

Eficiencia de los sistemas fotovoltaicos y sus perturbaciones en el SEP

Efficiency of photovoltaic systems and their disturbances in the SEP

José Vicencio Bautista-Sánchez

jose.bautista@utelvt.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-3358-1908>

Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas, Ecuador

RESUMEN

En esta investigación se propone analizar los efectos de la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos y las perturbaciones generadas por estos al ingreso de la red eléctrica. La metodología aplicada fue de carácter cuantitativa con enfoque experimental ya que mediante el uso de buscadores académicos de alto nivel, se fundamentó la parte teórica y referencial de esta investigación, mientras que la metodología experimental se aplicó mediante el uso del software MATLAB/Simulink, en el que se realizó una simulación cuya finalidad fue interpretar como se originan valores de voltaje y potencia en los sistemas antes de ser inyectados al SEP, aplicando el método cuantitativo y cualitativo se pudo realizar el análisis de los valores y curvas arrojadas por el Simulink. En relación con los resultados obtenidos tras la simulación realizada en el software, en la que se adiciono un filtro de potencia pasivo paso bajo en el sistema fotovoltaico, se presentó una reducción de 4% de las corrientes armónicas en comparación con los valores iniciales. Como conclusión de la investigación se puede indicar que los sistemas fotovoltaicos son muy eficientes en ámbitos energéticos ya que promueven el potencial de energías verdes a nivel mundial, combatiendo contra el cambio climático y reduciendo las emisiones de CO₂ que son producidas por fuentes de energía no convencionales, otra conclusión arrojada de la investigación da a comprender que la aplicación de elementos de compensación permiten que los sistemas fotovoltaicos tengan un nivel más alto de utilidad y eficiencia.

Palabras claves: Compensación, distorsión, filtro paso bajo, inversor, sistema fotovoltaico.

ABSTRACT

In this research, it is proposed to analyze the effects of the efficiency of photovoltaic systems and the disturbances generated by them at the entrance of the electrical network. The methodology applied was of a quantitative nature with an experimental approach since, through the use of high-level academic search engines, the theoretical and referential part of this research was based, while the experimental methodology was applied through the use of MATLAB/Simulink software, in which a simulation was carried out whose purpose was to interpret how voltage and power values originate in the systems before being injected into the SEP, applying the quantitative and qualitative method, it was possible to carry out the analysis of the values and curves thrown by Simulink. In relation to the results obtained after the simulation carried out in the software, in which a passive low-pass power filter was added in the photovoltaic system, a reduction of 4% of the harmonic currents was presented in comparison with the initial values. As a conclusion of the investigation, it can be indicated that photovoltaic systems are very efficient in energy fields since they promote the potential of green energies worldwide, fighting against climate change and reducing CO₂ emissions that are produced by non-conventional energy sources. , another conclusion drawn from the research suggests that the application of compensation elements allows photovoltaic systems to have a higher level of utility and efficiency.

Keywords: Compensation, distortion, low pass filter, inverter, photovoltaic system

INTRODUCCIÓN

El hombre ha utilizado de diferentes formas la energía según las necesidades y disponibilidades de cada momento y lugar. En un principio las energías renovables eran utilizadas en el diario vivir, por lo que fueron consideradas como la base energética del desarrollo humano, sin embargo, con la aparición de los recursos fósiles, se dio un cese a las energías renovables [1].

Dando paso a la explotación del petróleo y en conjunto a la generación de energía eléctrica por medio de combustión, lo que ha presentado efectos positivos en relación con el desarrollo humano y negativos con relación al impacto ambiental.

En vista de los problemas causados al ambiente, países en vía de desarrollo y desarrollados realizan continuos esfuerzos en un intento de mejorar la eficiencia energética y la utilización de la energía renovable con el fin de reducir el consumo de recursos fósiles, planteando proyectos de generación mediante recursos renovable tales como generación eólica, hidroeléctrica, geotérmica, mareomotriz y solar, siendo esta última la más popular y utilizada gracias a la facilidad de uso del recurso aplicado para generación eléctrica [2][3].

La energía solar al igual que el resto de las energías renovables, proporcionan energía limpia y segura, presentando beneficios sociales como la creación de empleo y sobre todo cuidado del medio ambiente [4], a nivel mundial se ha producido un incremento constante de la potencia fotovoltaica instalada en muchos países [5]. La eficiencia energética que

proporciona la energía solar ayuda a reducir el consumo de energía proporcionada por la red eléctrica y en algunos casos sustituirla por completo, muchos países de Latinoamérica y Europa han optado por implantar esta nueva tecnología como fuente principal de generación eléctrica por los múltiples beneficios que brinda esta fuente de energía renovable.

La implementación y la explotación de los Sistemas fotovoltaicos (SFV) han puesto en evidencia sus efectos en la calidad de energía, siendo así que en los sistemas fotovoltaicos autónomos (SFVA) la calidad de la energía depende únicamente del sistema que se tiene instalado, pero cabe recalcar que en sistemas fotovoltaicos conectados a la red el inversor de puede generar perturbaciones tales como armónicos que podrían ingresar en la red eléctrica provocando un mal funcionamiento de cargas y la reducción de su vida útil [6].

