá del rendimiento y tipo de aplicación.

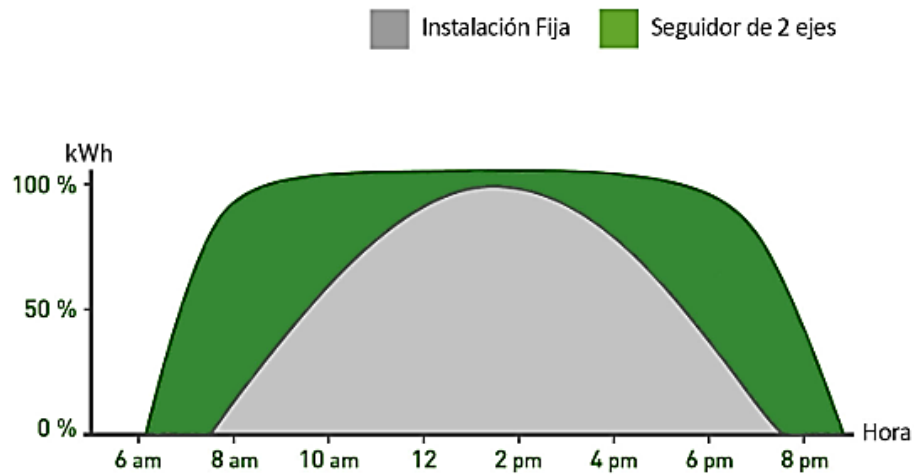


Figura 2.16: Energía producida por un sistema fotovoltaico con instalación fija (zona gris) y con seguidor de 2 ejes (zona verde) (37)

2.9 SEÑAL PERIÓDICA

Son aquellas en las que se establece un patrón que se repite de manera consecutiva a lo largo del tiempo, a este patrón se le conoce como ciclo y el tiempo que tarda en repetirse, periodo en unidades de tiempo.

Una señal $x(t)$ es periódica durante una constante de tiempo (T), donde $x(t+T) = x(t)$, $\forall t \in \mathbb{R}$. En la figura 2.17 (a) se representa una señal sinusoidal, y en la figura 2.17 (b) una señal cuadrada.

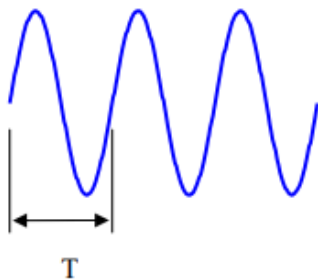


Figura 2.17: a) Señal sinusoidal (38)

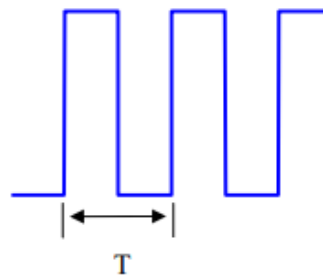


Figura 2.17: b) Señal cuadrada (38).

2.10 DISPOSITIVOS ELETRÓNICOS DE POTENCIA

El diseño de convertidores electrónicos de potencia está relacionado al desempeño de los dispositivos y circuitos de estado sólido que lo constituyen. En los años 50, se inicia una revolución tecnológica motivada por la invención del transistor de silicio en los Bell, de la mano de Bardeen y Shockley, premios nobel de física (39).

A la vez toma relevancia la electrónica de potencia con el desarrollo del tiristor o el rectificador controlado de silicio y con el dominio de la electrónica en estado sólido, de tal forma que los convertidores electrónicos de potencia puedan transformar el flujo de energía de entrada y salida (40).








Diodo	BJT	MOSFET	IGBT	SCR	TRIAC	GTO
						

Figura 2.18: Símbolos de dispositivos básicos utilizables en Electrónica de Potencia (41).

2.10.1 MOSFET

El transistor de efecto de campo metal-oxido-semiconductor o MOSFET por sus siglas en inglés (*Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor*), es un dispositivo de 4 terminales observe la figura 2.14; fuente (*S, Source*), drenador (*D, drain*), puerta (*G, gate*) y sustrato (*B, bulk*). Es un dispositivo semiconductor constituido por silicio policristalino.

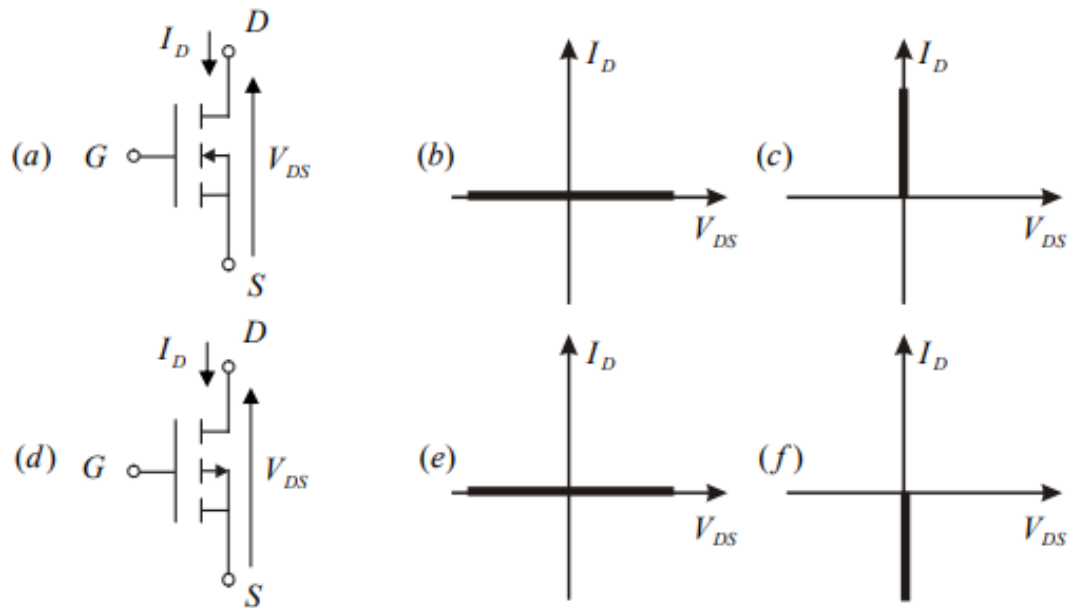


Figura 2.19: Símbolo y curvas V-I de un MOSFET (40).

- a) MOSFET de canal n;
- b) Estado de bloqueo del MOSFET de canal n;
- c) Estado de conducción del MOSFET de canal p;
- d) MOSFET de canal p; (e) estado de bloqueo del MOSFET de canal p;
- e) Estado de conducción del MOSFET de canal p.

El MOSFET es utilizado para amplificar o conmutar señales electrónicas y es el componente más utilizado en la microelectrónica (42).

Además, es un dispositivo de conducción y bloqueo de conmutación controlada que maximizan las pérdidas de conmutación, mejora el control de en relación al transistor bipolar (BJT), pero presenta desventajas de capacitancias asociadas a su estructura (41).

Ahora bien, es un dispositivo que está controlado por tensión y no por corriente, el cual posee un coeficiente de temperatura positivo que detiene el escape térmico. Todas estas ventajas y la eliminación de la corriente residual hacen que el MOSFET se convirtiera en el dispositivo de elección para diseños como interruptor de potencia [39]. En el mercado se encuentran MOSFET de hasta 500 V/50 A y de 1,2 kV/5 A en pastilla única.

2.10.2 IGBT

Un Transistor Bipolar de Puerta Aislada o IGBT (*en inglés Insulated Gate Bipolar Transistor*, procede en esencia de la tecnología MOSFET de potencia, por tanto, su estructura y funcionamiento son parecidos. El transistor compuesto combina un MOSFET y un BJT, tienen terminales puerta (G, gate), colector y emisor de un BJT encapsulado en un semiconductor tipo P (figura 2.20) (43).

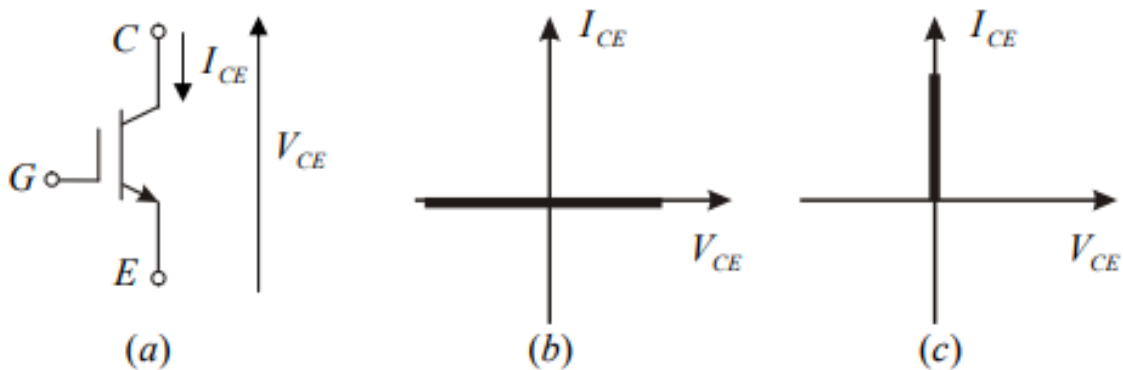


Figura 2.20: a) Estructura de un IGBT V-I b) curva de estado de bloqueo, c) curva de estado de conducción [36].

Con la finalidad de aprovechar las ventajas de robustez de los BJT y de control de los MOSFET, se desarrolló el transistor bipolar de puerta aislada (IGBT), siendo estos los dispositivos actuales en los que se realizan mayores esfuerzos de desarrollo, en detrimento de los BJT (41).

Un IGBT tiene una alta impedancia de entrada, igual que un MOSFET, y bajas pérdidas de conducción en estado activo como los BJT. No obstante, no presentan problemas de ruptura secundaria como los BJT.

Existen diversas estructuras de IGBT que permiten distintos comportamientos, como la conducción bidireccional y el bloqueo unidireccional, o la capacidad para soportar bloqueo en inversa. En el mercado se encuentran IGBTs de hasta 1,5 kV/1,5 kA en pastilla única (41).

El IGBT tiene las características de conmutación y conducción de salida de un transistor BJT, pero está controlado por voltaje como un MOSFET. En general, significa que tiene las ventajas de la capacidad de manejo de alta corriente de un bipolar con la facilidad de control de un MOSFET. Sin embargo, el IGBT todavía tiene las desventajas de una corriente residual comparativamente grande y no tiene diodo de drenaje del cuerpo (44).

2.11 CONVERTIDOR ELECTRÓNICO DE POTENCIA

El convertidor corriente juega un rol muy importante dentro del sistema solar fotovoltaico para la conversión de energía renovable, como la eólica o la solar. Su función principal es la de obtener corriente alterna a partir de corriente continua.

La tarea de la electrónica de potencia es procesar, controlar el flujo de energía eléctrica mediante la aplicación de voltaje y corriente de manera optimizada para la carga de los usuarios (figura 2.21).

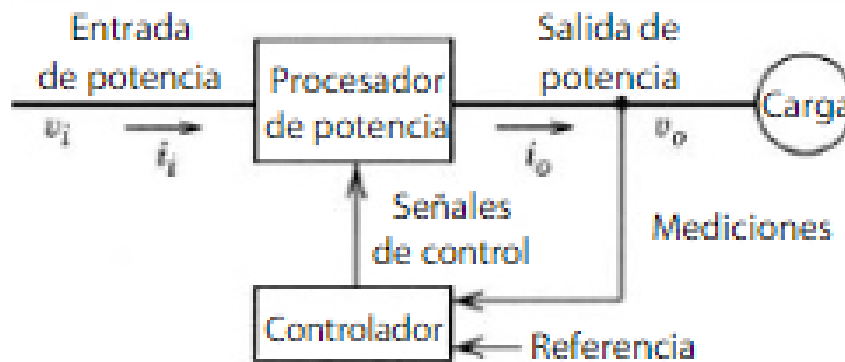


Figura 2.21: Diagrama a bloques de un sistema de electrónica de potencia (38).

El convertidor utiliza dispositivos semiconductores de potencia controlados por señales electrónicas como circuitos integrados y elementos de almacenamiento de energía como inductores o capacitores y se clasifican de acuerdo a lo siguiente:

Convertidor CA/CC o rectificador

El convertidor CA/CC transforma la corriente alterna monofásica o trifásica a corriente continua.

- **Convertidor CC/CC:** El convertidor CC/CC transforma un valor de entrada de corriente continua en otro diferente de salida. Su utilización acoplados a rectificadores permite diseñar convertidores CA/CC con mejor factor de potencia.
- **Convertidor CA/CA:** Del mismo modo que un convertidor CC/CC, el convertidor CA/CA transforma un valor de entrada de corriente alterna, en uno de salida distinto. Son ampliamente utilizados en arrancadores de motores de inducción con la función de reducir la intensidad de demanda durante el inicio de ciclo de motores.
- **Convertidor CC/CA o Inversor:** El convertidor CC/CA transforma la corriente continua a corriente alterna, con la posibilidad de controlar la frecuencia como el valor de tensión o intensidad de la salida. Se utilizan para acoplar al sistema eléctrico la energía generada por los generadores eólicos, a través de motores de velocidad variable (40).

En el contexto de este trabajo, se presenta la simulación e implementación experimental en ésta última clasificación de conversión de energía eléctrica CC/CA, en donde existen varias aplicaciones de control durante la conversión de energía en sistemas de energía fotovoltaica, entre los más comerciales se encuentran los convertidores con seguimiento de punto de máxima potencia (MPPT) y convertidores por modulación de ancho de pulso (PWM) o modulación de ancho de pulso simple (SPWM).

2.12 CONVERTIDOR CON SEGUIMIENTO DE PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA MPPT

Por sus siglas en inglés MPPT (Maximum Power Point Tracker), son controladores que buscan el balance entre el voltaje y corriente en el que los paneles solares operan a su máxima potencia. El regulador es un conversor CC-CC que adapta la tensión que generan los paneles solares a la tensión que necesita los dispositivos de almacenamiento

de energía o bancos de baterías para cargarse. Las estrategias tecnológicas son implementadas ya que los paneles solares presentan baja eficiencia energética, por lo tanto, se aplica un seguimiento MPPT para operar continuamente los módulos fotovoltaicos en el punto de máxima potencia MPP ver figura 2.22, independientemente de las alteraciones ambientales (45).

El uso de mecanismos de control MPPT en los convertidores, permiten incrementar la eficiencia de la operación de las celdas solares (46).

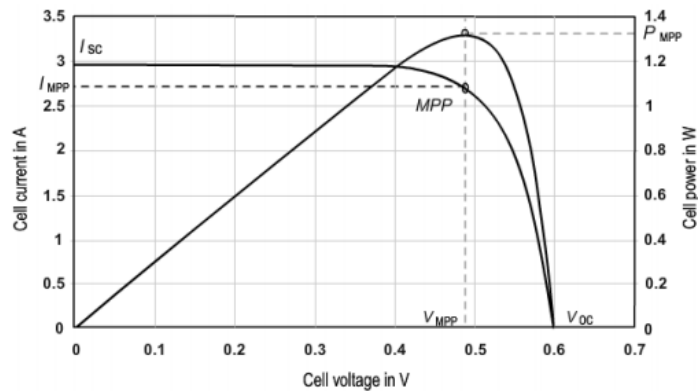


Figura 2.22: P-V I-V Curva de operación de una celda solar (47).

