

INSTITUTO SUPERIOR TECNOLÓGICO UNIVERSITARIO RUMIÑAHUI

ESCUELA DE POSGRADOS

MAESTRÍA TECNOLÓGICA SISTEMAS DE GENERACIÓN SOLAR Y EÓLICA

Trabajo de titulación previo a la obtención del Título de Magister Tecnológico en Sistemas de Generación Solar y Eólica.

Tema:

Estudio de un sistema fotovoltaico de 2 MW con convertidores Boost y controladores MPPT utilizando simulación en Simulink de MATLAB.

Autor: Yolanda Amparo Getial Freire

Directores: Luis Daniel Andagoya Alba

Wilson David Pavon Vallejos

Fecha: Septiembre de 2024.

Sangolquí - Ecuador



Autor: Yolanda Amparo Getial Freire.
Título a obtener: Magister Tecnológico en sistemas de Generación solar y eólica.
Matriz: Sangolquí -Ecuador.
Correo electrónico: yolanda.getial@ister.edu.ec



Dirigido por: Luis Daniel Andagoya Alba
Título: Máster en Integración de las Energías Renovables en el Sistema Eléctrico / Ingeniero Eléctrico.
Matriz: Sangolquí -Ecuador
Correo electrónico: luis.andagoya@ister.edu.ec



Dirigido por: Pavón Vallejos Wilson David
Título: PhD en Ingeniería.
Matriz: Sangolquí -Ecuador
Correo electrónico: wilson.pavon@ister.edu.ec

Todos los derechos reservados

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

@2024 Tecnológico Universitario Rumiñahui
Sangolquí – Ecuador
(GETIAL FREIRE YOLANDA AMPARO)

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO TITULACIÓN

Sangolquí, 15 de septiembre del 2024

MSc. Elizabeth Aldás
Directora de Posgrados
Instituto Superior Tecnológico Universitario Rumiñahui
Presente

De mi consideración:

Me permito comunicar que, en calidad de director del presente Trabajo de Titulación denominado: **ESTUDIO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO DE 2 MW CON CONVERTIDORES BOOST Y CONTROLADORES MPPT UTILIZANDO SIMULACIÓN EN SIMULINK DE MATLAB** realizado por **YOLANDA AMPARO GETIAL FREIRE** ha sido orientado y revisado durante su ejecución, así mismo ha sido verificado a través de la herramienta de similitud académica institucional, y cuenta con un porcentaje de coincidencia aceptable. En virtud de ello, y por considerar que el mismo cumple con todos los parámetros establecidos por la institución, doy mi aprobación a fin de continuar con el proceso académico correspondiente.

Particular que comunico para los fines pertinentes.

Atentamente,

LUIS DANIEL Firmado digitalmente
por LUIS DANIEL
ANDAGOYA ANDAGOYA ALBA
ALBA Fecha: 2024.09.15
21:15:58 -05'00'

Luis Daniel Andagoya-Alba
Director del Trabajo de Titulación
C.I.:1723285993
Correo electrónico: luis.andagoya@ister.edu.ec

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO TITULACIÓN

Sangolquí, 15 de septiembre del 2024

MSc. Elizabeth Aldás
Directora de Posgrados
Instituto Superior Tecnológico Universitario Rumiñahui
Presente

De mi consideración:

Me permito comunicar que, en calidad de director del presente Trabajo de Titulación denominado: **ESTUDIO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO DE 2 MW CON CONVERTIDORES BOOST Y CONTROLADORES MPPT UTILIZANDO SIMULACIÓN EN SIMULINK DE MATLAB** realizado por **YOLANDA AMPARO GETIAL FREIRE** ha sido orientado y revisado durante su ejecución, así mismo ha sido verificado a través de la herramienta de similitud académica institucional, y cuenta con un porcentaje de coincidencia aceptable. En virtud de ello, y por considerar que el mismo cumple con todos los parámetros establecidos por la institución, doy mi aprobación a fin de continuar con el proceso académico correspondiente.

Particular que comunico para los fines pertinentes.

Atentamente,



Firmado electrónicamente por:
**WILSON DAVID PAVON
VALLEJOS**

Wilson David Pavón Vallejos
Director del Trabajo de Titulación
C.I.:1719224311
Correo electrónico: wilson.pavon@ister.edu.ec

CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Sangolquí, 15 de septiembre del 2024

MSc. Elizabeth Aldás
Directora de Posgrados
Instituto Superior Tecnológico Universitario Rumiñahui
Presente

Por medio de la presente, yo, Yolanda Amparo Getial Freire, declaro y acepto en forma expresa lo siguiente: ser autor del trabajo de titulación denominado ESTUDIO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO DE 2 MW CON CONVERTIDORES BOOST Y CONTROLADORES MPPT UTILIZANDO SIMULACIÓN EN SIMULINK DE MATLAB, de la Maestría Tecnológica en **SISTEMAS DE GENERACIÓN SOLAR Y EÓLICA**; manifiesto mi voluntad de ceder al Instituto Superior Tecnológico Universitario Rumiñahui los derechos de reproducción, distribución y publicación de dicho trabajo de titulación, en cualquier formato y medio, con fines académicos y de investigación.

Esta cesión se otorga de manera no exclusiva y por un periodo indeterminado. Sin embargo, conservo los derechos morales sobre mi obra.

En fe de lo cual, firmo la presente.

Atentamente,



Yolanda Amparo Getial Freire

CI: 0803012855

**FORMULARIO PARA ENTREGA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN EN
BIBLIOTECA DEL INSTITUTO SUPERIOR TECNOLÓGICO UNIVERSITARIO
RUMIÑAHUI**

MAESTRÍA TECNOLÓGICA: SISTEMAS DE GENERACION SOLAR Y EOLICA

AUTOR:

Yolanda Amparo Getial Freire

TUTOR:

(Dos nombres y dos apellidos)

CONTACTO ESTUDIANTE:

0995214695

CORREO ELECTRÓNICO:

yolanda.getial@ister.edu.ec

TEMA: Estudio de un sistema fotovoltaico de 2 mw con convertidores boost y controladores mppt utilizando simulación en simulink de matlab

RESUMEN:

En el contexto de la creciente demanda de energías renovables y la búsqueda de soluciones más eficientes para la generación de electricidad, este estudio se centra en el diseño y simulación de un sistema fotovoltaico de gran escala (2 MW). El problema científico abordado radica en la optimización de la extracción de energía de los paneles solares, maximizando su eficiencia bajo diversas condiciones climáticas y de carga. Con este fin, se plantea como objetivo general desarrollar un modelo detallado en Simulink de MATLAB que incluya convertidores Boost y controladores MPPT (Seguimiento del Punto de Máxima Potencia). La metodología empleada combina la modelización de componentes fotovoltaicos, electrónicos de potencia y algoritmos de control, permitiendo simular el comportamiento dinámico del sistema en tiempo real. La justificación de esta investigación se encuentra en la necesidad de contar con herramientas de diseño y análisis precisas para la implementación de sistemas fotovoltaicos a gran escala, garantizando su rentabilidad y sostenibilidad. Los resultados obtenidos a través de la simulación permitieron evaluar el desempeño del sistema bajo diferentes escenarios, identificando las

condiciones óptimas de operación y validando la eficacia de los controladores MPPT empleados. Como conclusión fundamental, se demostró la viabilidad técnica de implementar un sistema fotovoltaico de 2 MW utilizando la configuración propuesta, destacando la importancia de la simulación como herramienta de diseño y optimización en este tipo de proyectos. Además, se identificaron áreas de mejora para futuros trabajos, como la consideración de factores ambientales más complejos y la integración de sistemas de almacenamiento de energía.

PALABRAS CLAVES: Inversor fotovoltaico, Modelado y simulación, Panel solar, Red eléctrica, Sistema fotovoltaico de gran escala.

ABSTRACT:

In the context of the growing demand for renewable energies and the search for more efficient solutions for electricity generation, this study focuses on the design and simulation of a large-scale photovoltaic system (2 MW). The scientific problem addressed lies in the optimization of energy extraction from solar panels, maximizing their efficiency under various climatic and load conditions. To this end, the general objective is to develop a detailed model in MATLAB Simulink that includes Boost converters and MPPT (Maximum Power Point Tracking) controllers. The methodology used combines the modeling of photovoltaic components, power electronics and control algorithms, allowing to simulate the dynamic behavior of the system in real time. The justification for this research lies in the need for accurate design and analysis tools for the implementation of large-scale photovoltaic systems, ensuring their profitability and sustainability. The results obtained through simulation allowed evaluating the performance of the system under different scenarios, identifying the optimal operating conditions and validating the effectiveness of the MPPT controllers used. As a fundamental conclusion, the technical feasibility of implementing a 2 MW photovoltaic system using the proposed configuration was demonstrated, highlighting the importance of simulation as a tool for the development of the system.

KEYWORDS: Photovoltaic inverter, Modeling and simulation, Solar panel, Power grid, Large-scale photovoltaic system.

SOLICITUD DE PUBLICACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

SOLICITUD DE PUBLICACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Sangolquí, 16 de septiembre del 2024

MSc. Elizabeth Aldás

Directora de Posgrados

Instituto Superior Tecnológico Universitario Rumiñahui

Presente:

A través del presente me permito aceptar la publicación del trabajo de titulación denominado: **Estudio de un Sistema Fotovoltaico de 2 MW con Convertidores Boost y Controladores MPPT utilizando Simulación en Simulink de MATLAB**, de la Unidad de Integración Curricular en el repositorio digital “DsPace” del estudiante: Yolanda Amparo Getial Freire, con documento de identificación No.0803012855, estudiante de la **Maestría Tecnológica en SISTEMAS DE GENERACION SOLAR Y EOLICA**.

El trabajo ha sido revisado las similitudes en el software “TURNITING” y cuenta con un porcentaje máximo de 15%; motivo por el cual, el Trabajo de titulación es publicable.

Atentamente,



Yolanda Amparo Getial Freire

CI: 0803012855

Dedicatoria:

En memoria de mis padres, por los principios y valores que me inculcaron, y por su amor incondicional. A mi hijo, Damian Irua, por su constante apoyo en cada paso de este camino. A mis maestros, por su sabiduría y guía, y a mis amigos, por su inquebrantable compañerismo, quienes me han motivado a alcanzar esta meta con determinación y perseverancia.

Agradecimiento:

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a todas las personas que han sido parte de este importante logro. A mis padres, cuya memoria vive en los valores y enseñanzas que me inculcaron, y a mi hijo, Damian Fernando Irua Getial, por ser mi motivación constante. Agradezco también a mis maestros, por su orientación invaluable y su dedicación para compartir su conocimiento. A mis amigos, quienes con su apoyo inquebrantable han estado a mi lado en cada paso de este camino. Este trabajo es el resultado de su confianza y aliento, por lo cual siempre estaré profundamente agradecida.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Aprobación del Director del Trabajo de Titulación.....	III
Carta de Cesión de Derechos del Trabajo de Titulación	V
Formulario para Entrega del Trabajo de Titulación en Biblioteca del Instituto Superior Tecnológico Universitario Rumiñahui	VI
Solicitud de Publicación del Trabajo de Titulación	VIII
Dedicatoria:	IX
Agradecimiento:	X
Índice de contenido.....	XI
INTRODUCCIÓN.....	XIV
Tema	XIV
Planteamiento del Problema	XIV
Problema Científico.....	XIV
Preguntas Científicas o Directrices	XIV
Objetivo General.....	XV
Objetivos Específicos	XV
Justificación	XV
Variables.....	XVI
Idea a Defender y/o Hipótesis	XVI
CAPÍTULO I.....	1
MARCO TEÓRICO	1
1.1 Contextualización espacio temporal del problema.....	1
1.2 Contextualización Espacial	1
1.4 Justificación del Estudio.....	3
1.5 Revisión de investigaciones previas sobre el objeto de estudio.....	3
1.6 Cuerpo teórico- conceptual.....	8
1.7 Energía Solar Fotovoltaica:	9
1.8 Inversores Fotovoltaicos:.....	9
1.9 Controladores MPPT:.....	10
1.10 Simulación en Simulink de MATLAB:.....	11
1.11 Estabilidad de Sistemas Fotovoltaicos:	11

CAPÍTULO II.....	13
MARCO METODOLÓGICO	13
2.1. Enfoque de Investigación.	13
2.2. Tipo de Estudio.....	13
2.3. Justificación del Enfoque.....	13
2.4. Etapas Metodológicas.....	14
2.5 Caso de estudio.....	14
2.6 Métodos.	15
CAPÍTULO III	17
PROPUESTA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO TÉCNICO.....	17
3.1. Fundamentos de la propuesta:	17
3.2. Diagrama esquemático general del sistema.....	17
3.3 Presentación de la propuesta.....	21
3.4. Descripción detallada de componentes.....	23
3.5 Ejecución de la propuesta.	25
3.6 Graficas 2. PV del arreglo de 500 KW.....	27
3.7 Potencia promedio de los arreglos fotovoltaicos.	31
3.8 Origen de los Datos.	32
3.9 Interpretación de la Curva de potencia promedio de los arreglos fotovoltaicos.	34
3.10 Análisis y resultados.....	37
3.11 Conclusiones.....	40
3.12 Recomendaciones:	42
REFERENCIAS:	43
ANEXOS:.....	46

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación Planta Fotovoltaica Gran Solar.	2
Figura 2: Inversor Multiplus II.....	10
Figura 3: Controlador MPPT.....	11
Figura 3: Diagrama esquemático general del sistema.	20
Figura 5: Granja fotovoltaica conectada a un sistema de distribución de 25 KV.	22
Figura 6: Grafico superior Curva de Corriente-Voltaje	27
Figura 7: Gráfica superior (Corriente vs Voltaje o I-V Curve).....	29
Figura 8: Gráfica Superior: Irradiación Expuesta al Sistema.....	31
Figura 9: Curva de potencia promedio de los arreglos fotovoltaicos.....	33
Figura 10: Forma de onda de voltaje alterno (CA) en la salida del inversor de 500KV	37

INTRODUCCIÓN

Tema

Estudio de un sistema fotovoltaico de 2 MW con convertidores boost y controladores MPPT utilizando simulación en Simulink de Matlab.

Planteamiento del Problema

La creciente demanda de energía eléctrica a nivel mundial, sumada a la preocupación por el cambio climático, ha impulsado el desarrollo de fuentes de energía renovable. La energía solar fotovoltaica se ha posicionado como una de las tecnologías más prometedoras en este sentido. Sin embargo, la variabilidad de la radiación solar y las características eléctricas de los paneles fotovoltaicos plantean desafíos en la extracción eficiente de energía. En este contexto, el presente estudio se enfoca en el diseño y optimización de un sistema fotovoltaico de gran escala (2 MW) utilizando herramientas de simulación computacional.

