

Comparación de convertidores MPPT multinivel para el seguimiento del punto de máxima potencia en paneles fotovoltaicos

Fanor Andrés Adarme Martínez

Universidad CESMAG
Facultad de ingeniería
Programa de ingeniería electrónica
San Juan de Pasto
2024

Comparación de convertidores MPPT multinivel para el seguimiento del punto de
máxima potencia en paneles fotovoltaicos

Fanor Andrés Adarme Martínez

Asesor

Fredy Alexis Dulce Mera

Universidad CESMAG
Facultad de ingeniería
Programa de ingeniería electrónica
San Juan de Pasto
2024

Dedicatoria

Este proyecto está dedicado principalmente a mi papá que en paz descansa, quien fue el que más me apoyo en todo este proceso, en general a mis padres Pedro Pablo Adarme y Nubia Martínez por su sacrificio, esfuerzo y darme el ejemplo de la perseverancia a pesar de las dificultades y desafíos que se han presentado.

A mí por la dedicación empeño y perseverancia con la que se implementó y lleve a cabo el desarrollo de dicha investigación, por todo mi esfuerzo a pesar de cada dificultad que se presentó en mi camino.

A mis hermanos Jhonatan Martínez y Karen Martínez por brindarme su apoyo moral el cual es muy importante en estos procesos

A mi familia, los que me brindaron su apoyo moral y me dieron palabras de aliento para culminar mi proceso de manera satisfactoria. Y, por último, a mis amigos y compañeros que forjé durante todo este proceso fueron muy valiosos para culminar este proyecto.

Agradecimientos

El desarrollo de este proyecto fue gracias a un compromiso y dedicación notable de mi parte, la culminación no se podría alcanzar sin la colaboración de cada personaje mencionado a continuación, muchos de los cuales han brindado un respaldo significativo para llevar a cabo el proyecto.

A la universidad CESMAG quienes brindan una excelente educación con todo el cuerpo docente en el programa de ingeniería electrónica para la formación de nuevos ingenier@s.

Al Mg. Fredy Alexis Dulce Mera por su guía, apoyo, dedicación y paciencia en todo este proyecto, también en el proceso académico.

A todo el cuerpo docente, quienes impartieron sus conocimientos desinteresadamente permitiendo que nos formemos como profesionales con buenas aptitudes y capacidades.

A todas las personas que me apoyaron y han hecho que este proyecto se desarrolle con éxito en especial a aquellas personas que estuvieron dispuestos a ayudar y compartieron sus conocimientos conmigo.

Contenido

Introducción	12
1. Problema de Investigación	14
1.1 Objeto o tema de investigación	14
1.2 Línea de investigación: Potencia y Energía	14
1.3 Sub-línea de investigación: energías Alternativas	14
1.4 Descripción o planteamiento del problema.....	14
1.5 Formulación del problema (Pregunta de investigación)	15
1.6 Objetivos	15
1.6.1 Objetivo General.	15
1.6.2 Objetivos específicos.....	15
1.7 Justificación.....	16
1.8 Viabilidad.....	17
1.9 Delimitación	17
2. Tópicos del marco teórico.....	18
2.1 Antecedentes	18
2.1.1 Concepción de un convertidor modular multinivel para grandes generaciones fotovoltaicas basadas en criterios de eficiencia.	18
2.1.2 Sistemas fotovoltaicos conectados a la red a gran escala de media tensión que utilizan convertidores multinivel modulares y puente en H en cascada: una revisión.	19
2.1.3 Modelado y análisis de un convertidor BOOST híbrido multinivel derivado de impulso (BDMHC).....	20
2.1.4 Comparación de la distorsión armónica total del convertidor modular multinivel y del convertidor modular multinivel híbrido paralelo.....	20
2.2 Enunciados de los supuestos teóricos.....	22
2.2.1 Energía solar	22

2.2.2	Irradiancia.....	23
2.2.3	insolación.....	23
2.2.4	Celda Fotovoltaica.....	24
2.2.5	Tecnologías de fabricación de celdas fotovoltaicas	26
2.2.6	Paneles fotovoltaicos	27
2.2.7	Voltaje, potencia y número de células de los paneles fotovoltaicos	27
2.2.8	¿Que son los paneles fotovoltaicos?.....	28
2.2.9	Funcionamiento de un panel fotovoltaico	28
2.2.10	Variables que afecta la generación de energía en los paneles fotovoltaicos	29
2.2.11	Relación de la Curvas voltaje-corriente y voltaje-potencia de una celda solar	29
2.2.12	Técnicas de control para MPPT	31
2.2.13	Convertidor modular multinivel MMC	34
2.2.14	convertidor BOOST híbrido multinivel derivado de impulso (BDMHC) ..	34
2.2.15	variables.....	35
2.3	Hipótesis.....	38
2.3.1	Hipótesis de investigación.....	38
2.3.2	Hipótesis nula	38
2.3.3	Hipótesis alternativa	38
3.	Metodología	39
3.1	Enfoque	39
3.2	Paradigma.....	39
3.3	Método	39
3.4	Tipo de investigación	39
3.5	Diseño de investigación	40

3.6	Universo	40
3.7	Muestra.....	41
3.8	Técnicas de recolección de la información	41
3.8.1	Validez de la técnica.....	41
3.8.2	Confiabilidad de la técnica	41
3.9	Instrumentos de recolección de la información.....	42
4.	Resultados	43
4.1	Modelo del panel para simulación	43
4.2	Simulación Convertidores Multinivel	43
4.2.1	Simulación Matlab/Simulink Convertidor BOOST híbrido multinivel derivado de impulso.....	44
4.2.2	Simulación Matlab/Simulink Convertidor Modular Multinivel MMC.....	45
4.2.3	Resultados de las simulaciones	47
4.3	Simulación de convertidores para ensamblaje ¡Error! Marcador no definido.	
4.3.1	Simulación Matlab/Simulink Convertidor BOOST híbrido multinivel	52
4.3.2	Simulación Matlab/Simulink Convertidor Modular Multinivel MMC.....	52
4.3.3	Resultados de las simulaciones	53
4.4	Funcionamiento Algoritmo P&O..... ¡Error! Marcador no definido.	
4.5	Resultados de los datos recolectados	58
4.5.1	Modelamiento matemático del panel.....	58
4.5.2	Graficas de datos	59
5.	Análisis y discusión de los Resultados	68
5.1.1	Comparación de eficiencia entre el convertidor MMC y el convertidor BOOST	69
	Conclusiones	75

Recomendaciones.....	77
Bibliografía	79
Anexos	81

Lista de Figuras

figura 1.estructura del convertidor MMC con matrices fotovoltaicas distribuidas y submódulos.	20
figura 2. Voltaje y corriente de salida de MMC trifásico	21
figura 3. Voltaje y corriente de salida del PHMMC trifásico	22
figura 4. Espectro de Radiación Solar.....	23
figura 5. Curva de Irradiación Diaria y horas solares pico	24
figura 6. efecto Fotoeléctrico de una celda solar.....	25
figura 7. Celda Fotovoltaica de Silicio Policristalino	25
figura 8. Celda Fotovoltaica de Silicio mono-cristalina.....	25
figura 9. Celda Fotovoltaica de Silicio amorfa	26
figura 10. Celdas mono-cristalinas, poli-cristalinas, de película delgada y sus eficiencias	27
figura 11. Desplazamiento de Electrones mediante la captación de Fotones	28
figura 12. Esquema de Funcionamiento de un Panel solar	29
figura 13. curva voltaje-corriente y voltaje-potencia	30
figura 14. Diagrama de flujo del algoritmo adaptativo P&O MPPT	32
figura 15. Diagrama de flujo método inductancia incremental.....	33
figura 16. Diagrama de flujo algoritmo voltaje fraccional circuito abierto	33
figura 17. Topología MMC para la interconexión en media tensión en generadores fotovoltaicos.....	34
figura 18. Circuito equivalente para Inversión e Impulso intervalo de Disparo-Potencia	35
figura 19. Radiación solar absorbida y reflejada por la superficie terrestre.....	36
figura 20. Niveles de temperatura de calor	37
Figura 21.	43
Figura 22. Convertidor Boost hibrido multinivel Matlab/Simulink.	45
Figura 23. Convertidor Modular Multinivel MMC Matlab/Simulink	46
Figura 24. Salida corriente y voltaje AC Convertidor Boost hibrido multinivel Matlab/simulink	47
Figura 25. Salida corriente y voltaje AC Convertidor Modular Multinivel MMC Matlab/Simulink	48

Figura 26. Diagrama de flujo del algoritmo P&O implementado en la investigación.....	49
Figura 27. Convertidor Boost hibrido multinivel Matlab/Simulink	52
Figura 28. Convertidor Modular Multinivel MMC Matlab/Simulink.	53
Figura 29. Salida Convertidor Boost hibrido multinivel Matlab/simulink.	54
Figura 30. Salida Convertidor Modular Multinivel MMC Matlab/Simulink.	55
Figura 31. Grafica de salida del convertidor Boost.....	56
Figura 32. Grafica de salida del convertidor MMC.	57
Figura 33. Datos convertidores Boost P1, MMC P2, valor teórico, irradiancia y temperatura.	60
Figura 34. Datos convertidores Boost P1, MMC P2, valor teórico, irradiancia y temperatura.	61
Figura 35. Datos convertidores Boost P1, MMC P2, valor teórico, irradiancia y temperatura.	62
Figura 36. Datos convertidores Boost P1, MMC P2, valor teórico, irradiancia y temperatura.	63
Figura 37. Datos convertidores Boost P1, MMC P2, valor teórico, irradiancia y temperatura.	64
Figura 38. Datos convertidores Boost P2, MMC 1, valor teórico, irradiancia y temperatura.	65
Figura 39. Datos convertidores Boost P1, MMC P2, valor teórico, irradiancia y temperatura.	66
Figura 40. Datos convertidores Boost P1, MMC P2, valor teórico, irradiancia y temperatura.	67
Figura 41. Montaje convertidor BOOST	81
Figura 42. Montaje convertidor MMC.....	82
Figura 43. Modelo panel solar	84

Lista de Tablas

Tabla 1. Parámetros para MMC	21
Tabla 2. Parámetros del PHMMC	21
Tabla 3. Técnicas de recolección de la información.	41
Tabla 4. Descripción del algoritmo P&O.....	50
Tabla 6. Datos típicamente suministrados por el fabricante.	59
Tabla 7. Definición de las técnicas estadísticas.	70
Tabla 8. Aplicación de las técnicas estadísticas de los datos reflejados en la figura 31...	71
Tabla 9. Aplicación de las técnicas estadísticas de los datos reflejados en la figura 32...	71
Tabla 10. Aplicación de las técnicas estadísticas de los datos reflejados en la figura 33.	72
Tabla 11. Aplicación de las técnicas estadísticas de los datos reflejados en la figura 34.	72
Tabla 12. Aplicación de las técnicas estadísticas de los datos reflejados en la figura 35.	72
Tabla 13. Aplicación de las técnicas estadísticas de los datos reflejados en la figura 36.	73
Tabla 14. Aplicación de las técnicas estadísticas de los datos reflejados en la figura 37.	73
Tabla 15. Aplicación de las técnicas estadísticas de los datos reflejados en la figura 38.	74

Introducción

En gran parte del mundo las instalaciones de sistemas solares fotovoltaicos han presentado un incremento elevado en los últimos tiempos aprovechando de mejor manera los recursos energéticos disponibles. Las energías renovables no convencionales como lo es la energía fotovoltaica son capaces de minimizar el exceso de contaminación al medio ambiente.

La célula fotovoltaica es la encargada de captar la energía contenida de la radiación solar y transformarla en energía eléctrica; desafortunadamente, la eficiencia de la conversión de energía de los paneles fotovoltaicos tiende a ser baja porque no aprovecha la energía necesaria proveniente del sol, las células fotovoltaicas tienen una curva característica de operación (voltaje vs corriente), en el cual se refleja cualquier punto de funcionamiento, dentro de esta curva existe un punto en particular conocido como punto de máxima potencia (MPP), en el cual la celda solar suministra la potencia máxima de salida a una carga (Cruz-Monsalve et al., 2020).

La eficiencia de una instalación fotovoltaica depende de diferentes factores como lo es: la eficiencia del módulo fotovoltaico, la eficiencia del inversor y la eficiencia del algoritmo de búsqueda del punto de máxima potencia o MPPT. Para mejorar la eficiencia del módulo fotovoltaico y del inversor se requiere de avances científicos y tecnológicos lo cual demanda tiempo y pueden llegar a ser costoso. Por otra parte mejorar la búsqueda del punto de máxima potencia (MPP) con convertidores multinivel es más fácil y representan menos costo, lo que conllevaría a un aumento en la generación de potencia en los sistemas fotovoltaicos (PV) (P. Telechea, 2015).

Dentro de los algoritmos de MPPT existe una gran variedad de técnicas, entre sus más destacadas y conocidas esta: Perturbar y observar (P&O), conductancia incremental y voltaje fraccional de circuito abierto (fvoc) entre otros.

La integración del sistema fotovoltaico a la red se puede clasificar según la topología del convertidor en topologías centralizadas y Multi-String. La topología más simple es la topología centralizada que consta de un convertidor conectado a una gran cantidad de módulos fotovoltaicos, su rendimiento energético se reduce durante el sombreado parcial o el desajuste de módulos, esto es el resultado de usar solo un MPPT para una gran cantidad de cadenas fotovoltaicas. Por otro lado, en la topología de cadenas múltiples, cada cadena fotovoltaica tiene su propio MPPT independiente, lo que dará como resultado un alto rendimiento energético. Sin

embargo, la implementación independiente del MPPT requiere el uso de un convertidor CC-CC que contribuye a la complejidad de la topología y al costo total (Bashir et al., 2020).

En el trabajo de investigación se realiza una revisión y comparación del convertidor modular multinivel MMC y del convertidor BOOST híbrido multinivel, y se busca la mejor alternativa para el seguimiento del punto de máxima potencia en paneles fotovoltaicos.

1. Problema de Investigación

1.1 Objeto o tema de investigación

Convertidores multinivel para el seguimiento del punto de máxima potencia en paneles fotovoltaicos.

1.2 Línea de investigación: Potencia y Energía

La línea de Potencia y Energía del Programa de Ingeniería Electrónica de la Universitaria CESMAG enfoca su trabajo en el estudio de la generación, transformación, intercambio, transporte, distribución, almacenamiento y consumo de energía eléctrica de manera absoluta o por unidad de tiempo, incluyendo el diseño, análisis, control y optimización de sistemas de electrónica de potencia. Las líneas de investigación incluyen Calidad de la Energía y Energías Alternativas.

1.3 Sub-línea de investigación: energías Alternativas

Las energías alternativas son aquellas que se obtienen mediante procesos alternativos a los tradicionales (quema de combustibles fósiles o en el caso de Colombia la hidroeléctrica a gran escala), estas se dividen en renovables o limpias, las cuales se obtienen de fuentes naturales capaces de regenerarse de manera más rápida de lo que se consumen o ser virtualmente infinitas; y en no renovables cuya fuente se consume más rápido de lo que se regenera pero que a diferencia las fuentes tradicionales el impacto ambiental es menor.

1.4 Descripción o planteamiento del problema

A lo largo de los años se han desarrollado diversas fuentes de energía eléctrica basadas en el uso de combustibles fósiles, provocando un impacto ambiental eminente por sus altos niveles de contaminación. Por esta razón se ha visto la necesidad de buscar fuentes de energía renovables que permitan minimizar la contaminación a causa de las energías tradicionales. Así, se sabe que la energía solar es una fuente de energía limpia que se puede aprovechar para reducir el impacto negativo del cambio climático.

Existen muchos factores ambientales que pueden afectar el buen funcionamiento de los paneles fotovoltaicos, por ello es necesario el uso de convertidores MPPT ya que son dispositivos fundamentales en las instalaciones fotovoltaicas. El propósito de cualquier convertidor MPPT es extraer la máxima potencia del módulo fotovoltaico en todas las condiciones ambientales (Mohapatra et al., 2019).

La Universidad CESMAG cuenta con la estación Davis, que permite extraer datos de temperatura e irradiancia. Estos datos se utilizarán para realizar pruebas con los convertidores. Además, el laboratorio dispone de la instalación de paneles fotovoltaicos, esenciales para evaluar el rendimiento de dos convertidores multinivel. Es imposible probar todas las estrategias existentes, pero si es posible investigar cuales son las más destacadas para poder obtener buenos resultados y así determinar cuál es la más adecuada.

Si bien, en la literatura el convertidor modular MMC y el convertidor BOOST multinivel presentan buenos resultados, pero es importante analizar las ventajas que ofrecen respecto a los otros convertidores es decir en qué condiciones se tiene un mejor desempeño y cual permite extraer la mayor cantidad de energía del sistema fotovoltaico en los distintos escenarios que se puedan presentar.

1.5 Formulación del problema (Pregunta de investigación)

¿Cuál es la cantidad de energía extraída por el convertidor modular MMC y el convertidor BOOST multinivel en los paneles fotovoltaicos?

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo General.

Comparar la energía extraída por los convertidores multinivel MMC y BOOST en paneles fotovoltaicos de 40W.

1.6.2 Objetivos específicos

- Validar el funcionamiento de los convertidores a través de un algoritmo utilizando el software Matlab.
- Implementar los convertidores multinivel MMC y BOOST para la extracción de la máxima energía de los paneles fotovoltaicos.

- Analizar los convertidores multinivel implementados comparando la energía extraída de cada uno.

1.7 Justificación

La implementación de convertidores multinivel MPPT en instalaciones fotovoltaicas son de gran relevancia debido a que los paneles fotovoltaicos presentan deficiencias a causa de factores externos no controlables, por tal razón con la implementación de los convertidores multinivel se quiere extraer el máximo rendimiento energético en condiciones medioambientales no controlables, incrementando el potencial eléctrico que es aprovechado a causa de la irradiancia solar. Además, un convertidor multinivel permite controlar el nivel de carga de las baterías y por ende a controlar el flujo energético que circula entre los paneles fotovoltaicos, lo que ayudaría a salvaguardar la vida útil de las baterías y a evitar un exceso de desechos tóxicos que serían perjudiciales para el medio ambiente. Si bien no es este el objeto de la investigación, pero si es importante destacar la utilidad de este tipo de convertidores.

Como en este trabajo se busca extraer la mayor cantidad de energía en los paneles fotovoltaicos, se propone analizar el desempeño del sistema empleando dos tipos de convertidores multinivel con los cuales se desea trabajar durante el desarrollo del proyecto determinado cual extrae la mayor cantidad de energía posible a los paneles.

Uno de ellos es el convertidor modular MMC ya que es fácil de implementar por tal razón su costo no es muy elevado, se destaca por tener la ventaja de extenderse a cantidades altas de voltaje (Elsanabary et al., 2020). Así mismo el convertidor BOOST multinivel es capaz de controlar y minimizar el efecto de los cambios de voltaje en las plantas solares, como también a suministrar la cantidad requerida de energía sin exceso ni escasez lo que es importante ya que, al controlar el nivel de carga de las baterías, estas no sufrirán daños. (Jeyasudha.S & Geethalakshmi.B, 2017).

Los resultados de este proyecto permitirán conocer que convertidor multinivel mencionado anteriormente brinda un mayor rendimiento en paneles fotovoltaicos, evaluando la extracción de energía de estos convertidores multinivel respecto a las variables de entrada como lo son temperatura, irradiancia, voltaje y corriente.

1.8 Viabilidad

Este estudio es viable debido a que se cuenta con los recursos tales como bibliografías y artículos científicos que son necesarios para el proceso de investigación, como también de la disposición y el respaldo de algunos docentes de la universidad para aclarar dudas y solucionar algunos inconvenientes que se pueden presentar durante el desarrollo del estudio.

Además, para realizar las respectivas comparaciones que son necesarias para obtener un buen rendimiento en la implementación del convertidor se cuenta con el acceso a la universidad CEMAG y posteriormente a los paneles fotovoltaicos que se encuentra en el laboratorio en la misma universidad.

Así mismo se cuenta con los recursos económicos para la adquisición de materiales como componentes electrónicos que serán financiados por el estudiante para la implementación del dispositivo o circuito MPPT multinivel y del software Matlab del cual se hará uso de la licencia de la universidad para desarrollar el algoritmo necesario para que el controlador funcione correctamente y de tal forma llevar a cabo la finalidad del proyecto.

1.9 Delimitación

El proyecto será desarrollado en las instalaciones de la universidad CESMAG donde se va a trabajar con los paneles fotovoltaicos que se encuentran ubicados en el laboratorio San Buenaventura.

Se hará uso del Software Matlab en el cual se realizará un algoritmo que este acorde a los parámetros que se están buscando, así mismo para la implementación se consideran únicamente 2 convertidores MPPT multinivel, los cuales proporcionan un rendimiento adecuado y menor pérdida de energía en los módulos fotovoltaicos. Cabe resaltar que es importante realizar pruebas entre los dos convertidores implementados y así observar cual es el más apropiado.

El proyecto.

2. Tópicos del marco teórico

2.1 Antecedentes

2.1.1 *Concepción de un convertidor modular multinivel para grandes generaciones fotovoltaicas basadas en criterios de eficiencia.*

La topología modular multinivel MMC permite una conexión directa a la red de media tensión MT, la alta frecuencia de conmutación que poseen estos convertidores MMC permite reducir la inductancia del enlace que es utilizada para la interconexión de la red. Las células fotovoltaicas pueden entregar diferentes potencias debido a sombreados parciales o a cualquier otro factor que se pueda presentar. Por ello, el convertidor DC-DC de cada módulo lo que hace es rastrear el punto de máxima potencia de su correspondiente célula fotovoltaica. Luego, el convertidor DC-DC de cada módulo realiza la regulación de voltaje en su salida. Por tal razón, Este convertidor será capaz de mantener un voltaje regulado en la salida final del módulo, de tal manera que la suma de todas las salidas balanceadas de cada módulo arroje el nivel objetivo de voltaje medio (González et al., 2016).

Para validar el funcionamiento del MMC, se realiza un ejemplo para un MMC de 1 MW conectada a 13,2 kV con 4 módulos fotovoltaicos. Básicamente, consiste en probar la variación de la irradiancia solar en los módulos, desde un 100% de producción de energía hasta un 2%, El funcionamiento del MMC también se prueba con una producción de potencia activa nula y con una gran gestión de potencia reactiva capacitiva e inductiva, ambos a los mismos niveles de la potencia activa nominal del MMC. Inicialmente entregan una potencia nominal de 1 MW, posterior a ello cuando las irradiancias solares caen al 2% en 0,5 segundos, la corriente se reduce considerablemente. Entonces las corrientes aumentan de nuevo en 0,8 s debido a la generación de flujo de potencia reactiva capacitiva de 1 MVAR, aunque las irradiancias solares en todos los módulos permanecen al 2% (González et al., 2016).

Para realizar el cálculo de las pérdidas y la eficiencia de cada etapa del módulo desde la salida hasta la entrada, es decir la potencia nominal y el voltaje por módulo se puede realizar de la siguiente manera.

$$P_{nom_{mod}} = \frac{P_{totalMMC}}{N_{modulos}} \quad (1)$$

$$V_{nom_{mod}} = \frac{V_{totalMMC}}{N_{modulos}} \quad (2)$$

- $P_{nom_{mod}}$: Potencia de generación total deseada.
- $V_{nom_{mod}}$: Voltaje objetivo rms neutro.
- $N_{modulos}$: Cantidad de módulos.

2.1.2 Sistemas fotovoltaicos conectados a la red a gran escala de media tensión que utilizan convertidores multinivel modulares y puente en H en cascada: una revisión.

Según (Bashir et al., 2020). El convertidor modular multinivel MMC es un candidato comprometedor para el futuro de los sistemas fotovoltaicos debido a sus capacidades únicas, como (Seguidor del punto de máxima potencia) MPPT independiente para módulos fotovoltaicos, calidad de energía mejorada en comparación con las topologías del Convertidor multinivel de puentes-H en cascada CHB, la topología MMC consta de dos brazos por fase, cada brazo tiene varios submódulos SM conectados en serie. Cada SM normalmente consta de celdas de medio puente o de puente completo. La topología MMC se considera como la evolución de la topología CHB. La principal diferencia en la estructura entre las topologías MMC y CHB es la existencia del enlace CC común y los inductores del brazo, Además, permite la conexión directa de los campos fotovoltaicos a las redes de media tensión MT añadiendo más SM conectados en serie, esta topología puede mejorar la eficiencia y reducir el costo de todo el sistema.

En (Elsanabary et al., 2020) se presentó un convertidor modular multinivel MMC monofásica con un enlace de CC común. Este apartado presenta un nuevo control de balance de condensadores basado en el concepto de submódulo virtual (VSM) utilizando el llamado control de mapeo de bucle virtual selectivo. Este control permite el equilibrio de voltaje para muchos submódulos SM sin una carga computacional adicional. Este método se basa en un cambio de mapeo de bucle continuo entre los VSM y los SM reales para ecualizar los voltajes de los condensadores incluso con SM asimétricos. Ver figura 1.