Existen varios métodos de compensación para perturbaciones generadas por paneles solares, entre las que podemos mencionar, tenemos banco de capacitores, compensador PRES, compensación estática, y los filtros de potencia activa y pasiva, que nos ayudan en la reducción de los armónicos.

Para la utilización efectiva y eficiente de estos métodos, se cuenta en la actualidad con herramientas útiles para determinar si los cálculos y sistemas a implementar son efectivos comprobados mediante simulaciones, la cuales determinan las variaciones y efectividad de los sistemas de compensación [4].

El presente tema de investigación está enfocado en un aspecto de innovación enriquecedora gracias a la utilización de energías denominadas limpias para generar energía eléctrica, con la finalidad de ser inyectarla al SEP, permitiendo tener fuentes de generación amigables con el ambiente y sistemas eléctricos de respaldo, pero tomando en cuenta las perturbaciones que estas pueden generar al ingresar al sistema eléctrico con relación a la calidad del suministro. La investigación presente está estructurada por una introducción, base teórica, trabajos relacionados, metodología, resultados y conclusiones.

Bases teóricas

En los últimos años el desarrollo de la tecnología está enfocado en la creación de fuentes de generación eléctrica totalmente renovables tales como los sistemas fotovoltaicos que realizan su función transformando la irradiación del sol en electricidad, contribuyendo con el medio ambiente, el desarrollo sostenible y el desarrollo al empleo local, los sistemas fotovoltaicos son una fuente de energía inagotable que no contamina ni emite gases de efecto invernadero por lo que no aporta con el calentamiento global, demostrando ser una de las tecnologías renovables más eficiente en la lucha contra el cambio climático [7]. La energía solar es un recurso inagotable ya que el sol está disponible en todo el mundo y se adapta a los ciclos naturales por lo cual se denomina renovable, por dichos recursos se ha implementado paneles solares transformando de manera directa la luz solar en electricidad empleando una tecnología basada en el efecto fotovoltaico, que permite el progreso de las presente generaciones sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones [8].

La energía obtenida a través de estos paneles fotovoltaicos es utilizada para múltiples funciones, las cuales podemos observar en la Figura 1 [9].

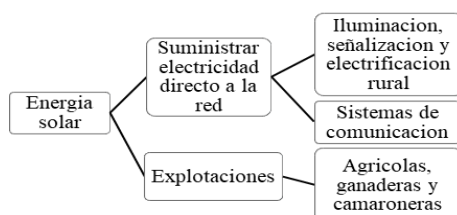


Figura 1. Aplicaciones de la energía solar [9].

La energía solar fotovoltaica es una de las fuentes renovables más potenciadas a nivel mundial, por sus múltiples recursos y beneficios que se obtiene al instalar un sistema de estos, no obstante, al momento de ser conectados a la red, estos generan perturbaciones en las magnitudes fundamentales de un sistema eléctrico, incumpliendo con normas y parámetros que regulan la calidad de energía eléctrica.

Los elementos más conocidos que producen perturbaciones en el sistema son los componentes convertidores de potencia, componentes de núcleo magnético, inversores de tensión y corriente, entre otros, estos dispositivos pueden causar grandes distorsiones en la red produciendo pérdidas en el sistema, reducción de la vida útil de los dispositivos e interferencias con sistemas de comunicación que estén muy cerca de las redes eléctricas [10], debido a ello se destacan una serie de perturbaciones que se muestran en la Figura 2.

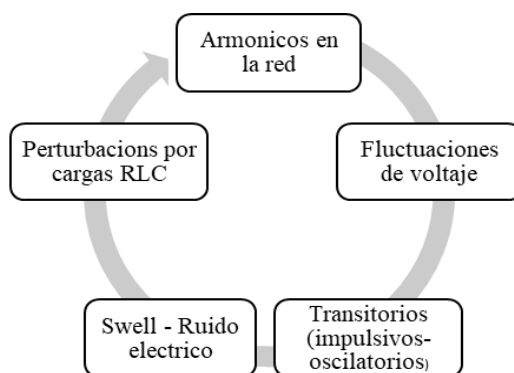


Figura 2. Perturbaciones en sistemas fotovoltaicos [10].

Debido a estos tipos de perturbaciones, también se han generado diferentes métodos para disminuir en un cierto porcentaje las perturbaciones al momento de ser inyectados al SEP. Uno de los métodos presentados en la base teórica de este estudio es el compensador PRES (resonante proporcional), su objetivo es obtener una baja distorsión armónica en la corriente en el sistema fotovoltaico que conecta al SEP [11]. El filtro de potencia activa y pasivo es otros métodos de compensación el cual permite que la reducción de armónicos de orden superior e inferior que genera el inversor manteniendo un rango tolerable [12][13].