2.13 CONVERTIDOR CON MODULACIÓN DE ANCHO DE PULSO PWM

La modulación por ancho o de pulso PWM (*Pulse Width Modulation*) consiste en un tipo de señal de voltaje que se utiliza para transformar la cantidad de energía que se envía a una carga a través de una señal cuadrada (figura 2.12: b), es decir, modifica el ciclo de trabajo de una señal de entrada de tipo periódico (figura 2.23). Las señales son del tipo sinusoidal o cuadrada a las que se les modifica el ancho del pulso modificando el ciclo de trabajo de tal forma que el valor promedio de la señal sea el voltaje entre 0V y el máximo que soporte el dispositivo PWM, en el caso de Arduino es 5V, y una frecuencia de 500 Hz en donde sólo puede ser utilizado con los pines que tienen el símbolo ~ en sus números (48).

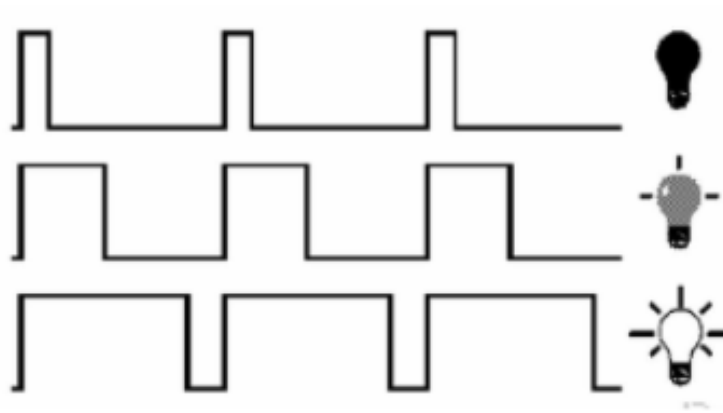


Figura 2.23: Representación de la modulación de la señal cuadrada con PWM (49)

Con el módulo PWM es posible generar un tren de pulsos de amplitud y ciclos de trabajo variable, de tal forma que con ésta regulación se optimiza la energía del circuito regulador ya que el dispositivo electrónico de potencia, trabaja en la zona de corte y saturación, por lo que la potencia que disipa en forma de calor, se reduce de manera considerable (49).

Para generar una señal sinusoidal a partir de un control de pulsos, es necesario modular los ciclos de trabajo estableciendo pulsos cortos negativos y positivos de modo que el valor promedio se aproxime a una onda sinusoidal como se muestra en la figura 2.24.

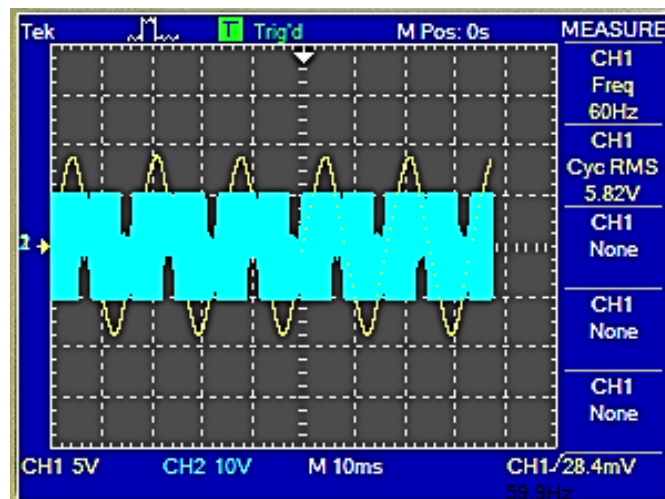


Figura 2.24: Modulación de pulsos a partir de una señal cuadrada para generar señal sinusoidal. (Fuente: Elaboración propia)

Para aumentar el valor de la amplitud de la señal sinusoidal, se hace aumentar la relación de ancho de pulso o ciclo de trabajo. De ésta forma es posible controlar la tensión de salida, por otra parte, es posible disminuir la frecuencia aumentando el número de pulsos por cada semi-ciclo (figura 2.25).

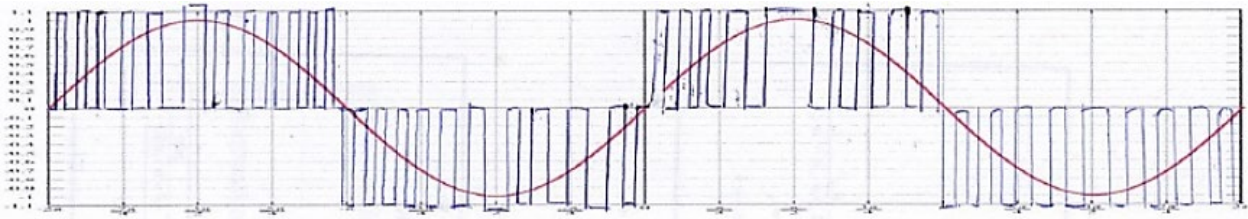


Figura 2.25: Modulación de pulsos para la disminución de la frecuencia Hz (49).

En las aplicaciones más comunes para controlar el voltaje de salida de los inversores se realiza una técnica de modulación de un solo ancho de pulso. Para controlar las variaciones de entrada de CC, la modulación de varios anchos de pulso. Para la regulación de voltaje de los inversores, modulación de senoidal de ancho de pulso. Para el control constante de tensión y frecuencia, modulación modificada de ancho de pulso, entre otras.

2.14 INVERSOR DE POTENCIA DEL TIPO FUENTE DE IMPEDANCIA ZSI.

Una de las topologías más prometedoras en el campo de los convertidores electrónicos de potencia, es la del inversor del tipo fuente de impedancia ZSI (en inglés Z-Source Inverter), la cual es una topología emergente para tecnologías de conversión de energía CC/CA, la cual emplea una red de dos puertos, compuesta por dos capacitores y dos inductores conectados en forma de X, para proporcionar una fuente de impedancia (Z-source), acoplado el circuito principal del inversor a la fuente de entrada figura 2.26.

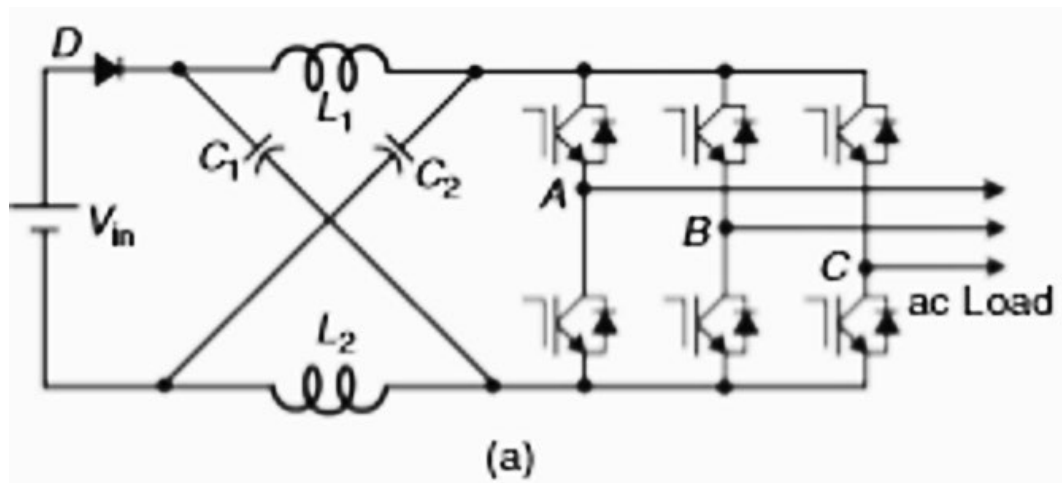


Figura 2.26: Estructura básica de la topología ZSI (6).

El ZSI utiliza ventajosamente el estado de disparo directo (ST) para aumentar el voltaje de entrada, lo que mejora la confiabilidad del inversor y amplía los campos de aplicación. En comparación con otros convertidores de potencia, brinda una atractiva etapa única de conversión CC/CA, con capacidad de aumento de presión con menor costo, menor volumen y mayor eficiencia debido a un menor número de componentes. Para tecnologías de generación de energía emergentes, como celdas de combustible, matrices fotovoltaicas (PV) y turbinas eólicas, y nueva energía (50).

Un convertidor electrónico de potencia convencional, típicamente se realiza a través de la conexión en serie de un convertidor CC/CC como elevador, y un convertidor CC/CA como inversor. El problema con esta configuración es que la conexión en serie genera pérdidas de energía, por lo que disminuye el rendimiento del convertidor en términos de eficiencia ya que la energía producida por el panel solar, es procesada 2 veces, además de incrementar el costo del diseño al implementar más dispositivos electrónicos. Por lo tanto el ZSI no requiere la etapa del convertidor CC/CC, si no que utiliza la red de impedancia basada en elementos pasivos para acoplar la fuente de alimentación con el circuito principal de conmutación y control (51).

En últimos informes se ha informado que el inversor de fuente Z (ZSI) es adecuado para sistemas fotovoltaicos residenciales debido a la capacidad de aumento de voltaje e inversión en una sola etapa (52).

El inversor de fuente de voltaje tradicional que ha sido la tecnología de conversión de energía para fuentes de energía renovables, no hace frente a esta amplia naturaleza de cambio de voltaje y a menudo requiere un aumento de voltaje adicional mediante un convertidor de CC/CC. Los inversores de fuente Z pueden resolver este problema. La tecnología de conversión de potencia de una sola etapa ofrece una excelente alternativa con menor costo, mayor confiabilidad y eficiencia. Las configuraciones, características y resultados del sistema se muestran para el acondicionamiento avanzado de energía de sistemas de energía alternativa (53).

2.15 INVERSOR DE POTENCIA DEL TIPO CUASI FUENTE DE IMPEDANCIA QZSI

El inversor QZSI es una topología derivada del inversor fuente de impedancia (ZSI), el cual conserva todas las ventajas del ZSI, es capaz de invertir y elevar el voltaje en una sola etapa de potencia de manera confiable. Su desempeño es muy flexible ya que cuenta con un amplio rango de ganancia de voltaje, lo cual resulta más conveniente para aplicaciones fotovoltaicas, además la captación solar que realizan los paneles solares, varía dependiendo de la temperatura y la irradiación solar (54).

El circuito QZSI difiere del de ZSI convencional en la interfaz de red de impedancia (LC) entre la fuente y el inversor. La red protege el circuito de daños cuando se produce el disparo. El diagrama del circuito contiene diodos, capacitores como filtros, una red de impedancia, interruptores inversores y una carga (figura 2.27) (55).

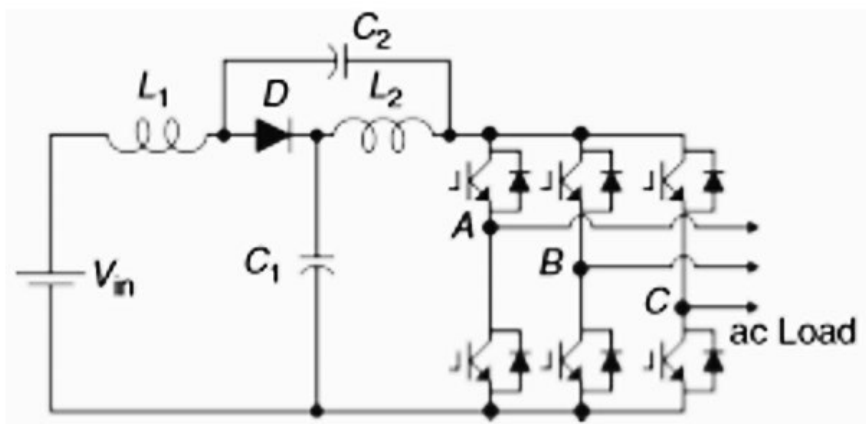


Figura 2.27: Estructura básica de la topología QZSI (6).

El QZSI reúne ventajas importantes sobre la topología ZSI incluyendo que se utilizan menos componentes en el circuito, los voltajes en los capacitores de la red de impedancia son más bajos, la conexión a tierra de la fuente de alimentación de entrada y el enlace de CC, que reducen el ruido de modo común en el sistema.

QZSI no solo tiene las diversas ventajas sobre el ZSI; en comparación con ZSI, el voltaje y la corriente nominal de los componentes pasivos son más bajos por lo que se reduce el estrés de trabajo, la tensión de voltaje de los dispositivos de conmutación es menor y puede utilizar la energía producida por el panel fotovoltaica con la máxima eficiencia debido a la corriente de entrada continua (56).

Del mismo modo que el ZSI, la operación del QZSI se divide en 2 etapas: La etapa de elevación de voltaje a través de su red de impedancia y la etapa de conversión.

La etapa de conversión consta de un arreglo de interruptores denominados ramas de inversión, el cual permite conmutar activamente la señal y es conectada a la carga a una diferencia de potencial que permite establecer una corriente a través de ella. El otro estado del arreglo corresponde a los estados en que la carga es cortocircuitada, debido a que es conectada por los interruptores inferiores y superiores a una misma diferencia de potencial, por lo que el voltaje reflejado en la carga es cero (51). En la figura 2.28 se puede apreciar la configuración de los 2 estados en la topología: En la figura 2.28 a) se muestra el estado de corto circuito, y en la figura 2.28 b) la etapa de conmutación o activa.

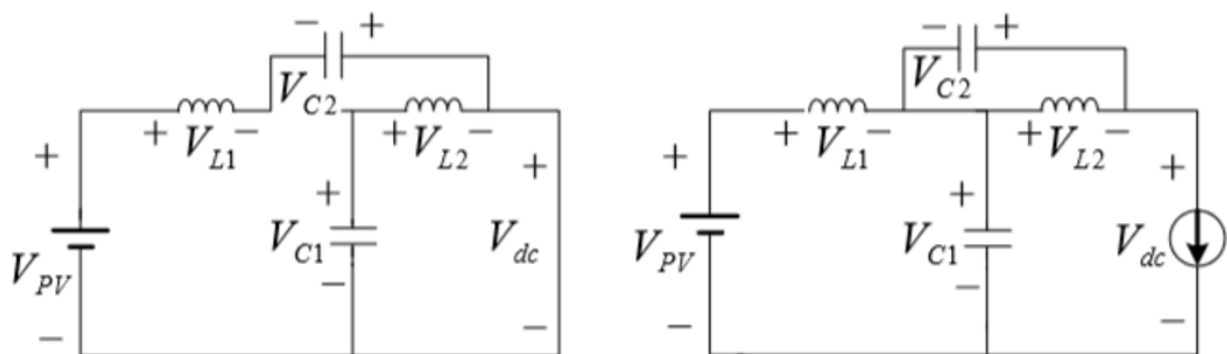


Figura 2.28 (a:) Estado de corto circuito Figura 2.28 (b): Estado de conmutación (56).