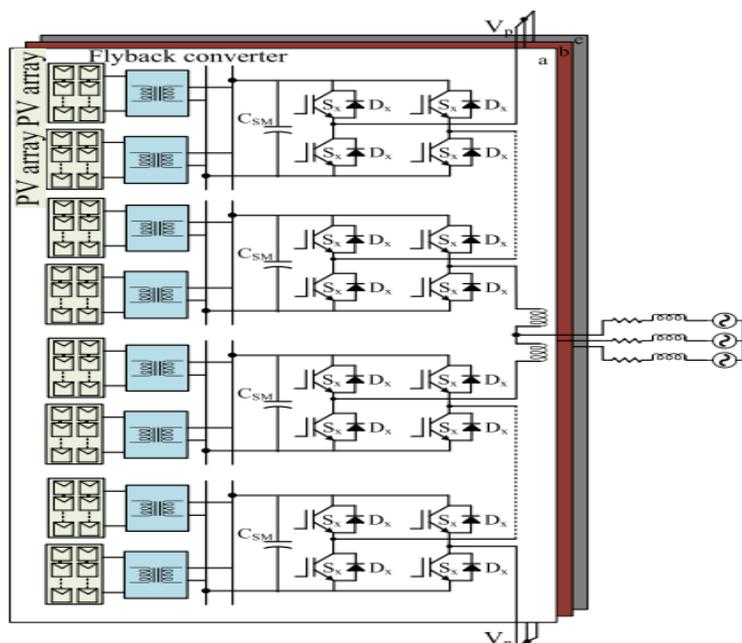


figura 1. estructura del convertidor MMC con matrices fotovoltaicas distribuidas y submódulos.
(Elsanabary et al., 2020)

2.1.3 Modelado y análisis de un convertidor BOOST híbrido multinivel derivado de impulso (BDMHC)

(Jeyasudha.S & Geethalakshmi.B, 2017) Presenta la topología BDMHC que es capaz de suministrar cargas de CA y CC multinivel simultáneas, se quiere dar a conocer el modelo promediado que describe el comportamiento dinámico de un convertidor híbrido multinivel derivado de impulso.

El BDHC se implementa reemplazando un solo interruptor de control del convertidor de impulso convencional en una red de puente bidireccional monofásica. Las salidas híbridas de CC y CA están controladas por el mismo conjunto de interruptores. Por lo tanto, reduce la cantidad de componentes menores en comparación con el sistema de convertidor de potencia convencional, protege el disparo directo inherentemente en la etapa del inversor y produce una mejor densidad de procesamiento de energía y fiabilidad.

2.1.4 Comparación de la distorsión armónica total del convertidor modular multinivel y del convertidor modular multinivel híbrido paralelo

Para analizar el rendimiento de distorsión armónica THD del convertidor modular multinivel MMC y del híbrido paralelo PHMMC, se realizó una simulación de los mismos mediante PSCAD/EMDTC. Los valores se basan en el método de prueba y error.

Tabla 1. Parámetros para MMC

Vcap	1900 μ F
Carga	R = 5 Ω , L = 100mH
Número de submódulos	8
Frecuencia de cambio	1kHz

Similar al MMC, el valor del capacitor local de la celda PHMMC se mantiene en 1900 μ F. El índice de modulación se mantiene 1.

Tabla 2. Parámetros del PHMMC

Vcap	1900 μ F
Carga	R = 5 Ω , L = 100mH
Número de submódulos	4
Frecuencia de cambio	1kHz

Como se puede observar en la figura 2, la salida de voltaje a través del MMC tiene 5 niveles. El MMC ha utilizado 8 submódulos para lograr el voltaje de salida de 5 niveles. La cantidad de dispositivos utilizados es mayor en comparación con PHMMC, por lo tanto, se puede lograr un mejor control sobre el funcionamiento de los dispositivos en PHMMC ya que el recuento de dispositivos es bajo y la complejidad es menor en comparación con MMC, para un mayor número de niveles.

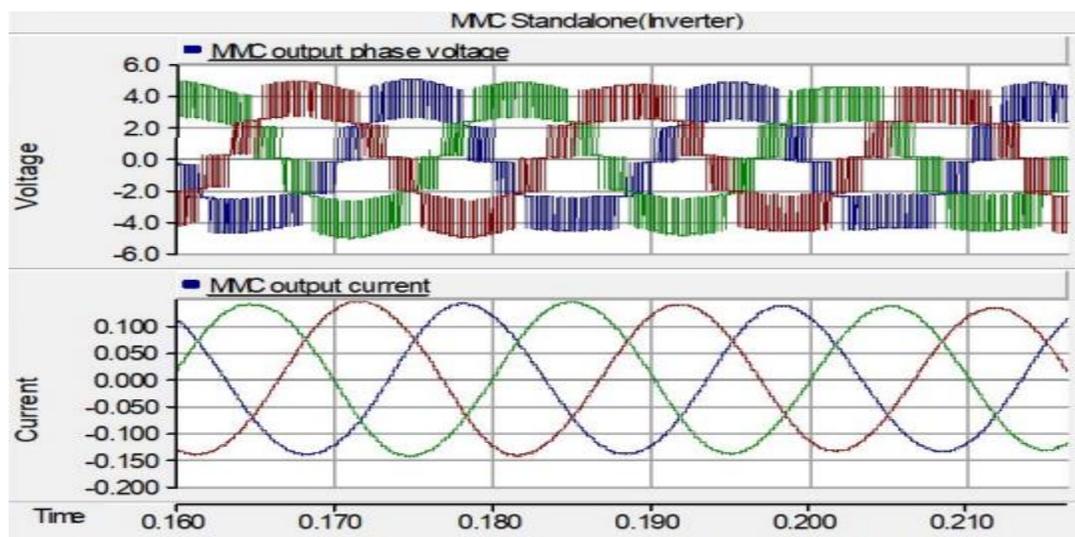


figura 2. Voltaje y corriente de salida de MMC trifásico

(Mishra & Bhesaniya, 2018)

En PHMMC, el voltaje a través de la carga RL o el voltaje de fase para este caso es de 9 niveles, como se puede ver en la figura 3.

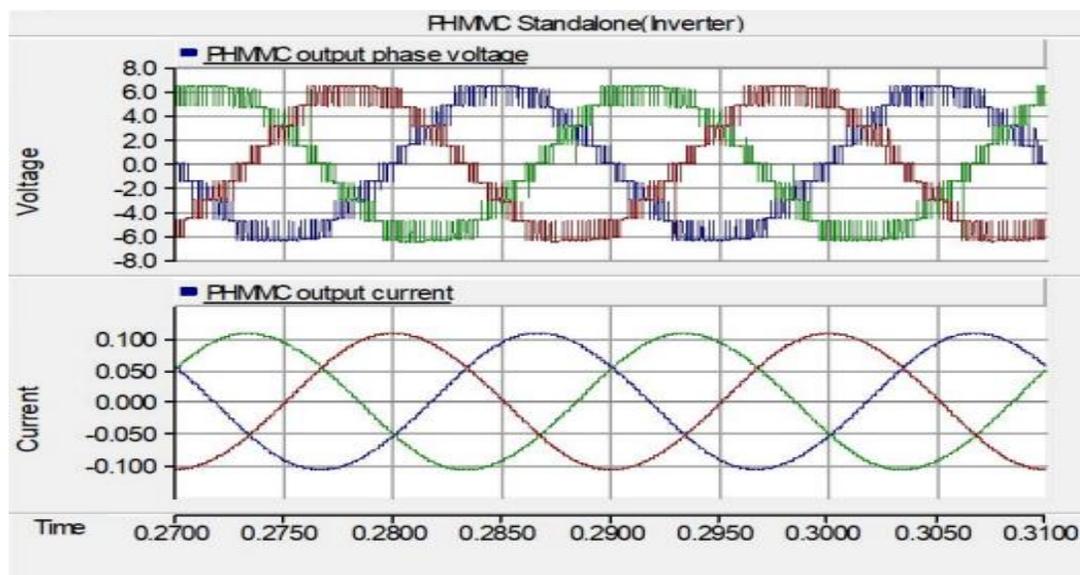


figura 3. Voltaje y corriente de salida del PHMMC trifásico

(Mishra & Bhesaniya, 2018)

El voltaje del eslabón de la cadena se despliega para formar voltaje de CA utilizando un circuito de puente completo. El número de niveles se puede aumentar para lograr una forma de onda de voltaje de CA simplemente aumentando el número de submódulos. (Mishra & Bhesaniya, 2018).

2.2 Enunciados de los supuestos teóricos

2.2.1 Energía solar

El sol representa la mayor fuente de energía existente en el planeta. La energía es transmitida por medio de ondas electromagnéticas presentes en los rayos solares, esta energía se la puede percibir en forma de luz y calor. Cerca del 70% de la energía solar recibida por la tierra es absorbida por la atmósfera, la tierra y por los océanos. Mientras que el 30% restante es reflejado por la atmósfera de regreso al espacio. Como bien se sabe la energía solar es una fuente de energía renovable, limpia y sustentable en el tiempo (Sosa, 2009).

La energía solar presenta dos características específicas muy importantes que la diferencian de las fuentes energéticas convencionales: dispersión e intermitencia. Evidentemente,

la energía solar es una forma de energía que presenta gran dispersión, ya que su densidad, en condiciones muy favorables, difícilmente alcanza 1 kW/m^2 , valor que queda muy por debajo de las densidades con las que se trabaja usualmente en ingeniería. Esto significa que para obtener densidades energéticas elevadas se necesitan, o bien grandes superficies de captación, o sistemas de concentración de los rayos solares. Por otro lado, la otra característica específica de la energía solar es su intermitencia. Esto hace que, a la par que se desarrollan instalaciones captadoras de energía, es necesario investigar los correspondientes sistemas de almacenamiento de la energía captada (Sol et al., 2020).

2.2.2 Irradiancia

Es la magnitud utilizada para describir la potencia incidente por unidad de superficie de todo tipo de radiación electromagnética. En este caso corresponde a radiación proveniente del sol, la cual se puede percibir en forma de calor o luz. Su unidad de medida en el sistema internacional es W/m^2 .

En la figura 4 se puede apreciar el espectro de radiación solar para niveles sobre la atmósfera terrestre y a nivel del mar (Sosa, 2009).

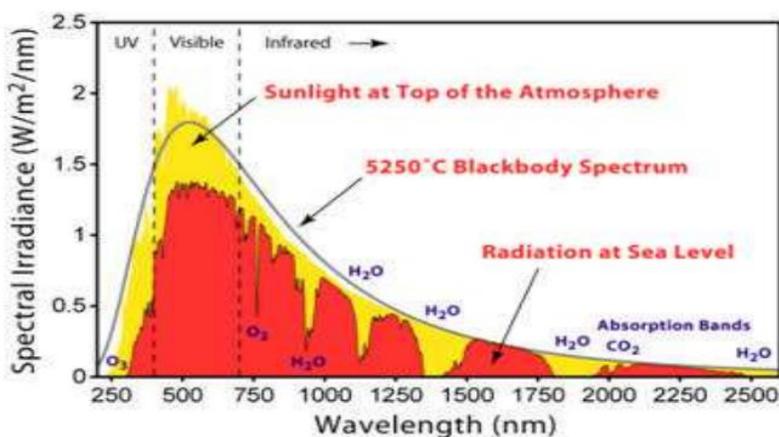


figura 4. Espectro de Radiación Solar

(Sosa, 2009)

2.2.3 insolación

Según (Sosa, 2009). Es la energía radiante que incide en una superficie de área conocida en un intervalo de tiempo dado. Su unidad de medida es (Wh/m^2) Watts-hora por metro cuadrado. La insolación también se expresa en términos de horas solares pico. Una hora de energía es equivalente a la energía recibida durante una hora, a una irradiancia promedio de

1.000 W/m². La energía útil que entrega el panel fotovoltaico es directamente proporcional a la insolación incidente. En la figura 5 se puede observar la insolación correspondiente a un día.

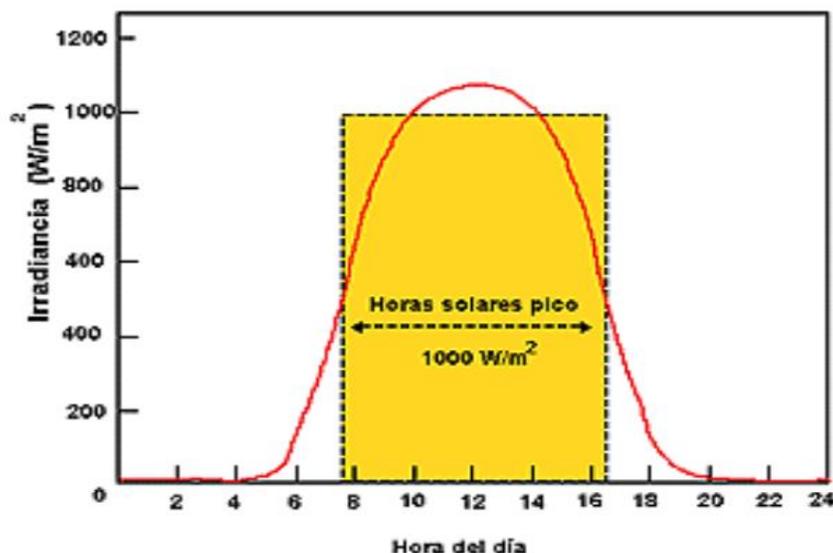


figura 5. Curva de Irradiación Diaria y horas solares pico

(Sosa, 2009)

La insolación es un parámetro que se considera importante en el diseño de sistemas fotovoltaicos. Los factores climáticos y el ángulo de posicionamiento del panel con respecto al sol pueden afectar la insolación sobre la superficie de captación. En zonas de poco sol, ya sea por el sombreado parcial, neblina u cualquier otro factor, la insolación promedio en un periodo de tiempo será menor. En épocas de invierno los niveles de insolación van a ser bajos.

2.2.4 Celda Fotovoltaica

Es un dispositivo electrónico que permite transformar la energía luminosa (fotones) en energía eléctrica (electrones) mediante el efecto fotoeléctrico. A su vez el efecto fotoeléctrico consiste en la emisión de electrones por un material cuando se le ilumina con radiación electromagnética, estos electrones libres, al ser capturados generan una corriente eléctrica como se puede observar en la figura 6. En la figura 7, figura 8 y figura 9 se muestran celdas fotovoltaicas de silicio poli-cristalino, mono-cristalina y amorfas. La unión de celdas fotovoltaicas consiste en una red de celdas solares conectadas en serie para aumentar la tensión de salida continua hasta el valor deseado. También se pueden conectar en paralelo con el propósito de aumentar la corriente de salida del sistema (Sosa, 2009).

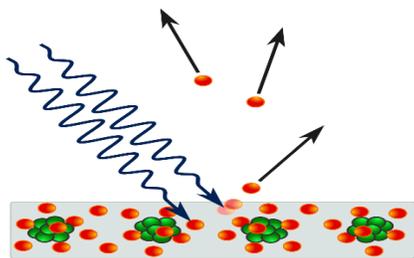


figura 6. efecto Fotoeléctrico de una celda solar

(Sosa, 2009)



figura 7. Celda Fotovoltaica de Silicio Policristalino

(Sosa, 2009)

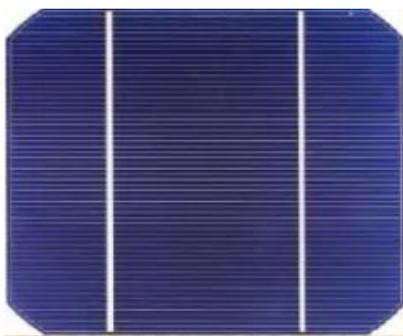


figura 8. Celda Fotovoltaica de Silicio mono-cristalina

(Sosa, 2009)



figura 9. Celda Fotovoltaica de Silicio amorfa

(Sosa, 2009)

2.2.5 Tecnologías de fabricación de celdas fotovoltaicas

Los módulos fotovoltaicos están compuestos por células solares, estas comúnmente se fabrican de silicio ya que es un material con gran abundancia en la tierra, cuenta con una baja tasa de contaminación, presenta una alta durabilidad en el tiempo y cuenta con sobresalientes propiedades fisicoquímicas. Las células de silicio se pueden clasificar en tres tipos dependiendo su proceso de fabricación: Celdas solares mono-cristalinas, policristalinas y de película delgada o amorfas.

Celdas mono-cristalinas

Se cortan en obleas delgadas de un cristal continuo (silicio), cada célula presenta un color uniforme normalmente va desde el azul al negro. El silicio utilizado en este tipo de célula presenta alta pureza y una estructura cristalina perfecta. Como resultado del proceso de fabricación, las células tienen alrededor de $10 \times 10 \text{ cm}^2$ y $350 \mu\text{m}$ de espesor, con una eficiencia de uso directo entre el 14-17%.

Celdas poli-cristalinas

Están hechas de material de silicio similar al de la mono-cristalina, excepto que en lugar de crecer en un solo cristal, se funden y se vierten en un molde. Esto forma un bloque cuadrado que puede cortarse en obleas cuadradas. A medida que el material se enfría, se cristaliza de una manera imperfecta formando tonalidades de colores diferentes en su superficie. Las células poli-cristalinas con iguales dimensiones y condiciones alcanzan un rendimiento de hasta el 12%.

Celdas de película delgada (amorfas)

Las células de película delgada son de silicio o se produce a partir de nuevos materiales, como el arseniuro de galio, telurio de cadmio o el Cobre Indio Diselenido. Estas células también

llamadas amorfas están protegidas por medio de encapsulación con vidrio frontal y uno de protección posterior (Cepeda & Sierra, 2007).

La eficiencia de estas células se puede observar en la figura 10.

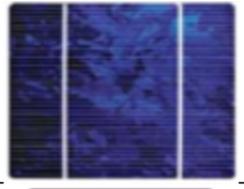
Celdas	Nombre	Eficiencia en laboratorio	Eficiencia directa
	Mono-cristalina	24%	14-17%
	Poli-cristalina	19-20%	11-14%
	De película delgada (amorfas)	16%	<10%

figura 10. Celdas mono-cristalinas, poli-cristalinas, de película delgada y sus eficiencias (Cepeda & Sierra, 2007)

2.2.6 Paneles fotovoltaicos

Un panel fotovoltaico (FV) es una placa rectangular, formada por un conjunto de celdas FV protegidas por un marco de vidrio y aluminio anodizados. La función principal de un panel FV es la de soportar mecánicamente a las celdas FV y de protegerlas de los efectos degradables de la intemperie. La vida útil de un panel FV puede llegar a los 30 años, aunque los fabricantes otorgan garantías de 20 años. El mantenimiento típico consiste de una limpieza del vidrio para prevenir que las células FV no puedan capturar la radiación solar (Pilco & Jaramillo, 2008).

2.2.7 Voltaje, potencia y número de células de los paneles fotovoltaicos

Los paneles FV proporcionan voltajes de salida de 12 V, 20 V, 24 V, y 30 V, dependiendo del número de células FV. Se necesita conectar 24 celdas en serie para alcanzar un voltaje nominal de salida de 12V. La mayoría de paneles FV comerciales contienen alrededor de 36 celdas fotovoltaicas. La potencia de salida de un panel FV indica la capacidad de generar electricidad en condiciones óptimas de operación. La tendencia de la industria es ofrecer paneles

con potencias de salida elevadas, pero se pueden encontrar en el mercado paneles fotovoltaicos de baja potencia (desde 5W), de potencia media (55W), y de alta potencia (hasta 160 W) (Pilco & Jaramillo, 2008).

2.2.8 ¿Que son los paneles fotovoltaicos?

Según (Carballo, 2016). Los paneles fotovoltaicos son dispositivos formados por metales sensibles a la luz es decir que aprovechan los rayos solares para generar energía eléctrica. constan de una multitud de celdas llamados paneles fotovoltaicos que convierten la radiación solar en electricidad debido al efecto fotovoltaico que provoca la energía solar. En conclusión, los paneles se encargan de capturar la energía solar transformándola directamente en eléctrica, en forma de corriente continua que se almacena en acumuladores, para que pueda ser utilizada fuera de las horas de luz. Sus posibles usos son muchos ya que conectados a una red y generando electricidad pueden dar servicios notables en energía a casas o empresas.

2.2.9 Funcionamiento de un panel fotovoltaico

Para (Sosa, 2009). Se basa en el efecto fotovoltaico o efecto fotoeléctrico, mediante la captación de fotones provenientes de la luz solar, los cuales inciden con una cierta cantidad de energía en la superficie del panel, esta interacción provoca el desprendimiento de los electrones de los átomos de silicio, rompiendo y atravesando la barrera de potencial de la capa semiconductor como se muestra en la figura 11. Lo que generara un diferencial de potencial en la capa N con respecto a la P.

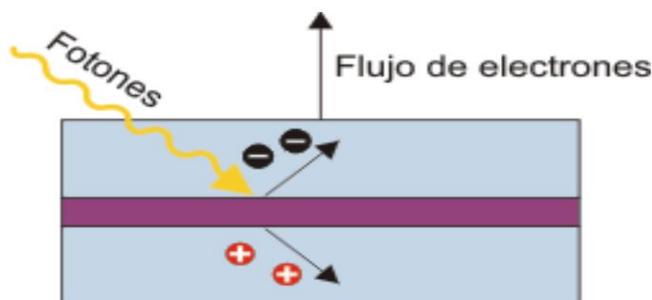


figura 11. Desplazamiento de Electrones mediante la captación de Fotones (Sosa, 2009)

El nivel de energía proporcionado por un panel fotovoltaico depende.

- Tipo de panel y área del mismo
- Nivel de radiación e insolación
- Longitud de onda de la luz solar

Ahora, si se conecta una carga eléctrica o elemento de consumo entre los terminales del panel se iniciará una circulación de corriente continua. Ver figura 12.

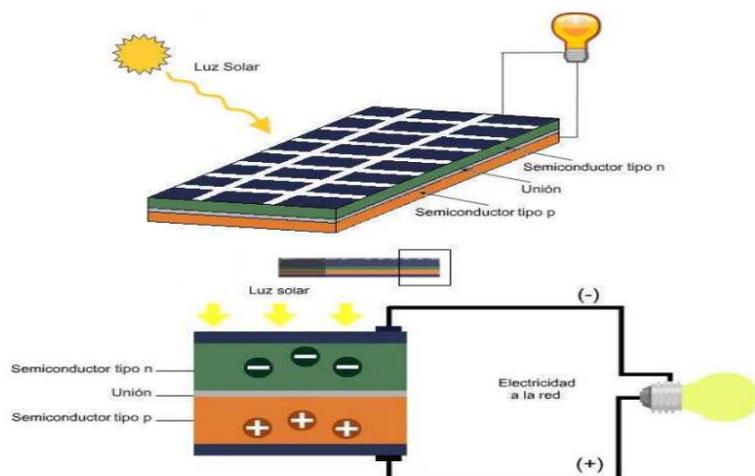


figura 12. Esquema de Funcionamiento de un Panel solar

(Sosa, 2009)

2.2.10 Variables que afecta la generación de energía en los paneles fotovoltaicos

Algunas de las variables más considerables que pueden afectar la eficiencia fotovoltaica en los paneles solares son. Los factores propios del panel, temperatura de funcionamiento del panel fotovoltaico, efecto de la reflexión y suciedad en la superficie de los paneles solares, factores externos al panel, efecto de las variaciones climáticas, ángulo de inclinación de los paneles fotovoltaicos y sombreado en la superficie del panel (Cepeda & Sierra, 2007). Es importante conocer dichas variables con el fin de mitigar sus efectos y lograr mejoras significativas en términos de eficiencia para este tipo de sistemas.

2.2.11 Relación de la Curvas voltaje-corriente y voltaje-potencia de una celda solar

Para (Granda-Gutiérrez et al., 2013). Las características típicas de una celda solar se pueden representar por medio de gráficas: voltaje–corriente y voltaje–potencia como se muestra en la figura 13. En los gráficos mostrados a continuación, se pueden observar los puntos más representativos de las curvas tales como: la corriente de corto circuito (I_{sc}), el voltaje de circuito abierto (V_{oc}), el punto de máxima potencia (MPP), la corriente en el punto de máxima potencia (I_{MPP}), el voltaje en el punto de máxima potencia (V_{MPP}) y la potencia en el punto de máxima potencia (PMPP).

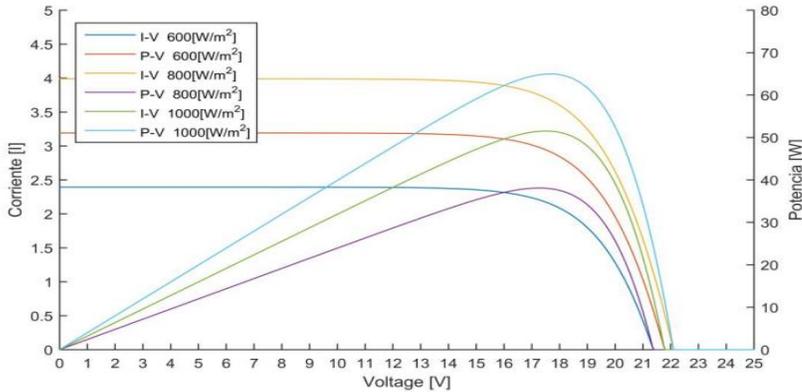


figura 13. curva voltaje-corriente y voltaje-potencia

(Granda-Gutiérrez et al., 2013)

El modelo matemático que describe la curva voltaje-corriente en una celda solar generalmente se describe por medio de la siguiente ecuación:

$$I = I_l - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V+IR_s)}{a}\right) - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{R_{sh}} \quad (3)$$

donde, I_l es la corriente foto generada, I_0 es la corriente de saturación inversa, R_s es la resistencia en serie, R_{sh} es la resistencia en paralelo, V es el voltaje, q es la carga de un electrón ($1.6 \times 10^{-19}C$), y a es un parámetro dado por la ecuación:

$$a = KTcA \quad (4)$$

Siendo k la constante de Boltzman ($1.38 \times 10^{-23} J/K$), Tc es la temperatura de la celda y A es el factor de idealidad. El factor de idealidad permite distinguir el comportamiento entre una celda de silicio y una de germanio, dependiendo así de la tecnología de fabricación de la celda solar.