La instalación de un banco de capacitores cuya función es compensar de energía reactiva a la red es otro de los métodos de compensación importante para los sistemas de generación alternativo junto con la compensación estática Var o (SVC), mimo que este encarga de regular y controlar voltaje reduciendo las pérdidas y oscilaciones de potencia activa [14].

La comprobación de cableado es también considerada un método de mitigación y este consiste en la inspección de las conexiones entre los diferentes equipos y así evitar distorsiones por ruido eléctrico [2]. La optimización de las cargas en el circuito también nos ayuda evitando sobretensiones en el SEP [7].

El método mitigación de perturbaciones basado en un sistema neuro difuso adaptativo (ANFIS) tiene la función de detectar, identificar y eliminar defectos/fallas electromagnéticas en un sistema fotovoltaico (PV) [15].

El método de compensación con Inversores de multinivel, son ampliamente utilizados en sistemas fotovoltaicos (PV) por su alta eficiencia, corrientes de fuga reducidas y niveles reducidos de EMI, la cuales son perturbaciones electromagnéticas que conducen al envejecimiento de los equipos de potencia [16].

Para finalizar con los métodos de mitigación tenemos la técnica PWM, utilizado para mitigar la distorsión armónica en el sistema conectado a la red, incluidos los inversores fotovoltaicos (PV), las turbinas eólicas y de agua [17]. Y como ultimo método de compensación analizado se presentan los filtros sintonizados los que cumplen la función de evitar la circulación de las corrientes de armónico por el sistema y reducir la distorsión de la tensión [18].

Trabajos relacionados

Dentro del área de investigación propuesta se consideran notables aquellos trabajos internacionales y nacionales que propusieron un análisis de la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos y de los que plantearon o utilizaron elementos y sistemas que permiten la mitigación de las perturbaciones presentadas en estos sistemas al ser inyectados al SEP. Esta investigación se apoyó en las distintas plataformas de búsquedas tales como: Scopus, IEE Explore, AMC y Google Académico, los estudios recopilados fueron obtenidos mediante el motor de búsqueda de tema principal. En los párrafos siguientes se presenta las investigaciones que influyeron de manera significativa en el desarrollo de la presente investigación.

Como primer estudio de análisis se presenta la investigación aplicada por Piyadanai Pachanapan en el año 2019 en Tailandia, la que se denominó "El control de sistemas de techo fotovoltaicos conectados a la red a gran escala para evitar el cargo por factor de potencia", en el que se planteó como objetivo corregir el factor de potencia de los sistemas fotovoltaicos conectados a gran escala a la red eléctrica con la finalidad de generar un ahorro en las facturas, para lo que utilizó el metodología cualitativa puesto que realiza un modelo matemático con cálculos de flujo de carga de barrido de tiempo en el software DlgSILENT PowerFactory. Los resultados de la simulación muestran que la compensación de la potencia reactiva mediante convertidor con interfaz fotovoltaica, con algoritmo de control inteligente, puede mejorar el factor de potencia en el PCC de forma efectiva, donde concluye que este algoritmo inteligente funciona de forma positiva, sin necesidad de instalar dispositivos de compensación.

El estudio mencionado en el párrafo anterior se relaciona con el presente tema de investigación, debido a que detalla la arquitectura del FV conectado a la red de distribución y emplea modelos matemáticos junto a simulaciones de los circuitos para comprobar que el algoritmo estructurado permite el mejoramiento del factor de potencia.

Se presenta como segunda investigación el tema "Local Power Control by LV distributed PV for Feeder Power Factor Correction and Overvoltage Mitigation" desarrollado por Muhammad Rashid y Andrew M Knight en el año 2020 en Canadá; empleó una metodología descriptiva sobre la degradación del factor de potencia y la sobretensión de los alimentadores de tipo monofásico y de forma radial para zonas rurales, con el objetivo de proponer algoritmos de control de potencia reactiva para mitigar la degradación del factor de potencia. Los resultados se basan en tres métricas simples: regulación del voltaje del alimentador, el factor de potencia del alimentador y la inyección de energía del PV; concluye que los problemas de sobretensión ocurren cuando la demanda de carga es baja y la generación fotovoltaica es alta en cambio si la demanda de carga como la generación fotovoltaica son altas, el factor de potencia del alimentador se degrada severamente, pudiéndose solucionar estas problemáticas con el algoritmo de control local propuesto [19].

La investigación mencionada en el párrafo anterior se relaciona con el estudio actual puesto que explica el comportamiento del sistema fotovoltaico en la red de baja tensión rural y proporciona información sobre los métodos populares para la mitigación de sobrevoltaje causado por el PV, ya que es una perturbación que afecta la calidad de la red eléctrica.