Problema Científico

¿Cómo diseñar y simular un sistema fotovoltaico de 2 MW que garantice una operación estable bajo condiciones variables de irradiación y temperatura, utilizando convertidores Boost y controladores MPPT implementados en Simulink de MATLAB?

Preguntas Científicas o Directrices

¿Cuál es la mejor configuración de los convertidores Boost y los controladores MPPT para el sistema solar propuesto?

¿Cómo afectan las condiciones climáticas variables (irradiación, temperatura) al desempeño del sistema y a la eficiencia de los controladores MPPT?

¿Cuál es la contribución de la simulación en Simulink de MATLAB para el diseño y análisis del sistema fotovoltaico?

Objetivo General

Diseñar y simular un sistema fotovoltaico de 2 MW en Simulink de MATLAB, que incluya convertidores boost controlados mediante MPPT, un convertidor de tres niveles y un transformador de acoplamiento, para mejorar la estabilidad de producción fotovoltaica.

Objetivos Específicos

- ✓ Modelar los componentes del sistema fotovoltaico (paneles solares, convertidores Boost, controladores MPPT) en Simulink de MATLAB.
- ✓ Simular el comportamiento dinámico del sistema bajo diferentes escenarios de irradiación y temperatura.
- ✓ Analizar la influencia de las características eléctricas de los paneles solares en el funcionamiento del sistema.
- ✓ Determinar la capacidad de seguimiento del punto de máxima potencia (MPP) del sistema bajo condiciones de irradiación variable.

Justificación

La energía solar fotovoltaica se posiciona como una alternativa cada vez más viable para satisfacer la creciente demanda energética mundial. Sin embargo, la eficiencia y estabilidad de los sistemas fotovoltaicos se ven afectadas por factores como la variabilidad de la irradiación solar y la temperatura. En este contexto, el presente estudio se justifica por la necesidad de desarrollar sistemas fotovoltaicos más robustos y eficientes. A través del diseño y simulación de un sistema fotovoltaico de 2 MW, empleando convertidores Boost y controladores MPPT en la plataforma Simulink de MATLAB, se busca optimizar la extracción de energía de los paneles solares, garantizando una producción eléctrica estable y maximizando el retorno de la inversión. La simulación permitirá evaluar el comportamiento del sistema ante diferentes condiciones operativas, identificar posibles puntos débiles y ajustar los parámetros de diseño para obtener un sistema fotovoltaico altamente confiable y adaptable a las condiciones ambientales cambiantes.

Variables.

Variables Dependientes:

Potencia de salida del sistema fotovoltaico.

Eficiencia del sistema.

Tiempo de respuesta del controlador MPPT.

Variables Independientes:

Irradiación solar.

Temperatura.

Carga conectada.

Parámetros de los convertidores Boost.

Algoritmos de control MPPT.

Idea a Defender y/o Hipótesis

Se plantea la hipótesis de que un sistema fotovoltaico de 2 MW, diseñado y simulado en Simulink de MATLAB, utilizando convertidores Boost y controladores MPPT adecuadamente dimensionados y configurados, puede alcanzar una alta eficiencia de conversión de energía y una operación estable bajo condiciones variables de irradiación y temperatura. Además, se espera que la simulación permita identificar la configuración óptima del sistema y predecir su comportamiento en condiciones reales de operación.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 Contextualización espacio temporal del problema.

La energía solar fotovoltaica, como tecnología de generación eléctrica, ha experimentado un crecimiento exponencial en las últimas décadas, impulsada por la creciente preocupación global por el cambio climático y la necesidad de diversificar las fuentes de energía. Este crecimiento se ha visto favorecido por la disminución de los costos de los paneles solares, así como por el desarrollo de políticas públicas que promueven el uso de energías renovables. En este contexto, el diseño y optimización de sistemas fotovoltaicos de gran escala, como el sistema de 2 MW propuesto en este estudio, se ha convertido en un área de investigación de gran relevancia. La capacidad de simular y analizar el comportamiento de estos sistemas mediante herramientas como MATLAB/Simulink ha permitido a los ingenieros y científicos desarrollar soluciones más eficientes y confiables. (Brañas, s. f.)

1.2 Contextualización Espacial

- **Ubicación geográfica:**
- **Latitud:** 0.0740°S
- **Longitud:** 78.1050° W
- La elección de la ubicación geográfica para un sistema fotovoltaico de 2 MW es crucial. Factores como la irradiación solar promedio, la temperatura ambiente, la disponibilidad de tierra y la infraestructura eléctrica deben considerarse cuidadosamente. Regiones con alta irradiación solar y baja nubosidad son ideales para maximizar la producción de energía, en este caso se toma como lugar de referencia la planta fotovoltaica Gran Solar.



Figura 1: Ubicación Planta Fotovoltaica Gran Solar.

Fuente: (Proyectos, s. f.)

1.2.1. Condiciones climáticas: Las condiciones climáticas, como la nubosidad, la lluvia y las tormentas de polvo, pueden afectar significativamente la producción de energía solar. Es necesario analizar los datos históricos de las condiciones climáticas de la región para evaluar la fiabilidad del sistema fotovoltaico.

Contextualización Temporal

1.3.1 Variabilidad de la radiación solar: La radiación solar varía a lo largo del día, las estaciones y los años. Esta variabilidad plantea desafíos para la integración de la energía solar en la red eléctrica, ya que la generación de energía no es constante. Se ha tomado como referencia la planta Gran Solar de Imbabura, situada en Ecuador, tiene una capacidad instalada de 20 MW. La irradiación solar promedio en la región es de 5.5 kWh/m²/día. Con un factor de capacidad estimado del 20%, ofrece un entorno ideal para realizar pruebas de rendimiento y eficiencia de sistemas fotovoltaicos. La planta es representativa para estudios sobre la optimización de generación solar en condiciones específicas de radiación y clima.

1.3.2. Perfiles de carga: Los perfiles de carga eléctrica varían según la hora del día, el día de la semana y la estación del año. Es importante diseñar el sistema fotovoltaico para que su producción de energía se adapte a los perfiles de carga de los consumidores.

1.3.3. Políticas energéticas: Las políticas energéticas gubernamentales pueden influir en la viabilidad económica y técnica de los sistemas fotovoltaicos. Los incentivos fiscales, los programas de compra de energía y las regulaciones de conexión a la red son factores clave a considerar.

1.4 Justificación del Estudio.

La creciente demanda global por fuentes de energía limpia y renovable ha impulsado el desarrollo de tecnologías fotovoltaicas. Sin embargo, la producción de energía solar fotovoltaica se ve afectada por la variabilidad de la radiación solar y las condiciones climáticas. En este contexto, el presente estudio se enfoca en el diseño y simulación de un sistema fotovoltaico de 2 MW con el objetivo de optimizar su rendimiento y estabilizar su producción.

La utilización de convertidores boost y controladores MPPT en este tipo de sistemas resulta crucial para maximizar la extracción de potencia de los paneles solares. Los convertidores boost permiten elevar el voltaje de salida del sistema, adaptándolo a las características de la red eléctrica, mientras que los controladores MPPT garantizan que el sistema opere en su punto de máxima potencia en todo momento. La simulación en MATLAB/Simulink ofrece una herramienta poderosa para modelar y analizar el comportamiento dinámico de sistemas fotovoltaicos. Al simular el sistema propuesto, se pueden evaluar diferentes configuraciones y estrategias de control, identificando aquellas que ofrecen un mejor desempeño en términos de eficiencia y estabilidad.

Los resultados obtenidos en esta investigación permitirán validar el diseño del sistema fotovoltaico y proporcionar recomendaciones para su implementación a gran escala. Además, los conocimientos adquiridos contribuirán al avance del estado del arte en el campo de las energías renovables, fomentando el desarrollo de tecnologías más eficientes y sostenibles.

1.5 Revisión de investigaciones previas sobre el objeto de estudio.

Los convertidores Boost son dispositivos electrónicos que elevan el voltaje de una fuente de energía, permitiendo que la energía generada por los paneles solares se utilice de manera más eficiente. El estudio (Jiménez et al., s. f.) plantea que en sistemas fotovoltaicos, la función principal de los convertidores Boost es maximizar la producción de energía al aumentar el voltaje de salida, lo que es crucial para la conexión a la red eléctrica o para alimentar cargas específicas

que requieren un voltaje superior al de los paneles solares. La importancia de los convertidores Boost en un sistema fotovoltaico radica en su capacidad para optimizar el rendimiento del sistema fotovoltaico, especialmente en condiciones de baja irradiación o cuando los paneles operan a voltajes más bajos. Al elevar el voltaje, se mejora la transferencia de energía y se minimizan las pérdidas en el sistema, lo que resulta en una mayor eficiencia general. Además (García & Isaac, 2014) estos convertidores permiten la implementación de técnicas de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), que ajustan continuamente el funcionamiento del sistema para extraer la máxima energía disponible. Los convertidores Boost, diseñados para elevar una tensión continua a un valor superior, han experimentado una notable evolución en su funcionamiento. Antes, su implementación era más sencilla pero menos eficiente. Utilizaban componentes discretos y su control era más básico. La regulación de la tensión de salida se lograba principalmente mediante el ajuste del ciclo de trabajo de un interruptor, pero la precisión y la respuesta dinámica eran limitadas. Actualmente, gracias a los avances en la electrónica de potencia (Fong et al., 2017) los convertidores Boost son mucho más sofisticados. Emplean dispositivos semiconductores de potencia de alta frecuencia y bajo consumo, como MOSFETs y diodos Schottky. Además, la incorporación de microcontroladores y DSPs ha permitido implementar algoritmos de control más avanzados, como PWM digital y técnicas de modulación basadas en modelos. Esto ha resultado en convertidores Boost con mayor eficiencia, menor tamaño, y una mejor respuesta a las variaciones de la carga y la fuente de alimentación. Asimismo, la integración de sensores y la comunicación digital han facilitado la monitorización y el control remoto de estos dispositivos, mejorando su fiabilidad y mantenimiento. Los convertidores Boost son esenciales en la simulación de paneles fotovoltaicos, ya que permiten elevar el voltaje de salida de los paneles, optimizando la conversión de energía solar en eléctrica. Su capacidad para incrementar el voltaje es crucial en aplicaciones donde se requiere un nivel de tensión superior al proporcionado por los paneles, facilitando la integración en sistemas eléctricos y mejorando la eficiencia general. Además, al simular variaciones en la irradiancia solar, los convertidores Boost ayudan a modelar el comportamiento dinámico de los paneles, permitiendo un análisis más preciso de su rendimiento en condiciones cambiantes. Esto es fundamental para (Ramírez & Ortiz, s. f.) el diseño y la implementación de sistemas fotovoltaicos eficientes, contribuyendo al desarrollo de tecnologías sostenibles y a la reducción de costos en la generación de energía renovable. Los convertidores Boost son una herramienta clave en la optimización y

simulación de sistemas fotovoltaicos. Es un circuito electrónico que eleva el voltaje de una fuente de alimentación de corriente continua (DC). Funciona almacenando energía en un inductor durante un período de tiempo y luego liberándola rápidamente a un condensador, lo que aumenta el voltaje de salida. Los componentes principales de un convertidor Boost son un inductor, un diodo, un interruptor (transistor MOSFET IGBT) y un condensador de salida. El interruptor se conmuta a alta frecuencia para controlar el flujo de energía entre el inductor y el condensador. La relación entre el voltaje de entrada y salida depende del ciclo de trabajo del interruptor. Este tipo de convertidor es ampliamente utilizado en aplicaciones como sistemas fotovoltaicos, alimentación de cargas inductivas y circuitos de control de motores, debido a su simplicidad y eficiencia. El convertidor Boost con celda de clavijas es una variante del convertidor Boost básico (Novoa, s. f.) diseñado para mejorar su rendimiento y confiabilidad. A diferencia del convertidor básico, este incorpora una celda de clavijas, que es un conjunto de diodos conectados en serie. Esta celda distribuye la tensión a través de múltiples diodos, reduciendo la tensión que soporta cada uno individualmente. Esto aumenta la vida útil del diodo principal y disminuye las pérdidas por conmutación. Además, la celda de clavijas ayuda a mejorar la estabilidad del convertidor y a reducir el ruido electromagnético. El convertidor Boost con celda de clavijas es una opción popular en aplicaciones donde se requiere una mayor confiabilidad y eficiencia, como en sistemas de alimentación de alta potencia y sistemas fotovoltaicos de gran escala. El convertidor Boost síncrono (Amich & Cerrada, s. f.) representa una evolución significativa en la tecnología de conversión de potencia. A diferencia de los convertidores Boost tradicionales, que utilizan un diodo como elemento de conducción pasivo, el convertidor síncrono reemplaza este diodo por un segundo transistor conmutado. Esta modificación permite un control más preciso sobre el flujo de corriente y reduce significativamente las pérdidas por conducción, mejorando así la eficiencia del convertidor. Además, el convertidor síncrono ofrece un mayor rango de operación y una respuesta dinámica más rápida. Sin embargo, su implementación requiere un control más complejo y un diseño más cuidadoso debido a la presencia de dos transistores conmutados. En resumen, el convertidor Boost síncrono es una excelente opción para aplicaciones que demandan alta eficiencia, alta densidad de potencia y un rápido tiempo de respuesta. El convertidor Boost de multi-niveles (Namoune et al., s. f.) representa un avance significativo en la tecnología de conversión de potencia, especialmente en aplicaciones de alta potencia como los sistemas fotovoltaicos. A diferencia de los convertidores convencionales, que utilizan un solo nivel de