La corriente foto generada varía en función de la radiación solar y de la temperatura de trabajo en la celda y se describe por:

$$I = \frac{S}{S_{ref}} [I_{l, ref} + \mu_{isc}(Tc - Tc, ref)] \quad (5)$$

donde, S es la irradiación solar, S_{ref} es la irradiación solar en condiciones de referencia ($1000 W/m^2$), $I_{l, ref}$ es la corriente foto generada en condiciones de referencia y se puede tomar como la corriente de cortocircuito ($I_{l, ref} = I_{sc}$), y μ_{isc} es el coeficiente de cortocircuito.

La corriente de saturación inversa está dada por la expresión siguiente:

$$I_0 = I_{0, ref} (Tc/Tc, ref)^3 \exp \left[\frac{qE_g \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{Tc} \right)}{KA} \right] \quad (6)$$

donde, E_g es la energía del semiconductor en su banda de gap y $I_{0,ref}$ es la corriente de saturación inversa en condiciones de referencia.

Generalmente, la eficiencia de una celda solar no se afecta con la variación en la resistencia en paralelo (debida a impurezas en el Silicio), por lo que se puede asumir que $R_{sh} = \infty$. Por otro lado, una pequeña variación en la resistencia serie afecta significativamente el comportamiento y eficiencia de una celda solar. Ya que la resistencia en paralelo no representa un porcentaje significativo de pérdidas, se simplifica el modelo matemático planteado en (3). Entonces, el valor de $(V + IR_s) / R_{sh}$ puede ser igualado a cero y así la ecuación quedaría de la siguiente manera.

$$I = I_l - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V+IR_s)}{a}\right) - 1 \right] \quad (7)$$

2.2.12 Técnicas de control para MPPT

¿Qué es un MPPT?

Para (Cruz-Monsalve et al., 2020). Es un controlador de carga que permite obtener la máxima potencia de los paneles solares haciéndolo trabajar siempre en el punto de máxima potencia. Los MPPT siempre van hacer cambiantes con el tiempo ya que dependen de la temperatura y el nivel de irradiancia; así, para hacer que los módulos fotovoltaicos operen cerca del punto de máxima potencia MPPT se necesita del uso de algoritmos de seguimiento a través de un convertidor de potencia, de esta manera se puede hacer que el módulo fotovoltaico entregue valores de corriente y voltaje específicos que maximicen la entrega de potencia.

Dentro de los algoritmos de MPPT existe gran variedad de técnicas, entre ellas están el método de perturbar y observar P&O, método de conductancia incremental, Método de voltaje fraccional de circuito abierto (fvoc) entre otras.

A continuación, se dan a conocer un poco más sobre estos métodos:

Método de perturbar y observar (P&O).

Es el algoritmo más usado para el seguimiento del máximo punto de potencia (MPPT), ya que posee fácil implementación y bajo costo computacional; en esta técnica se altera el voltaje de funcionamiento del panel a través de la variación del ciclo de trabajo del convertidor CD/CD si la potencia aumenta, se entiende que el punto de operación se acerca al MPP y la siguiente alteración se realizará en la misma dirección, si la potencia disminuye se entiende que el punto se aleja del MPP y se debe realizar una alteración en dirección contraria. En la figura 14 se muestra el diagrama de flujo del método mencionado anteriormente.

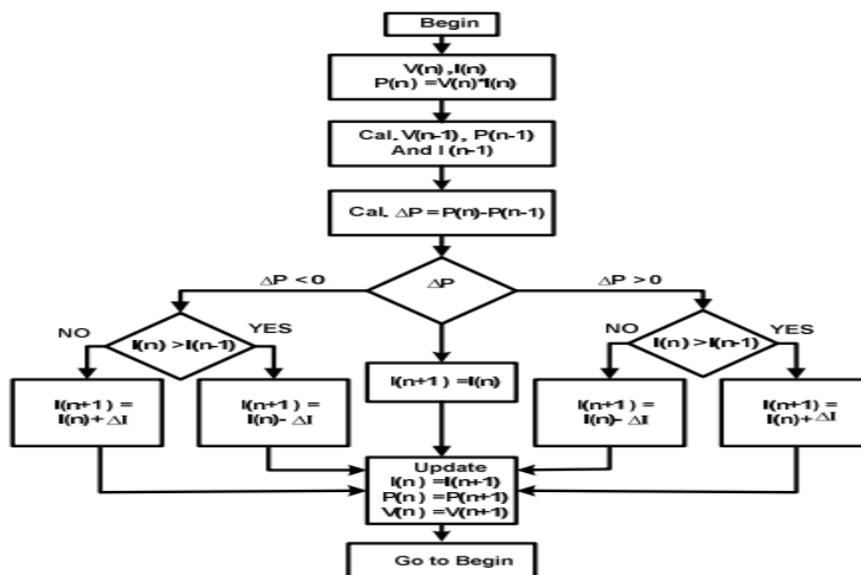


figura 14. Diagrama de flujo del algoritmo adaptativo P&O MPPT

(Cruz-Monsalve et al., 2020)

Método de la conductancia incremental.

Esta técnica utiliza el cálculo de las derivadas de corriente, voltaje y reglas lógicas que se deben cumplir para aumentar o disminuir el ciclo de trabajo.

El algoritmo de conductancia incremental posee ventajas respecto al P&O, ya que es más estable al llegar al MPP, de igual forma brinda un rendimiento eficaz y respuesta rápida ante variaciones de condiciones meteorológicas. Pese a esto, el algoritmo requiere un control más complicado en comparación al método de perturbación y observación y puede tener un ligero error de estado estacionario que debe ser controlado para que el sistema sea exacto al efectuar el MPPT. Ver diagrama de flujo en la figura 15.

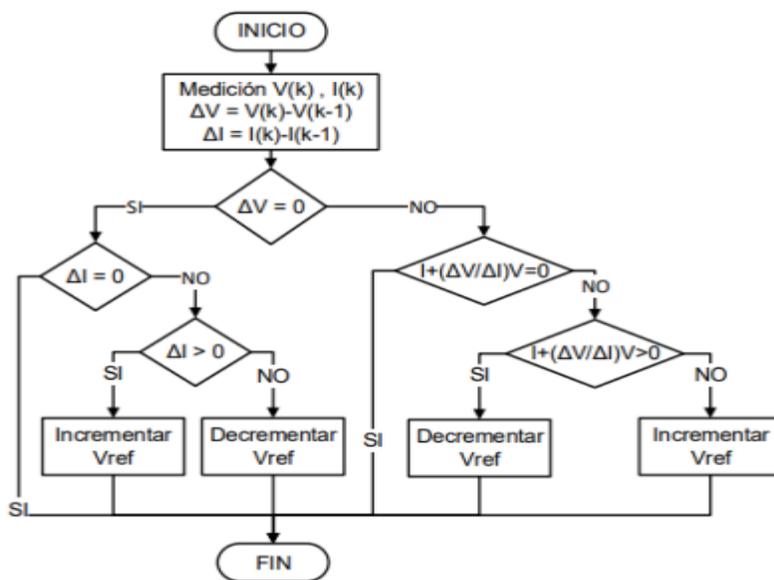


figura 15. Diagrama de flujo método inductancia incremental
(Cruz-Monsalve et al., 2020).

Método de voltaje fraccional de circuito abierto (fvoc).

Este método tiene como limitación la pérdida momentánea de potencia, debido a la desconexión de la carga del generador fotovoltaico para el registro de su tensión en circuito abierto. Esta técnica tiene como ventajas su simplicidad, bajo costo, fácil implementación, entre otros. Ver diagrama de flujo en la figura 16.

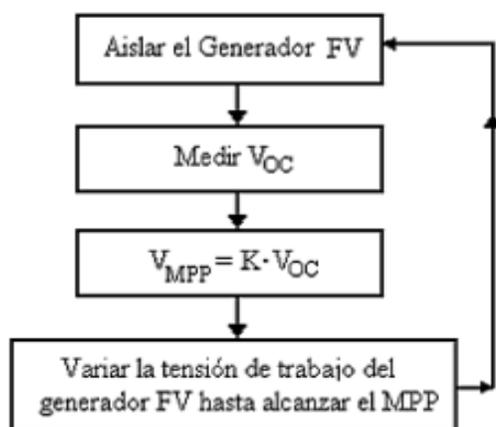


figura 16. Diagrama de flujo algoritmo voltaje fraccional circuito abierto
(Cruz-Monsalve et al., 2020)

2.2.13 Convertidor modular multinivel MMC

Para (González et al., 2016). La topología modular multinivel mostrada en la figura 17 permite una conexión directa a la red de media tensión MT sin necesidad de utilizar un transformador elevador de baja frecuencia. La alta frecuencia de conmutación equivalente a la salida del MMC debido a la forma de onda de voltaje multinivel permite reducir significativamente la inductancia del enlace utilizada para la interconexión de la red. Una de las características principales de MMC es su capacidad de generar un voltaje de salida sinusoidal mediante la utilización de dispositivos semiconductores de bajo voltaje sin la necesidad de conectarlos en cascada. El MMC trifásico se compone de bloques duplicados llamados submódulos (SM) que están conectados en serie.

Su estructura consta de dos brazos, superior e inferior (Bashir et al., 2020).

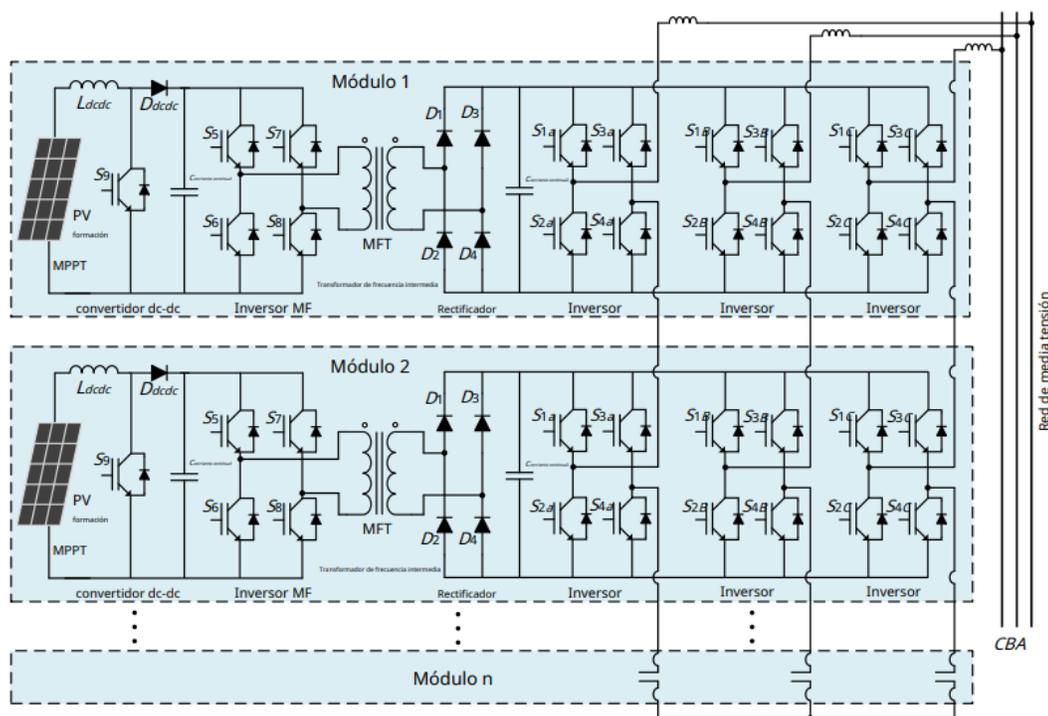


figura 17. Topología MMC para la interconexión en media tensión en generadores fotovoltaicos (González et al., 2016)

2.2.14 convertidor BOOST híbrido multinivel derivado de impulso (BDMHC)

Para (Jeyasudha.S & Geethalakshmi.B, 2017) el funcionamiento del BDMHC se lo puede considerar en dos maneras, modo impulso y modo inversión. En el modo impulso hay un alto modo conmutado de frecuencia que existe para cada nivel de fase del inversor. El modo de

refuerzo tiene dos intervalos, intervalo de disparo en el que la misma rama de interruptores está encendida y por ende la energía de entrada se transfiere a los inductores, la corriente a través de ella aumenta y el intervalo de potencia en el que la misma rama de interruptores está apagada. El modo de inversión es un modo de conmutación de baja frecuencia que tiene 3 niveles de activación ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$) los cuales se denominan períodos para producir una salida de 7 niveles. Ver figura 18.

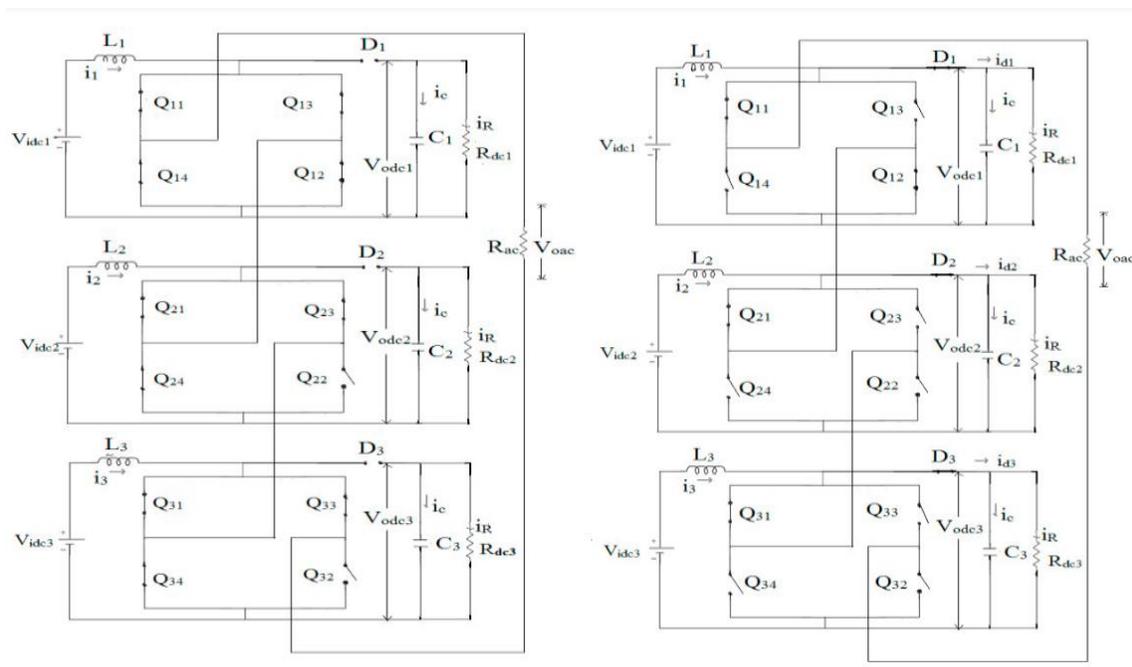


figura 18. Circuito equivalente para Inversión e Impulso intervalo de Disparo-Potencia
(Jeyasudha.S & Geethalakshmi.B, 2017)

2.2.15 variables

Radiación solar

El sol constituye una fuente de energía permanente. Esta energía solar llega a la tierra en forma de radiación. Sin embargo, del total de la energía que llega a la tierra procedente del sol sólo 3/4 partes entran a través de la atmósfera.

Esta radiación se percibe en forma de luz. La luz no es más que una corriente de fotones que se han generado al producirse reacciones nucleares en el sol y que llegan agrupados a la tierra en forma de haces de luz. Sólo una parte de ese haz de luz es captado por el ojo humano en una gama de color que va del rojo al violeta. Sin embargo, el haz se extiende hasta el color ultravioleta y el infrarrojo. En estos haces de luz está presente la energía que proporciona el sol.

Para alcanzar la superficie terrestre la radiación solar debe atravesar la atmósfera donde experimenta diversos fenómenos de reflexión, absorción y difusión que disminuyen la intensidad final, ver figura 19.



figura 19. Radiación solar absorbida y reflejada por la superficie terrestre

(Asmel Marrero, 2013)

La optimización del aprovechamiento de la energía solar depende de la cantidad de radiación recibida -variable según la época del año, de los materiales utilizados para su captación, de las formas de almacenamiento y consumo de la energía captada (Asmel Marrero, 2013).

irradiancia

Es importante tener en claro que la irradiancia es la magnitud usada para describir la radiación solar incidente por unidad de área, esta se mide en W/m^2 . En un módulo fotovoltaico la incidencia de radiación solar causa la aparición de corriente foto generada que es directamente proporcional a la irradiancia. En operación de cortocircuito la corriente resultante varía en proporción a la irradiancia. La radiación que entra en la atmosfera presenta pérdidas del 30% debido a la reflexión, por absorción pierde un 19%, el restante llega finalmente a las celdas solares de manera directa o difusa, eso depende de las condiciones climatológicas en las que se encuentre (Santander, 2017).

Temperatura

La temperatura es una magnitud que se refiere al calor o frio. En términos físicos corresponde a la suma de todas las frecuencias disponibles indicando su valor en grados kelvin

(°K). La temperatura referida a luz solar es de 5.000°K aproximadamente cuando es mediodía y de 2.000°K aproximadamente cuando está en el horizonte. En la figura 20 se muestra la temperatura de calor para distintas radiaciones solares (Sosa, 2009).



figura 20. Niveles de temperatura de calor

(Sosa, 2009)

Potencia

Desde el punto de vista de la física la potencia es el trabajo que se desarrolla por unidad de tiempo:

$$P = \frac{dW}{dt} \quad (8)$$

La unidad de potencia en el sistema internacional es el vatio simbolizado por W. La expresión (8) permite calcular la potencia que se desarrolla en cada instante de tiempo o potencia instantánea.

En un proceso gradual de definición de la magnitud, se debería empezar por introducir la potencia media que se desarrolla durante un intervalo de tiempo determinado. Esto se hace definiendo la

potencia como el trabajo que se hace por unidad de tiempo en este intervalo:

$$\langle P \rangle = \frac{\Delta W}{\Delta t} \quad (9)$$

Después, hacer el paso al límite para hablar de potencia instantánea como se ha definido en la ecuación (9) (Benito, n.d.).

En otras palabras, la potencia corresponde a la cantidad de energía eléctrica consumida, su unidad es el Watt (W) y se puede calcular de la siguiente manera.

$$P = v * i = \frac{v^2}{R} = i^2 R \quad (10)$$

Energía

En general se puede decir que la energía de un sistema es su capacidad para hacer un trabajo. Existe la energía cinética y la energía potencial.

Cuando un sistema hace un trabajo sobre otro se produce una transferencia de energía entre ambos sistemas. Por ejemplo, cuando se levanta una maleta lo que se hace es un trabajo que se convierte en energía potencial de la maleta es decir se ha transferido energía del cuerpo a la maleta. Y si la maleta cae al suelo, parte del trabajo se convierte en energía de movimiento de la maleta. Otra parte se convierte en el ruido que provoca el impacto o en la deformación de la maleta (Benito, n.d.).

Como se dijo anteriormente es la capacidad para realizar un trabajo, la energía está ligada a un sistema aislado que permanece constante en el tiempo. Eso significa que para multitudes de sistemas físicos clásicos la suma de la energía mecánica, la energía calorífica, la energía electromagnética y otros tipos de energía potencial es un número constante (física general).

$$\text{Energía} = p * t \quad (11)$$

Sabiendo que $P = v * i$

$$\text{Energía} = v * i * t \quad (12)$$

2.3 Hipótesis

2.3.1 Hipótesis de investigación

El convertidor modular multinivel MMC va a extraer 10% más de energía que el convertidor BOOST multinivel.

2.3.2 Hipótesis nula

El convertidor modular multinivel MMC va a extraer 10% menos de energía que el convertidor BOOST multinivel.

2.3.3 Hipótesis alternativa

El convertidor modular multinivel MMC no extrajo el 10% más de energía, pero sí logró extraer un 5% más energía que el convertidor BOOST multinivel.

3. Metodología

3.1 Enfoque

El enfoque de esta investigación es cuantitativo, debido a que las variables que se vienen desarrollando pueden tomar valores numéricos. Los resultados serán procesados y validados cuantitativamente para determinar el comportamiento de los convertidores MPPT multinivel en las instalaciones fotovoltaicas. Se considera importante el criterio de cuantificación ya que permite inspeccionar las características que mejor se adapten a el objeto de estudio. Es decir, a optar por la opción adecuada.

“Las investigaciones dentro de este paradigma siempre se enmarcan en el enfoque cuantitativo, debido a que utilizan datos cuantitativos o cuantificables que corresponden a propiedades, características o atribuciones que poseen los objetos de estudio” (Quijano, 2009).

3.2 Paradigma

“Desde el punto de vista epistemológico y metodológico el paradigma que orienta la investigación cuantitativa es el neopositivismo” (Quijano, 2009).

La investigación cuantitativa se orienta dentro del paradigma neopositivista debido a que su finalidad es implementar un convertidor MPPT multinivel que permite la mayor extracción de energía de un panel fotovoltaico en condiciones de sombreado parcial.

3.3 Método

En esta investigación cuantitativa se aborda el método científico, debido a que busca por medio de comparaciones encontrar e implementar el convertidor MPPT multinivel que mejor se adapte a las condiciones requeridas con el fin de validar o denegar las hipótesis de investigación y de esta manera dar una pronta solución al problema de investigación.

3.4 Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo descriptiva debido a que especificara la variable eléctrica que es la energía, donde por medio de dicha variable se va a determinar que convertidor MPPT multinivel es el más adecuado teniendo en cuenta la variación de irradiancia y

temperatura, ya que estas son las variables externas que afectan directamente a la corriente que entregan los paneles solares.

De tal manera, si se compara la energía de un MPPT frente a la energía que se tiene con otro MPPT se puede observar cual es el que entrega la máxima potencia que permite la mayor extracción de energía en los paneles fotovoltaicos y enseguida darle cabida al objeto de estudio que se trata de la implementación de un convertidor multinivel.

3.5 Diseño de investigación

El diseño de la presente investigación se la define como experimento puro porque requiere utilizar dos convertidores multinivel los cuales son necesarios para comparar si el convertidor MMC o el convertidor multinivel BOOST extrae la mayor cantidad de energía posible en un sistema fotovoltaico OFF GRID.

RG1	X1	O1
RG2	X2	O2

RG1: Sistema fotovoltaico estándar OFF GRID

RG2: Sistema fotovoltaico estándar OFF GRID

X1: Convertidor modular multinivel MMC

X2: Convertidor BOOST híbrido multinivel derivado de impulso (BDMHC)

O1: Energía extraída del sistema en un periodo de tiempo T, con el convertidor MMC

O2: Energía extraída del sistema en un periodo de tiempo T, con el convertidor BOOST Multinivel.

3.6 Universo

El universo para la presente investigación corresponde a convertidores multinivel tales como el convertidor modular MMC y el convertidor BOOST multinivel para el seguimiento del punto de máxima potencia en los módulos fotovoltaicos. El universo es finito ya que es cuantificable y accesible.

3.7 Muestra

La muestra en la presente investigación es la misma que el universo, ya que se realiza un estudio de energía extraída de los convertidores multinivel.

3.8 Técnicas de recolección de la información

Las técnicas de recolección de la información como lo es la encuesta, la entrevista y la observación directa son de suma importancia ya que por medio de ellas se puede recolectar información que son base para el desarrollo de la investigación. Para este caso la técnica de recolección de la información es observación directa, la cual se hace a través de instrumentos que midan irradiancia, temperatura, voltaje y corriente, puesto que estas son las principales variables que afectan el desarrollo de la investigación. Para medir el voltaje y la corriente se utilizará el sensor INA219 de alta precisión.

La comparación a realizar consta de una serie de pruebas que determinan el rendimiento del convertidor multinivel a través de la implementación de los mismos y de un algoritmo que será desarrollado en el software Matlab.

Tabla 3. Técnicas de recolección de la información.

Sensor	Variables de estudio	Hace parte
INA219	Corriente y Voltaje	Del proyecto
Piranómetro RK200-0.3	Irradiancia	Cabina de pruebas
Max6675 Termopar Tipo K - Spi	Temperatura	Cabina de pruebas

3.8.1 Validez de la técnica

La técnica de recolección de la información es válida, ya que los sensores son confiables y brindan las características necesarias para poder obtener la información requerida, un rango de detección adecuado, una resolución estimada y un tiempo de respuesta rápida, lo que permiten determinar con certeza cual es el convertidor multinivel que brinda mayor energía extraída de los paneles fotovoltaicos.

3.8.2 Confiabilidad de la técnica

La técnica para esta investigación es confiable, debido a que se van a utilizar sensores y equipos que estén correctamente calibrados y listos para hacer las comparaciones entre las

variables deseadas, además de herramientas como Matlab y dispositivos electrónicos que se encuentren en correcto funcionamiento para brindar certeza en la elaboración del circuito.

Uno de los sensores es el INA219 de alta precisión con interfaz I²C. Este sensor tiene un rango de detección de ± 3.2 A con una resolución de 0.8 mA una tensión de 0V a 26V y un tiempo de respuesta de 68 milisegundos. Las mediciones con este circuito tienen una precisión de $\pm 0.5\%$ (Romario & Coaquira, 2021). El piranómetro RK200-03 con un rango espectral: 300-3200nm, voltaje de alimentación: 12-24VDC, tiempo de respuesta ≤ 35 s (99%), un ángulo de medición de 2π , estabilidad: $\pm 2\%$ y una temperatura de operación -40 to +80d °C. Por último, el sensor Max6675 Termopar Tipo K – Spi con una resolución de 0.25°, un rango de uso de tarjeta de 3.0V a 5.5V, la temperatura de operación de la tarjeta es de -20°C a 80°C, el voltaje de funcionamiento de 3.35v y 0.800 grados C, la resolución de la temperatura es de 0,25 grados.