Un tercer caso de estudio aplicado por Seema Agrawal, Sunil Vaishnav, Ajit y Rk Somani en el año 2020 titulado "Filtro de potencia activo para la mitigación de armónicos de los problemas de calidad de la energía en el sistema de generación fotovoltaica", tiene por objetivo minimizar la contaminación armónica total existente en la corriente de suministro debido a la carga electrónica de potencia. Señala que la contaminación armónica de corriente total, se compensa utilizando un filtro de potencia activa de derivación de filtro dinámico. La simulación del sistema fotovoltaico y el estudio del algoritmo MPPT se han realizado con la ayuda del modelo matemático de la matriz fotovoltaica. En los resultados la fuente de corriente tiene un nivel de armónicos de 40.41% con 18.42 amperios de altitud antes de la compensación, con la corriente de mitigación de

armónicos, los armónicos se reducen al 2.40% con un nivel de 19.72 y se concluye que la corriente de origen se reduce a menos del 5% y la potencia activa se mejora mediante el filtrado armónico utilizando SAPF y la disminución de la potencia reactiva genera un mejor factor de potencia [20].

El estudio mencionado se relaciona con el presente tema de investigación puesto que ayudo a verificar, por medio de su filtro activo, que se pueden mitigar los armónicos presentados en el sistema y este tipo de filtro es el que se va a implementar en el modelo matemático y en la simulación de Matlab del presente trabajo de investigación, donde se comprobara los beneficios de usas este filtro [21].

El cuarto estudio fue aplicado por Huibo Guoying, Chun Wang y Ziwei Xu en el año 2019 el cual se denominó "Reactive Power Optimization of Power Grid with Photovoltaic Generation Base don Improved Particle Swarm Optimization", Este documentode investigación cualitativa tiene como objetivo considerar la operación económica de la red de distribución con la inversión adecuada de equipos de potencia reactiva y establece un modelo matemático para la optimización de la potencia reactiva de la red de distribución penetrada con generación fotovoltaica. Se adopta un algoritmo PSO (Power Swarm Optimation) donde los resultados muestran que el sistema de sitribucion conectado a la red con el sistema FV puede reducir la inversión de dispositivos de compensación y conckue que el algoritmo puede reducir efectivamente la pérdida del sistema, mejorar la economía de operación del sistema y la calidad de la potencia [22].

La investigación presentada se vincula con las perturbaciones en el sistema de potencia puesto que establece un modelo matemático de guía para crear un algoritmo que mejore la calidad del sistema de distribución acoplado con un sistema de generación fotovoltaica, demuestra la factibilidad del circuito realizando simulaciones en Matlab y verificando que el sistema si tenga reducción de pérdidas y se encuentre en los rangos aceptables.

Como quinto elemento de análisis se presenta la investigación documental realizada por los autores Valencia Elmer, Angulo Ronny y Vera Carlos en el año 2022 denominada "Una Revisión del Suministro de Energía Renovable y las Tecnologías de Eficiencia Energética", en la cual se describe el posicionamiento a nivel mundial de las diferentes tecnologías de suministro de energía renovable: solar, eólica, hidroeléctrica y geotérmica; se mencionan investigaciones relevantes que se han expuesto de cada una de estas nuevas fuentes de generación con su resultado principal. Contiene información sobre datos de fuentes de generación renovable en Ecuador y concluyen en que es indispensable disminuir el uso de combustibles fósiles en la generación de energía y el sector de transporte mediante el aumento de generación por medio fe fuentes renovables y hacerlas económicamente sustentables [23].

La relación que presenta el trabajo descrito en el párrafo anterior con la presente investigación está enfocada en el potencial energético que tiene el Ecuador con relación al alto nivel de radiación solar y el gran potencial fotovoltaico que este conlleva. Dado que el mercado de generación eléctrica mediante el uso del recurso solar es pequeño, debido a que existen pocos proyectos fotovoltaicos distribuidos en el país, con poca capacidad de generación, se presenta una gran oportunidad para que se desarrollen proyectos de mayor potencial de generación por medio de paneles fotovoltaicos tomando en cuenta la calidad de suministro al SEP ya que este factor garantiza la eficiencia de estos sistemas.

En el sexto estudio aplicado por Mihai Andrei en el año 2018 en Rumania se denomina "Diseño de control de voltaje para sistemas fotovoltaicos conectados a la red", tiene por objetivo resaltar la capacidad del sistema de control para eliminar los cambios rápidos de voltaje que ocurren debido a las rápidas variaciones de irradiación solar y eventos de la red de distribución; este artículo proporciona un método de control de voltaje para sistemas PV conectados al nivel de la red de distribución de voltaje medio. El sistema de control propuesto es compatible con los bucles bloqueados de fase (PLL) incluye

tres modos de operación: factor de potencia unitario, regulación de potencia reactiva y regulación de tensión. Las simulaciones se realizan en la herramienta Matlab/Simulink para validar el sistema de control propuesto. En los resultados se señala que el funcionamiento del punto de ajuste del voltaje durante un intervalo de tiempo inferior a 0.5 segundos elimina los cambios rápidos de voltaje, convirtiéndolos en transitorios con pocos efectos en la calidad de la energía y concluye que el modo de funcionamiento del punto de consigna de voltaje proporciona un rendimiento satisfactorio e implica el uso de un controlador único PI [24].