conmutación, los convertidores de multi-niveles dividen el voltaje de salida en múltiples niveles, lo que reduce las tensiones de conmutación en los dispositivos de potencia y disminuye las pérdidas por conmutación. Esta característica permite manejar mayores potencias y mejorar la eficiencia del sistema. Además, los convertidores de multi-niveles ofrecen una mejor calidad de onda de salida y una mayor capacidad de adaptación a las variaciones de la carga. En el contexto de los sistemas fotovoltaicos, estos convertidores permiten una integración más eficiente de las energías renovables a la red eléctrica, contribuyendo a un futuro más sostenible. Los sistemas fotovoltaicos (Marcano, 2023) capaces de transformar la energía solar en electricidad, han experimentado un crecimiento exponencial gracias a su potencial para mitigar el cambio climático y reducir la dependencia de los combustibles fósiles. Un componente fundamental en estos sistemas son los conversores Boost. Estos dispositivos electrónicos de potencia tienen la función de elevar el voltaje de salida de los paneles solares, que suele ser bajo y variable, a un nivel adecuado para alimentar cargas o conectarse a la red eléctrica. El convertidor Boost actúa como un "amplificador" de voltaje, permitiendo una mayor flexibilidad en el diseño y aplicación de los sistemas fotovoltaicos. Por otro lado (Hassaine, s. f.) los controladores MPPT (Máximo Power Point Tracking) son algoritmos de control que tienen como objetivo maximizar la extracción de energía de los paneles solares. Estos controladores ajustan continuamente el punto de operación del panel para garantizar que se extraiga la máxima potencia disponible en cada instante, independientemente de las condiciones climáticas o de la carga conectada. La combinación de convertidores Boost y controladores MPPT en los sistemas fotovoltaicos ofrece numerosas ventajas, entre las que destacan: Mayor eficiencia, al operar siempre en el punto de máxima potencia, se optimiza la utilización de la energía solar incidente. El convertidor Boost permite ajustar el voltaje de salida a las necesidades de la carga, mejorando la compatibilidad con diversos equipos. Los controladores MPPT contribuyen a estabilizar el funcionamiento del sistema, minimizando las fluctuaciones de voltaje y corriente. Mayor vida útil de los componentes: Al operar en condiciones óptimas, se prolonga la vida útil de los paneles solares y otros componentes del sistema. Los sistemas fotovoltaicos (Isaza, s. f.) con convertidores Boost y controladores MPPT representan una solución tecnológica avanzada y eficiente para la generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables. Su creciente adopción a nivel mundial demuestra su importancia en la transición hacia un futuro energético más sostenible. Los convertidores Boost y los controladores MPPT son componentes fundamentales en los sistemas

fotovoltaicos modernos. Mediante los convertidores Boost (*Melzar Ismael de León Moro.pdf*, s. f.) que permiten elevar el voltaje de salida de los paneles solares para adaptarlo a las necesidades de la carga, mientras que los controladores MPPT maximizan la extracción de energía de los paneles solares al operar en el punto de máxima potencia. El estudio propuesto se enmarca en un contexto global de transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles. La creciente demanda de energía eléctrica, junto con los avances tecnológicos en el campo de la fotovoltaica, han generado la necesidad de desarrollar sistemas fotovoltaicos de mayor capacidad y eficiencia. La utilización de herramientas de simulación como MATLAB/Simulink permite abordar este desafío de manera rigurosa y sistemática. Los inversores fotovoltaicos son el corazón de cualquier sistema solar. Existen diversos tipos, cada uno con características y aplicaciones específicas. Los inversores de cadena son los más comunes y conectan múltiples paneles en serie. Los inversores micro inversores procesan la energía de cada panel individualmente, ofreciendo mayor flexibilidad y monitoreo. También los inversores híbridos (Farhat et al., 2015) combinan la energía solar con otras fuentes, como la red eléctrica o baterías, permitiendo una gestión más eficiente de la energía. En cuanto a aplicaciones avanzadas, los inversores están siendo integrados en sistemas de almacenamiento de energía, vehículos eléctricos y redes inteligentes, permitiendo una mayor independencia energética y una gestión más sostenible de la electricidad. Además, los algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) se han sofisticado, permitiendo una extracción de energía aún más eficiente de los paneles solares. El estudio y diseño de convertidores Boost en sistemas fotovoltaicos es fundamental para optimizar la generación de energía solar. Estos dispositivos electrónicos son esenciales para elevar el voltaje de salida de los paneles solares, adaptándolo a las necesidades de las cargas y estabilizando la producción eléctrica. Los ingenieros investigan diferentes topologías de convertidores Boost, analizando su eficiencia, rendimiento dinámico y capacidad para operar en condiciones variables de irradiación. Además, se desarrollan estrategias de control avanzadas, como algoritmos MPPT, para maximizar la extracción de energía de los paneles solares y garantizar una operación estable del sistema. El objetivo final es diseñar convertidores Boost (Mikati et al., 2012) que sean confiables, eficientes y capaces de mejorar la calidad de la energía generada, contribuyendo así a una mayor penetración de las energías renovables. Los inversores Boost son componentes esenciales en los sistemas fotovoltaicos modernos, ya que permiten optimizar la producción de energía solar y adaptarla a las necesidades específicas de cada aplicación. Su capacidad para elevar el voltaje y

seguir el punto de máxima potencia los convierte en una herramienta invaluable para maximizar el rendimiento de las instalaciones solares.

1.6 Cuerpo teórico- conceptual.

La energía solar fotovoltaica se ha posicionado como una alternativa viable y sostenible para la generación eléctrica a nivel mundial. Sin embargo, la variabilidad de la radiación solar y las características de los paneles fotovoltaicos demandan soluciones tecnológicas que optimicen la extracción de energía y estabilicen la producción. En este contexto, el presente estudio se enfoca en el diseño y simulación de un sistema fotovoltaico de gran escala (2 MW) empleando convertidores Boost y controladores MPPT.(Object, s. f.)

La crisis energética global y la creciente preocupación por el cambio climático han impulsado la búsqueda de fuentes de energía limpia y renovable. La energía solar fotovoltaica, debido a su abundancia y potencial para generar electricidad de manera directa, se ha posicionado como una de las tecnologías más prometedoras. A nivel mundial, se observa un crecimiento exponencial en la instalación de sistemas fotovoltaicos a gran escala, impulsado por políticas gubernamentales favorables, avances tecnológicos y la reducción de costos. Latinoamérica, con su alta irradiación solar y una creciente demanda energética, presenta un gran potencial para el desarrollo de la energía solar fotovoltaica. Países como Chile, México y Brasil han implementado políticas energéticas ambiciosas que promueven la generación distribuida y la instalación de grandes plantas solares. Sin embargo, aún existen desafíos relacionados con la integración de estas plantas a las redes eléctricas existentes y la necesidad de desarrollar capacidades locales en diseño, instalación y operación de sistemas fotovoltaicos.(Güiza-Suárez et al., 2019)

A Nivel Nacional (Ecuador)

En Ecuador, el gobierno ha establecido metas ambiciosas para aumentar la participación de las energías renovables en la matriz energética nacional. La energía solar fotovoltaica se ha identificado como una de las tecnologías clave para lograr estos objetivos. Sin embargo, el desarrollo de grandes plantas solares en el país se encuentra en una etapa inicial, y existen desafíos relacionados con la disponibilidad de financiamiento, la regulación del sector eléctrico y la falta de mano de obra calificada.(Poveda, s. f.)

1.7 Energía Solar Fotovoltaica:

La energía solar fotovoltaica es la conversión directa de la luz solar en electricidad a través del efecto fotovoltaico. Este fenómeno ocurre en materiales semiconductores, como el silicio, que al ser expuestos a la luz generan una corriente eléctrica. Los paneles solares, compuestos por múltiples células fotovoltaicas, capturan esta energía y la convierten en corriente continua. Existen diferentes tipos de células solares, como las monocristalinas (alta eficiencia, costo elevado), policristalinas (menor eficiencia, menor costo) y amorfas (flexibles, baja eficiencia). Sin embargo, la energía solar fotovoltaica enfrenta desafíos como la variabilidad de la radiación solar, que afecta la producción de energía, y las limitaciones en la eficiencia de los paneles. Además, la temperatura influye en el rendimiento de las células solares. A pesar de estos retos, la energía solar fotovoltaica es una fuente de energía limpia y renovable con un gran potencial para el futuro.(Puig & Jofra, s. f.)

1.8 Inversores Fotovoltaicos:

Los inversores fotovoltaicos son dispositivos electrónicos esenciales que transforman la corriente continua (CC) generada por los paneles solares en corriente alterna (CA), la misma que utilizamos en nuestros hogares y oficinas. Esta conversión es necesaria para conectar los sistemas fotovoltaicos a la red eléctrica o alimentar cargas CA directamente. Existen diferentes tipos de inversores: los inversores de cadena, que conectan varios paneles en serie y paralelo, son los más comunes y ofrecen un buen equilibrio entre costo y rendimiento; los micro inversores, que convierten la energía de cada panel individualmente, ofrecen mayor flexibilidad y monitoreo; y los inversores híbridos, que combinan las funciones de un inversor y un cargador de baterías, permitiendo almacenar la energía solar para su uso posterior. Los inversores Boost, una tipología específica, son capaces de aumentar el voltaje de salida, lo que resulta muy útil en sistemas con baterías o para alimentar cargas que requieren voltajes más altos. Esta característica, junto con su capacidad de adaptarse a diferentes condiciones de operación, los convierte en una opción popular en sistemas fotovoltaicos.(Mier Quiroga & Enríquez, 2010)



Figura 2: Inversor Multiplus II.
Fuente: Propia.

1.9 Controladores MPPT:

Los controladores MPPT (Maximum Power Point Tracking) son dispositivos electrónicos diseñados para maximizar la energía eléctrica que se obtiene de un panel solar. La potencia que genera un panel solar varía según la intensidad de la luz solar y la temperatura, y existe un punto de máxima potencia (MPP) en el que se obtiene la mayor cantidad de energía. Los algoritmos MPPT, como el de perturbación y observación o el de conductancia incremental, ajustan continuamente el punto de operación del panel para mantenerlo cerca del MPP. Estos algoritmos se diferencian en su complejidad y velocidad de respuesta. El algoritmo de perturbación y observación es simple, pero puede presentar oscilaciones; el de conductancia incremental, en cambio, es más preciso, pero requiere cálculos más complejos. La elección del algoritmo MPPT dependerá de la aplicación específica y de las características del sistema fotovoltaico. En general, el objetivo es encontrar un equilibrio entre la eficiencia, la velocidad de convergencia y la robustez del algoritmo para garantizar un máximo aprovechamiento de la energía solar. (Bustos-Márquez et al., 2023)



*Figura 3: Controlador MPPT.
Fuente: Propia.*

1.10 Simulación en Simulink de MATLAB:

Simulink es una poderosa herramienta de simulación que permite modelar y analizar sistemas dinámicos de forma gráfica. Es ampliamente utilizada en ingeniería para diseñar, simular y analizar sistemas de control, como los sistemas fotovoltaicos. En Simulink, es posible crear modelos detallados de componentes fotovoltaicos como paneles solares, inversores, controladores MPPT y cargas, utilizando bloques predefinidos y personalizables. Estos modelos permiten simular el comportamiento del sistema en diferentes condiciones y evaluar su desempeño antes de implementarlo físicamente. Sin embargo, es fundamental validar estos modelos con datos experimentales reales para garantizar su precisión y confiabilidad. La validación implica comparar los resultados de la simulación con los datos obtenidos de un sistema fotovoltaico real, lo que permite identificar posibles discrepancias y ajustar los modelos si es necesario. (Vera-Dávila et al., 2018)

1.11 Estabilidad de Sistemas Fotovoltaicos:

La estabilidad de un sistema fotovoltaico es su capacidad de mantener un funcionamiento seguro y eficiente ante variaciones en las condiciones de operación. Factores internos como la temperatura de los paneles y la carga conectada, así como factores externos como la irradiación solar y las variaciones en la red eléctrica, pueden afectar la estabilidad del sistema. Una inestabilidad puede provocar oscilaciones de voltaje y frecuencia, lo que puede dañar los equipos

y afectar la calidad de la energía suministrada. Los inversores y los controladores MPPT desempeñan un papel crucial en la estabilidad del sistema. Los inversores, al convertir la corriente continua en corriente alterna, actúan como amortiguadores ante las perturbaciones. Los controladores MPPT, al ajustar continuamente el punto de operación del panel solar, ayudan a mantener un flujo de potencia estable. En resumen, la estabilidad es esencial para garantizar la vida útil y el rendimiento óptimo de un sistema fotovoltaico, y los inversores y controladores MPPT son herramientas fundamentales para lograrla.(Bueno & Full Professor, 2021)

CAPÍTULO II

MARCO METODOLÓGICO

2.1. Enfoque de Investigación.

El estudio propuesto para el diseño y simulación de un sistema fotovoltaico de 2 MW presenta un enfoque predominantemente **cuantitativo**. Esta elección se justifica por la naturaleza de los datos a recolectar y analizar, los cuales serán principalmente numéricos y medibles. Al utilizar herramientas de simulación como MATLAB/Simulink, se obtendrán resultados cuantitativos sobre el rendimiento del sistema, como la eficiencia de conversión, la potencia de salida y la estabilidad del sistema.

2.2. Tipo de Estudio.

En cuanto al tipo de estudio, se puede clasificar como **descriptivo y de simulación**. El objetivo principal es describir el comportamiento del sistema fotovoltaico bajo diferentes condiciones de operación y diseñar un sistema óptimo. La simulación en MATLAB/Simulink permite crear un modelo virtual del sistema y realizar experimentos controlados para evaluar su desempeño. Aunque no se trata de un estudio de campo en el sentido estricto, ya que los datos se obtendrán a través de simulaciones, se puede considerar como un estudio de simulación que busca predecir el comportamiento de un sistema real.

2.3. Justificación del Enfoque.

2.3.1. Cuantitativo: El enfoque cuantitativo es el más adecuado para analizar variables numéricas como la irradiación solar, la temperatura, la tensión y la corriente. Al utilizar modelos matemáticos y simulaciones, se pueden obtener resultados precisos y confiables sobre el rendimiento del sistema.

2.3.2. Descriptivo: El estudio busca describir el comportamiento del sistema fotovoltaico bajo diferentes condiciones de operación. A través de la simulación, se pueden obtener datos detallados sobre la potencia de salida, la eficiencia y la estabilidad del sistema.

2.3.3. Simulación: La simulación en MATLAB/Simulink permite evaluar el desempeño del sistema fotovoltaico antes de su construcción, lo que reduce los costos y riesgos asociados a la

implementación de un sistema real. Además, permite realizar un gran número de experimentos en un tiempo relativamente corto.

2.4. Etapas Metodológicas.

2.4.1 Revisión bibliográfica: Se realizará una revisión exhaustiva de la literatura científica para identificar los modelos matemáticos más adecuados para representar los componentes del sistema fotovoltaico, así como las técnicas de control más eficientes para los convertidores Boost y los controladores MPPT.

2.4.2 Modelado del sistema: Se desarrollará un modelo detallado del sistema fotovoltaico en MATLAB/Simulink, incluyendo los paneles solares, los convertidores Boost, los controladores MPPT y la red eléctrica.

2.4.3 Simulación y análisis: Se realizarán diversas simulaciones para evaluar el desempeño del sistema bajo diferentes condiciones de operación, como variaciones en la irradiación solar y la temperatura. Se analizarán los resultados obtenidos para identificar los puntos fuertes y débiles del sistema.