2.16 PRUEBA ESTADÍSTICA

La prueba estadística se divide en 2 componentes: Descriptivo e inferencial. El análisis inferencial es la conclusión que se formula a partir de las pruebas estadísticas que se aplican con los parámetros obtenidos de una o varias muestras. Las pruebas estadísticas se emplean para determinar el juicio de un experimento y determinar la probabilidad de éxito. Las pruebas paramétricas siguen datos con una distribución normal, de lo contrario serían no paramétricas y los datos son sometidos a otras técnicas para su análisis (57).

2.17 MEDIDAS DE DISPERSIÓN

Existen distintas maneras de representar la tendencia central o el promedio de un conjunto de datos, es la forma de medir la dispersión de los datos o que tanto están ubicados con respecto a la media aritmética. La media aritmética (Ecuación 1) es la suma de todos los datos tomados de la población, divididos entre la cantidad total de datos, es decir:

$$\text{Ecuación 1: } \text{Media}(X) = \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N}$$

siendo (X_1, X_2, \dots, X_N) el conjunto de observaciones

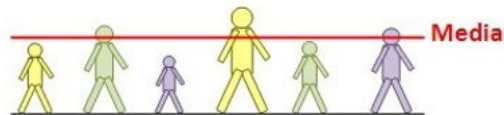


Figura 2.29: Representación gráfica de la media aritmética. (58)

Sean -10, 0, 10, 20 y 30, un conjunto de datos tomados de una población. De acuerdo a lo anterior la media aritmética de dichos datos es igual a 10 a la cual llamaremos *muestra 1*.

Dispersión de datos muestra 1

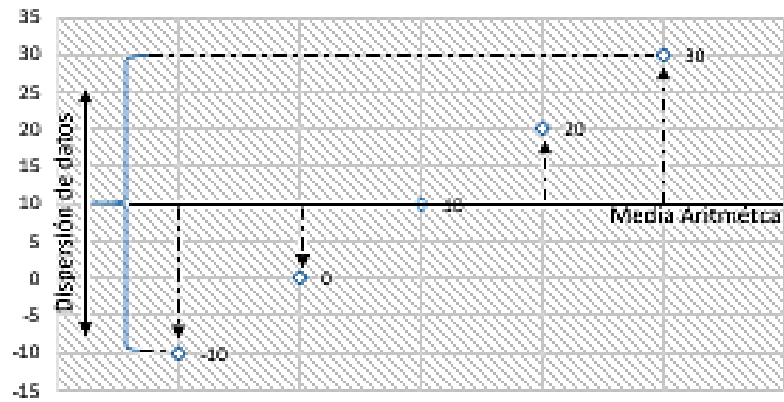


Figura 2.30: Representación de conjunto de datos y su media aritmética muestra 1.

(Fuente: Elaboración propia)

Sean 8, 9, 10, 11 y 12, un conjunto de datos tomados de una muestra. Haciendo el mismo ejercicio, la media aritmética de los datos es igual a 10, a ésta llamaremos *muestra 2*.

Dispersión de datos muestra 2

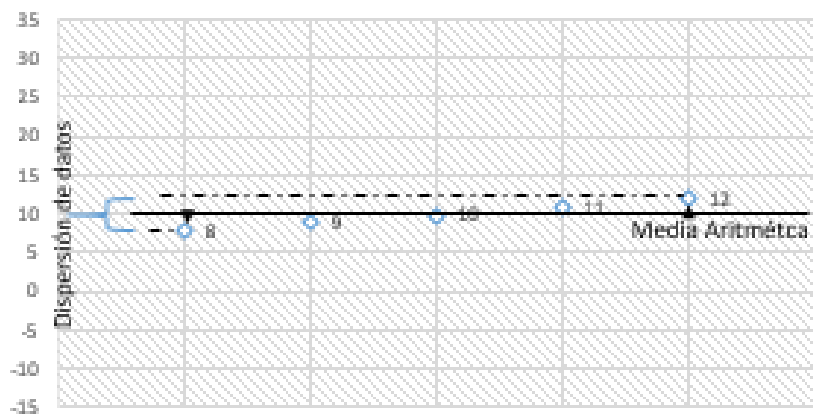


Figura 2.31: Representación de conjunto de datos y su media aritmética de muestra 2.

(Fuente: Elaboración propia)

Es posible apreciar entre las figuras 2.30 y 2.31, que, aunque la media aritmética de ambas muestras tiene un valor de 10, la dispersión de los datos es diferente. Los datos de la *muestra 2* están muy cerca de 10, el mayor de los datos está a 2 unidades de la media aritmética. Por otro lado, los datos de la *muestra 1*, se encuentran muy lejos de 10, el mayor de los datos está a 20 unidades de la media aritmética.

Al valor de la distancia entre el valor más pequeño y el más grande se le denomina Rango, es decir, el recorrido estadístico entre el valor máximo y el mínimo:

$$\text{Rango} = (\text{Max}) - (\text{Min}) \quad (58)$$

El rango de los datos de la *muestra 1* es de 40 unidades, mientras que el rango de los datos de la *muestra 2* es de 4, por lo tanto, la dispersión o variación del conjunto de datos es mayor en la *muestra 1* que en la *muestra 2*.

La varianza (Ecuación 2) mide la dispersión de los datos de una muestra con respecto a la media aritmética, al calcular la media de los cuadrados de las distancias de todos los datos.

Siempre se cumple que la varianza es mayor o igual que 0. Cuando el valor de la varianza es 0, quiere decir que la dispersión de los datos está sobre la media aritmética, por lo tanto la variación de los datos no es significativa (58). Por otro lado, cuando el valor de la varianza es muy alto, confirma que los valores de la muestra se separan bastante de la media aritmética.

$$\text{Ecuación 2: } S_X^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{x})^2}{N - 1}$$

siendo (X_1, X_2, \dots, X_N) un conjunto de datos y \bar{x} la media

La varianza de los datos mencionados anteriormente de la *muestra 1* es de 250, mientras que la varianza de los datos de la *muestra 2* es de 2.5. Por lo tanto, se puede deducir que la variación de los datos de la *muestra 2* es mucho menor que los de la *muestra 1*.

Finalmente, la desviación estándar (Ecuación 3) mide la dispersión de los datos de una muestra con respecto a la media o la magnitud del promedio de las desviaciones de los datos de una muestra, o bien, es la raíz cuadrada de la varianza.

$$\text{Ecuación 3: } S_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \text{Media}(X))^2}{N - 1}}$$

siendo (X_1, X_2, \dots, X_N) un conjunto de datos

El valor de la desviación estándar no es negativo y entre más se aproxima a 0, indica que la dispersión de los datos se encuentra sobre la media. Entre más lejos se encuentren los datos de la media, mayor será el valor de la desviación estándar.

El cálculo de la desviación estándar para los datos de la *muestra 1* es igual a la raíz cuadrada del resultado de su varianza, es decir, la raíz cuadrada de 250, igual a 15.8. Por otra parte, la desviación estándar de los datos de la *muestra 2* es de 1.58. Esto nos indica que los datos de la *muestra 1* están más alejados de la media, que los datos de la *muestra 2*. El resultado es fácil apreciarlo sobre las figuras 2.30 y 2.31 de manera visual.

Es importante resaltar que la desviación estándar evalúa la dispersión de un conjunto de datos, mientras que la varianza evalúa la variación de la dispersión.

2.18 PRUEBAS DE HIPÓTESIS

Una hipótesis es una afirmación transitoria que es sometida a prueba. Existe un procedimiento para poner a prueba la hipótesis. Lo primero es enunciarla de tal forma que se defina la afirmación y posteriormente probarla estadísticamente con la evidencia de los datos, los cuales darán la pauta para aceptar o rechazar la hipótesis.

En el trabajo de investigación la hipótesis es que en sistemas fotovoltaicos con niveles de potencia de hasta 150W, un microinversor de CC/CA de topología QZSI, utilizando dispositivos MOSFET, es más eficiente que con dispositivos IGBT. Será tarea de la investigación probar la veracidad o falsedad de dicha afirmación contrastando los valores reales provenientes de una muestra cualquiera. Si después de esta comparación resulta que el promedio obtenido de una muestra con MOSFET es mayor que con IGBT, entonces la estadística se encargará de aceptar como verdadera la hipótesis planteada.

El método de las pruebas de hipótesis consiste en establecer la probabilidad de que sea consecuencia del azar la diferencia existente entre 2 cantidades, las cuales pueden ser la diferencia entre un valor obtenido en la muestra y un parámetro, o la diferencia entre dos valores provenientes de dos muestras, ya sean promedios, porcentajes u otros valores (59).

En términos generales el objetivo de una prueba estadística es evaluar la diferencia que existe entre dos muestras, se elabora una hipótesis y se plantea en términos estadísticos. Después se ejecuta la distribución de probabilidad a la medida para calcular la probabilidad de la diferencia entre las dos muestras. Si la probabilidad es pequeña, se podrá demostrar que la diferencia es significativa.

El método consiste en utilizar un estadístico de prueba el que podrá calcularse con los datos de las muestras. Posteriormente se identifica la probabilidad de ocurrencia del valor obtenido en la tabla correspondiente (*norma, t de student u otra*), y finalmente con respecto a la probabilidad obtenida, se toma la decisión con respecto a la hipótesis.

El método se obtiene de la siguiente manera:

1. *Definir la hipótesis en términos estadísticos.*

- a) La hipótesis nula plantea que los valores comparados son iguales, es decir, H_0 :
Muestra 1 = Muestra 2.
- b) La hipótesis alternativa plantea que los valores comparados son distintos, H_1 :
muestra 1 \neq muestra 2.

2. Elegir un nivel de significancia.

El valor de significancia es la probabilidad de que la diferencia observada se deba al azar, la cual es importante que sea pequeña. En la práctica se utilizan valores iguales o inferiores a 0,05 el cual es el más usado en prueba de hipótesis. El valor de significancia se representa por el símbolo α (Alfa) e indica la evaluación en los valores extremos de la distribución de probabilidades ($\alpha / 2$).

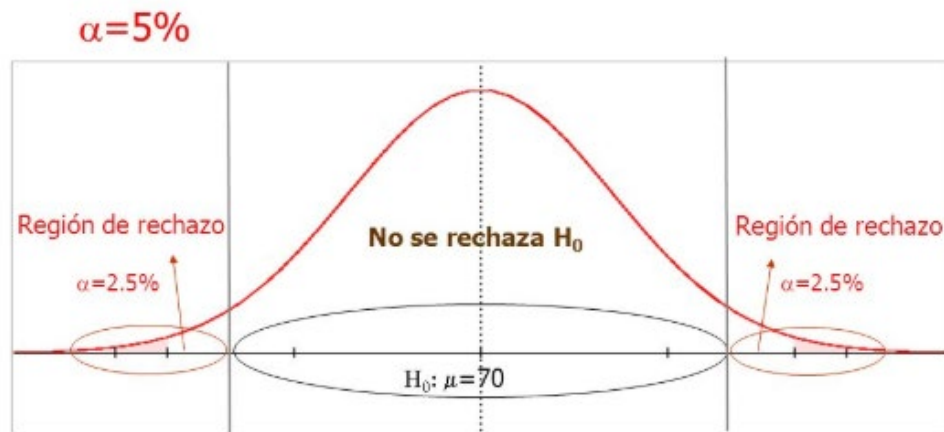


Figura 2.32: Nivel de significancia de la distribución de probabilidades (59).

3. Calcular el estadístico

El cálculo estadístico utilizado para la prueba de hipótesis depende de los elementos que lo conformen. En el caso de la comparación de 2 promedios, el estadístico recomendado es el de *t de student*.

4. Comparar la probabilidad obtenida en la tabla de referencia con el nivel de significancia seleccionado y tomar una decisión en base a la hipótesis planteada.

Nota: La hipótesis nula H_0 será rechazada si la probabilidad encontrada en la tabla es menor a la mitad del nivel de significancia ($\alpha/2$).

5. Argumentar y elaborar las conclusiones derivadas del resultado del cálculo estadístico.

CAPÍTULO 3: PROCEDIMIENTO DE INVESTIGACIÓN

3.1 DISEÑO DEL CIRCUITO DE INTERFASE

El proyecto consiste en diseñar y construir un convertidor de potencia de topología QZSI, para la conversión de energía solar fotovoltaica, con el propósito de evaluar su funcionamiento utilizando MOSFET e IGBT como dispositivos electrónicos de potencia. Se realiza una evaluación técnica comparativa de parámetros de entrada y salida como voltaje, corriente, potencia y eficiencia, para ambos dispositivos, con la finalidad de validar el diseño del QZSI y seleccionar los componentes que logren mejor desempeño.

Se define una metodología de diseño electrónico por etapas de acuerdo a los circuitos requeridos: potencia, interface y control. La metodología está soportada en la simulación, que permite validar y verificar los circuitos electrónicos, cada uno de ellos de manera modular y posteriormente al ser integrados en el prototipo.

Para el circuito de potencia se seleccionan componentes adecuados como los dispositivos de potencia, diodos de alta velocidad, capacitores, inductancias, etc., para un nivel de potencia de 150 Watts. Para la implementación del circuito de control se especifica un micro-controlador Arduino Mega 2560.

El circuito de disparos es diseñado para un nivel de tensión de entre 8-10 Volts en la compuerta del transistor MOSFET/IGBT para lograr una conmutación de alta velocidad. En el diseño inicial se encontró la dificultad de tener un aislamiento entre el Arduino y el circuito del inversor, sin embargo, el problema se soluciona armando un circuito con optoacopladores 4n25, resistencias, transistores 2n222 para amplificar la corriente del Arduino y de esta forma encender de manera correcta el LED del optoacoplador.

En primera instancia se diseña un circuito con conductores IR2112, sin embargo, el circuito se dañaba, por lo tanto, fue necesario aislar el Arduino y el inversor. Para lograr la opto-aislación, es necesario instalar tres fuentes para la activación de los transistores, las fuentes fueron las B0512-2W de MORNSUN, son conmutables y aisladas que elevan la tensión de 5V a 12 con 2W de disipación, se puede observar que en el esquemático de

tuvo una configuración “pull down” en la salida del optoacoplador y de igual manera en la entrada del optoacoplador con el transistor 2n2222.

Además, se añadió una compuerta lógica 74LS32 para sumar la señal de conmutación con la señal de estado “shoot-through” para que el transistor MOSFET/IGBT tuviera la señal “completa” ya que, el Arduino nos brinda la señal de conmutación y la señal de los estados “shoot-through” por separado, por ello se decidió utilizar esa compuerta, para tener una sola señal.