El estudio mencionado en el párrafo anterior se relaciona con el presente tema de investigación, debido a que gracias a la obtención de datos por medio de su sistema de control se constató la regulación de flujo de potencia reactiva y regulación de tensión lo que permite tener modelos referenciales que contrarresten las desventajas creadas por los rápidos cambios de voltaje por la irradiación solar variante.

Se incluye el séptimo documento desarrollado en el año 2018 titulado como "Estudio de la Eficiencia de los Sistemas Fotovoltaicos y su Impacto Socio Económico en la Zona Rural del Cantón Chone, Manabí, Ecuador" desarrollado por Alcira Vélez. El objetivo de su investigación se centra en la factibilidad sobre la utilización de la tecnología fotovoltaica para garantizar la electrificación rural asegurando la calidad del servicio eléctrico en zonas aisladas; la metodología utilizada es sobre todo descriptiva con técnica de campo, ya que se visitó a cuatro comunidades que estaban a diferentes distancias de la red eléctrica. El resultado de su investigación muestra que los costos por la implementación del sistema fotovoltaico autónomo son elevados, pero al mismo tiempo es menor que los costos de extensión de la línea eléctrica hacia los sitios de estudio y concluye que no resulta factible desde el punto de vista técnico-económico la extensión de la línea eléctrica y que existen otras soluciones que económicamente pueden emprenderse mediante el aprovechamiento de las fuentes renovables de energía en las zonas aisladas [25].

La investigación expuesta se relaciona con la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos en el Ecuador, donde demuestra la factibilidad del aprovechamiento de la energía solar para la generación de electricidad en zonas donde un sistema FV es la vía que más beneficios a largo plazo va a generar: ahorrativo, renovable y no hay grandes pérdidas de potencia [25].

Como octavo estudio se presenta "Análisis de Calidad de Energía Eléctrica en Sistemas Fotovoltaicos" desarrolla por Barreto Marlon y Guananga Oswaldo, que, tiene por objetivo, identificar los efectos producidos en la calidad de energía por la incorporación de sistemas fotovoltaicos teniendo en cuenta las normas y regulaciones vigentes en el Ecuador. Esta investigación desarrollada en el año 2022 establece un análisis de la variación de calidad de la energía de la red convencional cuando se conecta una mini-central de generación fotovoltaica. Para conectar el sistema solar a la red eléctrica trabajaron con un inversor on-grid y su unidad de comunicación que permite el monitoreo remoto en tiempo real del sistema mediante una comunicación de red Ethernet. Para la obtención de datos se utilizó analizadores de energía de la familia FLUKE modelo 475 que adquirió información de la red eléctrica, mientras el modelo 1735 se conectó a la salida del FV. El estudio determinó que cuando el sistema FV no genera potencia, se comporta como una carga e induce problemas en la calidad de energía [10]. Este proyecto mencionado se vincula al estudio actual en que estudia las perturbaciones que ocurren en los sistemas fotovoltaicos que se conectan a la red de distribución, mostrándonos también la arquitectura del modelo FV y los componentes que se necesitan para monitorear la calidad de la red. Mostrando ejemplos de las perturbaciones más comunes y el funcionamiento del sistema [10].

Metodología y desarrollo

Aspectos generales

El desarrollo de la presente investigación estuvo centrado en un estudio de tipo experimental, debido a que se realizó mediante la utilización del software MATLAB/Simulink, de un sistema de un arreglo fotovoltaico con la finalidad de interpretar como se originan los valores de voltaje y potencia en estos sistemas antes de ser inyectados al SEP, al igual que permitió conocer los distintos tipos de elementos que permiten compensar o rectificar los parámetros de calidad que se requieren antes del ingreso al sistema eléctrico.

Otra de las técnicas utilizadas fue la recolección de datos bibliográficos aplicada mediante la utilización de buscadores académicos de alto nivel, tales como Scopus, IEEE Explore, AMC, Scielo y Google Académico, la misma que fundamentó la parte teórica y referencial de la investigación, basado en la búsqueda de artículos relacionados con Eficiencia de los sistemas fotovoltaicos y sus perturbaciones en el SEP, publicados en estos buscadores, posterior a esta búsqueda se realizó una revisión de contenido seleccionado de los temas con mayor similitud al tema de estudio, entre los que esta; Eficiencia en sistemas fotovoltaicos, Perturbaciones en arreglos fotovoltaicos, mitigación de perturbaciones, calidad de la energía eléctrica. A si mismo se aplicó el método cuantitativo y cualitativo, ya que se procedió con la descripción y el cálculo del sistema de compensación seleccionado para utilizar en la simulación, a más de analizar los valores y curvas arrojados por el Simulink, así como la determinación de los beneficios ambiental y económico que se obtiene al implementar estos sistemas de generación y sus elementos de compensación.