2.4.4 Ajustes del sistema: Se utilizarán técnicas de ajuste para modificar los parámetros del sistema y mejorar su rendimiento.

2.4.5 Validación: Si es posible, se compararán los resultados de la simulación con datos experimentales obtenidos de un sistema fotovoltaico real para validar el modelo.

2.5 Caso de estudio.

El proyecto se desarrollará en un contexto global marcado, sin embargo, para motivos de este estudio se tomará la ubicación Gran Solar que está ubicada en la Provincia de Imbabura específicamente a 5km de la vía Salinas Urcuqui, tiene una capacidad instalada de 2 MW. La irradiación solar promedio en la región es de 5.5 kWh/m²/día. Por la transición hacia fuentes de energía renovables y sostenibles, con el objetivo de reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar el impacto del cambio climático. Los sistemas fotovoltaicos juegan un papel

clave en este proceso, ya que ofrecen una alternativa limpia para la generación de electricidad, especialmente en regiones con altos niveles de irradiancia solar.

A nivel nacional, el marco regulatorio está impulsando la adopción de energías renovables, y cada vez más, gobiernos y organizaciones están incentivando la instalación de sistemas solares a gran escala. Los proyectos fotovoltaicos están en expansión, tanto para uso residencial como industrial, integrando avances tecnológicos que buscan maximizar su eficiencia y minimizar su impacto ambiental. (Velasco & Cabrera, s. f.)

El entorno técnico también está evolucionando rápidamente, con mejoras en la eficiencia de los paneles fotovoltaicos, la implementación de algoritmos sofisticados para el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) y el diseño de convertidores más robustos para la conversión DC-AC. Esto permite que las plantas solares operen con mayor estabilidad y se integren a la red de forma más eficaz. Sin embargo, la variabilidad inherente de la energía solar presenta retos significativos en cuanto a la estabilidad de los sistemas fotovoltaicos. El diseño y control eficientes de los convertidores de potencia, tanto boost como de tres niveles, son esenciales para mantener una transferencia energética continua, maximizar la eficiencia y regular el flujo de potencia hacia la red. Además, la integración de estos sistemas en redes eléctricas existentes requiere una cuidadosa planificación para asegurar que no se generen problemas de estabilidad o sobrecargas.

En este proyecto, se aprovecharán las ventajas de la simulación en Simulink de MATLAB para diseñar un sistema fotovoltaico de 2 MW con convertidores boost, controladores MPPT y un convertidor de tres niveles. La simulación permitirá abordar los desafíos en un entorno controlado antes de implementar las soluciones en aplicaciones reales, proporcionando una plataforma sólida para mejorar la eficiencia energética y la estabilidad de sistemas fotovoltaicos integrados en la red. (fotovoltaico-libre.pdf, s. f.)

2.6 Métodos.

Para llevar a cabo el proyecto, se utilizará Simulink de MATLAB como la plataforma de simulación principal. Esto permitirá modelar con precisión cada componente del sistema fotovoltaico y evaluar su funcionamiento en diversas condiciones. A continuación, se detallan los materiales y métodos necesarios:

2.6.1. Investigación Bibliográfica:

Se recopilarán artículos científicos, libros y manuales técnicos para definir los estándares de diseño y control de sistemas fotovoltaicos. Esta información se sintetizará para orientar el modelado de los componentes en Simulink.

2.6.2. Modelado de Componentes:

Arreglos Fotovoltaicos: Se simularán dos arreglos con capacidades de 1.5 MW y 500 kW respectivamente, ajustando sus características a condiciones estándar de irradiancia y temperatura. Los modelos se basarán en datos reales de módulos solares disponibles comercialmente.

Convertidores Boost: Se modelarán convertidores DC-DC elevadores para cada arreglo, asegurando que alcancen el nivel de 1000 V DC. Se incluirán componentes como inductores y capacitores para representar correctamente la dinámica del convertidor.

Convertidor de Tres Niveles: Se implementará un modelo que convierta el voltaje de 1000 V DC a 500 V AC, empleando una topología NPC (Neutral Point Clamped) de tres niveles.

2.6.3. Desarrollo del Sistema de Control:

Controladores MPPT: Se aplicará el método Perturbar y Observar (P&O) para maximizar la potencia generada por los arreglos fotovoltaicos. Se establecerán algoritmos para variar el voltaje de salida de los convertidores boost y encontrar el punto de máxima potencia.

Controlador del Convertidor de Tres Niveles: Se diseñará un sistema de regulación de voltaje para mantener el bus DC a 1000 V, incluyendo un controlador de potencia reactiva.

2.6.4. Simulación y Verificación:

Se simulará el sistema completo bajo diferentes condiciones de irradiancia, temperatura y carga. Se monitorearán parámetros como el rendimiento de los MPPT, la eficiencia de los convertidores y la estabilidad de la potencia generada.

Los resultados se analizarán para validar la metodología y realizar ajustes finales al modelo.

CAPÍTULO III

PROPUESTA DEL DESARROLLO DEL PROYECTO TÉCNICO

3.1. Fundamentos de la propuesta:

El parque fotovoltaico consta de dos matrices fotovoltaicas: La matriz FV 1 y la matriz FV 2 pueden producir 1,5 MW y 500 kW respectivamente con una irradiancia solar de 1000 W/m² y una temperatura de célula de 25 grados C. Cada matriz FV está conectada a un convertidor elevador. Cada uno de ellos está controlado individualmente por un sistema de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT). Los MPPT utilizan la técnica Perturb and Observe (Perturbar y observar) para variar la tensión en los terminales del campo fotovoltaico con el fin de extraer la máxima potencia posible. Las salidas de los convertidores elevadores se conectan a un bus de CC común de 1000 V. Un convertidor NPC de tres niveles convierte los 1000 V de CC en unos 500 V de CA. El convertidor NPC está controlado por un regulador de tensión de CC cuya misión es mantener la tensión de enlace de CC en 1000 V sea cual sea la cantidad de potencia activa suministrada por los paneles fotovoltaicos. Además, el regulador de potencia reactiva permite al convertidor generar o absorber hasta 1 Mvar. Para conectar el convertidor a la red se utiliza un transformador trifásico de acoplamiento de 2,25 MVA 500V/25kV. El modelo de red consta de alimentadores de distribución típicos de 25 kV y un sistema de transmisión equivalente de 120 kV.

3.2. Diagrama esquemático general del sistema

El esquema presentado del parque fotovoltaico de 2 MW detalla una configuración para la generación y distribución de energía solar en un entorno de red. Este sistema utiliza dos matrices fotovoltaicas con capacidades distintas, convertidores elevadores controlados por MPPT, un convertidor NPC de tres niveles, y un transformador de acoplamiento para la integración en la red eléctrica de media tensión. A continuación, se proporciona una descripción detallada de cada componente en el diagrama esquemático que involucra dos matrices fotovoltaicas, un sistema de conversión de potencia y su integración a la red eléctrica. Este análisis abarca desde la generación de energía solar hasta su conexión a la red, enfocándose en la función y características de cada elemento.

3.2.1. Matriz Fotovoltaica de 500 kW.

La primera matriz fotovoltaica con capacidad de **500 kW** de potencia bajo condiciones estándar de irradiancia de **1000 W/m²** y una temperatura de célula de **25°C**. Esta matriz está compuesta por módulos fotovoltaicos que convierten la energía solar directamente en electricidad en corriente continua (CC). Al tener una capacidad más baja que la segunda matriz (de 1500 kW), esta matriz está diseñada para satisfacer demandas energéticas de mediana escala, o bien, para complementar la producción de otros sistemas de mayor capacidad. La salida de esta matriz fotovoltaica en CC es dirigida hacia un convertidor elevador, el cual permite acondicionar la tensión a niveles adecuados para ser inyectada al bus de CC común.

3.2.2 Matriz Fotovoltaica de 1500 kW

La segunda matriz fotovoltaica tiene una capacidad mayor, pudiendo generar **1500 kW** de potencia en las mismas condiciones estándar. Este sistema de mayor tamaño está diseñado para ser la fuente primaria de generación dentro del esquema, y al igual que la matriz de 500 kW, convierte la energía solar en corriente continua. La diferencia principal radica en la cantidad de potencia generada, ya que esta matriz está destinada a cubrir una demanda energética mucho mayor. El control y la integración de esta matriz requieren de un convertidor de mayor capacidad para elevar la tensión a los niveles requeridos en el bus de CC.

3.2.3 Convertidores DC-DC para Cada Arreglo Fotovoltaico

Cada matriz fotovoltaica está conectada a un **convertidor elevador DC-DC** que tiene la función de adaptar la tensión generada por los paneles fotovoltaicos a los **1000 V de CC** necesarios para el bus común. Además de elevar la tensión, estos convertidores permiten el control de la potencia extraída de las matrices fotovoltaicas mediante un sistema de seguimiento del punto de máxima potencia (**MPPT**). Este sistema garantiza que, a pesar de las variaciones en irradiancia o temperatura, los paneles fotovoltaicos siempre operen en su punto óptimo para extraer la máxima cantidad de energía.

3.2.4 Bus de CC a 1000 V

El **bus de CC a 1000 V** es el punto de unión de ambas matrices fotovoltaicas. En este bus se colecta la potencia generada en corriente continua y se prepara para ser convertida en corriente alterna (CA). La función del bus es actuar como un enlace común entre los arreglos fotovoltaicos y el inversor, asegurando que la tensión en todo momento se mantenga en **1000 V**. Esto es fundamental para garantizar la correcta operación del sistema y su posterior integración a la red.

3.2.5 Inversor

El **inversor** es uno de los componentes clave del sistema, ya que se encarga de convertir la energía en **corriente continua (CC)** del bus de 1000 V en **corriente alterna (CA)** a **500 V**. Este inversor, posiblemente de tipo **NPC (Neutral Point Clamped)** de tres niveles, está diseñado para maximizar la eficiencia de la conversión y minimizar las pérdidas de energía durante el proceso. Además, el inversor también puede tener funciones adicionales como el control de la potencia reactiva, permitiendo generar o absorber **1 MVAR** para mejorar la estabilidad de la red y el factor de potencia.

3.2.6 Bus de CA a 500 V

Después de la conversión de CC a CA, la energía pasa por el **bus de CA a 500 V**, que actúa como un nodo de interconexión antes de que la energía sea llevada al transformador para su adecuación a niveles de alta tensión. Este bus asegura que la energía generada en corriente alterna esté disponible en el punto adecuado de la topología del sistema para su siguiente etapa de elevación de tensión. Es aquí donde el inversor descarga la potencia convertida para su transmisión posterior.

3.2.7 Transformador de 2,25 MVA

El siguiente componente en la cadena es el **transformador de 2,25 MVA**, cuya tarea principal es elevar la tensión de **500 V** a **25 kV** para permitir la transmisión de la energía a la red de distribución. La alta capacidad del transformador asegura que pueda manejar la potencia combinada de ambas matrices fotovoltaicas y entregar esta potencia a un nivel de tensión adecuado para la red. Al elevar la tensión, el transformador también reduce las pérdidas en la transmisión de energía, lo cual es crucial para la eficiencia del sistema.

3.2.8 Bus de CA a 25 kV

El **bus de CA a 25 kV** es el punto donde la energía transformada está lista para ser inyectada en la red de distribución de media tensión. En este bus se asegura que la energía cumple con las características adecuadas para ser distribuida a la red, tanto en términos de tensión como de calidad de la potencia. Este nivel de tensión es típico en redes de distribución locales, que sirven como puente entre las fuentes de generación y los consumidores finales.

3.2.9 Red Eléctrica

Finalmente, la energía generada e integrada pasa a la **red eléctrica** a través de un sistema de distribución de **25 kV**. La red de distribución conecta la energía a diversos puntos de consumo, ya sea a usuarios residenciales, comerciales o industriales. Este sistema incluye alimentadores de media tensión y puede estar conectado a sistemas de transmisión de alta tensión (como el de **120 kV** mencionado). La estabilidad y calidad de la energía entregada a la red es fundamental para garantizar un suministro eficiente y continuo a los usuarios finales.

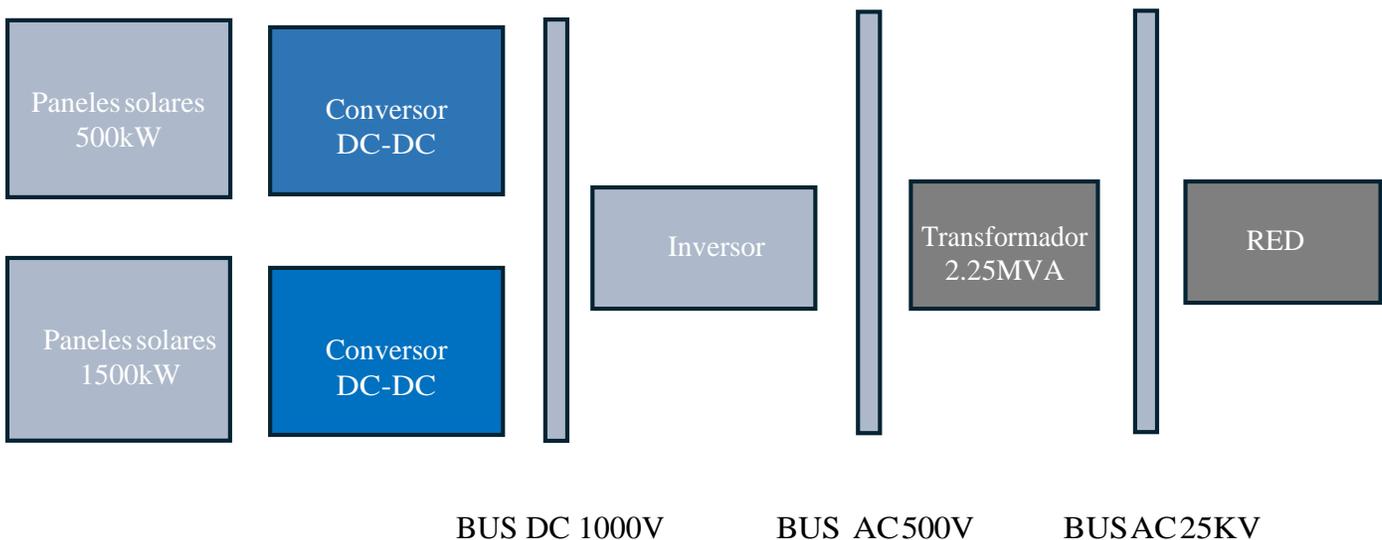


Figura 4: Diagrama esquemático general del sistema.