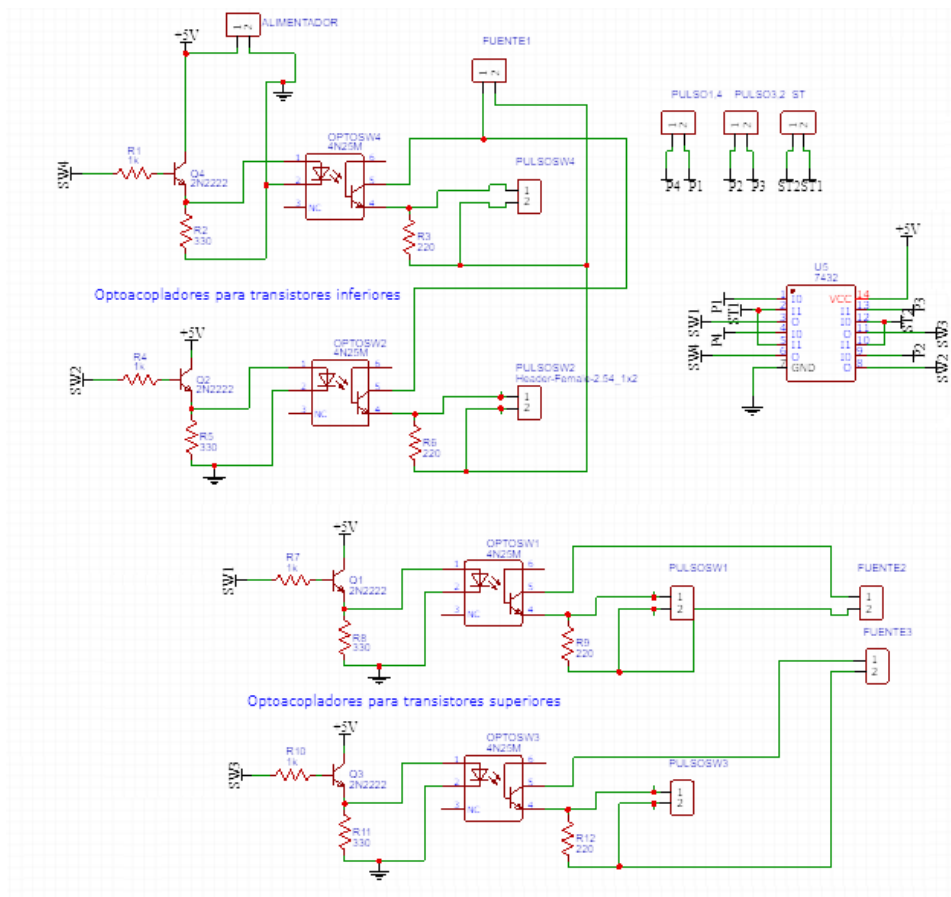


Figura 3.1: Circuitos de disparos para el prototipo
(Fuente: Elaboración propia)

3.2 ALGORITMO DE CONTROL DEL QZSI

Una de las técnicas de modulación más empleadas en esta topología, es la de Modulación de Ancho de Pulso (PWM). El patrón de conmutación se obtiene a partir de la comparación triangular de frecuencia y amplitud fija, la cual se genera al comparar

dos señales: una moduladora, v_{ref} y la portadora, v_p que es a alta frecuencia. Mediante la comparación de las dos señales anteriores es posible generar los pulsos que comandarán a los dispositivos semiconductores de potencia.



Figura 3.2: Patrón de pulsos para la etapa de potencia.
(Fuente: Elaboración propia)

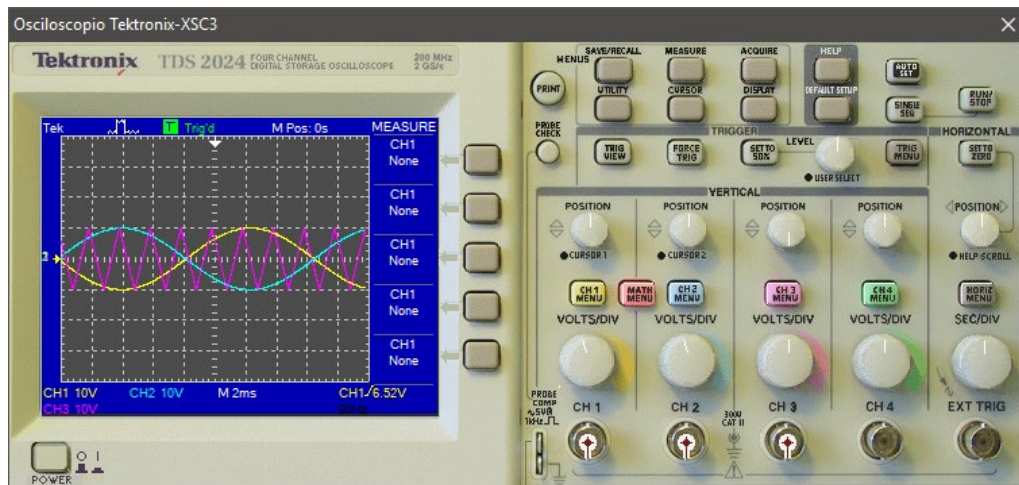


Figura 3.3: Comparación de señales del sistema.
(Fuente: Elaboración propia)

Cada transistor de potencia debe de tener su propio patrón de activación, tener en cuenta el arreglo de la figura 3.1.

Para la sección correspondiente a las conmutaciones controladas de los dispositivos, se debe considerar que el objetivo más importante del proyecto es elevar la eficiencia del

dispositivo inversor al máximo nivel posible. Es por ello que la selección de los componentes, en primera instancia, es un paso muy importante en la obtención de un parámetro de eficiencia del inversor en construcción figura 3.4.

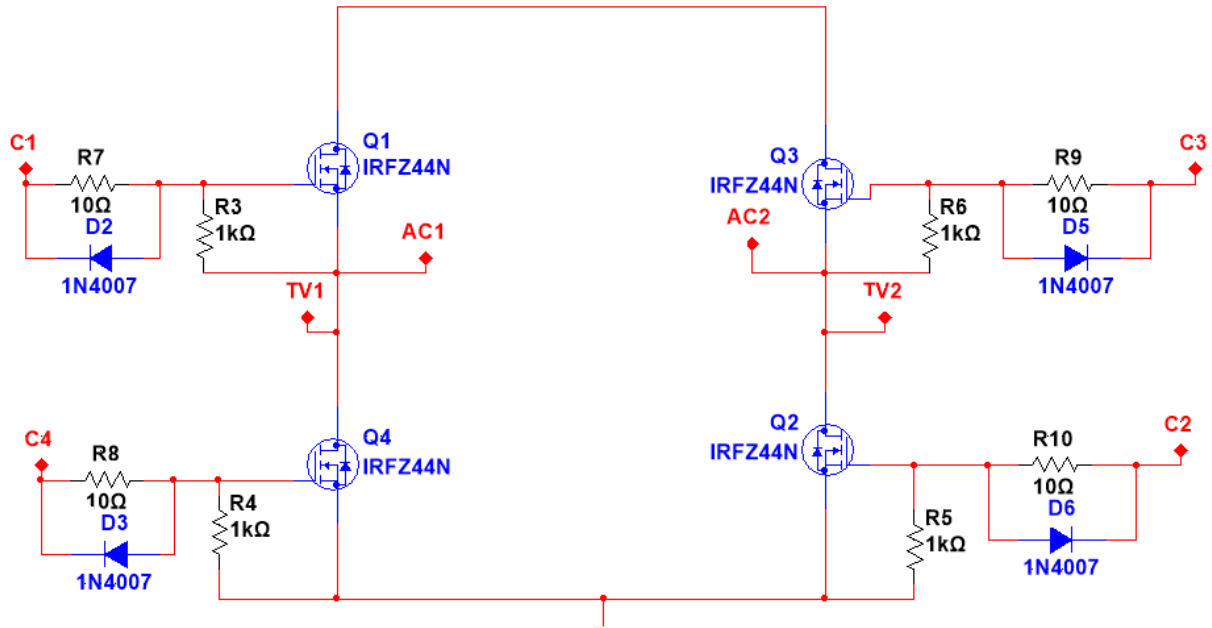


Figura 3.4: Puente H.

(Fuente: Elaboración propia)

En la figura 3.4 se observa como está constituido el puente H que permite efectuar las conmutaciones controladas del inversor. Es importante disminuir al máximo las pérdidas que se presentan en los conmutadores controlados, ya que impactan directamente en la eficiencia del dispositivo. Las pérdidas que se pueden enunciar son: pérdidas por calentamiento en los conmutadores debidas a la circulación de corriente eléctrica; así como la caída de tensión típica que es especificada por el fabricante del dispositivo electrónico.

En el proyecto se pretende reducir al máximo dichas pérdidas y aumentar la eficiencia del inversor que, a su vez, tiene características muy específicas: el voltaje de C.D. de entrada al puente H está definido entre 130 y 150 V de C.D., y la potencia eléctrica entregada a la carga es de 150 W (máximo).

De acuerdo a la selección del conmutador, el análisis de corriente de circulación nos permite elegir el transistor MOSFET IRFP460 como nuestra alternativa inicial para las primeras pruebas de funcionamiento; respecto a sus características, opera a un voltaje de hasta 500 V y a una corriente de hasta 20 A. Considerando que un MOSFET tiene una caída de tensión proporcional a la corriente que circula a través de él, es más eficiente utilizar el MOSFET IRFP460 que posee una caída de tensión de aproximadamente 0.7 V para el valor de potencia eléctrica propuesto en el proyecto; contrario a utilizar, por ejemplo, un transistor IGBT IXGK120N60B, que aunque ofrece mayor potencia de disipación, posee una caída de tensión por polarización de 2.1 V según el fabricante.

La caída de tensión puede ser aún menor, si se colocan transistores en paralelo, de esta manera, la resistencia interna del MOSFET R_{DS} disminuye y la caída de tensión es aún menor; una ventaja aunada a lo anterior es el aumento en la capacidad de potencia de disipación del puente H.

Respecto a la velocidad de conmutación, el circuito de control exige una frecuencia no mayor a 1 kHz, por lo que un MOSFET es capaz de efectuar sin ningún problema dichas actividades.

A través del disparo coordinado de los transistores, se hace necesario utilizar un circuito integrado capaz de polarizar los MOSFET que se requieren en cada etapa de la conmutación coordinada. Para llevar a cabo el control en el disparo de los transistores se pretende utilizar el integrado IR2101, que nos permite controlar dos transistores a la vez, por lo que solo se requieren dos unidades. Gracias a este dispositivo se evita el problema de la referencia de tierra de los transistores.

En el "QZSI" el voltaje es controlado mediante la regulación del índice de modulación, así como con el ciclo de trabajo del estado "*shoot-through*", en el cual se generan cortos circuitos en las piernas del inversor para poder elevar el voltaje del enlace de corriente directa.

La Modulación de Ancho de Pulso Simple (SPWM) permite agregar los estados "*shoot-through*" y así amplificar el voltaje.

La técnica al igual que el PWM requiere de una señal portadora y una moduladora la cual se encarga de invertir el voltaje. Sin embargo, el estado “shoot-through” es comandado por una señal de CD u_{st} . En la figura 3.5 se muestra el esquema de conmutación del algoritmo SPWM implementado.

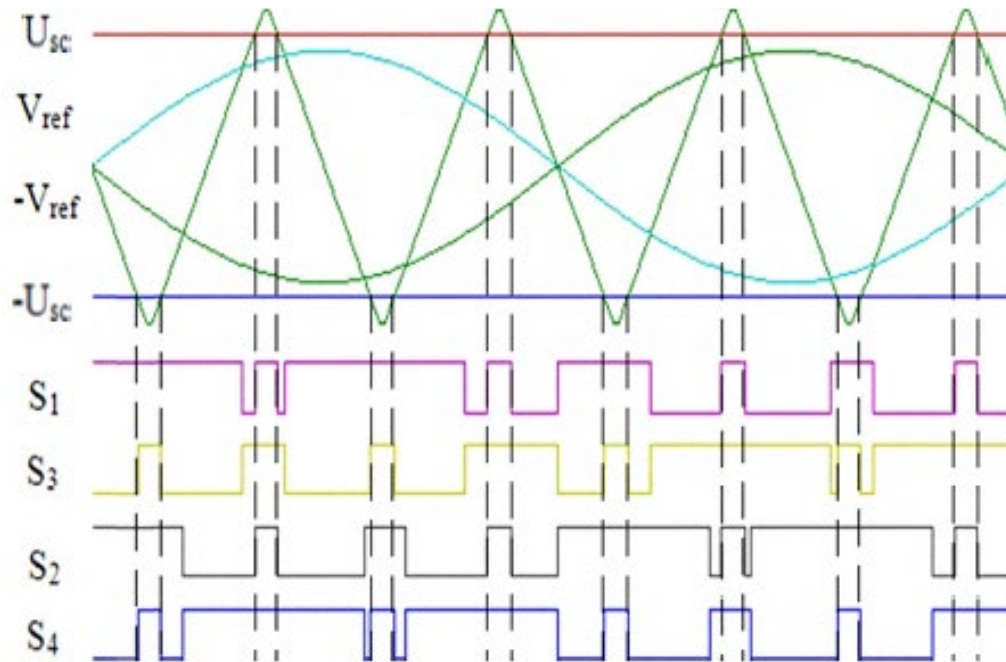


Figura 3.5: Esquema de la técnica SPWM.
(Fuente: Elaboración propia)

La técnica SPWM se implementó en el circuito de la figura 3.1 en el software PSIM.

La técnica SPWM se describe a continuación:

- Estado de modulación
 - Rama n°1:
 - Si $v_{ref} > v_p$ entonces S_1 está encendido*
 - Si $v_{ref} < v_p$ entonces S_3 está encendido*
 - Rama n°2
 - Si $-v_{ref} > v_p$ entonces S_2 está encendido*
 - Si $-v_{ref} < v_p$ entonces S_4 está encendido*

- Estado "shoot-through"

Si $u_{st} < v_p$ entonces S_1, S_2, S_3, S_4 están encendidos

Si $-u_{st} > v_p$ entonces S_1, S_2, S_3, S_4 están encendidos

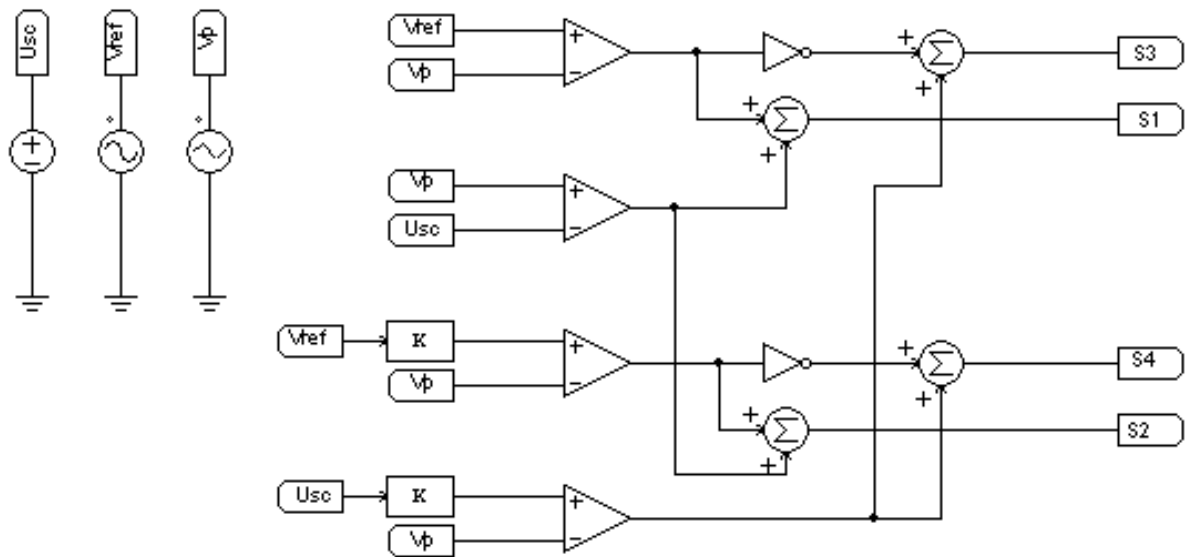


Figura 3.6: Implementación del SPWM en PSIM.