3.9 Instrumentos de recolección de la información

Se realiza diferentes pruebas comparando que convertidor multinivel obtiene mayor energía en los paneles fotovoltaicos; para ello, los datos de irradiancia, temperatura, corriente y voltaje que se obtengan serán evaluados en una hoja de cálculo de EXCEL que permita determinar la mayor energía extraída del sistema entre los dos convertidores multinivel.

4. Resultados

4.1 Modelo del panel para simulación

En la Figura 21, se presenta el MPP (Punto de Máxima Potencia) del panel que se utilizó para realizar las simulaciones en Matlab/Simulink.

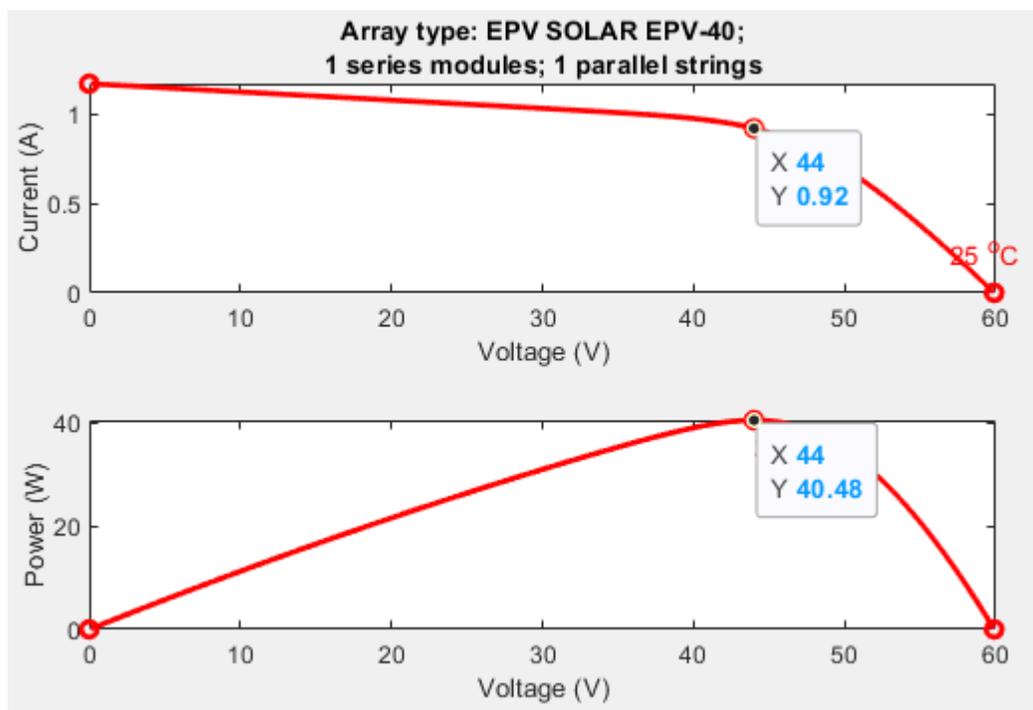


Figura 21.

Fuente. Esta investigación Curvas características panel de 40W referencia EPV SOLAR EPV-40 de la librería Simulink de Matlab.

4.2 Simulación Convertidores Multinivel

El principio fundamental de funcionamiento de los convertidores multinivel radica en la habilidad de combinar múltiples niveles de tensiones intermedias para obtener una tensión de salida específica. Cada uno de estos niveles de tensión se crea mediante la conexión de varios dispositivos semiconductores, como transistores IGBT o MOSFET, en configuraciones tanto en serie como en paralelo. Estos niveles de tensión intermedios se pueden obtener mediante diversas topologías, como convertidores multinivel en puente, en cascada o en configuración H.

Para llevar a cabo la simulación de estos convertidores multinivel en Matlab/Simulink, es necesario modelar con precisión los dispositivos semiconductores, los circuitos de control y los componentes de potencia. Esta simulación brinda la capacidad de diseñar y analizar las topologías MMC y BOOST de convertidores multinivel, ajustar sus parámetros según las necesidades específicas y llevar a cabo pruebas exhaustivas para evaluar su rendimiento en una variedad de aplicaciones.

Para el caso de las simulaciones, los valores de irradiancia y temperatura son fijos para todos los casos y para todos los niveles de cada convertidor simulado.

4.2.1 Simulación Matlab/Simulink Convertidor BOOST híbrido multinivel derivado de impulso.

En el convertidor BOOST Multinivel representado en la Figura 22, se puede apreciar una salida multinivel de AC que se asemeja a uno de los resultados de antecedentes. Para lograr esto, se requiere una cuidadosa configuración de los parámetros de los componentes electrónicos utilizados en la simulación.

La correcta configuración de todos estos parámetros y el control preciso de los transistores son pasos esenciales en la simulación y diseño del convertidor BOOST Multinivel para obtener una salida de AC multinivel adecuada.

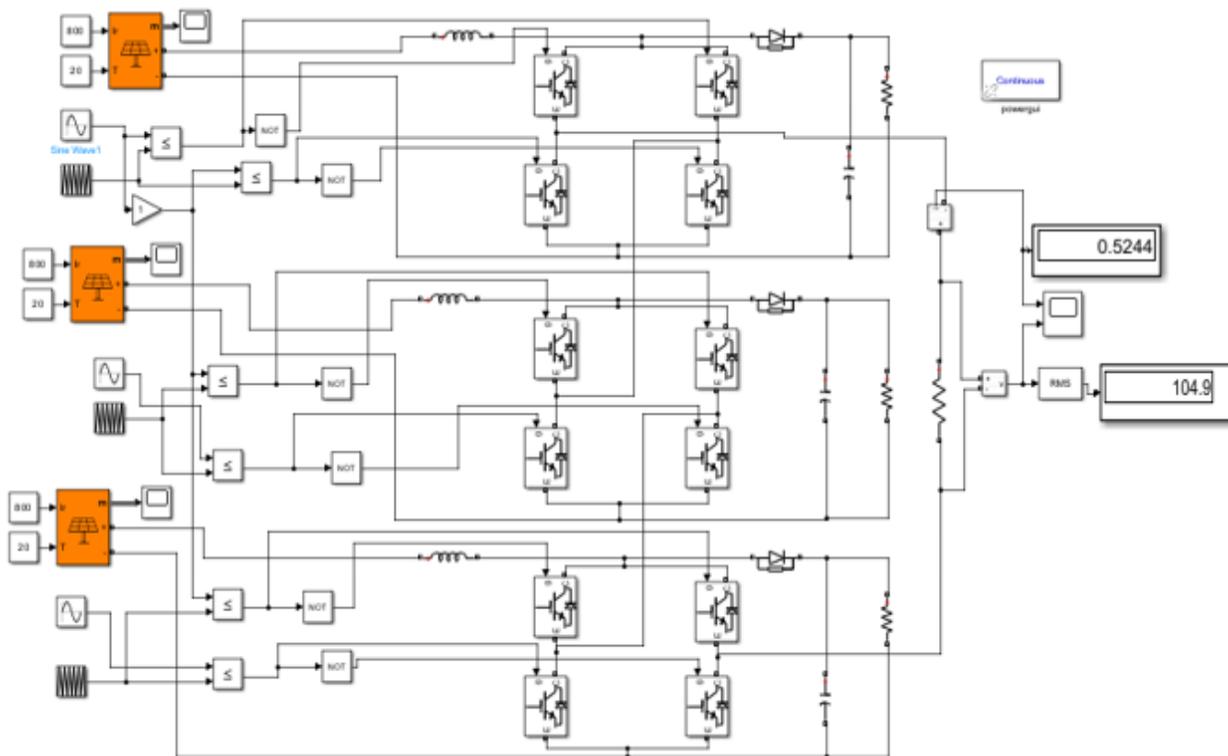


Figura 22. Convertidor Boost híbrido multinivel Matlab/Simulink.

Fuente. Esta investigación

4.2.2 Simulación Matlab/Simulink Convertidor Modular Multinivel MMC

En el caso del convertidor MMC representado en la Figura 23, el proceso de ajuste de parámetros de componentes electrónicos, configuración de irradiancia y temperatura, especificaciones de paneles y control de transistores sigue el mismo procedimiento que se aplicó al convertidor BOOST. Sin embargo, en esta topología, se observa una configuración diferente que se aprecia a simple vista.

El proceso de conversión de energía comienza con un convertidor DC - DC, seguido de un inversor de media frecuencia de puente completo, que a su vez se conecta a un transformador de media frecuencia utilizado como aislante para separar dos circuitos sin contacto físico directo mientras se transfiere la energía de un lado a otro. Luego, encontramos un rectificador de puente de diodos y un inversor monofásico de puente completo para la salida de AC. Cabe destacar que las salidas de cada módulo se conectan en cascada.

En esta simulación particular, se emplearon dos paneles solares, y los resultados muestran que la salida de AC en la figura 23 es similar a la obtenida en la figura 22, a diferencia de la

corriente, considerando que para el caso del convertidor BOOST fueron 3 paneles. Esta topología multinivel se utiliza comúnmente para conectar sistemas a la red de media tensión (MT).

Esta configuración del convertidor MMC es altamente eficiente y adecuada para aplicaciones de conexión a la red de media tensión, y su funcionamiento exitoso se logra mediante el mismo proceso de ajuste de parámetros y control preciso de transistores que se describió anteriormente en el caso del convertidor BOOST.

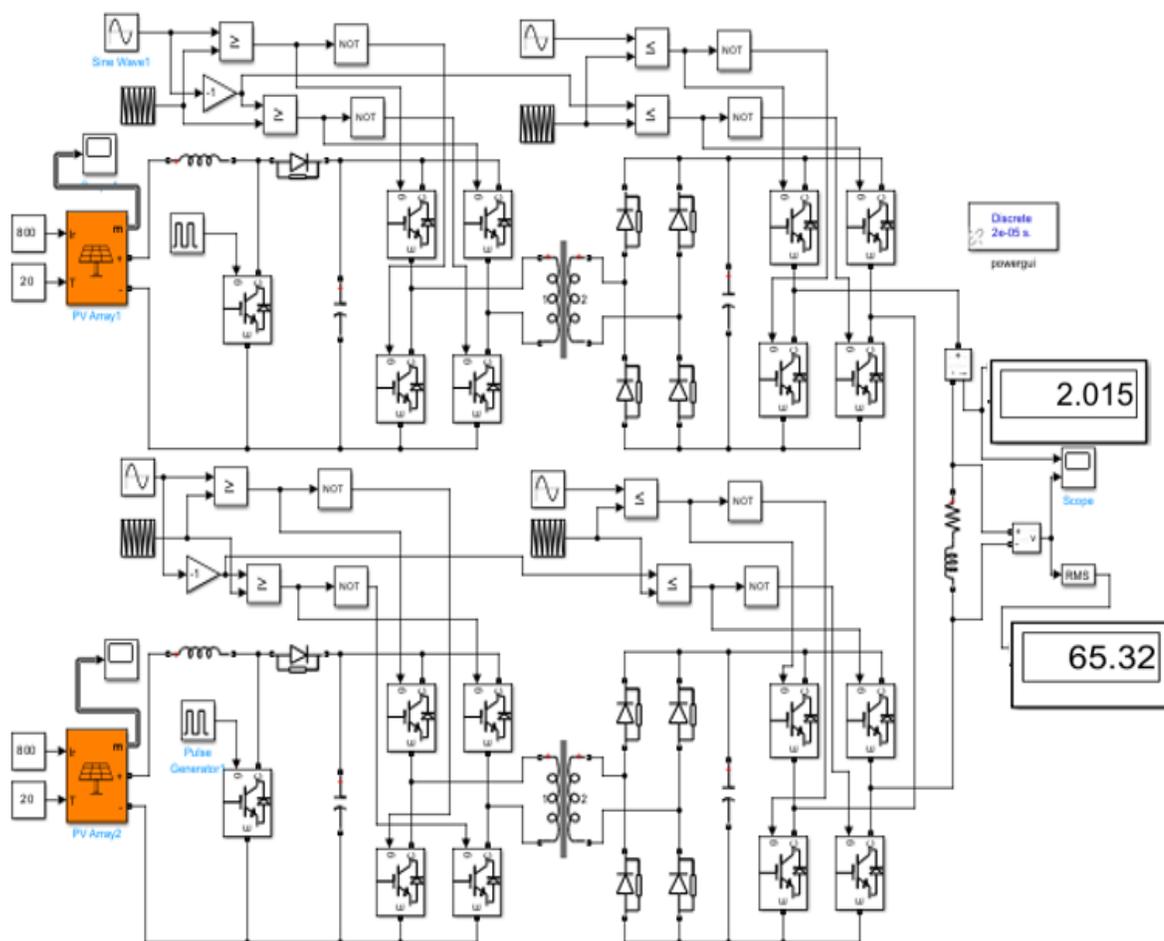


Figura 23. Convertidor Modular Multinivel MMC Matlab/Simulink

Fuente. Esta investigación.

Para el funcionamiento a base de simulación, en el caso de los dos convertidores se realiza la asignación de pulsos PWM no cambiantes.

4.2.3 Resultados de las simulaciones

Para validar los modelos desarrollados del sistema, se simula los circuitos usando Matlab/Simulink. En la Figura 24 y 25 respectivamente se muestran los resultados que se obtienen de la simulación.

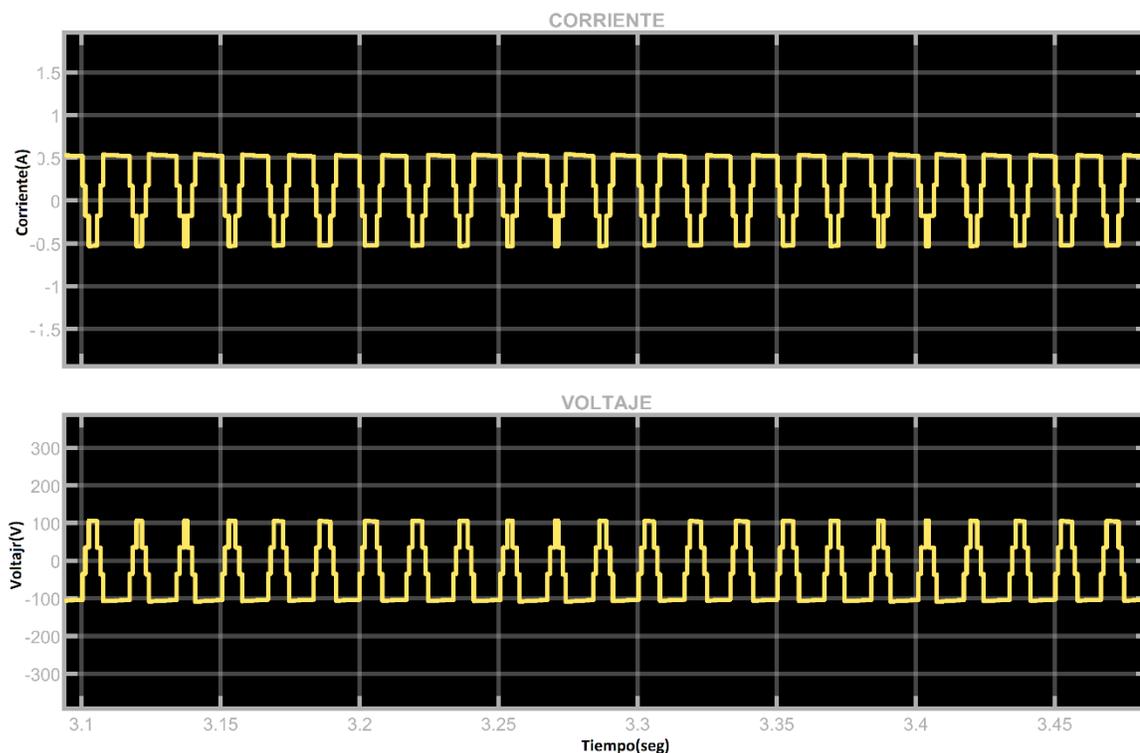


Figura 24. Salida corriente y voltaje AC Convertidor Boost híbrido multinivel Matlab/simulink

Fuente. Esta investigación.

La Figura 24. Es notable que, aunque estas señales cambian de forma en respuesta a las variaciones de las condiciones de funcionamiento, mantienen una igualdad constante entre sí durante todo el proceso. Esto se logra debido a que los tres conjuntos de paneles solares reciben irradiancias y temperaturas idénticas en todo momento.

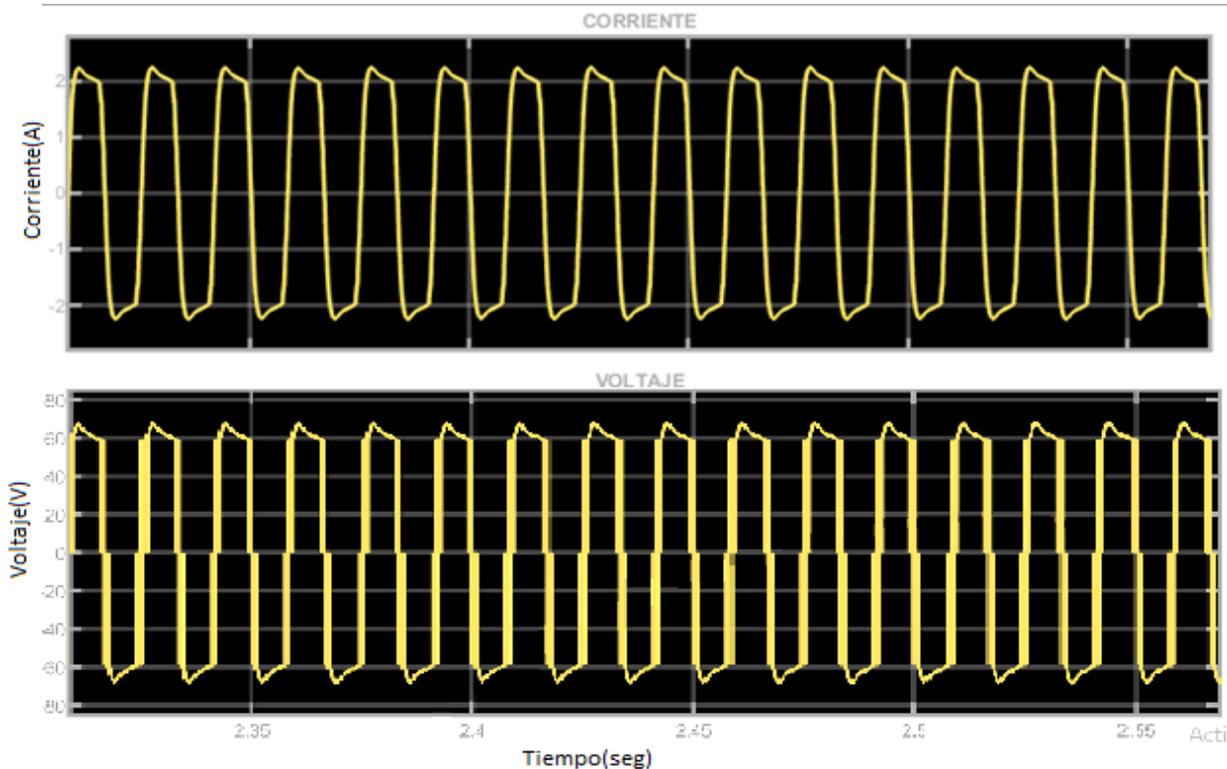


Figura 25. Salida corriente y voltaje AC Convertidor Modular Multinivel MMC Matlab/Simulink Fuente. Esta investigación.

En la representación de la Figura 25, se muestran los voltajes multinivel generados por el convertidor MMC, pertenecientes a la fase del inversor multinivel.

La igualdad en los índices de modulación de las señales de control entre los inversores de puente H se debe a la consistencia en la irradiancia que incide sobre los conjuntos fotovoltaicos. Esta uniformidad es fundamental para garantizar un funcionamiento óptimo y estable del sistema de conversión de energía. En resumen, una generación estable de voltajes multinivel, lo que es fundamental para mantener un rendimiento constante y confiable, incluso en condiciones variables.

4.3 Implementación de los convertidores MMC y BOOST.

4.3.1 Funcionamiento algoritmo P&O

El algoritmo de Seguimiento del Punto de Máxima Potencia (P&O) se emplea para garantizar la máxima potencia de los paneles, permitiendo que genere la máxima potencia posible. Cada implementación de este algoritmo se adapta a las especificaciones del circuito

correspondiente. Este proceso implica varias etapas cruciales, que incluyen la calibración de los sensores de voltaje y corriente, el control de los pulsos de modulación por ancho de pulso (PWM) y la determinación de la cantidad adecuada de pulsos de salida que se requiere para cada circuito específico. Para llevar a cabo estas tareas, se utiliza una tarjeta Arduino como parte integral del sistema.

El algoritmo de máxima potencia (P&O) debe tener el mismo análisis en los dos casos, ya que son un punto importante en la eficiencia de los convertidores y teniendo en cuenta que se debe realizar una comparación de los resultados para cada caso.

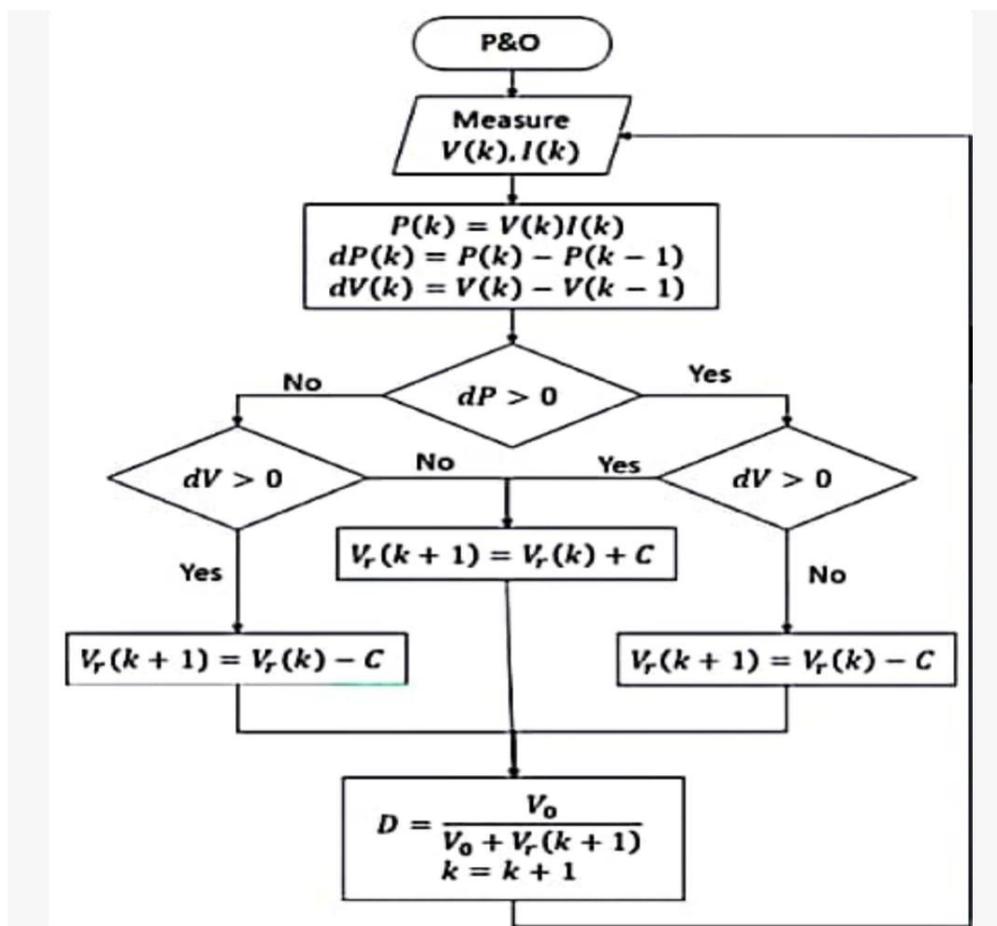


Figura 26. Diagrama de flujo del algoritmo P&O implementado en la investigación.

El diagrama de flujo presentado en la Figura 26, representa el proceso iterativo de un algoritmo utilizado comúnmente en sistemas de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) en paneles solares. Este algoritmo ajusta continuamente la tensión o corriente del panel solar y observa los cambios en la potencia generada para encontrar y mantener el punto de

máxima potencia. En la siguiente tabla se explica el funcionamiento del algoritmo anteriormente mencionado.

Tabla 4. Descripción del algoritmo P&O

1. Inicio	El algoritmo comienza con la inicialización de las variables necesarias, como la tensión y la corriente del panel solar.
2. Medición inicial	Se mide la tensión (V) y la corriente (I) del panel solar.
3. Cálculo de potencia	Se calcula la potencia (P) inicial utilizando la fórmula $P = V \cdot I$
4. Perturbación	Se realiza una pequeña perturbación en la tensión del panel solar.
5. Medición después de la perturbación	Se vuelven a medir la tensión y la corriente después de la perturbación.
6. Cálculo de nueva potencia	Se calcula la nueva potencia.
7. Comparación de potencias	Se compara la nueva potencia con la potencia anterior.
8. Decisión de ajuste	<ul style="list-style-type: none"> • Si la potencia ha aumentado, se mantiene la dirección de la perturbación. • Si la potencia ha disminuido, se cambia la dirección de la perturbación
9. Actualización de valores	Se actualizan los valores de tensión y potencia para la siguiente iteración.
10. Repetición	El proceso se repite hasta que se alcance y mantenga el punto de máxima potencia.

El algoritmo P&O se implementó en los convertidores con el fin de elevar la potencia a la salida de los paneles fotovoltaicos. El algoritmo está configurado de la siguiente manera.