Sistema fotovoltaico

La investigación presente fue desarrollada a partir de un modelo realizado en la herramienta Simulink del software Matlab, en el cual se planteó un sistema eléctrico fotovoltaico conectado a la red tal como se observa en la figura 3, con la finalidad de suministrar una potencia máxima de **50 kWp** al SEP, esta potencia generada inicialmente presenta una gran distorsión de onda debido a la presencia de armónicos los cuales se generan por procesos de conmutación que realiza el inversor, dado a ello, se propuso implementar un filtro para reducir cuya distorsión.

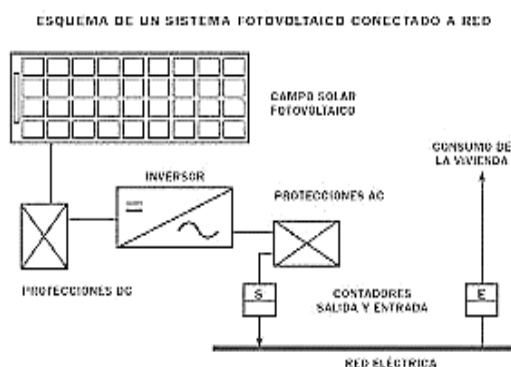


Figura 3. Esquema de un sistema fotovoltaico conectado a red.

Previo a la obtención del cálculo para implementar el filtro, se determinó el diagrama eléctrico y se lo trasladó a Simulink tal como se muestra en la figura 4, utilizando herramientas propias del software y adicional de Simscape, donde se utilizaron implementos como: PV Array, Inversor, constantes, Scope (dispositivo de medición) y cargas RLC.

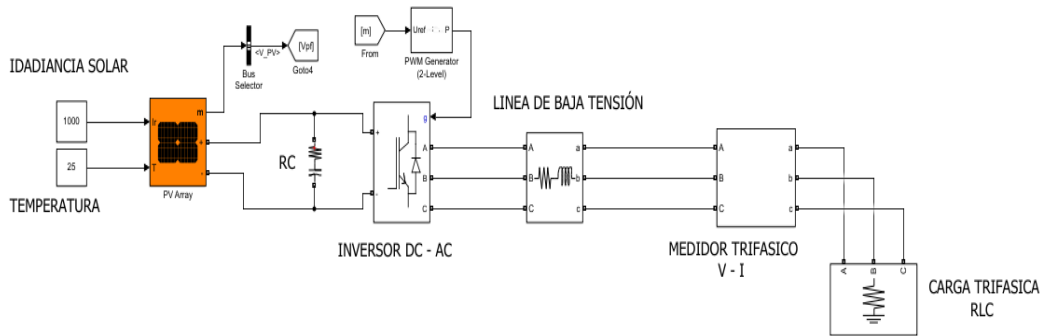


Figura 4. Diagrama del sistema fotovoltaico en el software Simulink.

Partiendo de la idea que queremos instalar un campo solar de generación, el cual será colocado sobre una estructura fija, se realizó un previo estudio acerca de los tipos de células que conforman los para así tener una idea de aquellos que resultan más eficientes.

De acuerdo con las características de cada módulo fotovoltaico, el dimensionamiento del sistema se ejecutó a partir de módulos monocristalinos SunPower de 400 W, la Tabla 1 indica las principales características del módulo.

Tabla 1. Características de un módulo monocristalino SunPower 400W.

Módulo monocristalino SunPower de 400 W	
Potencia nominal	400 W
Tolerancia de potencia	+5/0 %
Eficiencia	22.6 %
Tensión nominal (V_{mpp})	45 V DC
Intensidad de cortocircuito	6.58 A
Max tensión del sistema	1000 V IEC
Fusible de serie máx.	20 A

Fuente: Autores

Una vez determinado el módulo a utilizar, se conocieron las características base para hallar el inversor, el cual será el inversor trifásico CSI-50KTL-GI con una potencia de 75 kWp, la decisión de colocar este inversor es clara, podemos mantener en operativo el 90% de la instalación y obtener beneficios de la venta de la generación, la Tabla 2 indica las principales características del inversor trifásico.

Tabla 2. Características del inversor trifásico CSI-50KTL-GI.

Inversor trifásico CSI-50KTL-GI	
Potencia máx.	75 kWp
Tención de entrada DC máx.	1000 V
Rango de tensión de operación de entrada DC	200 – 800 V
Numero de MPPT	4
Corriente de operación	114 A. (28.5 por MPPT)
Potencia de salida nominal	50 kW
Tensión de salida	380/400 V AC
Distorsión armónica total de corriente	3%
Frecuencia de operación	50 Hz – 60 Hz
Factor de potencia	0.8 ajustable

Fuente: Autores

Según los datos obtenidos, tomados a partir de la configuración de conexiones y características de los módulos fotovoltaicos y el inversor llegamos a determinar las características del sistema tal como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Características del sistema fotovoltaico.