(Fuente: Elaboración propia)

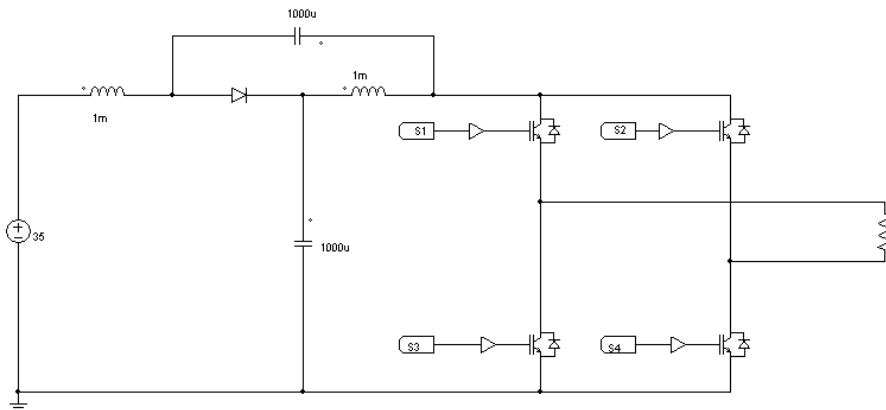


Figura 3.7 Circuito del QZS para simulación en PSIM.

(Fuente: Elaboración propia)

3.3 SIMULACIÓN EN PSIM

Se simula en el software PSIM 9.0.3, el voltaje de salida para el QZSI y la técnica SPWM. En la gráfica 3.8, es posible apreciar la amplificación de voltaje.

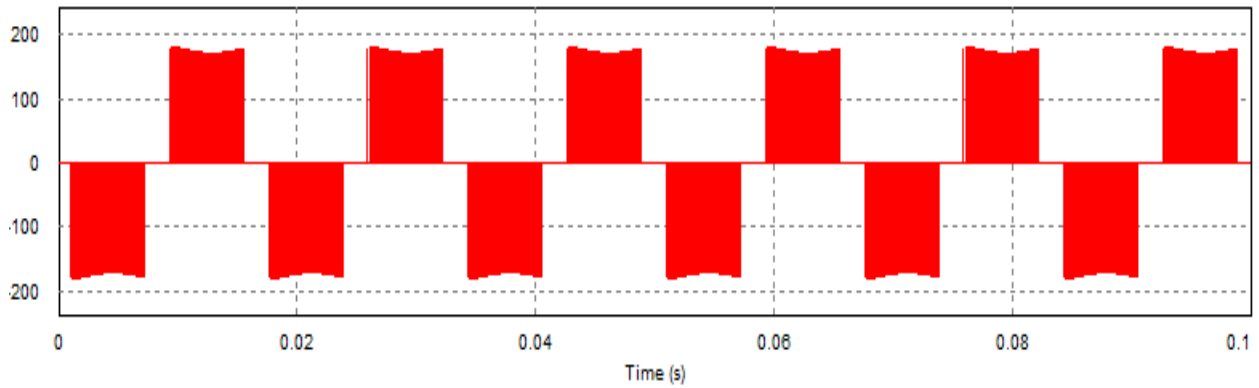


Figura 3.8: Gráfico del voltaje de salida en el circuito QZSI.

(Fuente: Elaboración propia)

A través de la simulación se verificó el funcionamiento del QZSI, así como la técnica SPWM. Con ello es posible observar la sensibilidad del estado “shoot-through” ante pequeñas variaciones, reflejando la no linealidad de la técnica SPWM. Por lo anterior es recomendable el estudio y la caracterización de esta técnica para distintos valores de capacitores e inductancias, esto con el fin de poder conocer mejor el comportamiento de esas variaciones.

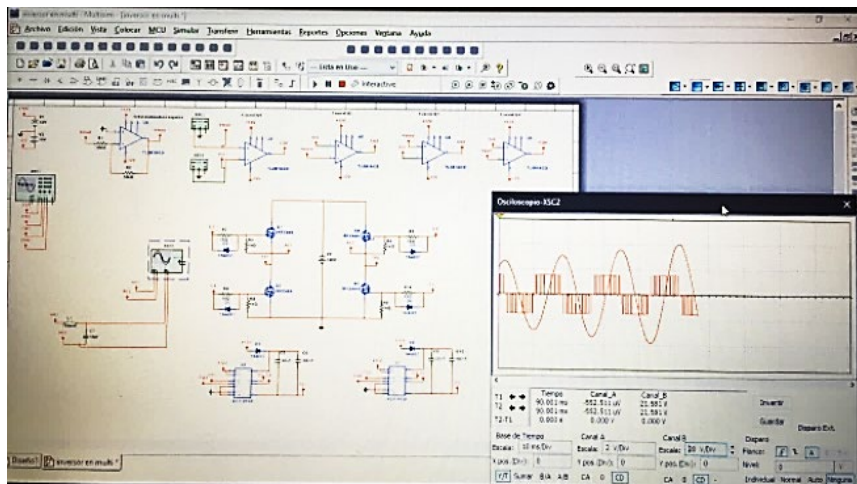


Figura 3.9: Circuito del QZSI simulado en el software PSIM.

(Fuente: Elaboración propia)

3.4 IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO DE CONVERTIDOR QZSI

En la figura 3.10 se visualiza el prototipo armado trabajando de tal forma que es posible encender un foco de 60 Watts.

Para su implementación, tal como se menciona al inicio de este capítulo, se define una metodología de diseño electrónico por etapas de acuerdo a los circuitos requeridos: potencia, interface y control, soportada en la simulación PSIM para validar y verificar los circuitos electrónicos de manera modular y posteriormente al ser integrados en el prototipo.

Para la etapa de potencia se seleccionan componentes adecuados como los dispositivos de potencia, diodos de alta velocidad, capacitores, inductancias, etc., para un nivel de potencia de 150 Watts.

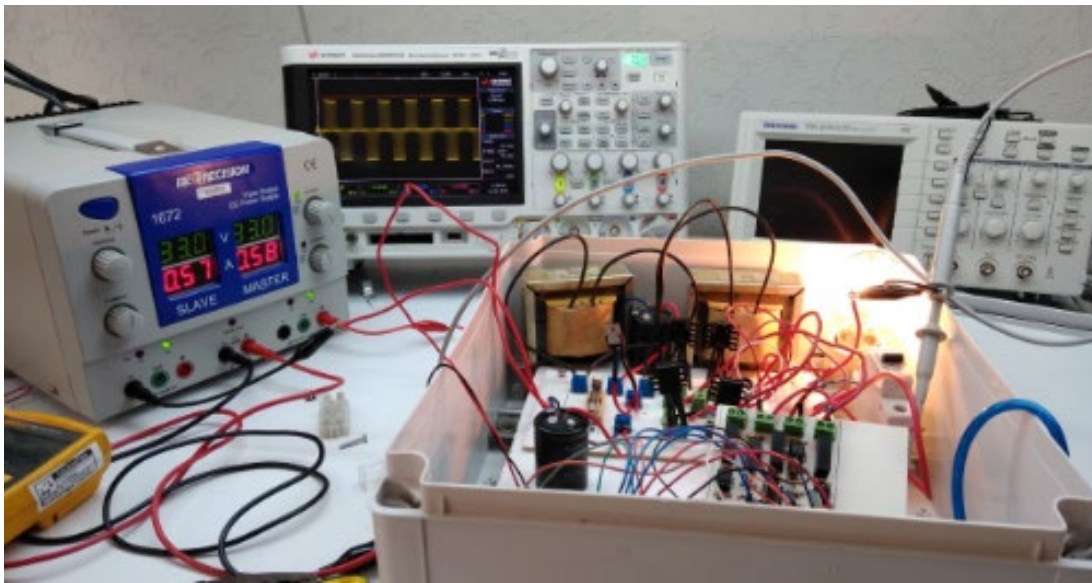


Figura 3.10: Prototipo de convertidor QZSI con foco de 60W.

Fuente: Elaboración propia.

Para la implementación del circuito de control se especifica un micro-controlador Arduino Mega 2560. Para el algoritmo de control, se implementa la técnica de Modulación de Ancho de Pulso Simple (SPWM) la cual permite agregar los estados "shoot-through" y así amplificar el voltaje con una señal portadora y una moduladora para invertir el voltaje. Cabe señalar que el estado "shootthrough" es comandado por una señal de CD.

Finalmente, en la etapa de interface que incluye los disparos a los transistores de potencia, se definen arreglos de resistencias "pull-down" con optoacopladores 4n25, ya

que los transistores MOSFET e IGBT se activan con voltaje. El circuito de disparos utiliza fuentes conmutadas aisladas para los transistores superiores del puente inversor y una para ambos transistores de la parte inferior. Adicionalmente se emplea una compuerta OR (74LS32), para sumar las señales digitales del estado de inversión con las del estado de amplificación (shoot-through).

CAPÍTULO 4: RESULTADOS

4.1 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS

Las pruebas se desarrollaron utilizando una fuente poder de corriente directa y una lámpara incandescente de 60 Watts como carga. Se aplicaron voltajes de alimentación fija (5, 10, 15, 20, 25 y 30 V) y con el índice de amplificación variable desde 5% hasta 60%. Se tomaron mediciones de voltaje a la entrada (V_{in}), corriente a la entrada (I_{in}), voltaje a la salida rms, (V_{out}), corriente a la salida rms (I_{out}), con estas mediciones se calculan las potencias de entrada y de salida, así como la eficiencia.

4.1.1 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS CON 5 VOLTS A 30 kHz

Se evalúa la eficiencia del inversor en distintas frecuencias de conmutación con una tensión de entrada de manera ascendente a una frecuencia de 30kHz, ya que, durante las primeras aplicaciones, la eficiencia es mayor. Por otro lado, se tiene la ventaja de que a esa frecuencia el oído humano no es capaz de percibirla, es decir, se vuelve silencioso, por ello se selecciona para el desarrollo de las pruebas. Se puede apreciar que la eficiencia con IGBT (tabla 4.1), es menor que con MOSFET (tabla 4.2).

f (kHz)	V_{in}	B %	I_{in}	V_{out}	I_{out}	p_{in}	p_{out}	eficiencia
30 a). IGBT	5	5	0.06	2.14	0.09	0.3	0.1926	64.20%
	5	10	0.07	2.214	0.093	0.35	0.205902	58.83%
	5	15	0.08	2.35	0.096	0.4	0.2256	56.40%
	5	20	0.09	2.51	0.099	0.45	0.24849	55.22%
	5	25	0.1	2.65	0.101	0.5	0.26765	53.53%
	5	30	0.11	2.72	0.104	0.55	0.28288	51.43%
	5	35	0.12	2.87	0.108	0.6	0.30996	51.66%
	5	40	0.13	3.12	0.111	0.65	0.34632	53.28%
	5	45	0.15	3.25	0.114	0.75	0.3705	49.40%
	5	50	0.18	3.53	0.119	0.9	0.42007	46.67%
	5	55	0.21	3.8	0.123	1.05	0.4674	44.51%
	5	60	0.25	4.05	0.128	1.25	0.5184	41.47%

Tabla 4.1: Parámetros de prueba obtenidos con una tensión de 5 volts para IGBT

(Fuente: Elaboración propia)

Con mediciones de voltaje a la entrada (V_{in}), corriente a la entrada (I_{in}), voltaje a la salida rms (V_{out}), corriente a la salida rms (I_{out}), con estas mediciones se calcula la potencia de entrada y potencia de salida, además, de calcular también la eficiencia.

En la prueba con IGBT se puede apreciar que mientras el índice de amplificación incrementa, la potencia demandada de salida es mayor y la fuente se protege. Hay una reducción en la eficiencia, sin embargo, es más baja en el prototipo con IGBT que con MOSFET (tabla 4.1 vs tabla 4.2).

f (kHz)	V_{in}	B%	I_{in}	V_{out}	I_{out}	P_{in}	P_{out}	eficiencia
30	5	0	0.103	3.57	0.121	0.515	0.43197	83.88%
b). MOSFET	5	5	0.116	3.87	0.125	0.58	0.48375	83.41%
	5	10	0.126	4.06	0.128	0.63	0.51968	82.49%
	5	15	0.136	4.27	0.13	0.68	0.5551	81.63%
	5	20	0.148	4.53	0.133	0.74	0.60249	81.42%
	5	25	0.161	4.78	0.136	0.805	0.65008	80.76%
	5	30	0.179	5.12	0.139	0.895	0.71168	79.52%
	5	35	0.197	5.46	0.142	0.985	0.77532	78.71%
	5	40	0.219	5.86	0.146	1.095	0.85556	78.13%
	5	45	0.251	6.42	0.151	1.255	0.96942	77.24%
	5	50	0.285	6.94	0.156	1.425	1.08264	75.97%
	5	55	0.344	7.71	0.163	1.72	1.25673	73.07%
	5	60	0.418	8.66	0.169	2.09	1.46354	70.03%

Tabla 4.2: Parámetros de prueba obtenidos con una tensión de 5 volts para MOSFET.

(Fuente: Elaboración propia)

4.1.2 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS CON 30 VOLTS A 30kHz.