1. Se definen los pines de los transistores y de los sensores de corriente y voltaje.

2. Se realiza la configuración y calibración de los sensores de voltaje y corriente
3. se programa el algoritmo P&O el cual esta direccionado a los transistores que tiene una configuración d puente H los cuales optimizan la extracción de voltaje y corriente del panel solar, lo que le permite alcanzar el MPP.

el algoritmo P&O opera periódicamente perturbando las variables características aumentando o disminuyendo los parámetros en una pequeña cantidad hasta alcanzar MPP. Para cumplir finalmente con el MPPT. El tiempo de encendido y apagado del interruptor se ajusta mediante tecnología PWM. Para maximizar la eficiencia del sistema fotovoltaico.

La configuración de los convertidores se encuentra en puente H, El puente H está formado por cuatro interruptores electrónicos. Estos interruptores permiten cambiar la polaridad de la tensión aplicada a la carga, lo que es útil para controlar la dirección de corriente y ajustar el voltaje de salida. Al conmutar los interruptores de manera adecuada, se puede controlar la corriente que fluye a través de la carga, permitiendo elevar, reducir o invertir el voltaje.

El objetivo principal al implementar el algoritmo P&O en la configuración en puente H, es optimizar la extracción de energía del panel solar, asegurando que opere siempre en su Punto de Máxima Potencia (MPP). El sistema mide el voltaje y la corriente de salida del panel solar para calcular la potencia actual. En seguida Una pequeña perturbación se introduce en el sistema. En el caso del puente H, esto puede ser un pequeño ajuste en el ciclo de trabajo (Duty Cycle) de los interruptores, que a su vez modifica el voltaje de salida.

Después de la perturbación, se mide nuevamente la potencia. Si la potencia ha aumentado, la perturbación se considera beneficiosa, y se continúa en la misma dirección, si la potencia ha disminuido, la dirección de la perturbación se invierte.

El algoritmo sigue ajustando el ciclo de trabajo del puente H hasta que se alcanza el MPP, lo que asegura la máxima eficiencia en la conversión de energía.

En el caso de una configuración de varios niveles, el algoritmo P&O debe aplicarse individual para cada nivel sin cambiar su estructura.

4.3.2 Simulación convertidores MMC y Boost.

Las simulaciones presentadas previamente se realizaron con el propósito de demostrar el principio de funcionamiento de los convertidores MMC y BOOST discutidos en los antecedentes.

En este contexto, se llevaron a cabo simulaciones utilizando Matlab/Simulink con el propósito de analizar el rendimiento de los circuitos presentados en las Figuras 27 y 28. Las simulaciones se realizaron aplicando pulsos PWM fijos. En ambos casos, se consideró una irradiancia de 1000 W/m^2 y una temperatura de 25 grados como condiciones de referencia.

4.3.2.1 Simulación Matlab/Simulink Convertidor BOOST híbrido multinivel

En este escenario, se logra obtener un resultado significativo en lo que respecta al punto máximo de operación del panel solar. Cabe destacar que la configuración y los parámetros de los componentes se mantienen idénticos a los previamente explicados en las simulaciones.

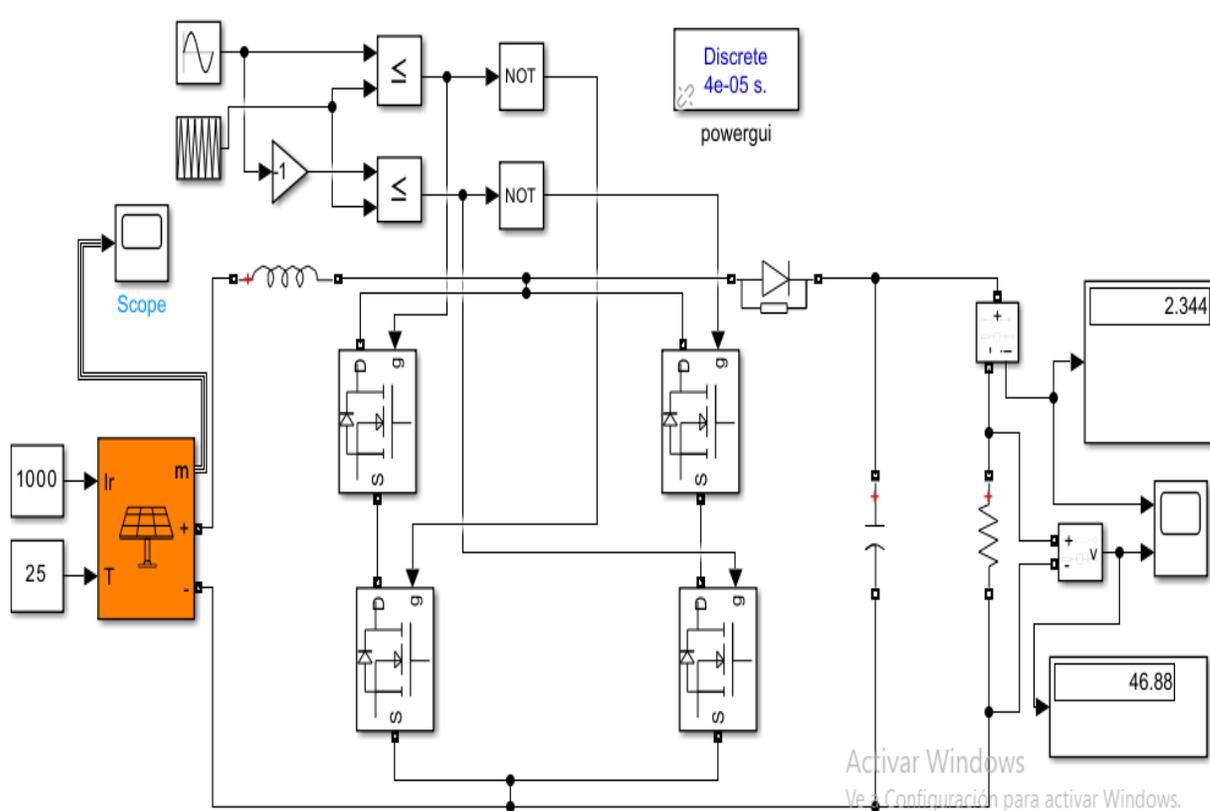


Figura 27. Convertidor Boost híbrido multinivel Matlab/Simulink

Fuente. Elaboración propia.

4.3.2.2 Simulación Matlab/Simulink Convertidor Modular Multinivel MMC

En este caso específico, es evidente a simple vista que su desarrollo es un tanto más complejo debido a la mayor cantidad de componentes que requieren control. No obstante, al

igual que en el convertidor BOOST, se logra alcanzar una salida deseada que se asemeja al punto máximo de operación del panel solar.

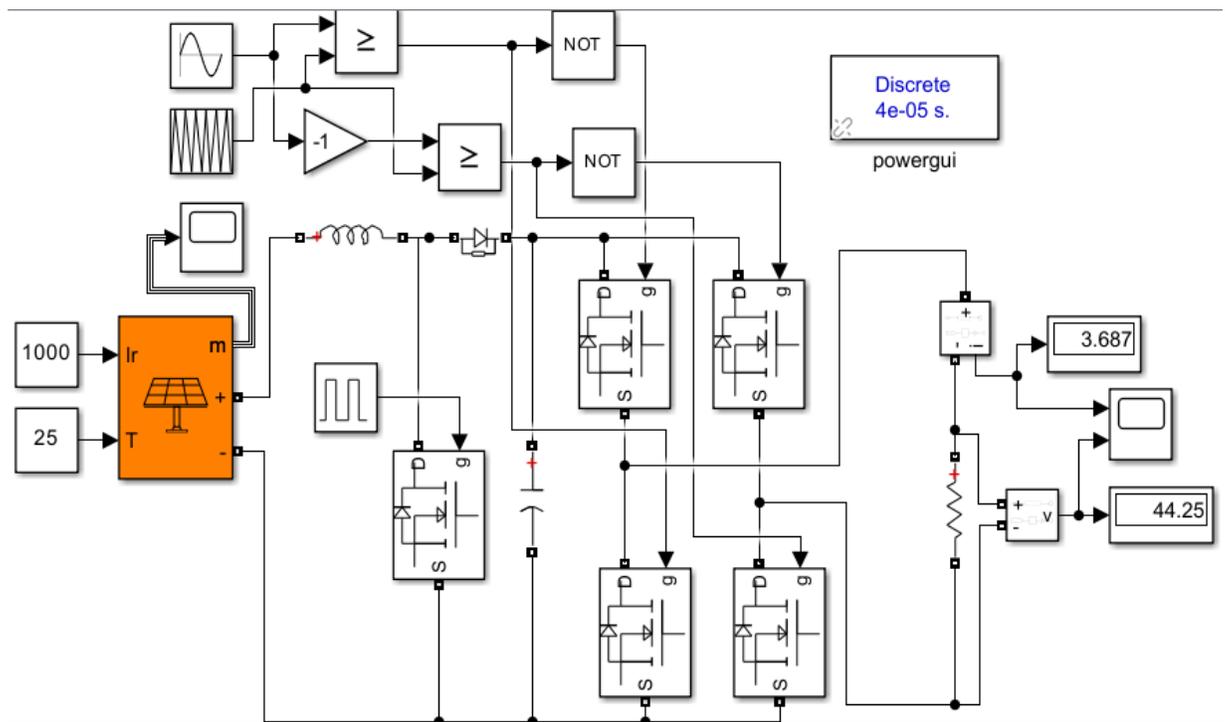


Figura 28. Convertidor Modular Multinivel MMC Matlab/Simulink.

Fuente. Elaboración propia.

4.3.3 Resultados de las simulaciones de los convertidores MMC y Boost

A continuación, presentamos los resultados de los convertidores mostrados anteriormente, que incluyen las señales de voltaje y corriente continua obtenidas en ambos sistemas. Estos resultados se ilustran en las Figuras 29 y 30.

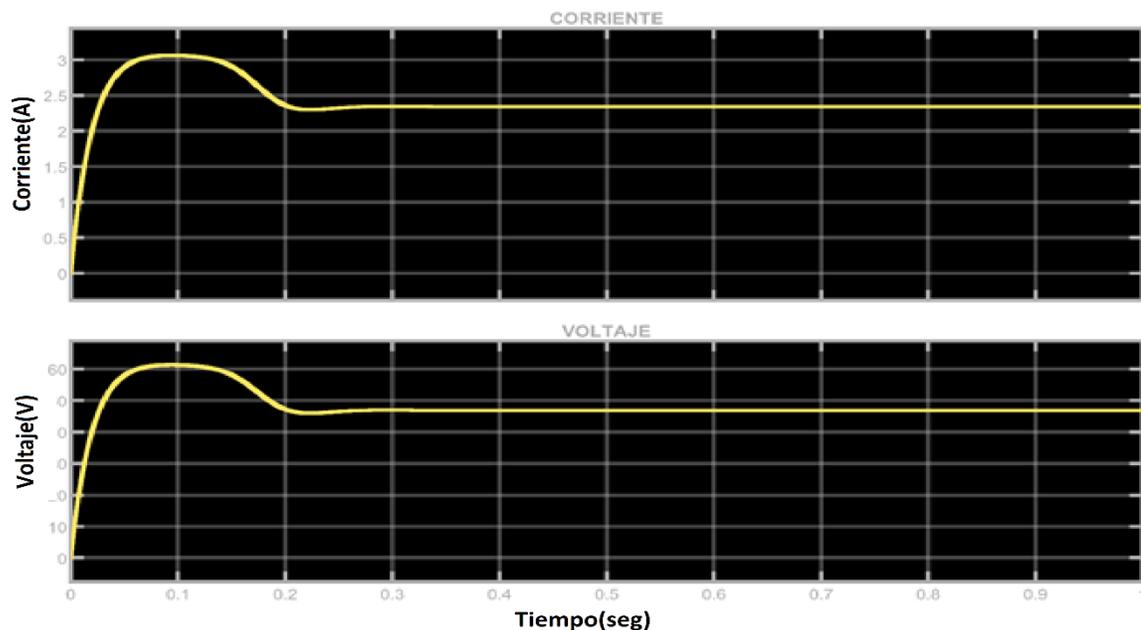


Figura 29. Salida Convertidor Boost híbrido multinivel Matlab/simulink.

Fuente. Elaboración propia.

En la gráfica de voltaje y corriente de salida de la figura 29, se observa como en los dos ejes de voltaje y corriente de salida se estabiliza en 46.88V y la corriente de 2.344A. Sin embargo, en ambos casos, se experimenta una sobretensión inicial, logrando una rápida estabilización.

La figura anterior en el eje de voltaje el sistema se ajusta al ciclo de trabajo manteniéndose dentro del rango deseado. De igual manera, en el eje de corriente el sistema responde a cambios en la carga, manteniendo la corriente dentro de los límites establecidos.

En resumen, al analizar estas gráficas de voltaje y corriente, se obtiene información esencial acerca del rendimiento y comportamiento del sistema en condiciones específicas. Estos datos son fundamentales para el diseño, la optimización y el control de sistemas de energía que emplean esta topología de conversión.

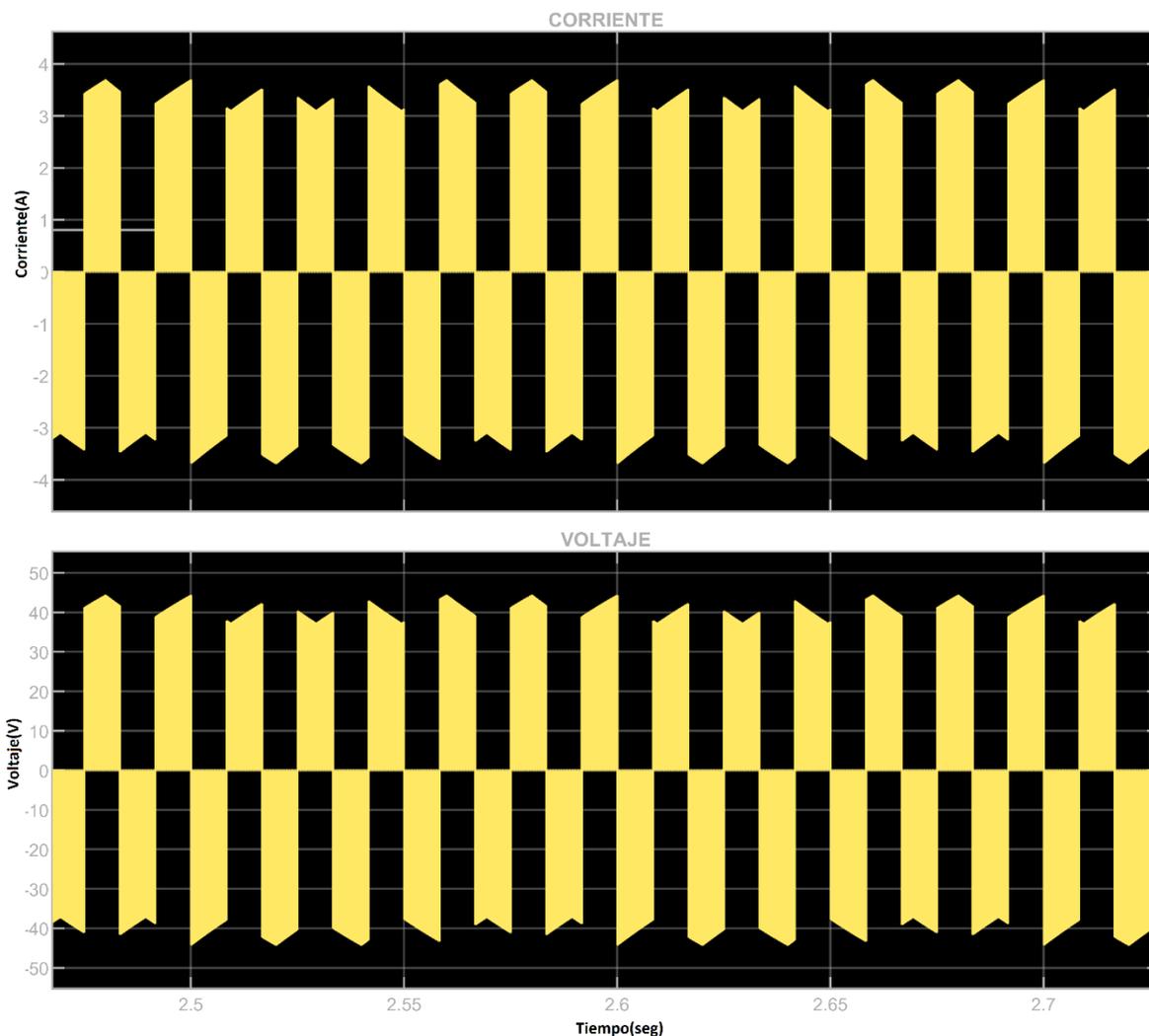


Figura 30. Salida Convertidor Modular Multinivel MMC Matlab/Simulink.

Fuente. Elaboración propia.

En la gráfica de tensión de salida, la tensión oscila de manera constante entre dos valores uno alto y uno bajo. Esto se debe al funcionamiento del convertidor MMC, que crea una señal cuadrada en la salida. El valor alto representa el nivel de tensión máxima que el convertidor puede entregar, y el valor bajo representa el nivel mínimo.

La gráfica cuadrada de salida indica que el convertidor MMC está funcionando de manera intermitente, alternando entre niveles máximos y mínimos de tensión y corriente.

4.3.4 Gráficas de los convertidores MMC y Boost en el osciloscopio.

Para este caso ya se hace uso del algoritmo P&O de máxima potencia en los convertidores implementados para obtener las potencias con las que se pueda analizar y

comparar si el convertidor MMC o Boost es más eficiente, la modulación se realizó por medio de Arduino donde fue necesario utilizar sensores de voltaje y de corriente para la recolección de datos, se utilizó el módulo Mosfet Irf520 5A el cual acopla la parte digital con la parte de potencia y maneja hasta 24 voltios en la carga los cuales son suficientes ya que el voltaje máximo del panel solar es alrededor de 17 voltios y 2.3 amperios.

Las siguientes gráficas, son las gráficas de salida de los convertidores Boost y MMC.

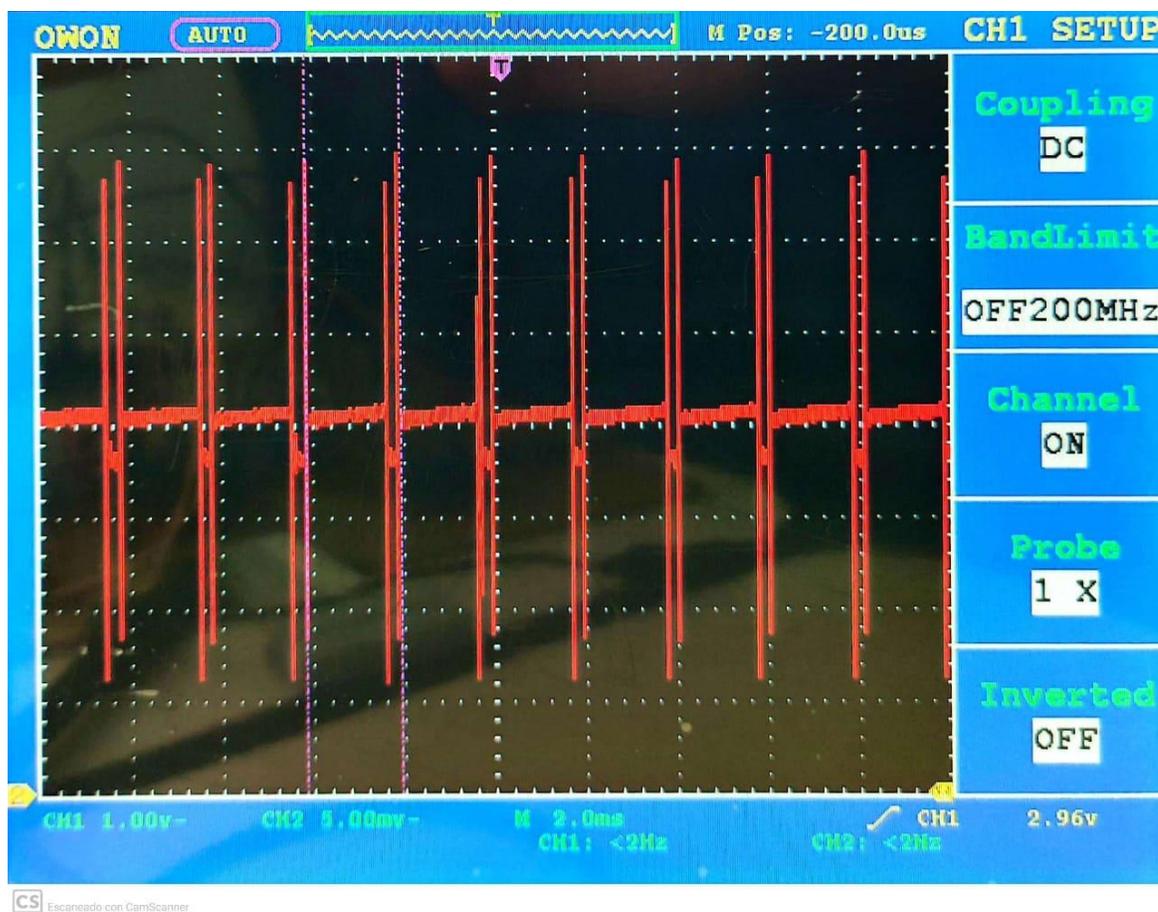


Figura 31. Gráfica de salida del convertidor Boost

Fuente. Elaboración propia.

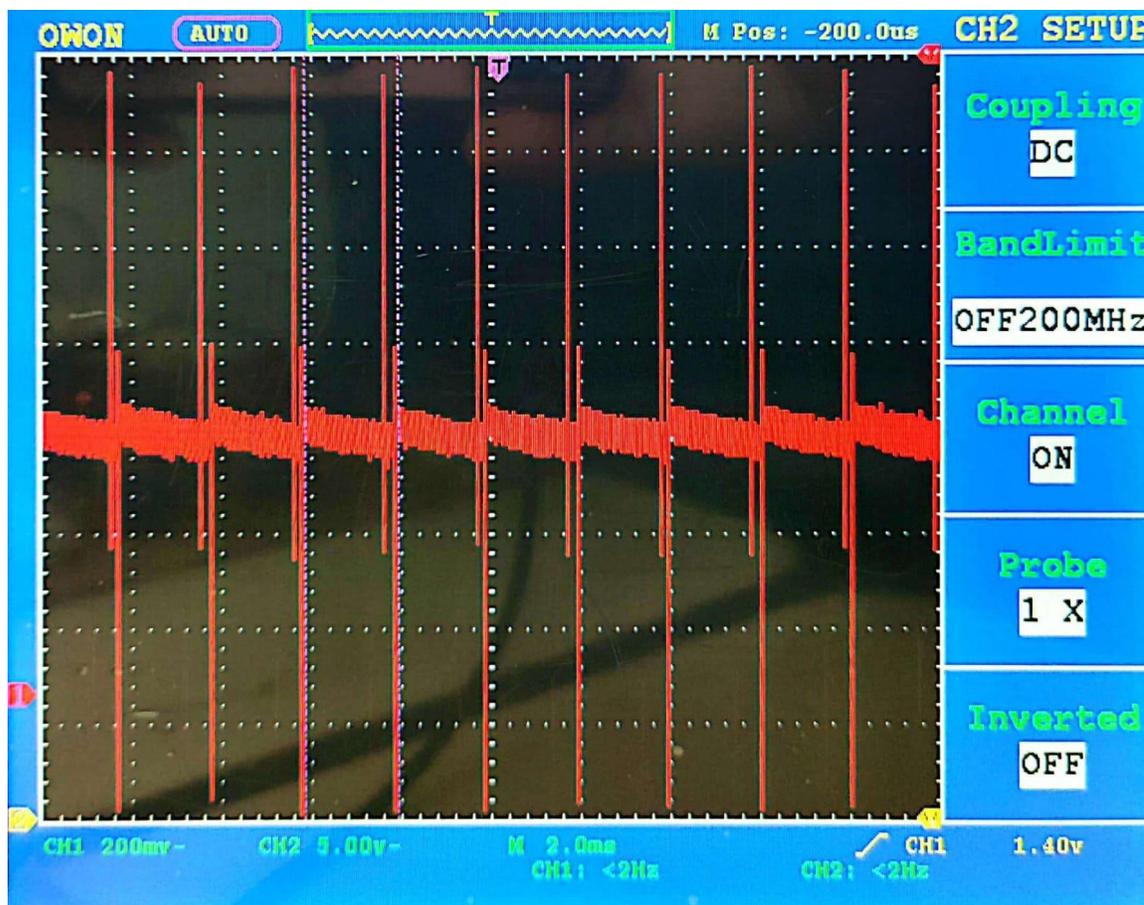


Figura 32. Grafica de salida del convertidor MMC.

Fuente. Elaboración propia.

En las figuras 31 y 32 se obtienen resultados similares, ya que en ambos casos se utiliza el mismo algoritmo P&O. Sin embargo, las escalas de cada gráfico pueden variar debido a las diferencias en la estructura de los convertidores.

En las figuras 29 y 30 las cuales corresponden a las salidas de los convertidores simulados se realizaron aplicando pulsos PWM fijos, al igual que los valores de irradiancia y temperatura, los cuales también fueron constantes. En el caso de los convertidores implementados físicamente representadas por sus graficas de salida en la figura 31 y 32 ya se hizo uso del algoritmo P&O, así como también los datos de entrada son dependientes de las condiciones medioambientales de irradiancia y temperatura a las que este expuesto el panel.

Por este motivo, dado que las condiciones en los dos casos a base de simulación e implementación no son iguales los resultados no van a ser exactamente iguales.