Fuente: Propia

3.3 Presentación de la propuesta.

La imagen presentada muestra un diagrama estructural de un sistema fotovoltaico (PV) de 2 MW conectado a una red de distribución de 25 kV. La disposición y el formato de los componentes sugieren que se realizó utilizando Simulink, una herramienta de simulación basada en bloques de MATLAB. Simulink es ampliamente utilizado en ingeniería para modelar, simular y analizar sistemas dinámicos, como redes eléctricas, controladores electrónicos, y sistemas de potencia.

3.3.1. Descripción del Software y su Uso

Simulink proporciona una interfaz gráfica de usuario (GUI) que permite arrastrar y soltar bloques predefinidos para crear modelos complejos de sistemas físicos y de control. Los usuarios pueden seleccionar componentes como fuentes de energía, convertidores, transformadores y cargas, y conectarlos mediante líneas de transmisión para representar la interacción entre ellos. Los bloques suelen tener parámetros configurables para simular diferentes escenarios y condiciones operativas. En la imagen presentada, cada bloque representa un componente clave dentro del sistema de generación fotovoltaica, como paneles solares, convertidores de energía y transformadores.

3.3.2. Estructura del Sistema Fotovoltaico

El sistema mostrado se divide en tres secciones principales: Planta Solar (PV Arrays): A la izquierda, se observa la planta solar con dos conjuntos de paneles fotovoltaicos (PV Array 1 y PV Array 2). Estos paneles están conectados a convertidores de tipo *boost* que elevan la tensión de salida de los paneles antes de que la energía se transfiera a la siguiente etapa.

Etapas de Conversión e Inversión de Energía: La etapa intermedia del sistema incluye convertidores de potencia que se encargan de procesar la energía antes de que sea integrada a la red. Se muestra el uso de un inversor NPC de 3 niveles que convierte la corriente continua (DC) en corriente alterna (AC) para su inyección en la red eléctrica.

3.3.3 Conexión a la Red: En el lado derecho, se visualiza la conexión del sistema fotovoltaico con la red de distribución de 25 kV. Se incluyen elementos como un transformador de

acoplamiento, que eleva la tensión a niveles adecuados para la distribución, y dispositivos de protección como el transformador de puesta a tierra. La gráfica también incluye una representación esquemática de las cargas conectadas a la red, con indicaciones de las potencias involucradas.

Funcionalidad del Modelo

El propósito principal de este modelo es simular el comportamiento de un sistema fotovoltaico en conexión con una red de distribución eléctrica. Con Simulink, los ingenieros pueden modificar parámetros como la temperatura de las celdas solares (como se observa en el ajuste de 25°C a 45°C) para analizar cómo afecta esto la generación de energía. El control del sistema también puede ajustarse mediante el bloque de "Control System", lo que permite probar diferentes estrategias de gestión de energía o protección de la red.

El uso de Simulink permite realizar simulaciones dinámicas de escenarios operativos, medir variables como la potencia activa (P) y reactiva (Q), y visualizar el comportamiento del sistema en tiempo real. Además, mediante los bloques de visualización, es posible monitorear las señales eléctricas y los valores de estado de los diferentes componentes del sistema.

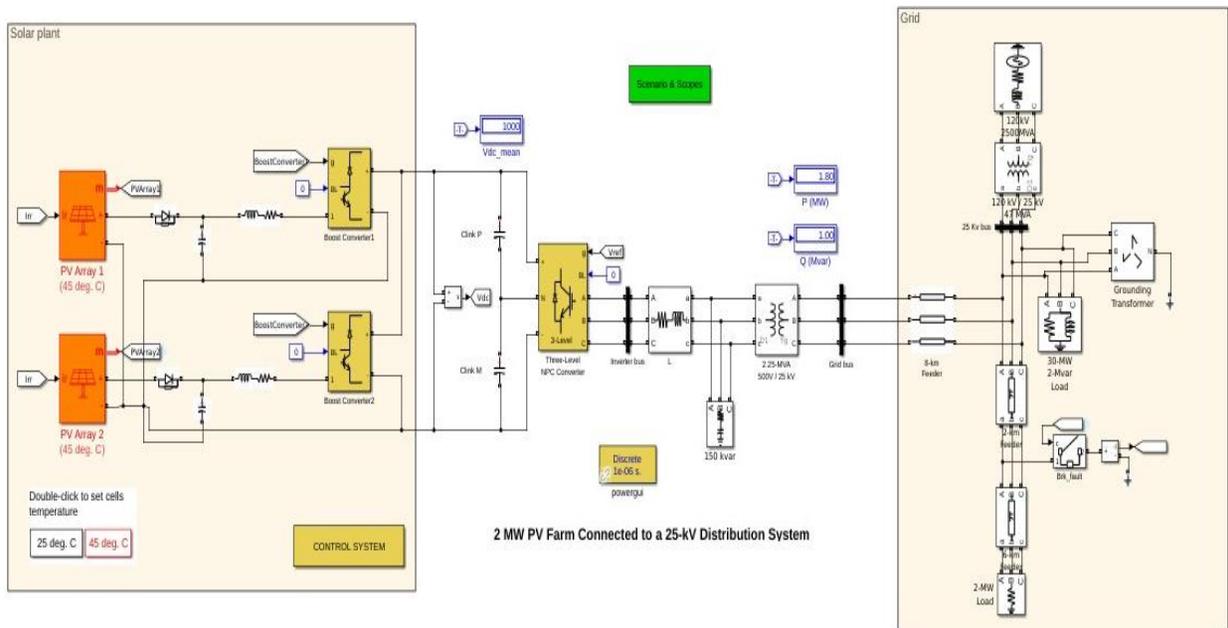


Figura 5: Granja fotovoltaica conectada a un sistema de distribución de 25 KV.

Fuente: propia

3.4. Descripción detallada de componentes.

Matrices fotovoltaicas (PV Arrays):

PV Array 1 tiene capacidad para producir hasta 1.5 MW y PV Array 2 hasta 500 kW bajo condiciones óptimas de irradiación solar y temperatura. Estas matrices convierten la energía solar en electricidad de corriente continua (CC). El rendimiento de estos paneles puede variar según la temperatura, siendo crucial ajustar las condiciones de operación para maximizar la eficiencia.

Convertidores elevadores (Boost Converters):

Cada matriz fotovoltaica está acoplada a un convertidor elevador que incrementa la tensión de salida para alinearla con el bus de CC de 1000 V. Controlados por algoritmos MPPT utilizando la técnica Perturb and Observe, estos convertidores optimizan la captura de energía solar adaptándose a las variaciones de irradiación y temperatura.

Bus de CC y convertidor NPC de tres niveles:

La energía acumulada en el bus de CC se convierte a corriente alterna (CA) de 500 V mediante un convertidor NPC, que está regulado para mantener constante la tensión de CC a 1000 V. Este convertidor también ajusta la producción de potencia reactiva hasta 1 Mvar, lo cual es crucial para la estabilidad de la red.

Transformador trifásico de acoplamiento:

El transformador eleva la tensión de 500 V a 25 kV para facilitar la transmisión de energía a través de la red de distribución de media tensión, minimizando las pérdidas y asegurando la compatibilidad con los estándares de la red.

Red de distribución y sistema de transmisión:

El sistema se conecta a una red típica de 25 kV y, opcionalmente, a un sistema de transmisión de 120 kV para la distribución a mayor escala. Este aspecto es vital para la integración eficiente del parque fotovoltaico en la infraestructura eléctrica existente.

Orden metodológico y recomendaciones para la implementación

Para implementar este tipo de sistema fotovoltaico, se recomienda seguir un enfoque metodológico estructurado:

Evaluación de sitio y capacidad:

Realizar un estudio detallado de las condiciones geográficas y climáticas del sitio. Esto incluye la evaluación de la irradiación solar promedio y la temperatura, que influirán directamente en la selección y configuración de las matrices fotovoltaicas.

Diseño del sistema y selección de componentes:

Seleccionar componentes que cumplan con los requisitos de capacidad y eficiencia, asegurando que el diseño del sistema sea escalable y ajustable a las condiciones locales. Cada componente debe ser seleccionado por su capacidad de integración y su rendimiento probado en condiciones similares.

Integración de sistemas de control MPPT y convertidores:

Implementar algoritmos MPPT eficientes es clave para maximizar la captura de energía. La correcta selección e instalación de convertidores elevadores y NPC garantizará que la conversión de energía sea lo más eficiente posible.

Pruebas y puesta en marcha:

Antes de la operación completa, realizar pruebas exhaustivas para asegurar que todos los componentes funcionan correctamente en conjunto y que el sistema alcanza las eficiencias proyectadas bajo diferentes condiciones operativas.

Monitoreo y mantenimiento:

Establecer un sistema de monitoreo continuo para evaluar el rendimiento del sistema en tiempo real y realizar mantenimiento preventivo y correctivo. Esto ayudará a identificar problemas de manera temprana y mantener la eficiencia del sistema a largo plazo.

Al seguir estos pasos, se puede garantizar la implementación exitosa de un parque fotovoltaico que no solo sea eficiente en términos de generación de energía sino también compatible y estabilizador dentro de la red eléctrica a la que se conecta.

3.5 Ejecución de la propuesta.

Graficas 1. PV del arreglo de **1.5MW**

Las gráficas presentadas indican el comportamiento de un sistema fotovoltaico de 1.5 MW bajo diferentes condiciones de temperatura. Estas curvas características son fundamentales para comprender el rendimiento y la eficiencia del sistema, así como para dimensionar adecuadamente los componentes de un sistema fotovoltaico. A continuación, se realizará un análisis detallado de cada una de las curvas, considerando los parámetros relevantes y su significado físico. En el caso de la **Matriz FV 1**, la tensión de salida inicial es más alta, reflejando su capacidad de generar mayor potencia debido al mayor número de módulos instalados. Observamos que después de un pico inicial, la tensión tiende a estabilizarse en un rango de aproximadamente **600-700 V**.

3.5.1 Descripción del Sistema Fotovoltaico.

Antes de adentrarnos en el análisis de las curvas, es importante describir brevemente las características del sistema fotovoltaico en cuestión:

Potencia Nominal: 1.5 MW, lo que indica la potencia máxima que el sistema puede generar bajo condiciones estándar de prueba (STC).

Configuración del Módulo: El sistema está compuesto por 15 módulos conectados en serie y 282 cadenas conectadas en paralelo. Esta configuración es común en grandes sistemas fotovoltaicos para optimizar la producción de energía y la gestión de la energía.

Análisis de las Curvas Características

3.5.2 Gráfico superior Curva de Corriente-Voltaje (I-V)

La curva I-V muestra la relación entre la corriente y el voltaje en los terminales del sistema fotovoltaico. En esta gráfica, se presentan dos curvas: una para una temperatura de 25°C (roja) y otra para una temperatura de 45°C (azul).

Eje X: Voltaje (V). Representa el voltaje a través de los terminales del sistema fotovoltaico.

Eje Y: Corriente (A). Representa la corriente que fluye a través del sistema fotovoltaico.

Características de la Curva I-V:

Punto de Máxima Potencia (PMP): Es el punto en el que el producto del voltaje y la corriente es máximo, es decir, donde se obtiene la máxima potencia eléctrica. Este punto está marcado en la gráfica con las coordenadas (X=651 V, Y=1501700 A) para la curva de 25°C.

Corriente de Cortocircuito (Isc): Es la corriente máxima que puede fluir a través del sistema cuando los terminales están cortocircuitados (voltaje cero).

Voltaje de Circuito Abierto (Voc): Es el voltaje máximo que puede alcanzar el sistema cuando no circula corriente (circuito abierto).

Efecto de la Temperatura:

Desplazamiento de la Curva: Al aumentar la temperatura, la curva I-V se desplaza hacia abajo y hacia la izquierda. Esto significa que tanto la corriente de cortocircuito como el voltaje de circuito abierto disminuyen con la temperatura.

Reducción de la Potencia Máxima: El punto de máxima potencia se desplaza hacia valores más bajos de voltaje y corriente, lo que resulta en una reducción de la potencia máxima que puede generar el sistema a temperaturas más altas.

3.5.3 Gráfico Inferior Curva de Potencia-Voltaje (P-V)

La curva P-V muestra la relación entre la potencia eléctrica y el voltaje en los terminales del sistema fotovoltaico. En esta gráfica, solo se presenta una curva para una temperatura de 45°C.

- Eje X: Voltaje (V).
- Eje Y: Potencia (W).

Características de la Curva P-V:

- Punto de Máxima Potencia: Es el punto más alto de la curva, donde se obtiene la máxima potencia eléctrica.

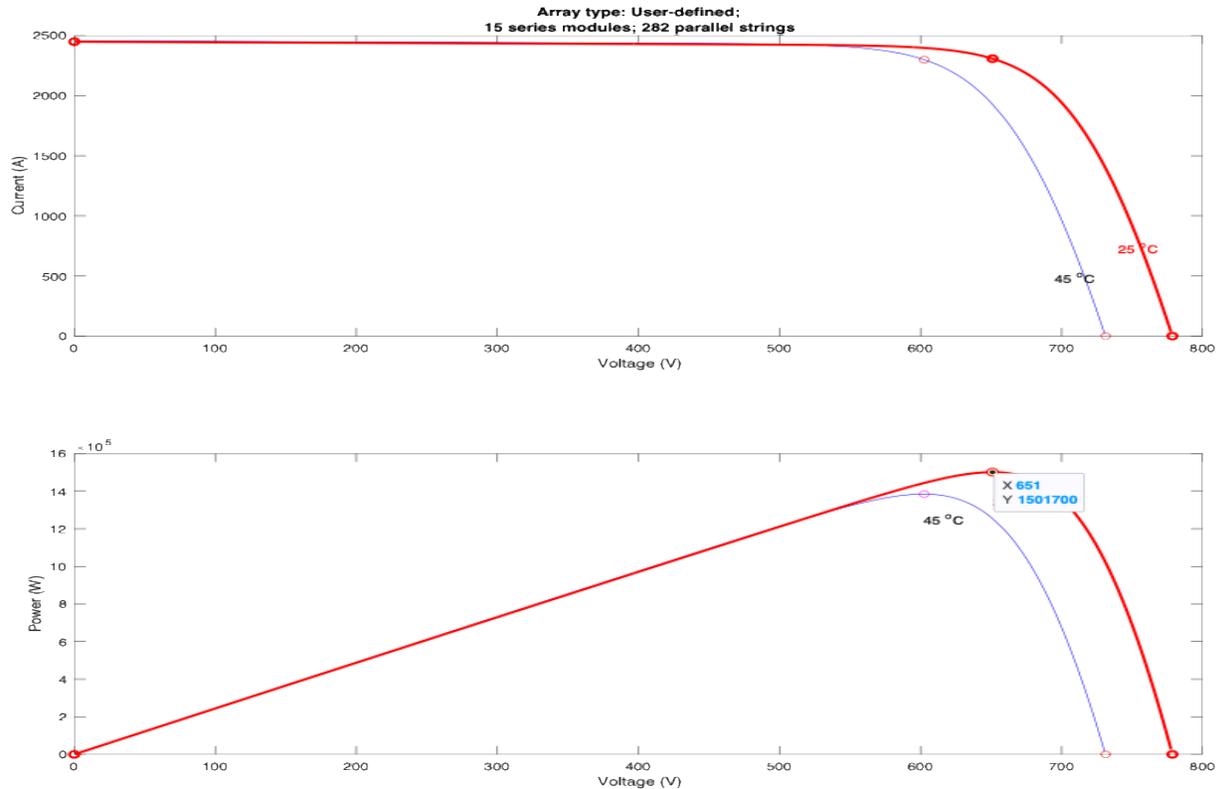


Figura 6: *Grafico superior Curva de Corriente-Voltaje*
Grafico Inferior Curva de Potencia-Voltaje (P-V)

Fuente: propia

3.6 Graficas 2. PV del arreglo de 500 KW

Para la **Matriz FV 2**, la tensión de salida es notablemente más baja, alrededor de **400-500 V**, lo cual es consistente con su menor capacidad de generación (500 kW). La diferencia en las tensiones medias de salida se debe al diseño del sistema, donde la configuración en serie/paralelo de los módulos y las características de los convertidores elevadores (Boost) determinan los valores de voltaje. Por lo tanto, el **voltaje** y la **corriente** se están midiendo a nivel de las salidas del arreglo fotovoltaico, considerando el comportamiento combinado de los módulos en serie y paralelo. El voltaje que se observa en las gráficas corresponde al voltaje total del sistema (sumando los voltajes de los módulos en serie), mientras que la corriente es el valor total resultante de la suma de las corrientes en paralelo.