Se considera una tensión de entrada de 30 volts a una frecuencia de 30kHz. La prueba hace notar que la eficiencia utilizando un MOSFET es mayor que con IGBT. Se puede apreciar en la tabla 4.3 el desempeño del prototipo con IGBT, y en la tabla 4.4 con valores superiores de eficiencia.

f (kHz)	Vin	B %	Iin	Vout	Iout	Pin	Pout	eficiencia
30 a). IGBT	30	5	0.18	21.2	0.254	5.4	5.3848	99.72%
	30	10	0.21	22.89	0.269	6.3	6.15741	97.74%
	30	15	0.23	24.34	0.279	6.9	6.79086	98.42%
	30	20	0.26	25.89	0.29	7.8	7.5081	96.26%
	30	25	0.28	27.4	0.301	8.4	8.2474	98.18%
	30	30	0.32	29.4	0.317	9.6	9.3198	97.08%
	30	35	0.36	31.4	0.331	10.8	10.3934	96.24%
	30	40	0.41	33.9	0.35	12.3	11.865	96.46%
	30	45	0.48	36.9	0.371	14.4	13.6899	95.07%
	30	50	0.58	40.8	0.396	17.4	16.1568	92.86%
	30	55	0.74	45.5	0.426	22.2	19.383	87.31%
	30	60	1.01	50	0.463	30.3	23.15	76.40%

Tabla 4.3: Parámetros de prueba obtenidos con una tensión de 30 volts para IGBT
(Fuente: Elaboración propia)

f (kHz)	Vin	B%	Iin	Vout	Iout	Pin	Pout	eficiencia
30 b). MOSFET	30	0	0.216	24.35	0.263	6.48	6.40405	98.83%
	30	5	0.25	26.6	0.281	7.5	7.4746	99.66%
	30	10	0.275	28.1	0.29	8.25	8.149	98.78%
	30	15	0.3	29.75	0.299	9	8.89525	98.84%
	30	20	0.333	31.6	0.311	9.99	9.8276	98.37%
	30	25	0.37	33.8	0.325	11.1	10.985	98.96%
	30	30	0.41	35.9	0.339	12.3	12.1701	98.94%
	30	35	0.465	38.55	0.356	13.95	13.7238	98.38%
	30	40	0.54	42.19	0.377	16.2	15.90563	98.18%
	30	45	0.63	46.1	0.398	18.9	18.3478	97.08%
	30	50	0.735	50.3	0.419	22.05	21.0757	95.58%
	30	55	0.92	56.8	0.453	27.6	25.7304	93.23%
30	60	1.14	63.6	0.486	34.2	30.9096	90.38%	

Tabla 4.4: Parámetros de prueba obtenidos con una tensión de 30 volts para MOSFET.
Fuente: Elaboración propia

Durante el análisis de las pruebas se observa que el prototipo tiene una alta eficiencia, y conforme se desarrollaron, se observa que cuanto mayor es la tensión de alimentación, la eficiencia lo es de la misma forma, de igual forma ocurre cuando el índice de amplificación incrementa.

4.2 EVALUACIÓN E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

Se logró comprobar que el algoritmo PWM simple, se implementa de manera correcta, asimismo el funcionamiento de la red de impedancia y el circuito de disparos. Conforme

a los resultados de cálculo de ambas pruebas, los MOSFET dieron mejores resultados y la eficiencia crece cuando el voltaje de alimentación es mayor.

A partir de los resultados de las pruebas se hace notar que el dispositivo apropiado para ser usado en niveles de potencia de hasta 150W es el MOSFET.

En la figura 4.1 se aprecia la forma de onda del voltaje de salida en el prototipo, la cual engloba el resultado de la integración total del proyecto. En la figura 3.10 se visualiza el prototipo armado en sus 3 etapas (potencia, interface y control), trabajando de tal forma que es posible encender un foco de 60 Watts.

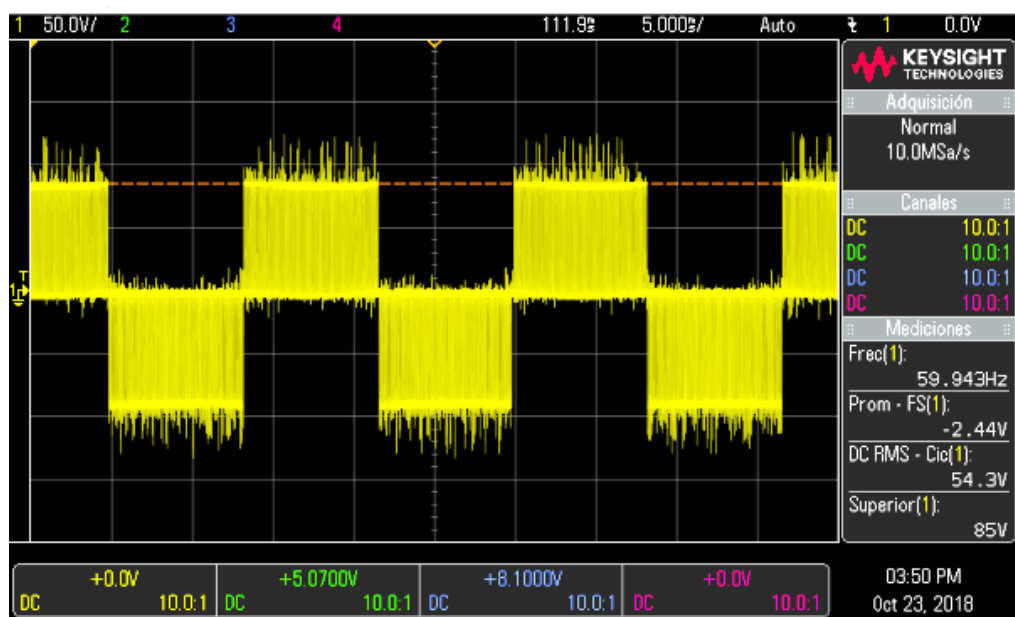


Figura 4.1: Forma de onda del voltaje de salida del convertidor.

Fuente: Elaboración propia

Las pruebas revelan que cuanto menor es la tensión, el MOSFET presenta mayor eficiencia sobre el IGBT. Ahora bien, cuanto mayor es la tensión de alimentación, la eficiencia del inversor va en aumento en ambos dispositivos.

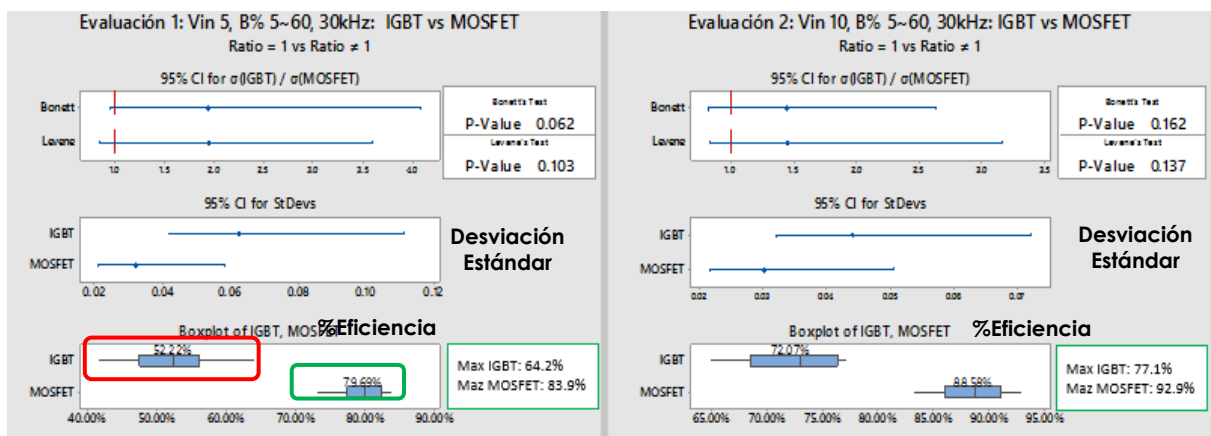
Los datos obtenidos se procesaron en Minitab 17, una aplicación de cálculo y administración de datos para interpretación estadística, donde fue posible realizar una evaluación más detallada.

Se aprecia en la figura 4.2 a), con un voltaje de entrada de 5V, que el MOSFET alcanza una eficiencia promedio de 79.69% (rectángulo Verde), presentando un mejor desempeño en comparación con el IGBT con 52.22% (rectángulo Rojo).

Para un nivel bajo potencia, el desempeño del MOSFET es más relevante sobre el IGBT.

Del mismo modo, se puede apreciar en el gráfico del cuadro central (StDvs), que la desviación estándar, medida que indica que tan dispersos están los datos con respecto a la media, para un MOSFET es menor que para un IGBT. Esto indica que para los niveles de potencia evaluados, el MOSFET es más estable, tiene menos variación en su desempeño.

Con un voltaje de entrada de 10V (figura 4.2 b), el comportamiento del MOSFET es similar al del IGBT, tiene mejor desempeño.



a)

b)

figura 4.2: Evaluación comparativa del resultado de la eficiencia entre MOSFET e IGBT

a) 5 volts

b) 10 volts.)

Se aprecia en la figura 4.3 a), que el MOSFET alcanza una eficiencia promedio de 92.4%(Rectángulo verde), presenta un mejor desempeño en comparación con el IGBT con 80.02%(Rectángulo rojo).

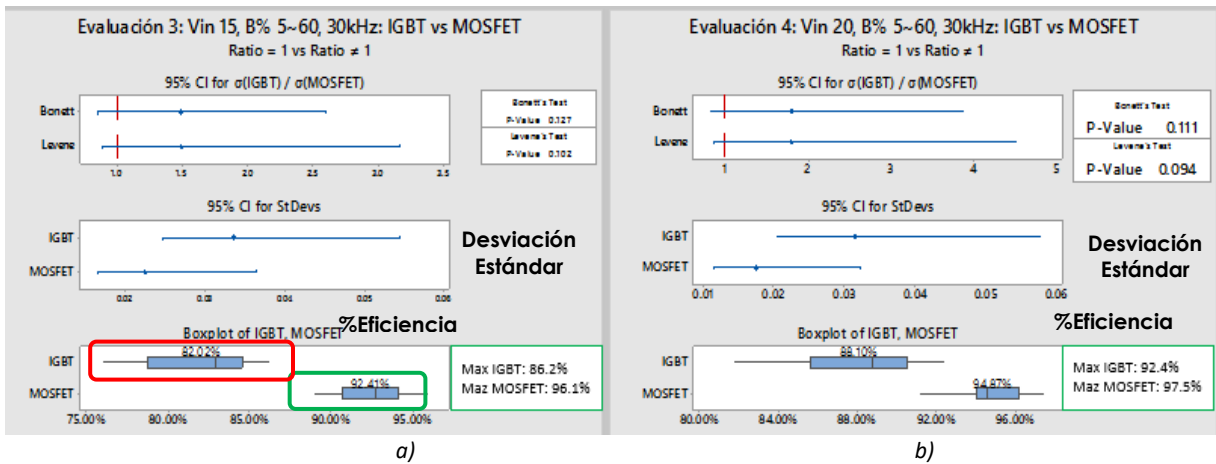


Figura 4.3: Evaluación comparativa del resultado de la eficiencia entre MOSFET e IGBT
a) 15 volts b) 20 volts

Finalmente, en la figura 4.4 b), es posible apreciar el punto máximo de eficiencia de las pruebas realizadas en el prototipo para ambos dispositivos, con una tensión de 30 volts, el MOSFET alcanza una eficiencia promedio de 97.9% (Rectángulo verde), en comparación con el IGBT con 94.31%(Rectángulo rojo). También se visualiza una desviación Std más alta en el IGBT, es menos estable para ese nivel de potencia.

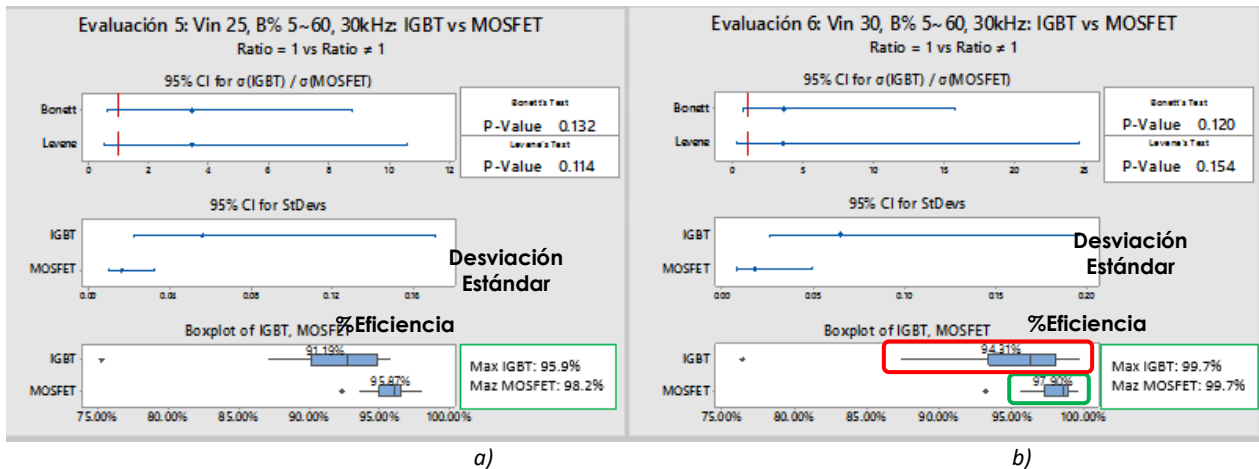


figura 4.4: Evaluación comparativa del resultado de la eficiencia entre MOSFET e IGBT
a) 25 volts b) 30 volts

4.3 PRUEBA DE HIPÓTESIS PARA UN VALOR DE ENTRADA DE 5 VOLTS.

Para realizar la primera prueba de hipótesis se consideran los valores de la **tabla 4.1**, valores obtenidos en las pruebas del 4.1.1, con un voltaje de entrada de 5V con IGBT y los valores de la **tabla 4.2**, con MOSFET. Por lo tanto, la hipótesis nula en términos estadísticos se representa de acuerdo a lo siguiente:

$$H_0: IGBT5 = MOSFET5,$$

Donde:

IGBT5: es el valor promedio de las eficiencias de la tabla 4.1

MOSFET5: es el valor promedio de las eficiencias de la tabla 4.2.

Con un valor de significancia de 0,05 se procede a calcular en estadístico.