Campo solar fijo	
Numero de módulos	125
Potencia por modulo	400 W
Potencia activa total	50 kW
Módulos por ramal	5
Numero de ramales	25
Tensión de salida	380/400 V AC
Factor de potencia	0.8 ajustable

Fuente: Autores

Para la simulación se determinó que los paneles solares a través de su radiancia captada de aproximadamente 1000 W/m^2 y temperatura de 25°C (medida de laboratorio), almacenan energía eléctrica en forma de corriente continua a 45 voltios DC, luego este voltaje se convierte en AC mediante un inversor de DC-AC con una salida de 380 V, adicionalmente este realiza funciones tales como, limitar la corriente de salida, mantiene la tensión de salida y frecuencia dentro de los rangos permitidos.

Después de observar el comportamiento de las ondas y determinada una distorsión **THD** de un 7 %, se colocó un filtro pasivo paso bajo en el sistema fotovoltaico, con la finalidad de atenuar las frecuencias más altas así mismo permitirles el paso a las frecuencias más bajas que a su vez también ayuda a eliminar el séptimo armónico producto de la perturbación presente.

Lo primero que se realizó para diseñar el filtro fue identificar las anomalías presentes, luego se procedió a escoger el equipo para eliminar dicha anomalía, observando el comportamiento de la onda de salida, en la cual el comité de transmisión y distribución "IEEE Power and Energy Society" determina qué; hay que tener en cuenta que no pueden presentarse armónicos que sobrepasen el 3% de distorsión armónica total **THD** [26].

En este tipo de filtros hay una frecuencia en la cual se produce un fenómeno de resonancia eléctrica, momento en el que la reactancia inductiva (parte imaginaria de la impedancia de la bobina) es igual a la reactancia capacitiva (parte imaginaria del condensador).

$$X_L = X_C \quad (1)$$

Esto provoca que la impedancia del circuito sea mínima, y solo se tenga en cuenta la resistencia óhmica del circuito, Una vez obtenido los datos principales de la simulación mostrados en la Tabla 4 el modelaje del filtro se realizó de la siguiente manera:

Tabla 4. Datos principales de la simulación.

<i>U</i>	Voltaje del sistema	380	<i>V</i>
<i>f</i>	Frecuencia del sistema	60	<i>Hz</i>
<i>R</i>	Resistencia del sistema	1	<i>kΩ</i>
<i>π</i>	pi	3.14159	
<i>f_c</i>	Frecuencia de resonancia	8	<i>kHZ</i>

Fuente: Autores

El filtro a utilizar es de tipo RC donde R es la resistencia del sistema y C es el valor de la capacitancia a determinar para crear cuya resonancia a partir de la siguiente formula:

$$C = \frac{1}{2\pi f * U} \quad (2)$$

Reemplazamos datos:

$$C = \frac{1}{2\pi * 60 * 380} = 6.98 \mu F$$

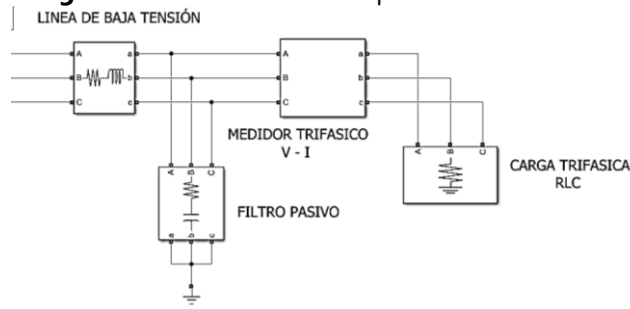
El valor para que el filtro paso bajo inyecte una resonancia de

8 kHZ de frecuencia con la cual mitigara la distorsión es de

$$R = 1 \text{ k}\Omega \text{ y } C = 6.98 \mu F$$

En este caso la conexión del filtro es en paralelo tal como observamos en la Figura 6 por lo cual se logró atenuar la distorsión armónica del 7% al 3%, gracias a ello se puede concluir que la perturbación que se determinó presente en el sistema fue reducida y equilibrada a rangos permitidos por el comité de transmisión y distribución "IEEE Power and Energy Society".

Figura 6. Conexión del filtro pasivo en el sistema.



RESULTADOS

Una vez realizada la simulación y ejecutada la debida aplicación del filtro se pudo obtener los siguientes resultados. La Figura 7 demuestra las respectivas ondas de tensión y corriente, antes de la aplicación del filtro pasivo, en la cual al compararla con la Figura 8 podemos diferenciar la cantidad de distorsión armónica reducida gracias a la aplicación del filtro.

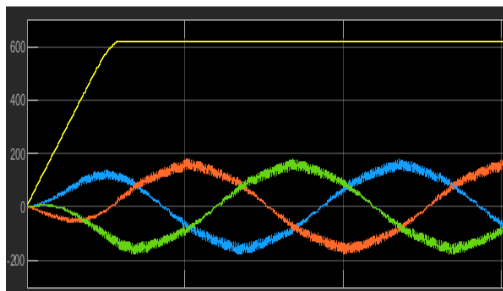


Figura 7. Onda sinusoidal de tensión y corriente sin filtro pasivo en el sistema.