3.6.1 Gráfica superior (Corriente vs Voltaje o I-V Curve):

Eje X (Voltaje, V): Representa la tensión eléctrica generada por el arreglo fotovoltaico.

Eje Y (Corriente, A): Representa la corriente eléctrica producida por el arreglo.

En esta gráfica, se visualizan dos curvas de color **rojo** y **azul**, que corresponden a diferentes temperaturas de operación:

Curva roja (25 °C): Representa la curva característica I-V del arreglo a una temperatura más baja (25 °C). Se puede observar que, a esta temperatura, el arreglo fotovoltaico genera una mayor tensión de circuito abierto (VOC), es decir, la tensión máxima cuando la corriente es cero. Esta curva también muestra una corriente mayor en la mayoría de los puntos de voltaje, indicando un mejor rendimiento a menor temperatura.

Curva azul (45 °C): Representa el comportamiento del arreglo a una temperatura más alta (45 °C). En este caso, se observa una disminución en la tensión de circuito abierto (VOC) y una ligera disminución en la corriente generada. Esto se debe a que las temperaturas más altas reducen la eficiencia de los módulos fotovoltaicos, causando una caída en la tensión.

3.6.2 Gráfica inferior (Potencia vs Voltaje o P-V Curve):

Eje X (Voltaje, V): De nuevo representa el voltaje generado por el arreglo.

Eje Y (Potencia, W): Representa la potencia eléctrica generada (en vatios) por el arreglo fotovoltaico.

Curva roja (25 °C): Similar a la gráfica superior, muestra el comportamiento del arreglo fotovoltaico a 25 °C. Se puede observar que la potencia máxima (Pmax) es mayor a esta temperatura, con un punto de máxima potencia (MPP) ubicado a un voltaje más alto.

Curva azul (45 °C): A 45 °C, la potencia máxima que puede generar el arreglo es menor, y el punto de máxima potencia se desplaza a un voltaje menor. Este efecto se debe a la reducción en la eficiencia del módulo a medida que la temperatura aumenta, lo cual es un comportamiento típico de las celdas solares.

3.6.3. Diferencias principales entre las dos gráficas:

Gráfica I-V (Corriente vs Voltaje): Muestra cómo la corriente varía con el voltaje bajo diferentes temperaturas. A mayor temperatura, disminuye el voltaje de circuito abierto (VOC) y la corriente también puede disminuir ligeramente.

Gráfica P-V (Potencia vs Voltaje): Aquí se observa cómo la potencia varía con el voltaje. La potencia máxima generada por el arreglo es mayor a temperaturas más bajas. El punto de máxima potencia (MPP) cambia su posición en función de la temperatura, desplazándose hacia la izquierda (menor voltaje) a temperaturas más altas.

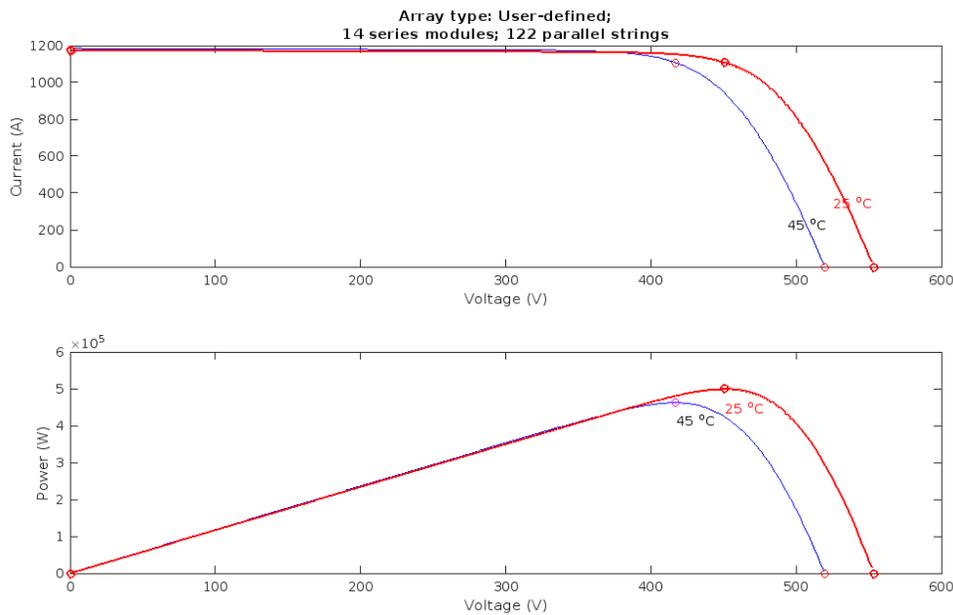


Figura 7: Gráfica superior (Corriente vs Voltaje o I-V Curve)

Gráfica inferior (Potencia vs Voltaje o P-V Curve)

Fuente: propia

Las gráficas presentadas detallan el comportamiento dinámico de un sistema fotovoltaico compuesto por dos arreglos, PV1 y PV2, bajo condiciones de irradiación variable. A continuación, se realizará un análisis pormenorizado de cada gráfica, describiendo las magnitudes medidas y su significado físico en el contexto de sistemas fotovoltaicos.

Gráfica Superior: Irradiación Expuesta al Sistema

Magnitud: Irradiación (W/m²).

Significado: Representa la potencia solar incidente por unidad de área que recibe el sistema fotovoltaico. Esta magnitud es fundamental, ya que la generación de energía eléctrica en un panel solar es directamente proporcional a la irradiación solar que incide sobre él.

Interpretación: La gráfica muestra un perfil de irradiación constante a lo largo del tiempo de medición. Esto sugiere que el sistema fotovoltaico se encuentra bajo condiciones de irradiación estables durante el período de análisis.

Gráfica Inferior: Voltaje Promedio de los Arreglos Fotovoltaicos

Magnitudes:

Voltaje promedio de los arreglos fotovoltaicos (V): Representa el voltaje promedio a través de ambos arreglos, PV1 y PV2.

Voltaje promedio de PV1 (V): Representa el voltaje promedio a través del arreglo fotovoltaico PV1.

Voltaje promedio de PV2 (V): Representa el voltaje promedio a través del arreglo fotovoltaico PV2.

En el caso de un sistema fotovoltaico, el voltaje generado está directamente relacionado con la intensidad de la luz que incide sobre las células solares y la temperatura de operación.

Interpretación:

Comportamiento Inicial: Al inicio del período de medición, se observa un rápido aumento del voltaje en ambos arreglos, lo que indica que los paneles solares están siendo expuestos a la irradiación solar y comienzan a generar electricidad.

Estado Estacionario: Tras el aumento inicial, el voltaje se estabiliza en un valor relativamente constante, lo que sugiere que el sistema ha alcanzado un estado de equilibrio bajo las condiciones de irradiación establecidas.

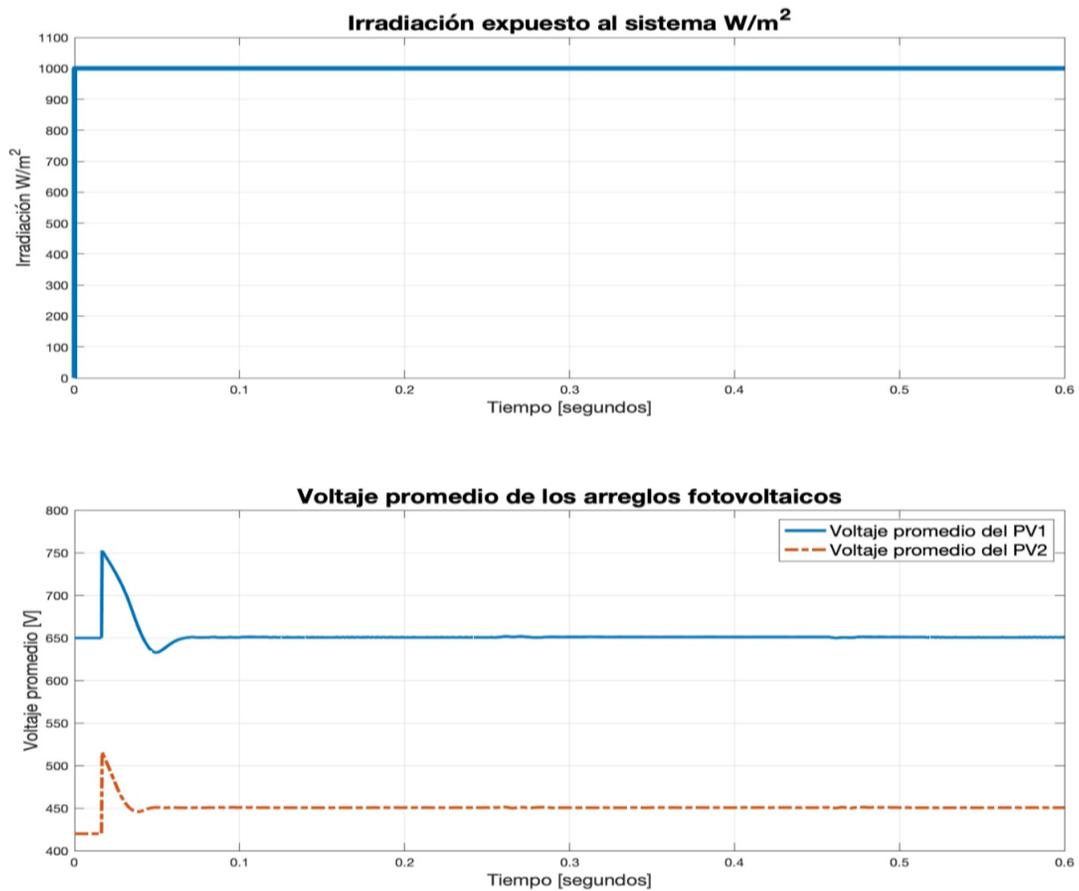


Figura 8: Gráfica Superior: Irradiación Expuesta al Sistema.
 Gráfica Inferior: Voltaje Promedio de los Arreglos Fotovoltaicos
Fuente: propia

3.7 Potencia promedio de los arreglos fotovoltaicos.

Análisis de las Curvas de Potencia Promedio

La gráfica que presentas nos muestra la evolución en el tiempo de la potencia promedio generada por cada uno de tus arreglos fotovoltaicos, PV1 y PV2. Este tipo de representación visual es fundamental para comprender el comportamiento dinámico de un sistema fotovoltaico y evaluar su desempeño. La gráfica muestra la evolución en el tiempo de la potencia promedio generada por dos arreglos fotovoltaicos. Cada curva representa la potencia promedio entregada

por cada uno de estos arreglos a lo largo de un determinado período de tiempo (en este caso, de 0 a 0.6 segundos).

3.8 Origen de los Datos.

Los datos de potencia promedio que alimentan estas curvas provienen de la monitorización continua de tus sistemas fotovoltaicos. Específicamente, se obtienen a partir de los datos de voltaje y corriente que generan los módulos fotovoltaicos individuales que conforman cada arreglo. Estos datos son recopilados por inversores o controladores de carga, y posteriormente procesados para calcular la potencia instantánea y, finalmente, la potencia promedio en un intervalo de tiempo determinado.

3.8.1 Características de los Arreglos Fotovoltaicos.

PV1: Este arreglo cuenta con una capacidad nominal de 1.5 MW, y está conformado por 15 módulos conectados en serie y 282 cadenas en paralelo. La conexión en serie aumenta el voltaje de salida del arreglo, mientras que la conexión en paralelo incrementa la corriente disponible.

PV2: Por su parte, el arreglo PV2 tiene una capacidad nominal de 500 kW, y está compuesto por 14 módulos en serie y 122 cadenas en paralelo. Esta configuración, aunque más pequeña que la de PV1, sigue el mismo principio de conexión de módulos en serie y paralelo para optimizar la generación de energía.

3.8.2 Interpretación de la Gráfica.

Eje de las abscisas (tiempo): Representa el tiempo transcurrido desde el inicio de la medición. En este caso, el tiempo se expresa en segundos.

Eje de las ordenadas (potencia promedio): Muestra la potencia promedio generada por cada arreglo fotovoltaico en un instante de tiempo dado. La unidad de medida es el megavatio (MW) para PV1 y el kilovatio (kW) para PV2.

3.8.3 Comportamiento de las Curvas.

Ambas curvas presentan un comportamiento similar, caracterizado por un rápido aumento de la potencia al inicio de la medición, seguido de una estabilización en un valor prácticamente constante. Este comportamiento se explica por la respuesta de los módulos fotovoltaicos a la

radiación solar incidente. Al inicio, los módulos se encuentran en condiciones de baja irradiación o sombra, lo que limita su generación de energía. A medida que aumenta la irradiación, la potencia generada también aumenta hasta alcanzar un valor máximo, correspondiente a las condiciones de máxima irradiación solar.