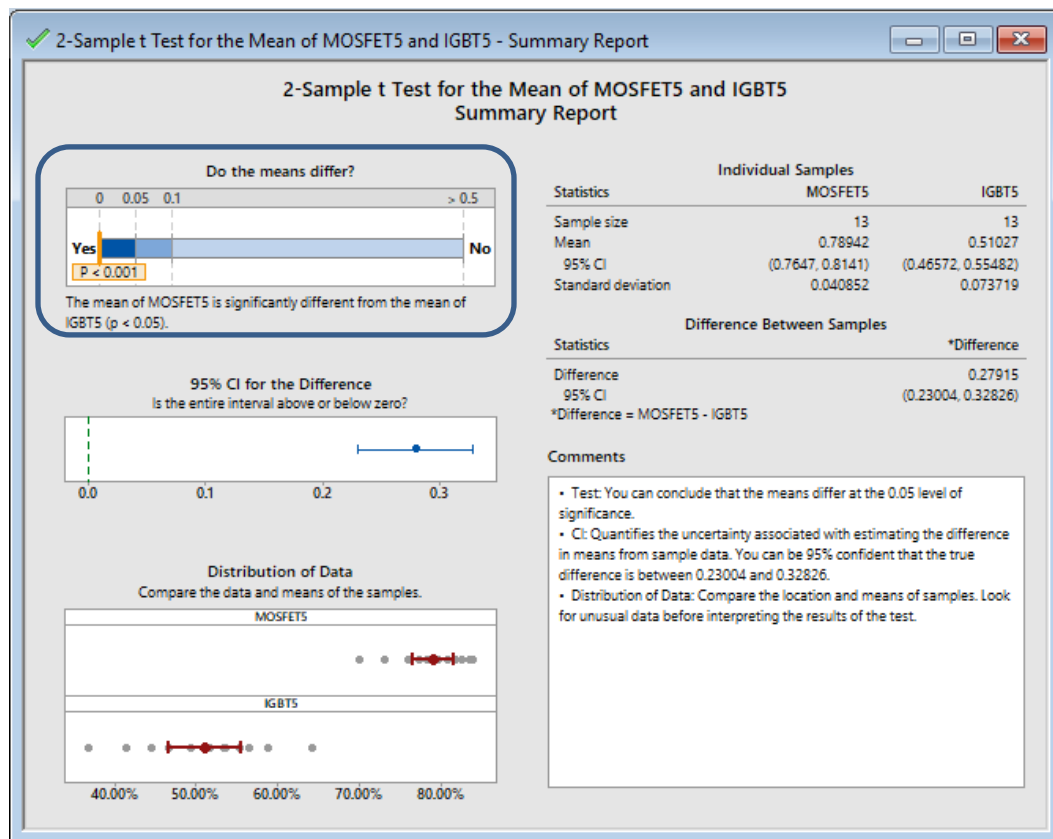


Figura 4.5: Prueba de hipótesis H_0 con los promedios de las eficiencias obtenidas en la tabla 4.1 y tabla 4.2

(Fuente: Elaboración propia)

El resultado del cálculo estadístico en la figura 4.5, indica que la hipótesis nula H_0 **se rechaza** debido a que el valor de P es menor de 0.05 (0.001), por lo tanto, la media de las eficiencias con MOSFET **es significativamente diferente** de la media de las eficiencias con IGBT, véase el resultado en el rectángulo azul de la figura.

Por lo tanto; $H_0: IGBT5 = MOSFET5$, Se rechaza.

El cálculo estadístico de la figura 4.6 revela que efectivamente en sistemas fotovoltaicos con niveles de potencia de hasta 150W, un microinversor de CC/CA de topología QZSI, utilizando dispositivos MOSFET, es más eficiente que con dispositivos IGBT, véase el resultado en el cuadro naranja de la figura.

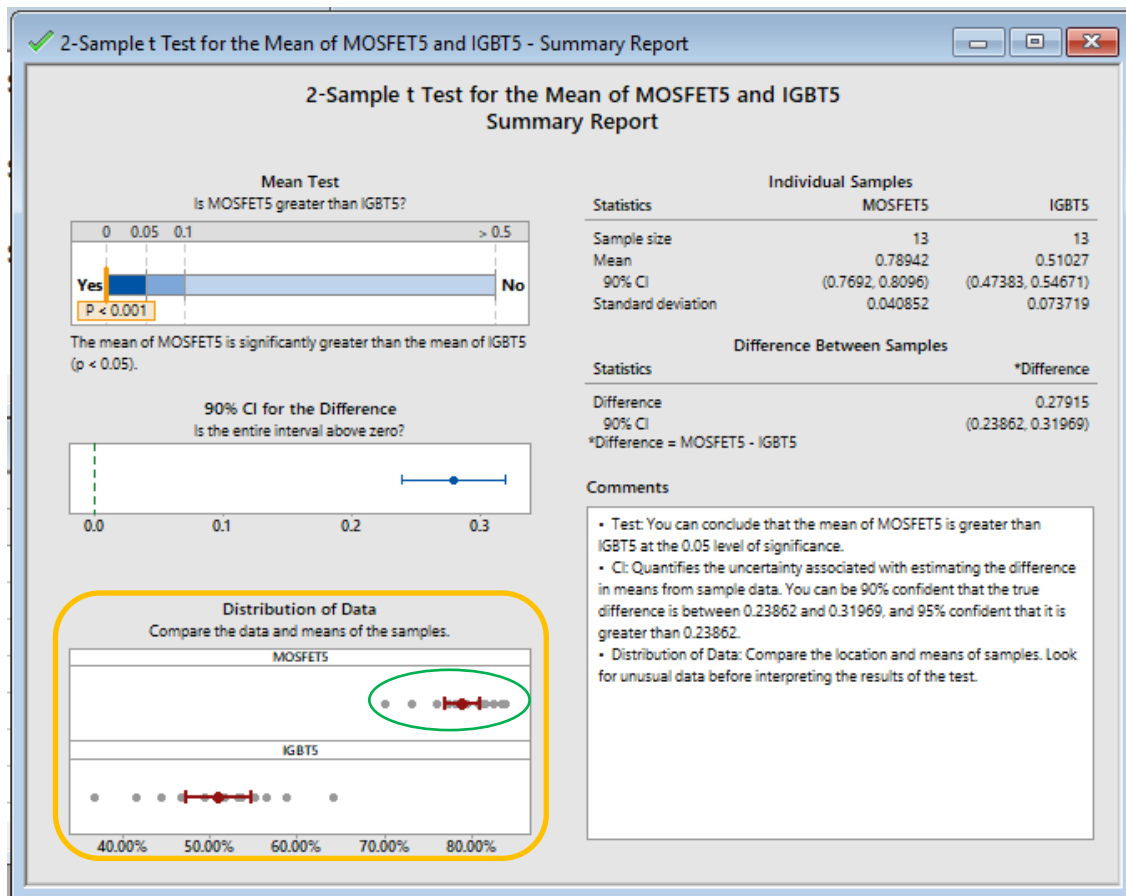


Figura 4.6: Comparación de los promedios de las eficiencias obtenidas en la tabla 4.1 y tabla 4.2

(Fuente: Elaboración propia)

4.4 PRUEBA DE HIPÓTESIS PARA UN VALOR DE ENTRADA DE 30 VOLTS

Para realizar la siguiente prueba de hipótesis se consideran los valores de la **tabla 4.3**, valores obtenidos en las pruebas del 4.1.2, con un voltaje de entrada de 30V con IGBT y los valores de la **tabla 4.4**, con MOSFET. Por lo tanto, se plantea una hipótesis nula H_0 que en términos estadísticos se representa de acuerdo a lo siguiente:

$$H_0: IGBT30 = MOSFET30,$$

Donde:

IGBT30: es el valor promedio de las eficiencias de la tabla 4.3

MOSFET30: el valor promedio de las eficiencias de la tabla 4.4

Con un valor de significancia de 0,05 se procede a calcular en estadístico.

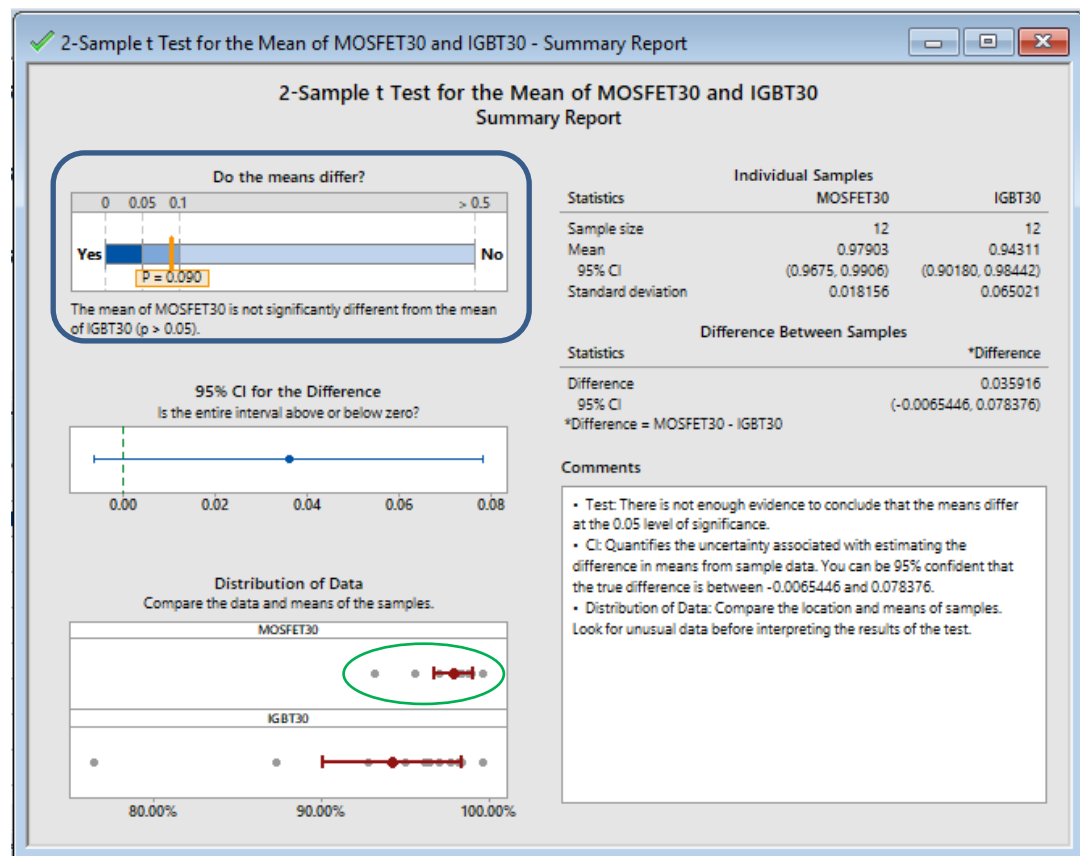


Figura 4.7: Prueba de hipótesis comparación de las eficiencias obtenidas en la tabla 4.3 y tabla 4.4

(Fuente: Elaboración propia)

A pesar de que el cálculo estadístico en la figura 4.7 indica que la media de las eficiencias del MOSFET e IGBT no son significativamente diferentes, la hipótesis nula H_0 **se rechaza** porque las medias no son iguales, por lo tanto, la media de las eficiencias con MOSFET **es diferente** de la media de las eficiencias con IGBT, véase el resultado en el rectángulo azul de la figura.

Por lo tanto; $H_0: IGBT30 = MOSFET30$, Se rechaza.

Del mismo modo que para la prueba con valor de entrada de 5V, el cálculo estadístico de la figura 4.8, confirma la hipótesis de que en sistemas fotovoltaicos con niveles de potencia de hasta 150W, un Micro inversor de CC/CA de topología QZSI, utilizando dispositivos MOSFET, es más eficiente que con dispositivos IGBT, véase el resultado en el cuadro naranja de la figura.

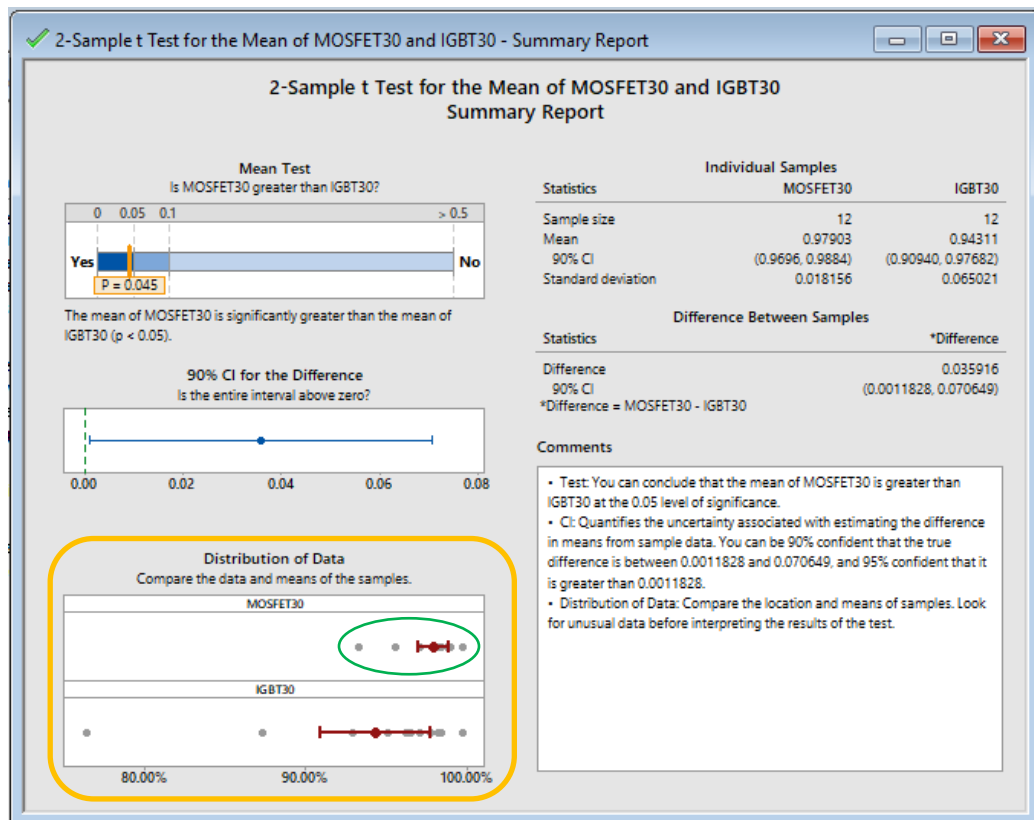


Figura 4.8: Comparación de los promedios de las eficiencias obtenidas en la tabla 4.3 y tabla 4.4

(Fuente: Elaboración propia)

CONCLUSIONES

Al realizar el trabajo se logró desarrollar un prototipo de convertidor electrónico del tipo fuente de impedancia de Nivel 4 de Madurez tecnológica. Se elaboró una comparativa que como resultado arrojó que para el nivel de potencia del prototipo desarrollado es más conveniente el uso de MOSFET que de IGBTs.

Se logró comprobar que el QZSI es una topología que brinda buenos resultados de amplificación e inversión de voltaje en una sola etapa y con un valor aceptable de eficiencia. Asimismo, se concluye que el MOSFET es el dispositivo más apropiado para ser utilizado en bajas potencias, en la topología.

En el presente trabajo se logró desarrollar experiencia en el diseño e integración de convertidores electrónicos de potencia, utilizando una metodología soportada en la simulación PSIM.

En conclusión, la contribución fue obtener un buen circuito de disparos y haber verificado la ventaja de los MOSFET's sobre IGBT's, para el rango de potencia variable en la que debe operar el inversor para esta aplicación de conversión de energía en paneles fotovoltaicos.