4.3.5 *Resultados de los datos recolectados de irradiancia, temperatura, convertidores MMC y Boost.*

Para la sección de toma de datos, las pruebas se realizaron durante varios días, ya que es necesario monitorear continuamente los convertidores para detectar posibles fallas. Estas fallas podían incluir cortocircuitos por exceso de corriente, fallos en componentes electrónicos, manipulación inadecuada de la alimentación en el Arduino, mal contacto o conexión de los paneles, problemas en las memorias de los módulos de lectura Micro SD para guardar los datos.

Los datos se tomaron en diferentes días y horas, además de realizar el cambio en la conexión del panel en los convertidores.

Los paneles tienen características y especificaciones técnicas muy similares, pero se quiso evaluar si el comportamiento cambiaba al variar la conexión de los convertidores con los paneles. Esto permitió observar si los resultados eran iguales, similares o diferentes al realizar las pruebas conectando ambos convertidores al mismo panel siempre.

4.3.5.1 *Modelamiento matemático del panel*

Para obtener las gráficas con la ayuda de Matlab fue necesario realizar un script con un modelo matemático denominado ecuación Shockley.

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{mKT}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V + IR_s}{R_{sh}}\right) \quad (13)$$

Donde I_{ph} representa la corriente fotogenerada, I_0 representa la corriente de saturación del diodo, m = factor de idealidad del diodo, R_s es la resistencia en serie, R_{sh} es la resistencia en paralelo, K corresponde a la constante de Boltzman, T es la temperatura absoluta de la celda y q es la carga elemental. El termino $KT=q$ se conoce como voltaje termodinámico (V_T). En la práctica algunos parámetros como la corriente de saturación I_0 , la resistencia serie o la resistencia en paralelo no son reportados por el fabricante por lo que es conveniente escribir la relación de la celda en función de términos conocidos como la tensión de circuito abierto o la corriente de corto circuito.

Teniendo como base los datos suministrados por el fabricante es posible obtener un modelo del generador fotovoltaico, en el que las entradas sean la irradiancia y la temperatura ambiente y como salidas se tengan el voltaje y la corriente. A continuación, se listan los datos típicamente suministrados por el fabricante a partir de los cuales se llegará al modelo deseado.

Tabla 5. Datos típicamente suministrados por el fabricante.

1. P_{max}	Es la máxima potencia que el panel fotovoltaico puede de entregar.
2. V_{mp}	Es el voltaje a la potencia pico
3. I_{mp}	Es la corriente a la potencia pico.
4. V_{oc}	Es el voltaje de circuito abierto.
5. V_{cc}	Es la corriente de corto circuito.

Los datos anteriores generalmente se presentan para condiciones de prueba estándar (STC) las cuales generalmente son irradiancia = 1000W/m² (Mera, 2015 Junio).

Para este caso los datos de irradiancia que se utilizaron para obtener las gráficas fueron tomados de la estación Davis.

4.3.5.2 Graficas de los datos de la estación Davis (Temperatura, irradiancia) y de los convertidores implementados

Las siguientes gráficas muestran los datos de irradiancia y temperatura obtenidos en cada prueba, junto con los datos de potencia de los convertidores Boost y MMC implementados físicamente. En estas gráficas también se representa el valor teórico de potencia calculado a partir de los datos de irradiancia registrados por la estación Davis. Para facilitar la comparación entre los datos y ajustarlos a escalas similares, se ha aplicado un factor divisor de mil a los valores de irradiancia, lo que permite visualizarlos en una escala comparable a los demás datos.

cada prueba está influenciada por las condiciones ambientales específicas de irradiancia y temperatura. P1 (panel numero 1) y P2 (panel numero 1).

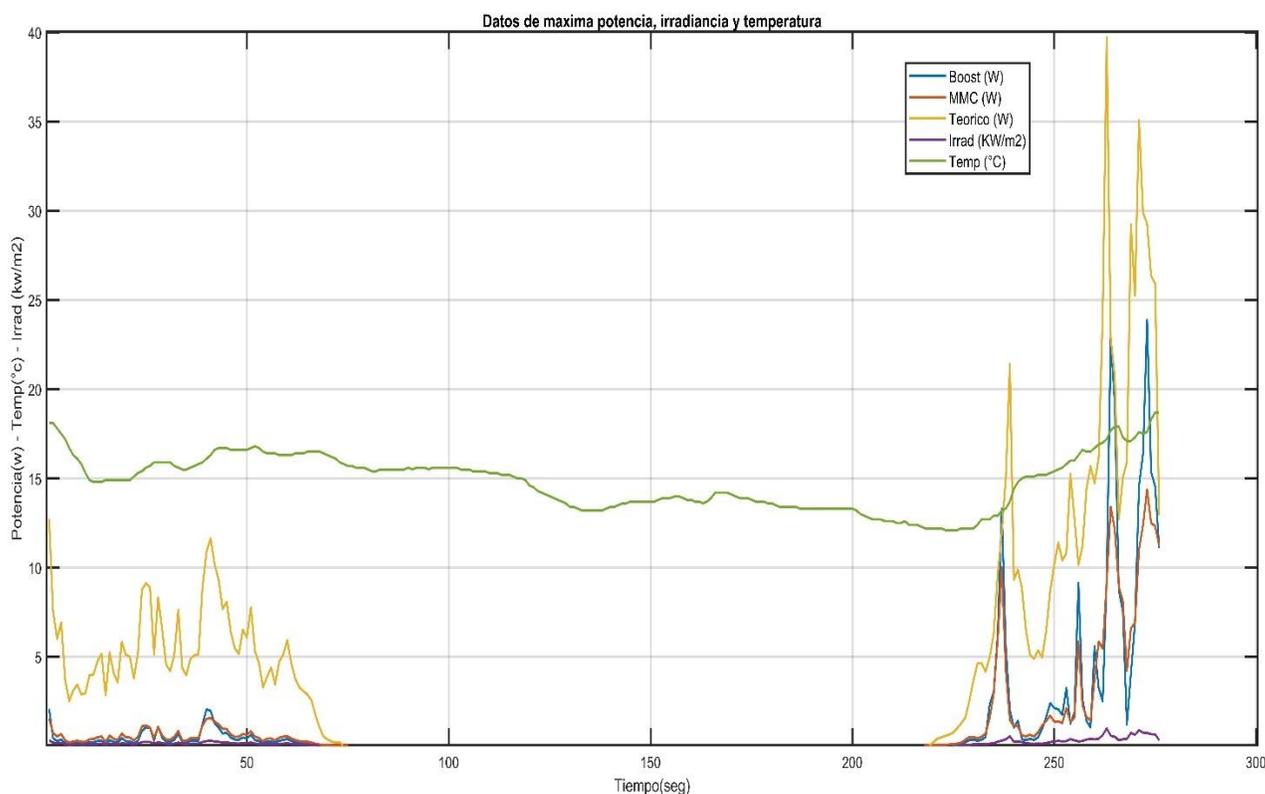


Figura 33. Datos convertidores Boost P1, MMC P2, valor teórico, irradiancia y temperatura.

En el caso de los datos recolectados en la primera etapa, los cuales se ven reflejados en la Figura 31, se observa que el rendimiento de potencia de los convertidores en las primeras horas es bastante bajo. Sin embargo, el 6 de abril de 2024, ambos convertidores muestran un comportamiento similar, aunque el MMC presenta puntos más bajos en determinados momentos. Ambos convertidores intentan seguir el MPP, lo cual es el objetivo en ambos casos. Esto permite evaluar cuál de los dos es más eficiente. En este caso, el convertidor Boost tiene un rendimiento máximo del 60%, mientras que el MMC alcanza su rendimiento máximo en un 36%.

El cálculo de este rendimiento se realizó con una regla de 3 simple en la herramienta Excel, donde se multiplica la potencia máxima obtenida con los convertidores por el 100% y este valor se lo divide en 40, siendo los 40 el valor teórico de la potencia del panel. Este método se aplicó a todas las gráficas de potencia siguientes.

En la misma figura se presentan los datos de irradiancia y temperatura recopilados por la estación Davis durante la primera prueba realizada. Se observa que los datos de irradiancia

varían significativamente con el tiempo, mientras que las variaciones de temperatura son mínimas. Este comportamiento se mantuvo consistente en todas las pruebas.

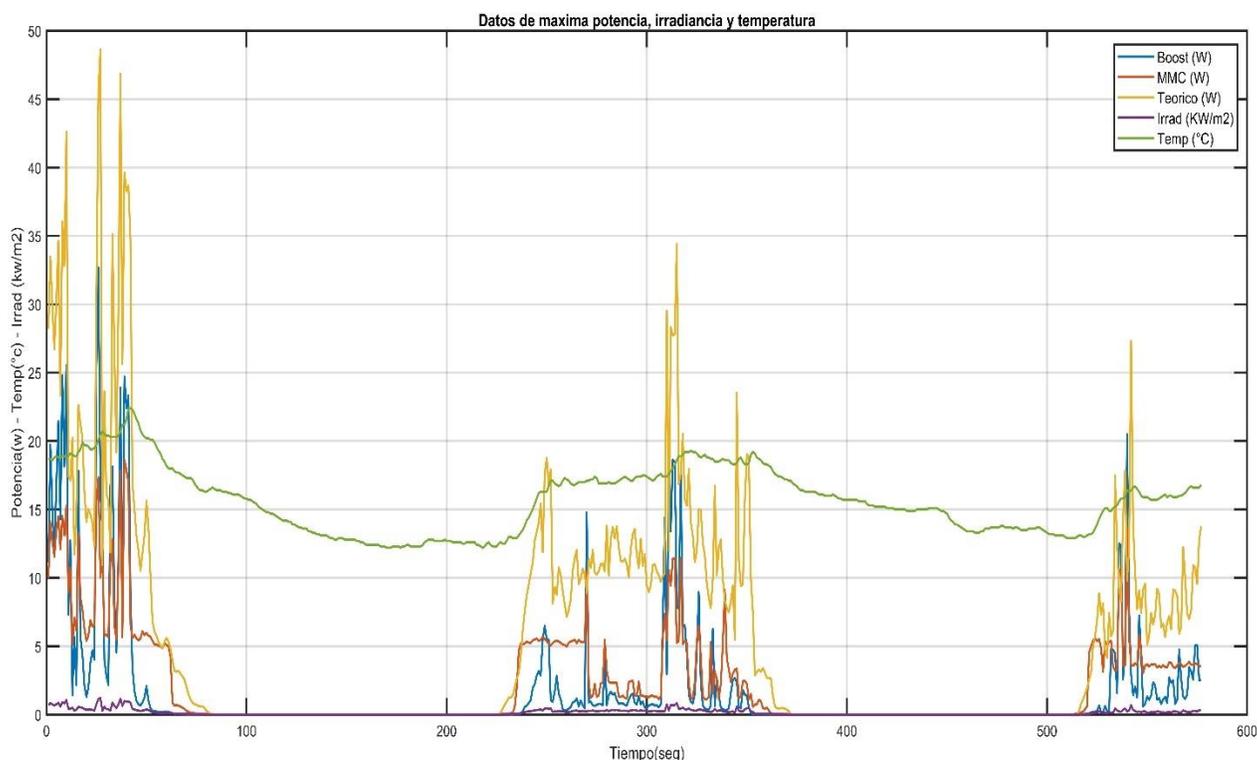


Figura 34. Datos convertidores Boost P1, MMC P2, valor teórico, irradiancia y temperatura.

En la Figura 32, se presenta la toma de datos de dos días consecutivos para verificar la resistencia de los componentes ante sobrecalentamientos por irradiancias o temperaturas muy elevadas. Al inicio de la prueba, durante el ciclo inicial, tanto el MMC como el BOOST intentan seguir el MPPT. Sin embargo, se observa que, en algunas ocasiones, el rendimiento del BOOST es más bajo antes de que la irradiancia llegue a cero.

El día 7 de abril de 2024, el MMC presenta un comportamiento anómalo, posiblemente debido a su estructura con dos capacitores, los cuales pueden tardar más en descargarse. Después de este comportamiento inadecuado del MMC, ambos convertidores muestran un bajo rendimiento en la primera etapa del ciclo, recuperándose a la mitad del mismo y en ocasiones, mostrando un nivel de potencia más alto uno que el otro.

El 8 de abril del presente año, el comportamiento es casi similar al del día anterior, con el MMC presentando el mismo comportamiento anómalo al final del ciclo. En este caso, el convertidor Boost alcanza un rendimiento máximo del 82%, mientras que el MMC tiene un rendimiento máximo del 47%.

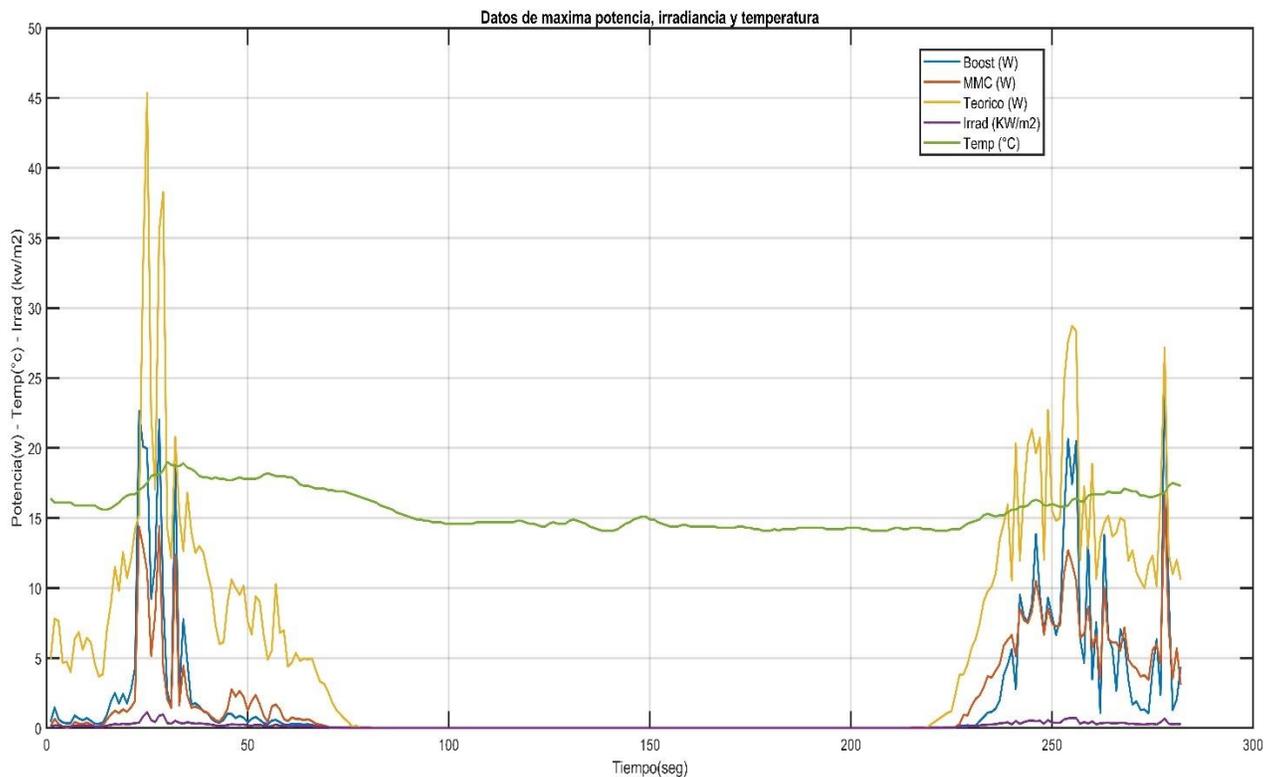


Figura 35. Datos convertidores Boost P1, MMC P2, valor teórico, irradiancia y temperatura.

En la Figura 33, se observa que ambos convertidores, incluyendo el BOOST, tienen un mejor desempeño cuando las irradiancias son elevadas. Sin embargo, cuando el nivel de irradiancia es más bajo, el rendimiento del MMC supera al del BOOST, mientras que, con irradiancias más altas, el BOOST muestra un mejor rendimiento en comparación con el MMC. El punto máximo de potencia en el caso del Boost es de 66% mientras que el del MMC sigue siendo más bajo con un 42%.

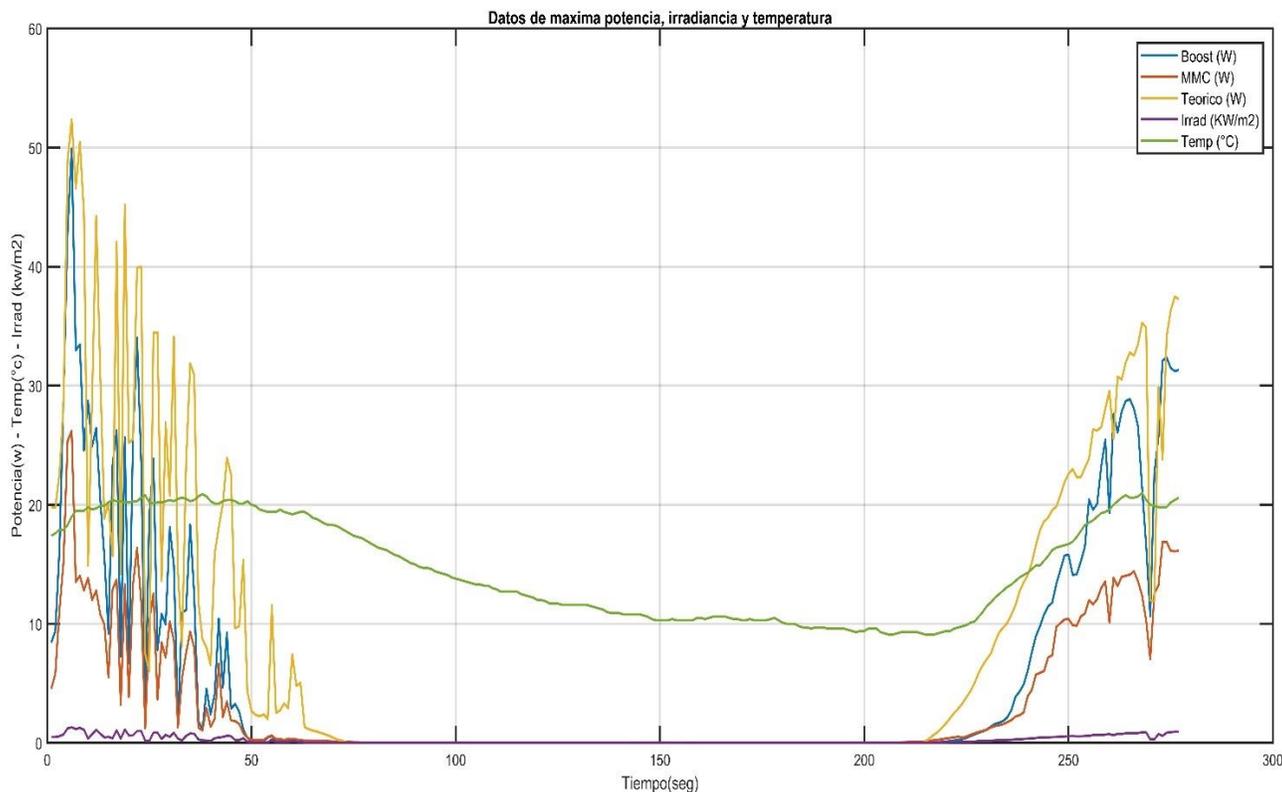


Figura 36. Datos convertidores Boost P1, MMC P2, valor teórico, irradiancia y temperatura.

En la Figura 34, tanto el MMC como el BOOST muestran un muy buen rendimiento de potencia. Este buen desempeño puede atribuirse al monitoreo constante. En ocasiones, debido a posibles cortocircuitos o excesos de corriente, los cables de alimentación (jumpers) se quemaban. Para abordar estos problemas, se utilizó un multímetro para revisar los circuitos paso a paso y verificar cualquier inconveniente, descartando así posibles fallos inadecuados en los convertidores. Cabe mencionar que esta revisión no se realizaba diariamente.

En esta figura, se observa que el BOOST tiene un rendimiento superior al del MMC, ya que presenta potencias mucho más altas. Esto se ve reflejado obteniendo un porcentaje de potencia superior al 100%, ya que para este caso el convertidor Boost sobrepasó en muchas ocasiones los niveles de potencia establecidos con un 125% mientras que con el MMC también se obtuvo un pico de potencia muy bueno con un 66%.

Este comportamiento también podría deberse a que el día en que se tomaron los datos fue significativamente más soleado que los demás, lo que resultó en mayores valores de irradiancia y temperatura. Dado que el convertidor BOOST se desempeña mejor bajo irradiancias más altas, los resultados observados en la Figura 36 reflejan esta circunstancia.

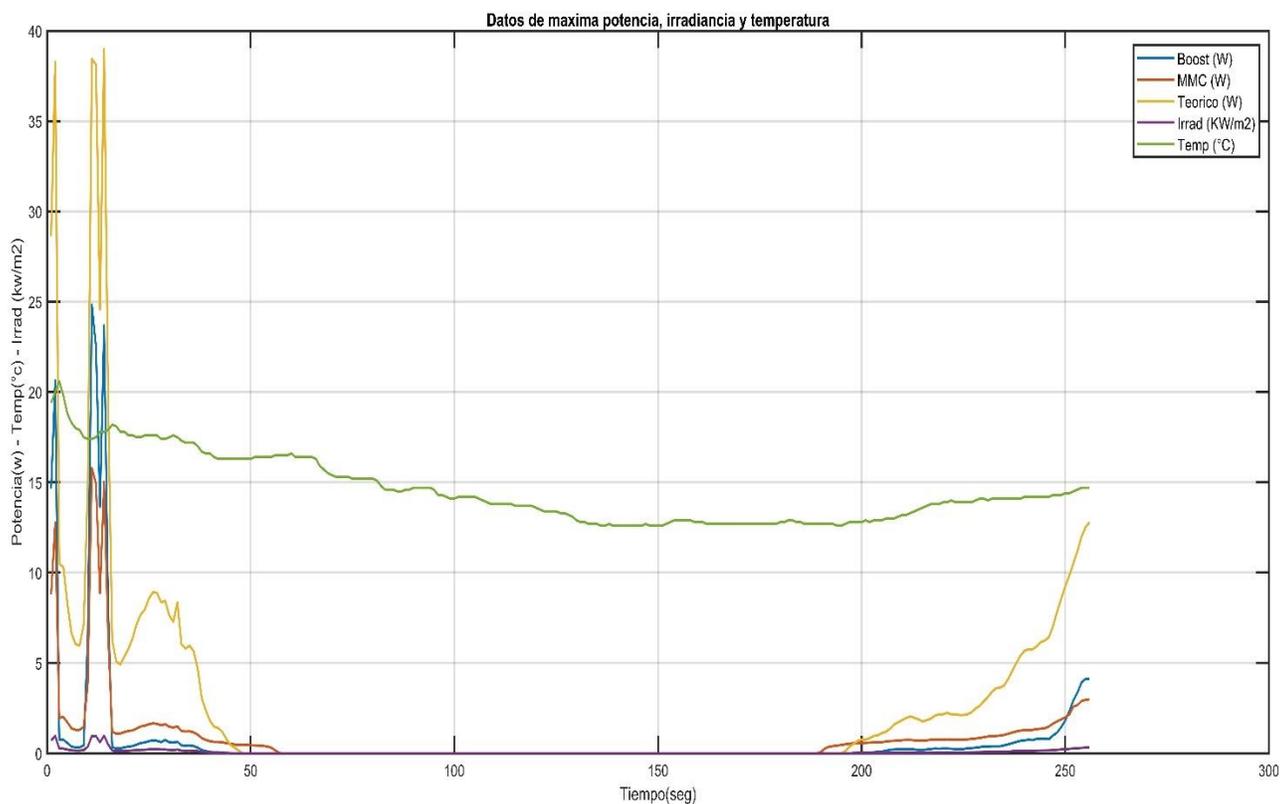


Figura 37. Datos convertidores Boost P1, MMC P2, valor teórico, irradiancia y temperatura.

En la Figura 35, se observa que, al igual que en casos de mayor irradiancia como en los otros casos, el convertidor BOOST es más eficiente. Por otro lado, el MMC mantiene niveles más altos de potencia cuando la irradiancia, convertida a potencia mediante el modelo matemático mencionado anteriormente, es más baja. Para este caso el punto de máxima potencia en el convertidor Boost es de 62% mientras que el del MMC es de 40%.