3.8.4 Factores que Influyen en la Potencia Promedio.

La potencia promedio generada por un arreglo fotovoltaico depende de diversos factores, entre los que destacan:

Irradiación solar: La cantidad de radiación solar incidente sobre los módulos fotovoltaicos es el factor más determinante.

Temperatura: La temperatura de los módulos afecta negativamente a su eficiencia.

Orientación e inclinación: La orientación e inclinación de los paneles influyen en la cantidad de radiación solar que reciben.

Sombra: La presencia de sombras sobre los módulos reduce significativamente la generación de energía.

Pérdidas en el sistema: Las pérdidas en los cables, conectores y otros componentes del sistema también afectan la potencia disponible en la salida del inversor.

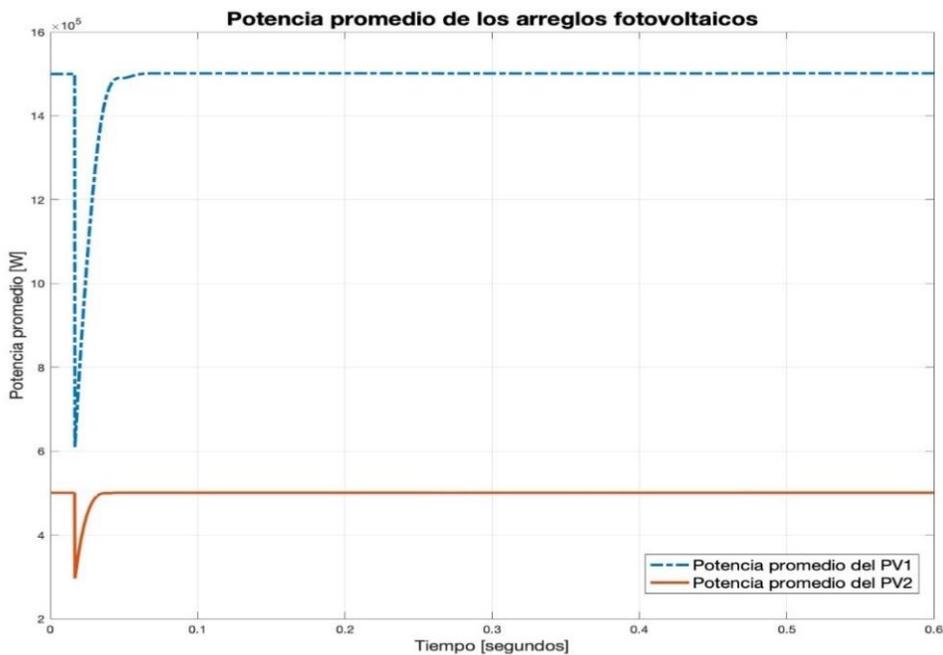


Figura 9: Curva de potencia promedio de los arreglos fotovoltaicos.

Fuente: propia.

3.9 Interpretación de la Curva de potencia promedio de los arreglos fotovoltaicos.

La gráfica que presentas representa la forma de onda de voltaje alterno (CA) en la salida de un inversor diseñado para generar una tensión de pico de 500kV. Esta forma de onda es fundamental para entender el funcionamiento del inversor y evaluar su desempeño. La imagen que proporcionas muestra una forma de onda cuadrada, la cual está lejos de ser ideal para el funcionamiento óptimo de un inversor en sistemas de generación eléctrica, particularmente cuando el inversor está diseñado para generar una tensión de pico de 500 kV.

En aplicaciones de inversores, especialmente en sistemas de generación solar y eólica, la forma de onda ideal para un buen rendimiento es una onda senoidal pura, o al menos lo más cercana posible a una senoidal. Esto se debe a que la red eléctrica y la mayoría de los equipos eléctricos están diseñados para operar con señales de corriente alterna (CA) senoidales, lo que minimiza las pérdidas, el ruido y la interferencia electromagnética. Además, la forma senoidal es eficiente y compatible con la mayoría de los transformadores, motores y equipos eléctricos que se conectan a la red eléctrica.

3.9.1 Eje de las abscisas (Muestras):

¿Qué representa?: Este eje representa el dominio del tiempo, pero en lugar de utilizar unidades de tiempo directas (segundos, milisegundos, etc.), se utilizan "muestras". Cada muestra corresponde a un instante de tiempo discreto en el que se mide el voltaje.

Importancia: La representación en muestras es común en sistemas digitales y de adquisición de datos. Permite capturar y analizar la señal de manera discreta, lo que es fundamental para su procesamiento posterior por sistemas digitales.

3.9.2 Eje de las ordenadas (Voltaje AC):

¿Qué representa?: Este eje representa el valor instantáneo del voltaje alterno en cada muestra. La escala en voltios indica la amplitud de la señal, y el signo indica la polaridad (positiva o negativa).

Importancia: El voltaje AC es la salida principal del inversor y su forma de onda es crucial para determinar la calidad de la energía eléctrica generada.

3.9.3 Forma de onda:

Características: La forma de onda que se observa es una onda cuadrada de alta frecuencia. Esta forma de onda se caracteriza por transiciones abruptas entre los valores máximo y mínimo, y una amplitud de pico de aproximadamente 500kV.

Significado: La forma de onda cuadrada es típica de los inversores que utilizan técnicas de modulación por ancho de pulso (PWM) para generar tensiones de alta frecuencia. La frecuencia de conmutación de los dispositivos electrónicos del inversor determina la frecuencia de la onda cuadrada.

3.9.4 Análisis de la gráfica:

Amplitud: La amplitud de pico de la onda cuadrada es de aproximadamente 500kV, lo cual coincide con el valor nominal del inversor. Esto indica que el inversor está generando la tensión deseada.

Frecuencia: La frecuencia de la onda cuadrada puede estimarse a partir de la distancia entre dos picos positivos consecutivos. Una frecuencia alta indica una conmutación rápida de los dispositivos electrónicos del inversor y, por lo general, se asocia con una mejor calidad de la forma de onda.

Armónicos: La forma de onda ideal de una tensión alterna es una senoide pura. Sin embargo, la onda cuadrada presenta una gran cantidad de armónicos, que son componentes de frecuencia múltiplos de la frecuencia fundamental. Estos armónicos pueden causar distorsión en la tensión y generar pérdidas en los sistemas eléctricos.

3.9.5 Forma de onda cuadrada vs. onda senoidal ideal

La forma de onda cuadrada que aparece en el gráfico tiene varias implicaciones en el desempeño del inversor:

3.9.6 Distorsión armónica: Una onda cuadrada introduce una cantidad significativa de armónicos, que son componentes de frecuencias adicionales superpuestas a la frecuencia fundamental. Estos armónicos pueden causar calentamiento excesivo en los equipos conectados, pérdida de eficiencia, ruidos y problemas en los transformadores, motores y otros dispositivos que dependen de una señal senoidal pura.

3.9.7 Eficiencia del inversor: El hecho de que la onda generada sea cuadrada puede sugerir que el inversor no está operando en su punto de máxima eficiencia. En general, los inversores con formas de onda cuadrada son más simples y baratos de fabricar, pero tienden a ser menos eficientes que aquellos que generan ondas senoidales puras o modificadas. En un sistema diseñado para generar tensiones tan elevadas como 500 kV, cualquier pérdida de eficiencia podría ser crítica, dado que la energía a estas magnitudes implica grandes cantidades de potencia.

3.9.8 Compatibilidad con cargas: Las cargas eléctricas, especialmente las más sensibles o no lineales (como motores de inducción o equipos electrónicos avanzados), tienden a no funcionar correctamente con una forma de onda cuadrada. Esto puede resultar en un mal rendimiento o incluso daños a estos equipos. En particular, los sistemas de generación solar y eólica deben ser capaces de integrarse sin problemas a la red eléctrica, y esto requiere que la forma de onda sea lo más cercana a la ideal para evitar perturbaciones en el sistema.

3.9.9 Forma de onda cuadrada: La forma de onda cuadrada que se observa en el gráfico no es la forma más adecuada para un inversor que debe operar con la máxima eficiencia y generar una tensión de 500 kV. Aunque un inversor con forma de onda cuadrada puede funcionar en aplicaciones limitadas, no es lo ideal para sistemas de gran escala como aquellos involucrados en la generación solar o eólica. En estas aplicaciones, lo más adecuado sería un inversor que pueda generar una onda senoidal pura o una aproximación muy cercana, como un inversor de onda senoidal modificada.

3.9.10 Impacto en el desempeño: El desempeño del inversor se verá afectado negativamente si la forma de onda no es la correcta. A largo plazo, operar con ondas cuadradas puede reducir la vida útil de los equipos conectados y del propio inversor, debido a las pérdidas por los armónicos y la sobrecarga en los componentes electrónicos. Además, se incrementan las pérdidas por calor

y, potencialmente, se generan problemas de compatibilidad electromagnética, lo que resulta en una disminución de la eficiencia total del sistema.

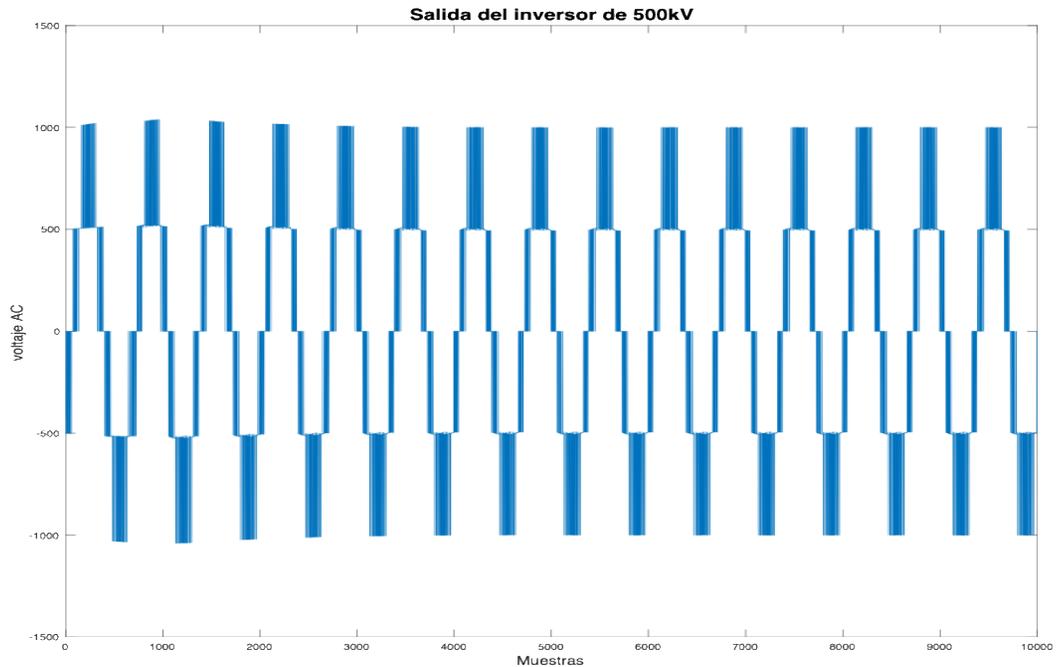


Figura 10: Forma de onda de voltaje alterno (CA) en la salida del inversor de 500KV

Fuente: propia

3.10 Análisis y resultados.

Para realizar un análisis de los resultados obtenidos del sistema fotovoltaico de 2 MW, utilizando Simulink de MATLAB, es esencial considerar varios aspectos clave relacionados con la variabilidad en las condiciones de irradiancia y temperatura, así como la implementación de la técnica de Seguimiento del Punto de Máxima Potencia (MPPT) mediante el método Perturbar y Observar (P&O).

3.10.1 Diseño del sistema

El sistema propuesto consta de dos arreglos fotovoltaicos, uno de 1.5 MW y otro de 500 kW, conectados a un bus común de 1000 V a través de convertidores boost individuales. La

configuración de este sistema permite una mayor flexibilidad en la generación de energía y optimización de la potencia entregada, incluso bajo diferentes condiciones ambientales.

3.10.2 Impacto de la temperatura e irradiancia

El comportamiento de los arreglos fotovoltaicos bajo diferentes condiciones de temperatura e irradiancia se puede visualizar en las curvas obtenidas en los gráficos adjuntos. En ambos casos, las curvas de corriente contra voltaje (I-V) y potencia contra voltaje (P-V) muestran la respuesta de los módulos fotovoltaicos a temperaturas de 25 °C y 45 °C.

En condiciones de mayor temperatura (45 °C), se observa una disminución en la potencia máxima generada, lo que es consistente con el comportamiento típico de los módulos fotovoltaicos. Esto se debe a que la eficiencia de los módulos disminuye con el aumento de la temperatura, desplazando el punto de máxima potencia (MPP) hacia valores de voltaje menores. El sistema, equipado con controladores MPPT mediante el algoritmo P&O, ajusta el punto de operación del convertidor boost para que el sistema se mantenga lo más cercano posible al MPP bajo estas condiciones cambiantes.

Por otro lado, cuando la temperatura es más baja (25 °C), se puede apreciar un aumento en la potencia generada y en el voltaje en el que se alcanza el MPP, lo que refleja una mayor eficiencia de conversión en los módulos fotovoltaicos.

3.10.3 Controladores MPPT y su mejora en la generación

La implementación de controladores MPPT con el método P&O permite que el sistema fotovoltaico mantenga una generación óptima de energía, incluso cuando las condiciones de irradiancia y temperatura cambian. Este método, aunque simple en su estructura, es eficaz en seguir de manera dinámica el punto de máxima potencia, lo cual mejora considerablemente la eficiencia del sistema, particularmente en condiciones variables.

En los gráficos se observa cómo el sistema ajusta el MPP de forma adecuada, ya que las curvas de potencia contra voltaje muestran que, a pesar de la caída en la potencia bajo altas temperaturas, el MPPT logra maximizar la generación en función de las condiciones disponibles. Además, el

uso de dos arreglos con capacidades distintas, conectados al mismo bus DC, permite optimizar la producción de energía a lo largo del día, compensando en cierto modo las pérdidas debidas a los efectos de temperatura y la irradiancia.

Para el análisis de los resultados obtenidos en el sistema fotovoltaico de 2 MW modelado en Simulink de MATLAB, es relevante evaluar el comportamiento del sistema bajo condiciones de irradiancia y temperatura variables, teniendo en cuenta la presencia de dos arreglos fotovoltaicos de 1.5 MW y 500 kW conectados a un bus DC común de 1000 V a través de convertidores boost. El control de los arreglos está basado en la implementación de controladores MPPT utilizando el algoritmo Perturbar y Observar (P&O), con el objetivo de maximizar la generación de energía.