APORTACIÓN DE LA TESIS

La contribución fue obtener un buen circuito de disparos y haber verificado la ventaja de los MOSFET's sobre IGBT's, para el rango de potencia variable en la que debe operar el inversor para esta aplicación de conversión de energía en paneles fotovoltaicos. Es conveniente seguir evaluando este tipo de convertidores y escalar más su nivel de maduración tecnológica que implica el desarrollo del producto a un nivel pre-comercial y que se realicen pruebas de desempeño para validar que cumpla con normatividad aplicable este tipo de productos. Se recomienda como trabajo futuro trabajar en la interconexión a la red eléctrica y en realizar pruebas con paneles fotovoltaicos. En este contexto, para futuras pruebas se recomienda probar diversos métodos de control MPPT mencionado en "MPPT Techniques for PV Systems, 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, Istanbul, Turkey, 13-17 May 2013" para su implementación en paneles fotovoltaicos. De igual manera, se piensa en usar otros métodos de conmutación y determinar con cual método tiene mayor eficiencia.

APORTACIÓN SOCIAL DE LA TESIS

Conformar un grupo de trabajo de alumnos de posgrado y pregrado del Instituto tecnológico de Aguascalientes, CIATEQ, con el soporte del Centro de Investigaciones en Óptica, con el que fue posible desarrollar experiencia en la topología QZSI, la cual, es idónea para construir convertidores electrónicos de potencia, para sistemas fotovoltaicos. Esta estrategia permitirá avanzar hacia un futuro sustentable, donde las nuevas generaciones puedan continuar con el diseño de sistemas y dispositivos más eficientes y sustentables, que contribuyan al bienestar social, el uso adecuado de los recursos naturales en materia energética, la soberanía nacional y la creación de tecnologías propias que garanticen su disponibilidad, a través del sector de energías renovables del país.

REFERENCIAS BIBLIGRÁFICAS

1. **Banco Mundial**,. Energía. *Banco Mundial*. [En línea] 03 de Octubre de 2018. <https://www.bancomundial.org/es/topic/energy/overview>.
2. **Báez, José Ricardo**. *Energía solar fotovoltaica, una alternativa para el futuro*. Bogotá, Colombia : s.n., 2018.
3. **Cohen, Bonni y Shenk, Jon**. *Una verdad muy incómoda: Ahora o nunca*. Participant Media, Paramount Pictures, 2017.
4. **Li, Yuan, y otros**. *Quasi-Z-Source Inverter for Photovoltaic Power Generation Systems*. 1. Dept. of Electrical Engineering, Wuhan University, Hubei 430072, China, 2. Dept. of Electrical and Computer Engineering, Michigan State University, East Lansing, MI 48824, USA : s.n., 2009.
5. **Minh-Khai , Nguyen, Young-Cheol, Lim y Sung-Jun Park, Park**. "A comparision between single phase quasi-z-sourse and quasi-switched boost inverters". s.l. : IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015. 10.1109/TIE.2015.2424201.
6. **Ellabban, Omar y Abu-Rub, Haitham**. *Z-Source Inverter: Topology Improvements Review*. s.l. : IEEE Industrial Electronics Magazine, 2016. págs. 9-10. 10.1109/MIE.2015.2475475.
7. **BBC News Mundo**. Los 6 gráficos que muestran el estado actual del calentamiento global. *BBC*. [En línea] BBC News, 3 de 12 de 2018. [Citado el: 23 de 11 de 2019.] <https://www.bbc.com/mundo/noticias-46426822>.
8. **kalmus, Peter**. "Cambio climático: la humanidad en la encrucijada". Madrid : BBVA, 2018. Una década trascendente.
9. **Torres Flores, Ramón Carlos**. *Energía solar en hogares y negocios pequeños: una propuesta*. México, DF. : Universidad Nacional Autónoma de México, 2018. págs. 151-154. ISSN:1665-952x.
10. **Techno Sun**. Empresa. *Lista de precios P.V.P*. [En línea] 2 de Febrero de 2019. [Citado el: 28 de Febrero de 2019.] www.technosun.com/es/descargas/TECHNO-SUN-lista-precios-solar-fotovoltaica.pdf.
11. **Comision Nacional de Hidrocarburos, (CNH)**. *El Sector del Gas Natural: Algunas propuestas para el desarrollo de la Industria Nacional*. Cd. Mexico : Dirección General de Comunicación Social, 2018.

12. **Coronel Zamora, César Iván y Pesantez Salinas, Juan Carlos.** *Comparación de topologías QZSI de generación fotovoltaica residencial.* Cuenca, Ecuador : Universidad Politécnica Salesiana, Sede Cuenca, 2018. 0302266267 - 0104805411.
13. **T.S, Shines y Ramamoorthy, S.** *Performance comparision of Quasi-Z-Sourse inverter with current sourse Switched Boost QZSI.* India : Research India Publications, 2019. págs. 34-35. 0973-4562.
14. **Subhani, Nafis, y otros.** *Performance Analysis of a Modernized Z-Sourse Inverter for Roboust Boost Control in Photovoltaic Power Conditioning System.* Perak, Malaysia : MDPI, Electronics, 2019. págs. 14-16. 10.3390/electronics8020139.
15. **Zhou, Yan, Li, Hongbo y Li, Hui.** *A Single-phase PV Quasi-Z-source Inverter with Reduced Capacitance using Modified Modulation and Double-Frecuency Ripple Suppression Control.* s.l. : IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, 2016. págs. 6-7. 10.1109/TPEL.2015.2432070.
16. **Valladares García, Octavio.** *Energía Solar térmicca y sus Aplicaciones.* Tlaquepaque, Jal. : Universidad Nacional Autónoma de México, 2008.
17. **Leal Iga, Carlos y Leal Iga, Javier.** *Radiación solar en proyectos urbanos.* Mty. : Universidad Autónoma de Nuevo León, 2015. págs. 12-13. ISSN 2007-1175.
18. **Arancibia Bulnes, Camilo y Best y Brown, Roberto.** *Energía del Sol.* Temixco, Morelos : Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Investigación en Energía, 2010. págs. 10-11. ISSN:1405-6550.
19. **Mendoza Bustamante, María Jesús.** *Sistema energía solar fotovoltaica aislada.* s.l. : Vive mas inversiones, A.S., 2018.
20. **Dibene Arriola, Luis, Paredes Vázquez, César y Messina López, Víctor.** *Medición de radiación solar global y comparación con datos de satélites para un sitio de México.* Fresnillo, Zac. : Revista del Desarrollo Tecnológico, ECORFAN, 2017. págs. 64-67. ISSN-2531-2960.
21. **Perpiñán Lamigueiro, Oscar.** *Geometría y Radiación Solar.* Madrid, España : Universidad Politécnica de Madrid, 2018.
22. **Hernán Eyra, Ismael.** *ENERGIA SOLAR PARA ARQUITECTOS.* s.l. : Solenarq, 2014.
23. **Kost, Christoph, Shammugam, Shivenes y Jülch, Verena.** *Levelized cost of electricity renewable energy technologies.* Freiburg, Germany : Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE, Marzo de 2018.

24. **Instituto de Energía Solar.** *Gráficos significativos energía solar fotovoltaica.* Madrid, España : Universidad Politécnica de Madrid, Octubre, 2018.
25. **Instituto del Medio Ambiente.** *Situación Global de las Energías Renovables.* Santiago de Chile : RENEWABLES 2018 GLOBAL STATUS REPORT, 2018.
26. **Salazar Peralta, Araceli, Pichardo, Alfredo y Pichardo, Ulises.** *La energía solar, una alternativa para la generación de energía renovable.* s.l. : Revista de Investigación y Desarrollo, ECORFAN, 2016. págs. 10-16. ISSN-2444-4987.
27. **Abella, Alonso Miguel.** *Sistemas fotovoltaicos.* Madrid, España : CIEMAT, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, 2015.
28. **Hua, Chihchiang y Lin, J.** *An on-line MPPT algorithm for rapidly changing illuminations of solar arrays.* s.l. : Renewable Energy, 2003. 10.1016/S0960-1481(02)00214-8.
29. **Arancibia Bulnes, Camilo y Best y Brown, Roberto.** *Energía del Sol.* 2010. págs. 15-16.
30. **Martínez Reyes, Alfonso, Poggi Varaldo, Héctor M y Pineda Cruz, José A.** *Tecnologías Solar-Eólica-Hidrógeno-Pilas de combustible como fuentes de energía.* Ecatepec Morelos, Estado de México : Libro de Ciencia y Tecnología N°2, 2009. ISBN: 978-607-95065-0-6.
31. **Flores Rivera, Norma Rosario y Domínguez Ramírez, Miguel Ángel.** *Medición de la eficiencia energética de los paneles solares de silicio.* Puebla : CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS, S. C., 2016.
32. **Sotysolar.** Sotysolar. [En línea] 2017. [Citado el: 29 de 06 de 2019.] <https://sotysolar.es/placas-solares/rendimiento>.
33. **Arenas Rosales, Filemón y Martell Chávez, Fernando.** *Generación fotovoltaica con adición de seguimiento cenital en el centro de México.* Celaya, Gto. : Tecnológico Nacional de México en Celaya, 2017. ISSN: 2448-847X.
34. **Pelayo López, Jorge A, y otros.** *Comparativa de la eficiencia entre un sistema fotovoltaico con seguimiento solar y un sistema fotovoltaico fijo.* s.l. : Revista Iberoamericana de las ciencias biológicas y agropecuarias, 2017. págs. 19-25. ISSN: 2007-9990.
35. **Lema Carrera, Miguel A.** *Diseño e implementación de un sistema automático de purificación de agua por medio de energía, reflexión solar y luz ultravioleta.* Quito, Ecuador : Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, 2015.

36. **Ortiz, Harold.** EcoSolar. [En línea] Autoconsumo, 21 de Abril de 2016. [Citado el: 29 de 06 de 2019.] <https://www.ecosolaresp.com/como-dimensionar-una-instalacion-fotovoltaica/>.
37. **Valldoreix, GreenPower.** Las Ventajas de los Seguidores Solares. [En línea] Valldoreix, GreenPower, Julio de 15 de 2015. [Citado el: 29 de 06 de 2019.] <http://www.valldoreix-gp.com/las-ventajas-de-los-seguidores-solares/>.
38. **Mohan, Ned, Undeland, Tore M y Robbins, William.** Sistemas Electrónica de Potencia. *Electrónica de potencia; Convertidores, aplicaciones y diseño.* 2009 : Mc Graw Hill, 3er Edición, págs. 3-12.
39. **EcuRed.** EcuRed. [En línea] Enciclopedia cubana, 3 de Agosto de 2011. [Citado el: 30 de 06 de 2019.] https://www.ecured.cu/William_Bradford_Shockley.
40. **Mañana Canteli, Mario.** Regulación, control y protección de máquinas eléctricas. *Convertidores electrónicos de potencia.* Santander, España : Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria, 2016.
41. **Ballester, Eduard y Pique, Robert.** Principios fundamentales y estructuras básicas. *Electronica de Potencia.* Barcelona : Marcombo Universitaria, 2011, págs. 48-51.
42. **Rashid, Muhammad H.** Circuitos, dispositivos y aplicaciones. *Electrónica de Potencia.* Foth Wayne, Indiana : Prentice Hall, 1995, págs. 282-300.
43. **Wikilibros.** Electrónica de Potencia/IGBT/Parámetros característicos de funcionamiento. [En línea] 11 de 06 de 2018. [Citado el: 30 de 06 de 2019.] https://es.wikibooks.org/wiki/Electr%C3%B3nica_de_Potencia/IGBT/Par%C3%A1metros_caracter%C3%ADsticos_de_funcionamiento.
44. **Blake, Carl y Bull, Chris.** *IGBT or MOSFET: Choose Wisely.* s.l. : International Rectifier, 2006. págs. 1-3.
45. **Meza, Heynler, García, José L y Sepulveda, Sergio.** *Estrategias de Control MPPT aplicadas en un convertidor DC/DC tipo BOOST para sistemas fotovoltaicos.* Colombia : Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA), 2017. págs. 102-104. 10.24054/16927257.
46. **Mummadi, Veerachary.** *Control of TI-SEPIC Converter for Optimal Utilization of PV.* New Delhi : IICPE, 2010. 10.1109/IICPE.2011.5728087..
47. **Satpathy, Saurav.** *Photovoltaic Power control using MPPT.* Orissa, India : National Institute of Technology, Department of Electrical Engineering, 2012.

48. **RACSO**. Arduino UTSFM. [En línea] Universidad Federico Santa María, Av. España 1680 Of. A611, 21 de mayo de 2014. [Citado el: 30 de 06 de 2019.] <http://www.arduino.utsfm.cl/modulacion-por-ancho-de-pulso-pwm/>.
49. **Canchanya Balbin, Roy Elvis**. *PWM Ferza Electronica de Potencia*. s.l. : Scribd, 2015.
50. **Ellabban, O y Abu-Rub, H**. *Z-Source Inverter, Topology Improvements Review*. s.l. : IEEE Industrial Electronics Magazine, 2016. págs. 5-8. 10.1109/MIE.2015.2475475.
51. **Chan, Freddy, y otros**. *Covnertidor Fuente Z para Aplicaciones Fotovoltaicas*. Guanajuato : XXXIV Semana Nacional de Energía Solar, 2010. SNES2010-SFV-015.
52. **Huang, Y. , y otros**. *Z-Source inverter for residential photovoltaic systems*. s.l. : IEEE Transactions on Power Electronics, 2006. págs. 1776-1782. 10.1109/TPEL.2006.882913.
53. **Peng, F.Z**. *Z-Source Inverters for Advanced Power Conditioning of Alternate Energy Systems*. Michigan : Michigan State University, 2016. 517-336-4687.
54. **Fang, X.P., Wang, X.G. y Chen, Z.Q**. *A Single-Phase AC Power Supply Based on Modified Quasi-Z-Source Inverter*. s.l. : IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2014. 10.1109/TASC.2014.2333533.
55. **Subhashini, N. y Kumar, N. Praveen**. *A Modified Single-Phase Quasi z source converter*. s.l. : International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT), 2015. págs. 248-249. 10.14445/22315381/IJETT-V27P245.
56. **Wang, Miao, y otros**. *Photovoltaic Grid-connected System based on Quasi-Z-source Inverter System*. s.l. : Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference, 2013. págs. 1219-1222. ISSN=1934-1768.
57. **Flores Ruiz, Eric, Miranda Novales, María Guadalupe y Villasís Keever, Miguel Ángel .** *El protocolo de investigación VI: cómo elegir la prueba estadística adecuada, Estadística Inferencial*. Ciudad de México : Revista Alergia México, 2017. págs. 364-370. 2017;64(3):364-370.
58. **Universo Formulas**. Universo Formulas. [En línea] Creative commons, 24 de 06 de 2019. [Citado el: 24 de 06 de 2019.] <https://www.universoformulas.com/estadistica/descriptiva/media/>.
59. **Quevedo Ricardi, Fernando**. *La prueba de la hipótesis*. Chile : Medwave, 2011. págs. 1-3. 10.5867/medwave.2011.07.5066.