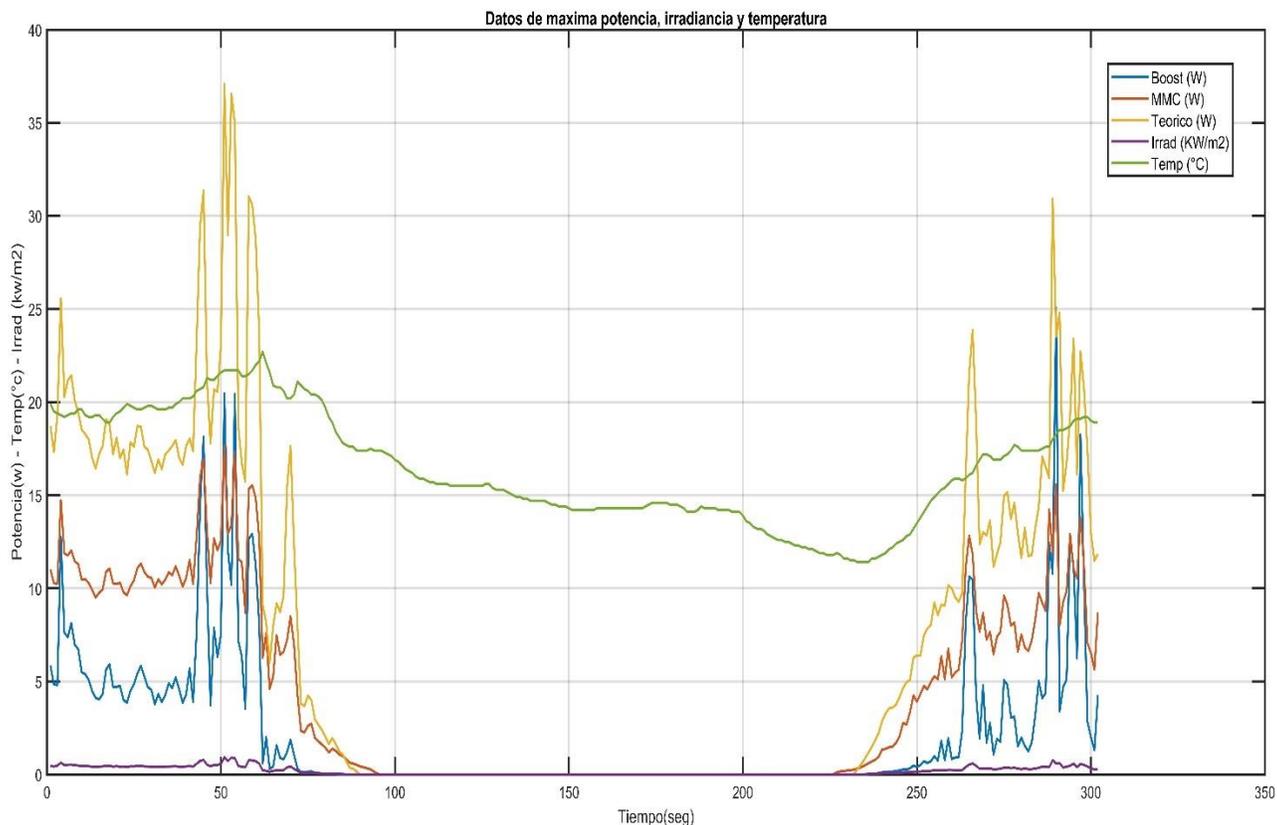


Figura 38. Datos convertidores Boost P2, MMC 1, valor teórico, irradiancia y temperatura.

En la Figura 36, se realizó el cambio de panel para verificar nuevamente el comportamiento de los convertidores. Para este caso el rendimiento del MMC mejora constantemente y supera en algunos instantes los niveles de potencia del convertidor BOOST. Sin embargo, los niveles de potencia globales en comparación al valor teórico son más bajos en ambos casos. El convertidor Boost se obtiene una potencia máxima de 63% similar a la del caso anterior mientras que el MMC es de 44%.

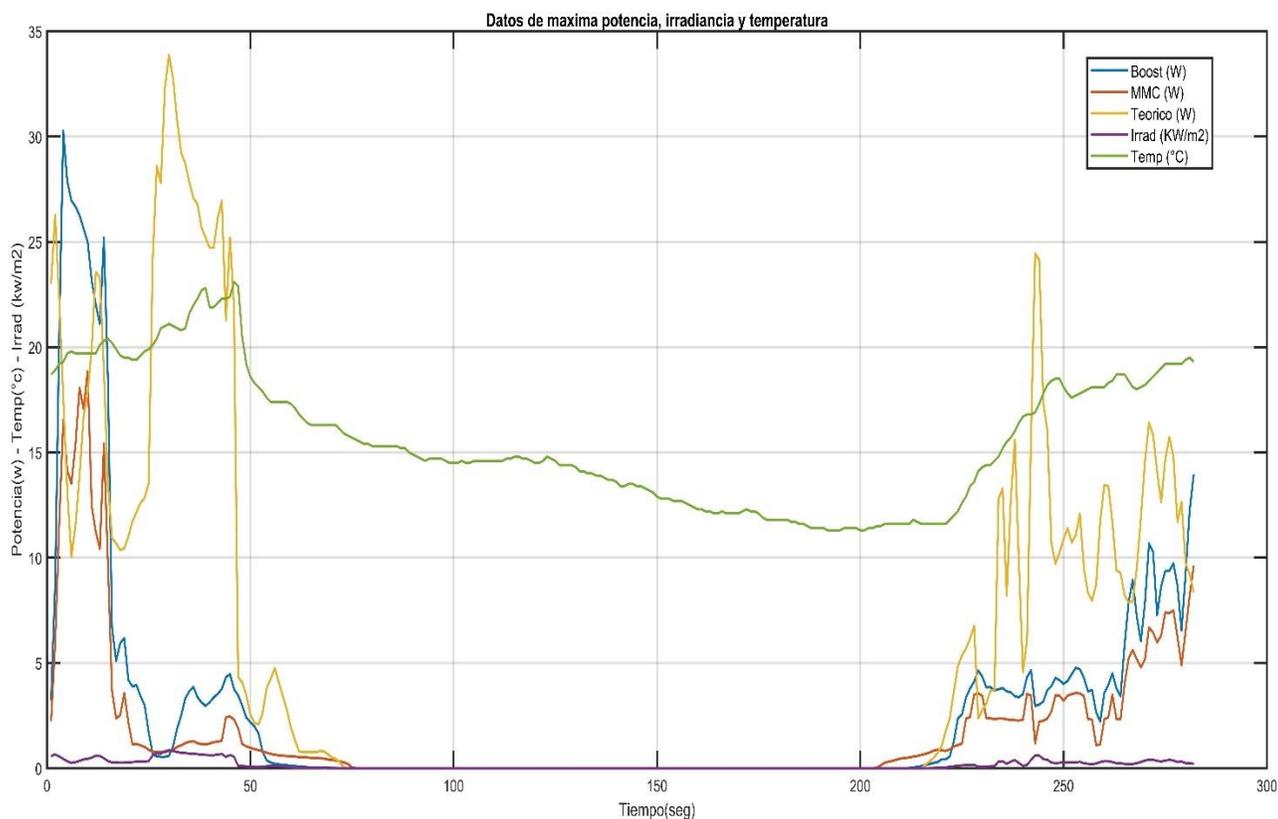


Figura 39. Datos convertidores Boost P1, MMC P2, valor teórico, irradiancia y temperatura.

En la Figura 37, ambos convertidores muestran un comportamiento similar. Al inicio del ciclo, presentan potencias muy buenas, que disminuyen bruscamente con el tiempo. Este patrón se repite el día 1 de mayo del 2024, donde ambos convertidores comienzan con un rendimiento adecuado, pero disminuyen con el tiempo nuevamente. El punto de máxima potencia en este caso es para el convertidor Boost de un 76% y para el MMC de un 47%.

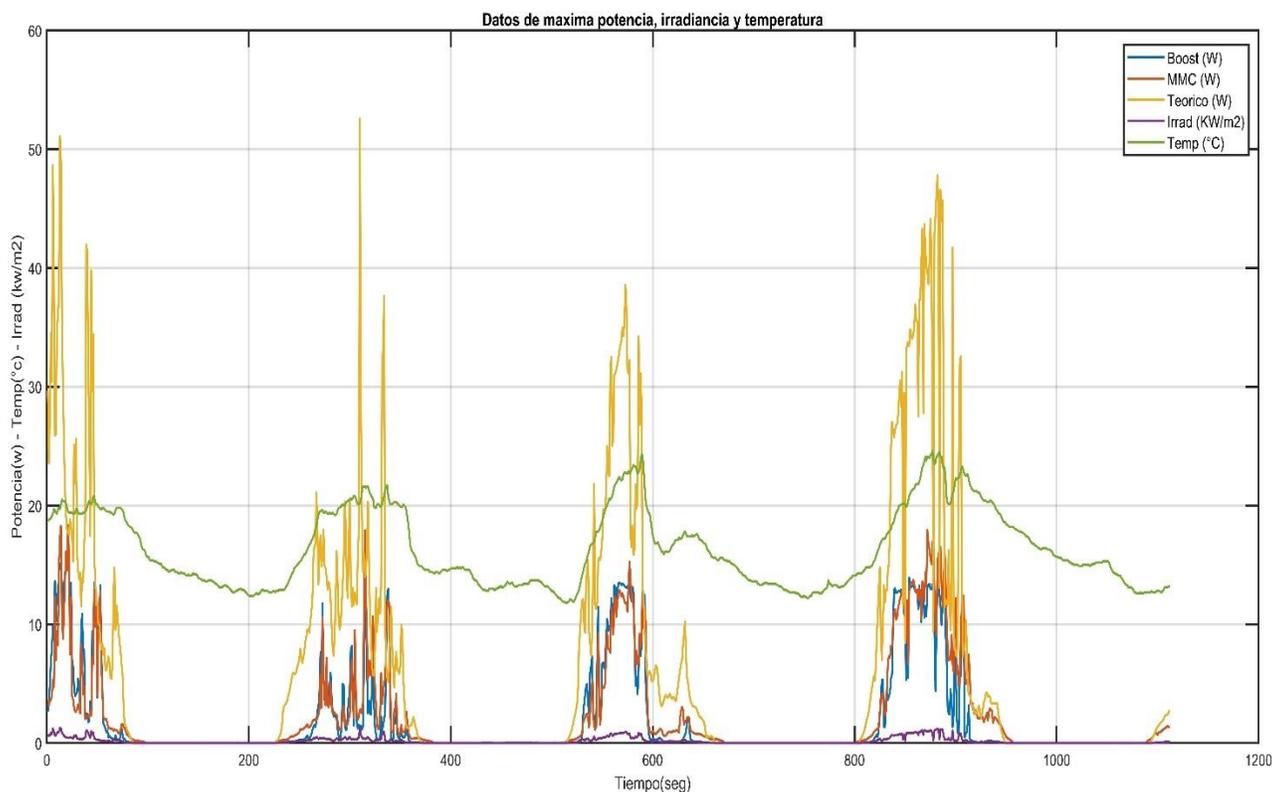


Figura 40. Datos convertidores Boost P1, MMC P2, valor teórico, irradiancia y temperatura.

En la Figura 38, se tomaron datos durante cuatro días para observar el comportamiento de los convertidores en dichas circunstancias. En ambos casos, el rendimiento de potencia es más elevado para el MMC siendo alrededor del 41% en el caso del Boost y con un 46% para el MMC, mostrando resultados consistentes cada día. Tanto el convertidor MMC como el BOOST presentan comportamientos similares a lo largo de este período.

Los datos estadísticos y porcentuales obtenidos previamente fueron calculados utilizando la herramienta Excel. Los cálculos y métodos estadísticos empleados se reflejan en el análisis y la discusión de resultados.

5. Análisis y Discusión de Resultados

5.1 Análisis y comparación de los convertidores implementados.

5.1.1 Comparación de las variables irradiancia y temperatura en la producción de potencia.

La producción de potencia en un sistema fotovoltaico está fuertemente influenciada por dos variables ambientales clave: la **irradiancia solar** y la **temperatura**. Ambas variables afectan el rendimiento de los paneles solares, pero de maneras diferentes.

- **Irradiancia Solar:**

Efecto en la Producción de Potencia:

Relación Directa: La producción de potencia de un panel solar es directamente proporcional a la irradiancia. A mayor irradiancia, mayor será la potencia generada, ya que más energía solar incide sobre la superficie del panel.

Máxima Potencia en Condiciones Óptimas: Bajo condiciones de alta irradiancia, y si otros factores como la temperatura son óptimos, el panel solar puede operar cerca de su máxima capacidad de producción de potencia.

- **Temperatura:**

Efecto en la Producción de Potencia:

Relación Inversa: A diferencia de la irradiancia, la temperatura tiene una relación inversa con la producción de potencia. A medida que la temperatura del panel aumenta, la eficiencia y la potencia de salida tienden a disminuir.

Disminución del Voltaje: El voltaje de circuito abierto disminuye con el aumento de la temperatura, lo que reduce la potencia máxima que el panel puede entregar.

- **Irradiancia Alta y Temperatura Baja:**

Condiciones Ideales: En condiciones de alta irradiancia y baja temperatura, los paneles solares pueden operar cerca de su máxima capacidad, generando la mayor potencia posible. Esta es la condición ideal para la producción de energía fotovoltaica.

- **Irradiancia Alta y Temperatura Alta:**

Compensación: Aunque la alta irradiancia debería aumentar la producción de potencia, el efecto negativo de la alta temperatura puede compensar parte de esta ganancia, reduciendo la eficiencia general del sistema.

- **Irradiancia Baja y Temperatura Baja:**

Producción Baja: Con baja irradiancia, la potencia generada será baja, incluso si la temperatura es favorable. Sin embargo, las bajas temperaturas ayudan a mantener la eficiencia del sistema en lo posible.

- **Irradiancia Baja y Temperatura Alta:**

Condiciones Desfavorables: Estas son las condiciones menos favorables para la generación de energía fotovoltaica. La baja irradiancia limita la entrada de energía, y la alta temperatura reduce aún más la eficiencia del panel.

5.1.2 *Comparación de eficiencia entre el convertidor MMC y el convertidor BOOST*

Basado en el análisis realizado anteriormente, se pueden extraer las siguientes conclusiones sobre la eficiencia relativa de los dos convertidores, MMC y BOOST:

- **Condiciones de Alta Irradiancia:**

BOOST: En condiciones de alta irradiancia, el convertidor BOOST mostró un mejor rendimiento en comparación con el MMC. Esto se observó en varias figuras, donde el BOOST presentó potencias más altas cuando la irradiancia era elevada.

MMC: Aunque su rendimiento fue bueno, no superó al BOOST en estos escenarios.

- **Condiciones de Baja Irradiancia:**

MMC: En condiciones de baja irradiancia, el MMC mostró un mejor rendimiento que el BOOST, manteniendo niveles de potencia más altos.

BOOST: Su rendimiento fue inferior al del MMC en estos escenarios.

- **Consistencia en Rendimiento:**

MMC: Mostró un comportamiento más constante y predecible en diferentes condiciones, aunque con algunas anomalías al inicio y al final del ciclo debido a su estructura interna.

BOOST: Aunque generalmente eficiente, mostró variaciones en su rendimiento bajo diferentes condiciones de irradiancia.

- **Cambio de Paneles:**

MMC: Al cambiar los paneles, el MMC mejoró su rendimiento y, en algunos casos, superó al BOOST, aunque los niveles de potencia globales fueron más bajos.

BOOST: Mantuvo un rendimiento relativamente constante, pero no mostró la misma mejora significativa que el MMC bajo cambio de paneles.

- **Rendimiento a Largo Plazo:**

MMC y BOOST: Ambos convertidores mostraron patrones de rendimiento consistentes durante varios días, con una recuperación de potencia al final del ciclo tras una disminución inicial.

En resumen, la eficiencia relativa de los convertidores MMC y BOOST depende de las condiciones de irradiancia:

Convertidor BOOST: Es más eficiente en condiciones de alta irradiancia y mantiene un rendimiento constante, aunque puede ser menos eficiente en irradiancias bajas.

Convertidor MMC: Muestra mejor rendimiento en condiciones de baja irradiancia y puede superar al BOOST cuando se realizan cambios en los paneles. Sin embargo, presenta algunas anomalías en el rendimiento inicial y final debido a su estructura interna.

Por lo tanto, no se puede declarar cual presenta mayor rendimiento, ya que la eficiencia depende del contexto específico de irradiancia y configuración del sistema. El BOOST es preferible en condiciones de alta irradiancia, mientras que el MMC es más adecuado para escenarios de baja irradiancia y configuraciones variables.

5.1.3 *Análisis estadístico de los resultados obtenidos en los convertidores.*

Se realizó un análisis de los datos donde se obtuvo el promedio, la potencia máxima, la potencia mínima para cada caso y el porcentaje del punto de máxima potencia el cual se realizó con una regla de 3 simple.

Estos datos se calcularon utilizando la herramienta Excel. Para cada caso se aplicaron técnicas estadísticas que se explican de manera general en la siguiente tabla.

Tabla 6. Definición de las técnicas estadísticas.

PROMEDIO	MAXIMA	MINIMA	PORCENTAJE (%)
Es la suma de un grupo de datos, dividida entre el recuento de esos datos.	Es el valor más grande que tiene la función local o globalmente, es decir para este caso es el valor del punto de máxima potencia.	Es el valor más pequeño que tiene la función local o globalmente, es decir el valor mínimo de potencia que para este caso es cero.	Es el cálculo de $(\text{parte}/\text{total}) * 100$, es decir para este caso $(\text{valor practico}/\text{valor teórico}) * 100$.

En la tabla 6, se definen los métodos estadísticos que se utilizaron para darle validez a los resultados obtenidos en la investigación, ya que es imposible realizar una tabla de los datos

recolectados de potencia, temperatura e irradiancia debido a que son miles de datos por cada convertidor.

En las siguientes tablas, se reflejan a groso modo el resultado de los métodos estadísticos que se le aplicaron individualmente a cada convertidor con el fin de determinar la eficiencia de cada uno de los convertidores, así como también si se acercan al valor teórico presentado.

Tabla 7. Aplicación de las técnicas estadísticos de los datos reflejados en la figura 31.

Convertidor BOOST	Convertidor MMC	Valor teórico
Promedio de los datos de potencia recolectados.	Promedio de los datos de potencia recolectados.	Promedio de los datos de potencia teórica.
1.042 W	0.931 W	3.82 W
Potencia máxima obtenida	Potencia máxima obtenida	Potencia máxima obtenida
23.88 W	14.37 W	39.72 W
Potencia mínima obtenida	Potencia mínima obtenida	Potencia mínima obtenida
0 W	0 W	0 W
Porcentaje (%)	Porcentaje (%)	Porcentaje (%)
60 %	36 %	99 %

Tabla 8. Aplicación de las técnicas estadísticos de los datos reflejados en la figura 32.

Convertidor BOOST	Convertidor MMC	Valor teórico
Promedio de los datos de potencia recolectados.	Promedio de los datos de potencia recolectados.	Promedio de los datos de potencia teórica.
1.736 W	2.188 W	5.724 W
Potencia máxima obtenida	Potencia máxima obtenida	Potencia máxima obtenida
32.68 W	18.64 W	48.64 W
Potencia mínima obtenida	Potencia mínima obtenida	Potencia mínima obtenida
0 W	0 W	0 W
Porcentaje (%)	Porcentaje (%)	Porcentaje (%)
82 %	47 %	122 %

Tabla 9. Aplicación de las técnicas estadísticas de los datos reflejados en la figura 33.

Convertidor BOOST	Convertidor MMC	Valor teórico
Promedio de los datos de potencia recolectados.	Promedio de los datos de potencia recolectados.	Promedio de los datos de potencia teórica.
1.914 W	1.737 W	5.453 W
Potencia máxima obtenida	Potencia máxima obtenida	Potencia máxima obtenida
26.23 W	16.75 W	45.36 W
Potencia mínima obtenida	Potencia mínima obtenida	Potencia mínima obtenida
0 W	0 W	0 W
Porcentaje (%)	Porcentaje (%)	Porcentaje (%)
66 %	42 %	113 %

Tabla 10. Aplicación de las técnicas estadísticas de los datos reflejados en la figura 34.

Convertidor BOOST	Convertidor MMC	Valor teórico
Promedio de los datos de potencia recolectados.	Promedio de los datos de potencia recolectados.	Promedio de los datos de potencia teórica.
5.602 W	3.121 W	8.556 W
Potencia máxima obtenida	Potencia máxima obtenida	Potencia máxima obtenida
49.9 W	26.21 W	52.36 W
Potencia mínima obtenida	Potencia mínima obtenida	Potencia mínima obtenida
0 W	0 W	0 W
Porcentaje (%)	Porcentaje (%)	Porcentaje (%)
125 %	66 %	131 %

Tabla 11. Aplicación de las técnicas estadísticas de los datos reflejados en la figura 35.

Convertidor BOOST	Convertidor MMC	Valor teórico
Promedio de los datos de potencia recolectados.	Promedio de los datos de potencia recolectados.	Promedio de los datos de potencia teórica.
1.750 W	0.805 W	2.728 W

Potencia máxima obtenida	Potencia máxima obtenida	Potencia máxima obtenida
24.84 W	15.8 W	39 W
Potencia mínima obtenida	Potencia mínima obtenida	Potencia mínima obtenida
0 W	0 W	0 W
Porcentaje (%)	Porcentaje (%)	Porcentaje (%)
62 %	40 %	98 %

Tabla 12. Aplicación de las técnicas estadísticas de los datos reflejados en la figura 36.

Convertidor BOOST	Convertidor MMC	Valor teórico
Promedio de los datos de potencia recolectados.	Promedio de los datos de potencia recolectados.	Promedio de los datos de potencia teórica.
2.222 W	4.196 W	7.290 W
Potencia máxima obtenida	Potencia máxima obtenida	Potencia máxima obtenida
25.06 W	17.67 W	37.08 W
Potencia mínima obtenida	Potencia mínima obtenida	Potencia mínima obtenida
0 W	0 W	0 W
Porcentaje (%)	Porcentaje (%)	Porcentaje (%)
63 %	44 %	93 %

Tabla 13. Aplicación de las técnicas estadísticas de los datos reflejados en la figura 37.

Convertidor BOOST	Convertidor MMC	Valor teórico
Promedio de los datos de potencia recolectados.	Promedio de los datos de potencia recolectados.	Promedio de los datos de potencia teórica.
2.711 W	1.727 W	5.873 W
Potencia máxima obtenida	Potencia máxima obtenida	Potencia máxima obtenida
30.28 W	18.85 W	33.88 W
Potencia mínima obtenida	Potencia mínima obtenida	Potencia mínima obtenida
0 W	0 W	0 W
Porcentaje (%)	Porcentaje (%)	Porcentaje (%)
76 %	47 %	85 %

Tabla 14. Aplicación de las técnicas estadísticas de los datos reflejados en la figura 38.

Convertidor BOOST	Convertidor MMC	Valor teórico
Promedio de los datos de potencia recolectados.	Promedio de los datos de potencia recolectados.	Promedio de los datos de potencia teórica.
1.945 W	2.233 W	6.381 W
Potencia máxima obtenida	Potencia máxima obtenida	Potencia máxima obtenida
16.23 W	18.35 W	52.56 W
Potencia mínima obtenida	Potencia mínima obtenida	Potencia mínima obtenida
0 W	0 W	0 W
Porcentaje (%)	Porcentaje (%)	Porcentaje (%)
41 %	46 %	131 %

Las tablas presentadas anteriormente reflejan los datos estadísticos calculados en Excel, con los cuales se busca dar validez a las gráficas de datos de los resultados obtenidos en la investigación.

Cada tabla, desde la 7 hasta la 14 se explica resumidamente las figuras desde la 31 hasta la 38 en el mismo orden en el que están distribuidas las figuras, en estas tablas se aplicaron a todos los datos recolectados en cada prueba métodos estadísticos que ayuden a darle validez a lo mencionado en cada figura.

Conclusiones

En conclusión, a pesar de que los paneles utilizados en esta investigación eran generalmente similares en cuanto a voltaje, corriente y potencia de salida, es decir, en sus especificaciones técnicas, se observaron diferencias significativas en los resultados obtenidos. Estas diferencias pueden deberse a los materiales y tecnologías de fabricación empleados por cada fabricante. Por ejemplo, algunos paneles pueden tener un mayor número de celdas o utilizar tecnologías de fabricación diferentes. En el mercado, las celdas monocristalinas suelen ser más eficientes que las policristalinas, lo que podría haber influido en los resultados obtenidos.

Es importante destacar que las diferencias en los resultados de la potencia de los convertidores y el modelo matemático de los paneles fotovoltaicos usando la ecuación de Shockley se puede atribuir a un desajuste en los parámetros usados para el modelo. Esto debido a que se usaron parámetros generales de paneles de 40W nuevos y los paneles usados ya tienen varios años de funcionamiento lo que puede haber modificado los parámetros reales.

El monitoreo constante y la revisión de los convertidores son esenciales para asegurar su correcto funcionamiento, ayuda a identificar y corregir estos problemas, que posiblemente mejor el desempeño de los convertidores. Se pudo observar que el rendimiento de los convertidores varía según las condiciones de irradiancia. En general, el convertidor BOOST se desempeña mejor bajo irradiancias altas, mientras que el MMC muestra un mejor rendimiento en condiciones de irradiancia baja. Esto destaca la importancia de considerar las condiciones ambientales al evaluar y comparar diferentes convertidores.

La estructura interna del convertidor, como la presencia de capacitores en el MMC, puede influir en su rendimiento y comportamiento. Por ejemplo, como lo es el caso los capacitores pueden causar retrasos en la descarga manteniendo potencias mejores. Es importante tener en cuenta estos factores estructurales al diseñar y utilizar convertidores.

Realizar pruebas cambiando el panel puede ser útil para evaluar la adaptabilidad y consistencia de los convertidores. En el caso estudiado, el cambio de panel mostró que el MMC podía mejorar su rendimiento y superar al BOOST, aunque los niveles de potencia globales fueran más bajos. Esto sugiere que el entorno y las configuraciones específicas de los paneles pueden afectar significativamente el rendimiento de los convertidores y apoya la teoría sobre las

diferencias en la potencia de salida de los convertidores y la potencia teórica que entrega el modelo.

Al observar el comportamiento de los convertidores durante varios días, se pueden identificar patrones y tendencias en su rendimiento. En algunos casos, ambos convertidores mostraron un buen rendimiento inicial, este tipo de análisis a largo plazo es necesario para entender el desempeño real de los convertidores en condiciones operativas. Esto indica que, bajo ciertas condiciones, ambos convertidores pueden ofrecer un rendimiento fiable y predecible.

Estudios de este tipo destacan la importancia de un monitoreo constante, y la consideración de las condiciones ambientales y estructurales.

Es importante incluir datos estadísticos para validar los resultados obtenidos. Con estos datos, se puede determinar con certeza cuál convertidor es mejor en diferentes escenarios. En este caso, se puede concluir que el convertidor Boost es más eficiente en el punto de máxima potencia, ya que siempre presenta porcentajes de potencia más elevados que el MMC. Sin embargo, al calcular el promedio de todos los datos obtenidos en cada toma de datos, se observa que en ocasiones el convertidor Boost supera al MMC, y en otras, sucede lo contrario.