3.10.4 Comportamiento bajo condiciones variables de irradiancia

En el gráfico de irradiancia expuesta al sistema, se observa una irradiancia constante de 1000 W/m² en un corto intervalo de tiempo, lo cual permite analizar el desempeño del sistema en condiciones ideales. Este valor representa un estándar óptimo de irradiancia para sistemas fotovoltaicos. Sin embargo, en escenarios reales, la irradiancia puede variar considerablemente debido a factores ambientales, como nubes y la posición del sol.

Bajo estas condiciones ideales, el sistema debería funcionar cerca de su capacidad máxima de generación. En los sistemas fotovoltaicos reales, cuando la irradiancia es menor, la potencia generada se reduce proporcionalmente. El controlador MPPT tiene la función de ajustar el punto de operación de los convertidores para garantizar que el sistema opere en el punto de máxima potencia posible bajo cualquier nivel de irradiancia. La estabilidad en la irradiancia mostrada en el gráfico sugiere que el sistema es capaz de mantener un flujo de energía constante y bien controlado durante este intervalo.

3.10.5 Respuesta del voltaje de los arreglos fotovoltaicos

En el gráfico que muestra el voltaje promedio de los arreglos fotovoltaicos, se puede observar un comportamiento típico del sistema de arranque y ajuste a las condiciones de operación. El arreglo de 1.5 MW (PV1) muestra un pico inicial en el voltaje seguido de una estabilización alrededor

de los 650 V, mientras que el arreglo de 500 kW (PV2) exhibe un comportamiento similar, con un pico inicial seguido de una estabilización en torno a los 450 V.

Este comportamiento indica que ambos arreglos están adecuadamente regulados por los controladores MPPT, que ajustan los convertidores boost para asegurar que cada arreglo opere en su punto de máxima potencia. La presencia de estos picos iniciales es característica del algoritmo P&O, que efectúa ajustes iniciales antes de estabilizarse en el MPP. Este ajuste permite al sistema maximizar la generación de energía bajo las condiciones variables de temperatura e irradiancia, asegurando una mayor eficiencia y aprovechamiento de la energía disponible.

3.11 Conclusiones.

El desarrollo y simulación de un sistema fotovoltaico de 2 MW en Simulink de MATLAB han permitido validar la hipótesis planteada en esta investigación. La implementación de convertidores Boost y controladores MPPT con el algoritmo Perturbar y Observar (P&O) ha demostrado que el sistema puede alcanzar una alta eficiencia de conversión de energía y operar de manera estable bajo condiciones variables de irradiación y temperatura. A continuación, se aborda cada una de las preguntas de investigación formuladas.

El análisis de los resultados de la simulación revela que la configuración óptima de los convertidores Boost y los controladores MPPT depende de las características específicas de los arreglos fotovoltaicos y del bus DC común. En el sistema propuesto, se utilizaron dos arreglos fotovoltaicos de 1.5 MW y 500 kW, respectivamente, cada uno con su propio convertidor Boost, lo que permitió ajustar de manera independiente el punto de operación de cada arreglo para maximizar la generación de energía. El uso de controladores MPPT con el algoritmo P&O permitió una regulación eficiente del voltaje en cada arreglo, ajustando el punto de máxima potencia (MPP) según las condiciones de irradiancia y temperatura. En resumen, la configuración adecuada para este tipo de sistemas incluye un convertidor Boost por arreglo fotovoltaico, lo que garantiza que cada arreglo pueda operar de manera óptima e independiente, con controladores MPPT sintonizados para responder rápidamente a los cambios en las condiciones ambientales.

Las condiciones variables de irradiancia y temperatura tienen un impacto significativo en el desempeño del sistema fotovoltaico, lo cual fue claramente evidenciado en la simulación. A

medida que la temperatura aumenta, el voltaje de los módulos fotovoltaicos disminuye, lo que afecta directamente la potencia generada. Sin embargo, el uso de los controladores MPPT permitió ajustar el punto de operación del sistema para mitigar estas pérdidas. De manera similar, la irradiancia variable influye directamente en la corriente generada por los módulos, lo que también fue compensado de manera eficiente por los controladores MPPT. En el conjunto de pruebas, se observó que, bajo condiciones de alta temperatura y baja irradiancia, la potencia máxima generada disminuye, pero el sistema sigue funcionando de manera estable y eficiente gracias a los ajustes automáticos realizados por el algoritmo P&O.

La simulación en Simulink de MATLAB ha sido fundamental para el diseño y análisis del sistema fotovoltaico. A través de la simulación, se pudo predecir el comportamiento del sistema bajo diversas condiciones operativas y ambientales, lo que permitió identificar la configuración óptima de los convertidores Boost y controladores MPPT. Además, la simulación proporcionó información valiosa sobre la respuesta dinámica del sistema, permitiendo visualizar cómo los arreglos fotovoltaicos y los convertidores se ajustan ante variaciones rápidas en la irradiancia y la temperatura. Esto es de gran importancia, ya que los sistemas fotovoltaicos reales operan en entornos sujetos a fluctuaciones climáticas continuas, y el análisis basado en simulación ofrece un modelo predictivo fiable para evaluar su desempeño en diferentes escenarios.

La simulación también permitió identificar los picos iniciales en el voltaje de los arreglos al momento de iniciar la operación del sistema, lo cual es característico del método P&O utilizado en los controladores MPPT. Estos picos son seguidos por una estabilización en el voltaje, lo que demuestra que el sistema logra ajustarse rápidamente al MPP bajo diferentes condiciones climáticas. Este tipo de observaciones serían difíciles de obtener sin una simulación detallada, lo que destaca la importancia de herramientas como Simulink de MATLAB en el proceso de diseño y análisis de sistemas fotovoltaicos.

La hipótesis planteada ha sido validada a través de la simulación, demostrando que un sistema fotovoltaico de 2 MW, diseñado con convertidores Boost y controladores MPPT adecuadamente dimensionados, puede alcanzar una alta eficiencia y una operación estable bajo condiciones variables de irradiancia y temperatura. Además, la simulación en MATLAB no solo permitió identificar la configuración óptima del sistema, sino que también proporcionó una plataforma

para predecir su comportamiento en condiciones reales, destacando su utilidad en el diseño y optimización de sistemas fotovoltaicos.

3.12 Recomendaciones:

El diseño y modelado del sistema fotovoltaico de 2 MW en Simulink de MATLAB, basado en dos arreglos fotovoltaicos de 1.5 MW y 500 kW conectados a un bus DC común de 1000 V mediante convertidores Boost y controladores MPPT, ha demostrado ser una solución eficiente para maximizar la generación de energía bajo condiciones variables de irradiancia y temperatura. No obstante, se plantean las siguientes recomendaciones para futuras investigaciones y desarrollos más avanzados en este campo.

En primer lugar, se recomienda implementar este diseño en sistemas de mayor capacidad, como plantas fotovoltaicas de 10 MW o más, con el fin de analizar el comportamiento del sistema a gran escala. La estructura modular del sistema actual, con dos arreglos independientes conectados a través de convertidores Boost y controladores MPPT, es fácilmente escalable y puede adaptarse a sistemas más grandes, lo que permitiría verificar si los resultados obtenidos en simulación también se mantienen en escenarios de mayor demanda energética.

Además, se sugiere evaluar el rendimiento del sistema utilizando otros algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), como el Incremento de Conductancia (IncCond) o técnicas basadas en inteligencia artificial. Aunque el método Perturbar y Observar (P&O) ha demostrado ser efectivo, la aplicación de algoritmos alternativos podría ofrecer una mayor rapidez y precisión en la adaptación del sistema a variaciones climáticas más extremas.

Por último, se recomienda realizar pruebas experimentales en sistemas reales, a fin de comparar los resultados obtenidos en la simulación con datos de campo y validar el modelo en condiciones operativas reales. Esta validación proporcionaría una visión más completa de la viabilidad del sistema en escenarios reales, permitiendo a los diseñadores tomar decisiones más informadas para futuras implementaciones de sistemas fotovoltaicos de gran escala. El proyecto ofrece un diseño sólido y eficiente para la optimización de sistemas fotovoltaicos, pero su escalabilidad y validación experimental deben ser exploradas en estudios futuros para garantizar su aplicabilidad en plantas solares de mayor envergadura.

REFERENCIAS:

- Amich, F. M.-C., & Cerrada, A. G. (s. f.). DISEÑO Y PRUEBA DE UN CONVERTIDOR REDUCTOR Y SU CONTROL PARA POSTERIOR FABRICACIÓN DE UN CONVERTIDOR DE POTENCIA CC-CC (ELEVADOR+REDUCTOR).
- Brañas, I. G. (s. f.). DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE ORGANIZACIÓN, ADMINISTRACIÓN DE EMPRESAS Y ESTADÍSTICA E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES.
- Bueno, P., & Full Professor, J. C. (2021). Contribution to the technological development of grid-scale photovoltaic systems to improve the stability of the electrical power system (Contribución al desarrollo tecnológico de los sistemas fotovoltaicos de escala de red para la mejora de la estabilidad del sistema eléctrico de potencia). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29469.64484>
- Bustos-Márquez, L. F., Sepúlveda-Mora, S. B., Guevara-Ibarra, D., & Medina-Delgado, B. (2023). Controlador de carga MPPT con método de estimación del estado de carga basado en conteo de amperios hora y voltaje a circuito abierto. *Ingeniería*, 28(2), e18722. <https://doi.org/10.14483/23448393.18722>
- Farhat, M., Barambones, O., Ramos, J. A., Duran, E., & Andujar, J. M. (2015). Diseño e Implementación de un Sistema de Control estable basado en Lógica Borrosa para optimizar el rendimiento de un sistema de Generación Fotovoltaico. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 12(4), 476-487. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2015.07.006>
- Fong, M. Á. A., Castillo, Ó. C., Rivas, J. J. R., & González, R. O. (2017). MODELADO Y CONTROL DE UN CONVERTIDOR BOOST EN DCM EMPLEADO EN UN SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA TRABAJAR EN MODO RED Y EN MODO ISLA. 39(128).
- Fotovoltaico-libre.pdf. (s. f.). Recuperado 1 de septiembre de 2024, de https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/34552388/fotovoltaico-libre.pdf?1409149757=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3Dconectados_a_la_red.pdf&Expires=1725237478&Signature=SyskB5aUKCv25u7vzqbSoPJpXIiZGwu22UY7hfIHxWKODkwqN4Vt3lXDr rReCkND4lxzzv4rHER7yIyo~4~eIYyBobYqJD9rKbcSKFwxal2TNQIB25n8m6QP~Talj KAXPNLRLyJ0C-XN7qoUlseIT-ckUHX67TrcuqNA-rP67VX7D9Q1uORUqbgo2P9lzoJnf0DTGBNgPmVsg1PRc3RC~d5EMOGhFquOAOm JAx8tjchEux5WisjvfYPmuR3tzxInKNvwL2qdeBe0V9oR0WzLpfy-TyqWApRHN7oxgG4A4pwxGEjtxnmE4UOlQBSc2ns6kaLD-xxpApchnUYQcpW5Q__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA
- García, A., & Isaac, I. (2014). *Redes de Distribución en Corriente Continua: Estado del arte y modelado*.

- Güiza-Suárez, L., Monsalve, J. C., Rodas, Cifuentes-Guerrero, J. A., & González, J. P. (2019). Energías renovables no convencionales y cambio climático: Un análisis para Colombia. Editorial Universidad del Rosario.
- Hassaine, L. (s. f.). Implementación de un Control Digital de Potencia Activa y Reactiva para Inversores. Aplicación a Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Red.
- Isaza, R. A. H. (s. f.). CARLOS ANDRES TORRES.
- Jiménez, G., Bressan, M., & Giraldo, F. (s. f.). Fernando Andrés Álvarez López.
- Marcano, P. (2023). Capítulo 7: Educación en Línea una mirada al Futuro (pp. 134-153).
- Melzar Ismael de León Moro.pdf. (s. f.). Recuperado 31 de agosto de 2024, de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/19070/1/Melzar%20Ismael%20de%20Le%C3%B3n%20Moro.pdf>
- Mier Quiroga, L., & Enríquez, J. (2010). Modelado de Inversores Senoidales Basados en Convertidores cd-cd.
- Mikati, M., Santos, M., & Armenta, C. (2012). Modelado y Simulación de un Sistema Conjunto de Energía Solar y Eólica para Analizar su Dependencia de la Red Eléctrica. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI, 9(3), 267-281. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2012.05.010>
- Namoune, A., Taleb, R., & Benzidane, M. R. (s. f.). Design and simulation of integrated spiral inductor a boost converter for photovoltaic application.
- Novoa, A. A. Q. (s. f.). DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE INVERSOR FOTOVOLTAICO DE BAJO COSTO.
- Object, object. (s. f.). Proyecto energía solar fotovoltaica: Diagnóstico, perspectivas y oportunidades en el marco de la política energética en las zni. Recuperado 1 de septiembre de 2024, de <https://core.ac.uk/reader/556225790>
- Poveda, B. L. L. (s. f.). INCIDENCIA DEL CAMBIO DE LA MATRIZ ENERGÉTICA EN EMPRESAS PROVEEDORAS DE SERVICIOS DE INSTALACIÓN DE ACOMETIDAS Y MEDIDORES EN EL SECTOR ELÉCTRICO Y UNA PROPUESTA ESTRATÉGICA. CASO: ENERGYWHOLE CÍA. LTDA.
- Proyectos. (s. f.). Recuperado 13 de septiembre de 2024, de <https://www.gransolar.ec/es/projects.html>
- Puig, P., & Jofra, M. (s. f.). 2 Energía Solar Fotovoltaica.
- Ramírez, B., & Ortiz, L. (s. f.). Detección e Identificación de Fallas de Sensado.

Velasco, G. F., & Cabrera, E. (s. f.). Generación solar fotovoltaica dentro del esquema de generación distribuida para la provincia de Imbabura.

Vera-Dávila, A. G., Delgado-Ariza, J. C., & Sepúlveda-Mora, S. B. (2018). Validación del modelo matemático de un panel solar empleando la herramienta Simulink de Matlab. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 8(2), 343-356.
<https://doi.org/10.19053/20278306.v8.n2.2018.7972>

ANEXOS:

Anexo 1. Arreglo fotovoltaico.

Anexo 2. Características técnicas del módulo fotovoltaico

Anexo 3. Características técnicas del convertidor DC-DC

Anexo 4. Características técnicas del transformador