Se concluye que ninguno de los dos convertidores alcanzó la potencia teórica calculada debido a que la potencia en el caso de todas las figuras es más baja, por ejemplo, la potencia en la figura 31 la cual también está representada por los datos de la tabla 7. Es para el convertidor Boost 39% menor que el valor teórico y del convertidor MMC 63% menor que el valor teórico.

De la misma manera, tomando el mismo ejemplo de la figura 31 y de la tabla 7, el convertidor Boost extrajo el 24% mayor potencia que el convertidor MMC.

En conclusión, realizado un análisis en la figura 32 y la tabla 8, el convertidor MMC extrajo el 35% menos potencia que el convertidor Boost.

Por último, se concluye que al hacer un nuevo análisis en la figura 33 y la tabla 9, el convertidor Boost no extrajo el 100% más de potencia, pero sí logró extraer un 24% más de potencia que el convertidor MMC.

A partir del análisis realizado, se concluye que el convertidor Boost mostró una mayor eficiencia en comparación con el convertidor MMC en las distintas pruebas realizadas durante el transcurso de la investigación. Pero que en ninguno de los dos casos alcanzó la eficiencia teórica calculada.

Recomendaciones

Basado en los resultados, proporcionar recomendaciones sobre cuándo y dónde es más efectivo usar cada tipo de convertidores es primordial antes de pensar en realizarlo o simplemente comprarlo dependiendo de la aplicación que se desea instalar. Si el objetivo es la implementación rápida y confiable, comprar convertidores probados y optimizados comercialmente puede ser preferible.

Si el objetivo es avanzar en el conocimiento técnico y potencialmente desarrollar soluciones más eficientes, probando diferentes tipos de convertidores y los algoritmos adecuados para cada uno de ellos, continuar con la investigación y desarrollo de los convertidores puede ser más beneficioso.

Para la implementación de convertidores MMC y BOOST en sistemas fotovoltaicos depende de varios factores, incluyendo las condiciones ambientales, los objetivos del sistema, y las características específicas de los paneles solares y los convertidores. En el caso del MMC en particular, entre los antecedentes investigados, este convertidor es más usado y eficiente para sistemas fotovoltaicos conectados a la red de media tensión, es decir es capaz de soportar corrientes bastante altas y responder de manera eficiente a este tipo de sistemas. En el caso del convertidor BOOST, que es bastante utilizado en varios sistemas DC-DC los cuales son muy eficientes para este tipo de casos.

Realizando un análisis basado en la investigación los procesos para la construcción y ejecución de convertidores pueden presentar irregularidades y desafíos que requieren pruebas exhaustivas para alcanzar los resultados deseados. Para futuras investigaciones, se recomienda primero considerar la aplicación específica de cada convertidor, ya que existen diversas estructuras de convertidores adaptadas a diferentes aplicaciones, así como diferentes configuraciones de sistemas fotovoltaicos.

Para trabajos futuros es esencial tener en cuenta las estructuras de los convertidores y el algoritmo de máxima potencia que cada uno requiere, dado que no todos los algoritmos se adaptan correctamente a todas las estructuras de convertidores. El rendimiento del algoritmo depende en gran medida de la configuración del convertidor.

Al implementar convertidores, es crucial considerar varios aspectos técnicos y operativos para asegurar un rendimiento óptimo y la fiabilidad del sistema.

Los aspectos más importantes que se deben tener en cuenta al momento de implementar los convertidores son la disponibilidad de los componentes que se requieren utilizar para su implementación, así como también la estructura de los convertidores debido a que de eso depende la complejidad de la implementación y el tiempo que se requiere para ejecutar el sistema, especificaciones del Sistema, eficiencia, diseño y topología del convertidor, control y modulación, protección y seguridad, interferencia electromagnética, fiabilidad y durabilidad, costos y mantenimiento, compatibilidad con la aplicación, condiciones ambientales entre otros.

Bibliografía

- Asmel Marrero, V. (2013). *Universidad Central “ Marta Abreu ” de Las Villas*. 30–34.
- Bashir, S. B., Zidan, H. A., & Memon, Z. A. (2020). *Power balancing of grid connected PV system based on MMC under different irradiation conditions*. 117.
- Benito, J. V. S. (n.d.). *Mecánica Cinemática y dinámica*.
- Carballo, G. (2016). *La importancia del uso de paneles solares en la generación de energía eléctrica*. 17.
- Cepeda, J., & Sierra, A. (2007). *Aspectos que afectan la eficiencia en los paneles fotovoltaicos y sus potenciales soluciones*. 07/80.
- Cruz-Monsalve, D. M., Pabon Fernandez, L. D., Caicedo-Peñaranda, E. A., Pardo García, A., & Díaz-Rodríguez, J. L. (2020). *Prototipo de seguimiento de máximo punto de potencia (MPPT) de bajo costo*. 8.
- Elsanabary, A. I., Konstantinou, G., Mekhilef, S., Townsend, C. D., Seyedmahmoudian, M., & Stojcevski, A. (2020). Medium Voltage Large-Scale Grid-Connected Photovoltaic Systems Using Cascaded H-Bridge and Modular Multilevel Converters: A review. *IEEE Access*, 8.
- González, M., Cárdenas, V., Miranda, H., & Álvarez-Salas, R. (2016). *Conception of a modular multilevel converter for high-scale photovoltaic generation based on efficiency criteria*. 125.
- Granda-Gutiérrez, E. E., Orta-Salomón, O. A., Díaz-Guillén, J. C., Jimenez, M. A., Osorio, M., & González, M. A. (2013). *Modelado y Simulación de Celdas y Paneles Solares*.
- Jeyasudha.S, & Geethalakshmi.B. (2017). *Modeling and Analysis of a Novel Boost Derived Multilevel Hybrid Converter*. 117.
- Mishra, P., & Bhesaniya, M. M. (2018). *Comparison of Total Harmonic Distortion of Modular Multilevel Converter and Parallel Hybrid Modular Multilevel Converter*. *Icoei*, 890–894. <https://doi.org/10.1109/ICOEI.2018.8553887>
- Mohapatra, A., Nayak, B., & Saiprakash, C. (2019). Adaptive Perturb Observe MPPT for PV System with Experimental Validation. *1st IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies and Systems, ICSETS 2019*.
- P. Telechea. (2015). “ *Revisión Y Comparación De Los Principales Métodos Mppt Para Sistemas*”.

- Pilco, P., & Jaramillo, P. (2008). *Sistemas fotovoltaicos para iluminación: paneles fotovoltaicos*.
- Quijano. (2009). *Guía de Investigación Cuantitativa*.
- Romario, W., & Coaquira, Q. (2021). *Medición y monitoreo de eventos extremos de irradiancia solar mediante una plataforma sensorial de bajo costo en las condiciones geográficas y climatológicas de Juliaca*. 3(Vol. 3, Num. 2), 53–62. <https://doi.org/10.47190/nric.v3i1.138>
- Santander, B. (2017). *ESTIMACIÓN DE LA EFICIENCIA DE UN SISTEMA DE ENERGIA ELÉCTRICA BASADO EN PANELES SOLARES CONSIDERANDO VARIABLES AMBIENTALES EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ*. 87(1,2), 149–200.
- Sol, E. L., Fuente, C., Captaci, S. D. E., Energ, D. E. L. A., Historia, B., Aplicaciones, D. E. L. A. S., Energ, D. E. L. A., Energ, P. D. E. L. A., Temperatura, R. D. E. B., Medias, T., Temperaturas, A., & Fotovoltaicos, S. (2020). *La Energía Solar*. 1–33.
- Sosa, J. M. (2009). *ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE ILUMINACIÓN, UTILIZANDO AMPOLLETAS DE BAJO CONSUMO Y ALIMENTADO POR PANELES FOTOVOLTAICOS*.
- Mera, F. A. (2015 Junio). *Modelamiento y control de una microrred en modo isla*. Bogota: Universidad de los Andes.

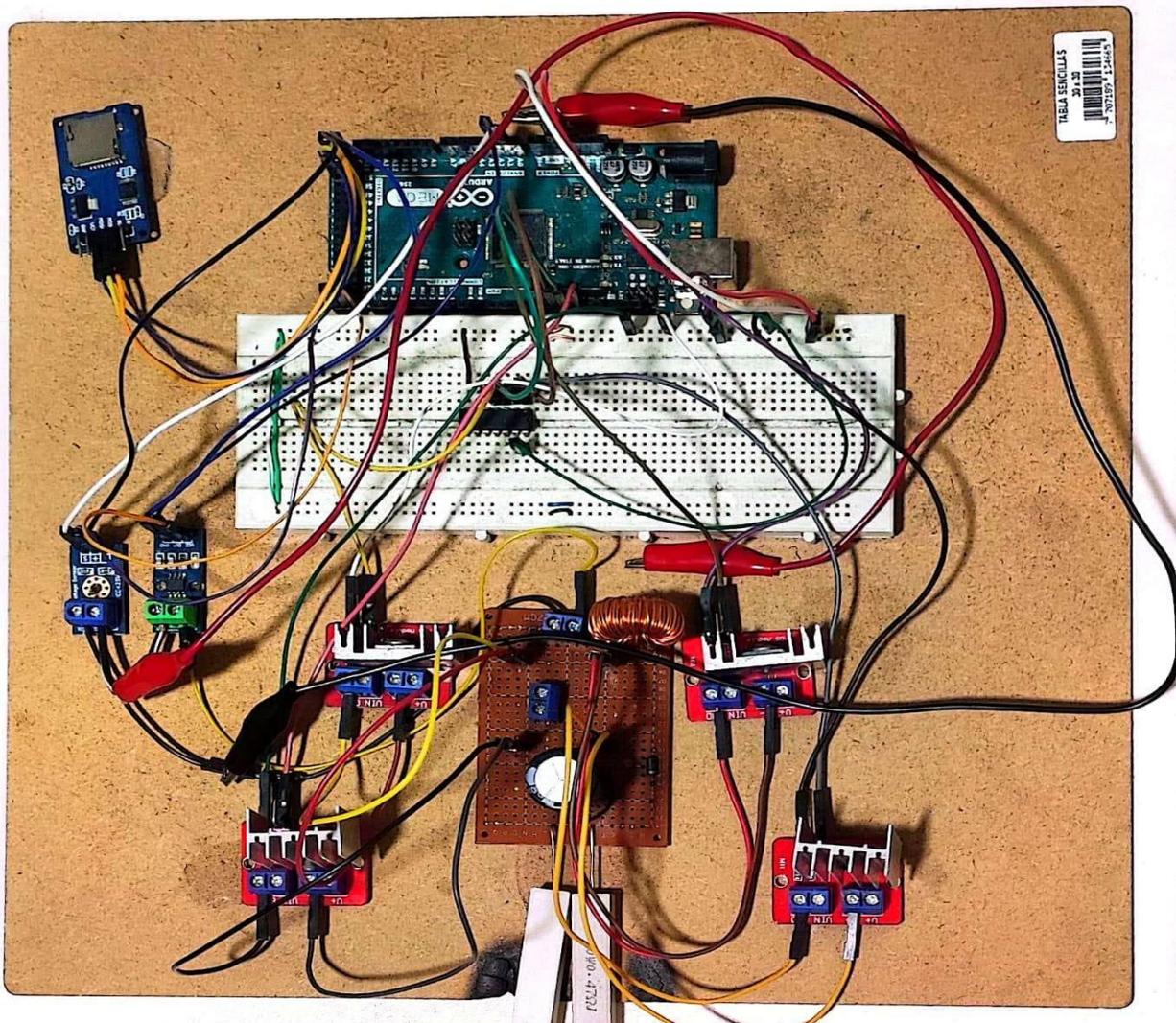
Anexos

Anexo A

Esquemas de circuitos.

Se presenta una vista detallada de los prototipos de los convertidores implementados. En las imágenes, es posible identificar los componentes esenciales que conforman el sistema.

- Convertidor Boost híbrido.



CS Escaneado con CamScanner

Figura 41. Montaje convertidor BOOST

- Convertidor MMC.

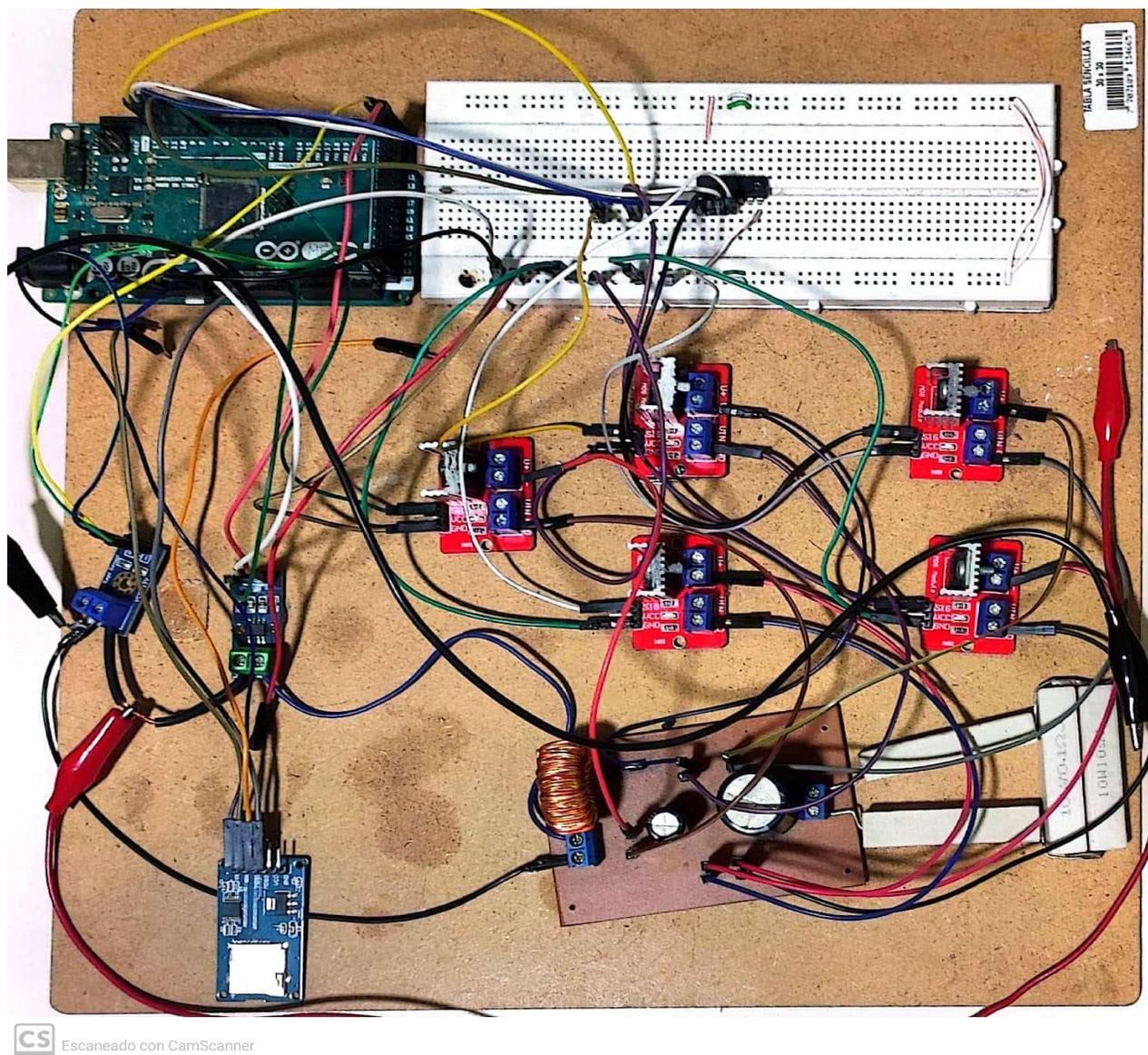


Figura 42. Montaje convertidor MMC

En estas configuraciones, el Arduino desempeña un papel fundamental en la etapa de control. A través de un programa específico, el Arduino es la herramienta que se encarga de buscar y mantener el punto de máxima potencia utilizando el algoritmo P&O. La protoboard, por su parte, cumple dos funciones principales: proporcionar la alimentación necesaria para los componentes del circuito y facilitar la inversión de algunos pulsos PWM mediante el uso del circuito integrado SN74LS04N, que actúa como una compuerta NOT.

El módulo controlador IRF520 MOSFET que está conectado al circuito y el cual desempeña un papel esencial al asignar las señales PWM requeridas para el funcionamiento del sistema. Además, los sensores de voltaje y corriente desempeñan un papel crucial al medir el voltaje suministrado por la fuente y la corriente adecuada dirigida hacia el algoritmo. Esta información es fundamental para que el algoritmo pueda tomar decisiones informadas y optimizar el sistema para que funcione a su máxima potencia. En conjunto, estos componentes trabajan de manera coordinada para lograr un sistema eficiente y preciso de seguimiento del punto de máxima potencia.

Anexo B

Algoritmos (P&O) en Arduino:

- Código algoritmo Boost



boost_proyecto.ino

- Código Algoritmo MMC



otrommc.ino

Anexo C

Modelo Matemático del Panel:

 晶尚新能 科技有限公司	
Model:	CF-5M-40M-30
Rated Maximum Power (P _m)	40W
Voltage at P _m (V _m)	17.33V
Current at P _m (I _m)	2.31A
Open-Circuit Voltage (V _{oc})	21.51V
Short Circuit Current (I _{sc})	2.58A
Normal Operating Cell Temp. (NOCT)	45 ± 2°C
Maximum System Voltage	1000VDC
Operating Temperature	-40°C to +85°C
Application	Class A
Cell Tech.	Mono-Si
Weight	4.8KG
Dimension (mm)	630 × 540 × 30

Warning

Modules generate electricity as soon as they are exposed to light. One module on its own is below the safety voltage level, but multiple modules connected in series (summing the voltage) represent a danger.

All technical data at standard test condition
 AM=1.5 E=1000W/M² TC=25°C Made in China
 Tel: +86-572-3872111 Fax: +86-572-3872098
 Http://www.stc-pv.com Email: stc@stc-pv.com






Figura 43. Modelo panel solar

Código Modelo Matemático del Panel



curva_MPPT_mo1.m

Anexo D

Datos recolectados.



datos.xlsx



datos_1.xlsx

 <p>UNIVERSIDAD CESMAG NIT: 800.109.387-7 VIGILADA MINEDUCACIÓN</p>	CARTA DE ENTREGA TRABAJO DE GRADO O TRABAJO DE APLICACIÓN – ASESOR(A)	CÓDIGO: AAC-BL-FR-032
		VERSIÓN: 1
		FECHA: 22/NOV/2024

ENTREGA DE TRABAJO

San Juan de Pasto, 22/11/2024

Biblioteca
REMIGIO FIORE FORTEZZA OFM. CAP.
Universidad CESMAG
Pasto

Saludo de paz y bien.

Por medio de la presente se hace entrega del Trabajo de Grado / Trabajo de Aplicación denominado **COMPARACIÓN DE CONVERTIDORES MPPT MULTINIVEL PARA EL SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA EN PANELES FOTOVOLTAICOS** presentado por el autor **FANOR ANDRES ADARME MARTINEZ**, del Programa de ingeniería electrónica al correo electrónico trabajosdegrado@unicesmag.edu.co. Manifiesto como asesor(a), que su contenido, resumen, anexos y formato PDF cumple con las especificaciones de calidad, guía de presentación de Trabajos de Grado o de Aplicación, establecidos por la Universidad CESMAG, por lo tanto, se solicita el paz y salvo respectivo.

Atentamente,



Fredy Alexis Dulce Mera
CC: 1085285392
Ingeniería electrónica
Cel:3166942421
fredy.dulce@correounivalle.edu.co

 UNIVERSIDAD CESMAG NIT: 800.109.387-7 <small>VIGILADA Mineducación</small>	AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE GRADO O TRABAJOS DE APLICACIÓN EN REPOSITORIO INSTITUCIONAL	CÓDIGO: AAC-BL-FR-031
		VERSIÓN: 1
		FECHA: 22/NOV/2024

INFORMACIÓN DEL (LOS) AUTOR(ES)	
Nombres y apellidos del autor: Fanor Andrés Adarme Martínez	Documento de identidad: 1081595385
Correo electrónico: norfa098@gmail.com	Número de contacto: 3107522017
Nombres y apellidos del asesor: Fredy Alexis Dulce Mera	Documento de identidad: 1085285392
Correo electrónico: fredy.dulce@correounivalle.edu.co	Número de contacto: 3166942421
Título del trabajo de grado: COMPARACIÓN DE CONVERTIDORES MPPT MULTINIVEL PARA EL SEGUIMIENTO DEL PUNTO DE MÁXIMA POTENCIA EN PANELES FOTOVOLTAICOS	
Facultad y Programa Académico: (Ingeniería) Ingeniería Electrónica	

En mi (nuestra) calidad de autor(es) y/o titular (es) del derecho de autor del Trabajo de Grado o de Aplicación señalado en el encabezado, confiero (conferimos) a la Universidad CESMAG una licencia no exclusiva, limitada y gratuita, para la inclusión del trabajo de grado en el repositorio institucional. Por consiguiente, el alcance de la licencia que se otorga a través del presente documento, abarca las siguientes características:

- a) La autorización se otorga desde la fecha de suscripción del presente documento y durante todo el término en el que el (los) firmante(s) del presente documento conserve(mos) la titularidad de los derechos patrimoniales de autor. En el evento en el que deje(mos) de tener la titularidad de los derechos patrimoniales sobre el Trabajo de Grado o de Aplicación, me (nos) comprometo (comprometemos) a informar de manera inmediata sobre dicha situación a la Universidad CESMAG. Por consiguiente, hasta que no exista comunicación escrita de mi(nuestra) parte informando sobre dicha situación, la Universidad CESMAG se encontrará debidamente habilitada para continuar con la publicación del Trabajo de Grado o de Aplicación dentro del repositorio institucional. Conozco(conocemos) que esta autorización podrá revocarse en cualquier momento, siempre y cuando se eleve la solicitud por escrito para dicho fin ante la Universidad CESMAG. En estos eventos, la Universidad CESMAG cuenta con el plazo de un mes después de recibida la petición, para desmarcar la visualización del Trabajo de Grado o de Aplicación del repositorio institucional.

 <p>UNIVERSIDAD CESMAG NIT: 800.109.387-7 VIGILADA MREDCACIÓN</p>	AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE GRADO O TRABAJOS DE APLICACIÓN EN REPOSITORIO INSTITUCIONAL	CÓDIGO: AAC-BL-FR-031
		VERSIÓN: 1
		FECHA: 22/NOV/2024

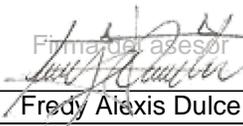
- b) Se autoriza a la Universidad CESMAG para publicar el Trabajo de Grado o de Aplicación en formato digital y teniendo en cuenta que uno de los medios de publicación del repositorio institucional es el internet, acepto(amos) que el Trabajo de Grado o de Aplicación circulará con un alcance mundial.
- c) Acepto (aceptamos) que la autorización que se otorga a través del presente documento se realiza a título gratuito, por lo tanto, renuncio(amos) a recibir emolumento alguno por la publicación, distribución, comunicación pública y/o cualquier otro uso que se haga en los términos de la presente autorización y de la licencia o programa a través del cual sea publicado el Trabajo de grado o de Aplicación.
- d) Manifiesto (manifestamos) que el Trabajo de Grado o de Aplicación es original realizado sin violar o usurpar derechos de autor de terceros y que ostento(amos) los derechos patrimoniales de autor sobre la misma. Por consiguiente, asumo(asumimos) toda la responsabilidad sobre su contenido ante la Universidad CESMAG y frente a terceros, manteniéndola indemne de cualquier reclamación que surja en virtud de la misma. En todo caso, la Universidad CESMAG se compromete a indicar siempre la autoría del escrito incluyendo nombre de(los) autor(es) y la fecha de publicación.
- e) Autorizo(autorizamos) a la Universidad CESMAG para incluir el Trabajo de Grado o de Aplicación en los índices y buscadores que se estimen necesarios para promover su difusión. Así mismo autorizo (autorizamos) a la Universidad CESMAG para que pueda convertir el documento a cualquier medio o formato para propósitos de preservación digital.

NOTA: En los eventos en los que el trabajo de grado o de aplicación haya sido trabajado con el apoyo o patrocinio de una agencia, organización o cualquier otra entidad diferente a la Universidad CESMAG. Como autor(es) garantizo(amos) que he(hemos) cumplido con los derechos y obligaciones asumidos con dicha entidad y como consecuencia de ello dejo(dejamos) constancia que la autorización que se concede a través del presente escrito no interfiere ni transgrede derechos de terceros.

Como consecuencia de lo anterior, autorizo(autorizamos) la publicación, difusión, consulta y uso del Trabajo de Grado o de Aplicación por parte de la Universidad CESMAG y sus usuarios así:

- Permiso(permitimos) que mi(nuestro) Trabajo de Grado o de Aplicación haga parte del catálogo de colección del repositorio digital de la Universidad CESMAG por lo tanto, su contenido será de acceso abierto donde podrá ser consultado, descargado y compartido con otras personas, siempre que se reconozca su autoría o reconocimiento con fines no comerciales.

En señal de conformidad, se suscribe este documento en San Juan de Pasto a los 22 días del mes de Noviembre del año 2024.

 Firma del autor	Firma del autor
Fanor Andrés Adarme Martínez	Nombre del autor:
Firma del autor	Firma del autor
Nombre del autor:	Nombre del autor:
 Firma del asesor Fredy Alexis Dulce	