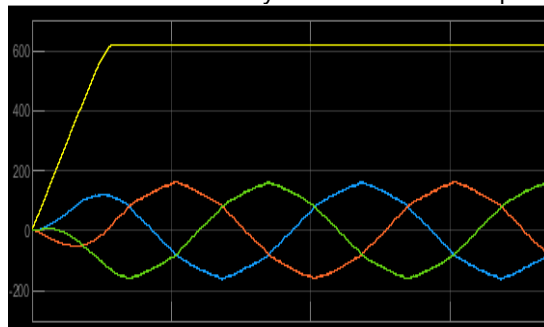


Figura 8. Onda sinusoidal de tensión y corriente con filtro pasivo en el sistema.

Cabe recalcar que tanto la corriente y la tención representan la potencia del sistema, y de igual forma esta distorsión la afecta, es por ello, que se realizó una representación de la potencia en cada una de las fases y su comportamiento después de implementar el filtro tal y como visualizamos en las Figuras 9 y 10.

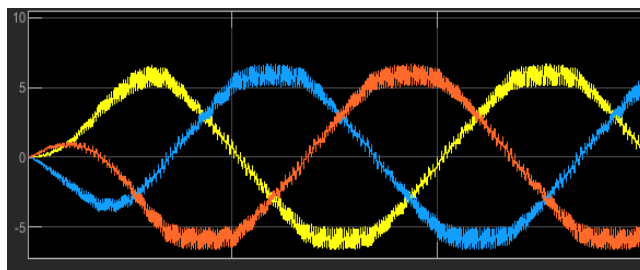


Figura 9. Onda sinusoidal de potencia en cada una de las fases sin filtro pasivo en el sistema.

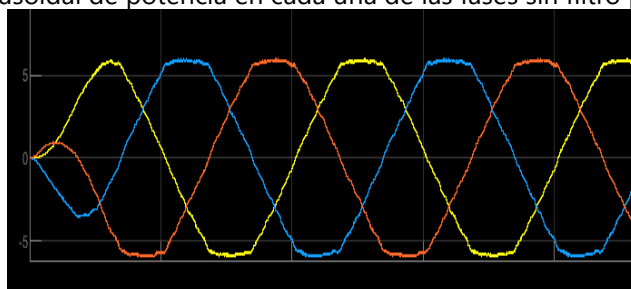


Figura 10. Onda sinusoidal de potencia en cada una de las fases con filtro pasivo en el sistema.

Tal y como se observó en las ondas anteriormente representadas, podemos describir que el objetivo planteado se cumplió de manera efectiva, logrando reducir aquellas perturbaciones generadas por el inversor.

Conclusiones

En relación a las diferentes perturbaciones se logró concluir que las distorsiones armónicas son muy frecuentes en sistemas fotovoltaicos las cuales son provocadas por dispositivos electrónicos que conforman parte del circuito para la conversión de energía eléctrica y ser conectada al SEP.

Tras los conocimientos obtenidos en las aulas sobre métodos de mitigación, de perturbaciones presentadas en el suministro eléctrico en el SEP se optó por utilizar un filtro de pasa baja para la disminución de los armónicos y cumplir con las magnitudes de voltaje, corriente y frecuencia como lo dicta el CENACE.

Como resultado de la simulación realizada en el software MATLAB/Simulink se logró comprobar la distorsión de onda armónica provocada por los inversores DC/AC y posterior su mitigación con la implementación de un filtro de potencia pasivo pasa baja, obteniendo una reduciendo en un 4% las corrientes armónicas, antes de ser inyectadas al SEP. Finalmente, tras varias investigaciones realizadas podemos llegar a la conclusión de que los sistemas fotovoltaicos son muy eficientes en ámbitos energéticos, promoviendo el potencial de energías verdes a nivel mundial, combatiendo contra el cambio climático y reduciendo las emisiones de CO₂ que son producidas por fuentes de energía no convencionales.

REFERENCIAS

- [1] H. Zhang, L. Shan, J. Ren, B. Cheng, and H. Zhang, "Study on photovoltaic grid-connected Inverter control system," *International conference on power electronics and drive systems (PEDS)*, pp. 1–3, 2009, DOI: 10.1109/PEDS.2009.5385769.
- [2] H. Cornejo, "Sistema solar fotovoltaico de conexión a red en el centro materno infantil de la universidad de Piura," Tesis de pregrado, Universidad de Piura, Piura, 2013. [Online]. Available: <https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/1762>
- [3] F. Linares, "Efecto de la temperatura en paneles solares fotovoltaicos y tecnologías de refrigeración para el mejoramiento de la eficiencia," Trabajo de grado, Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín, 2020.
- [4] D. Masa Bote, "Contribución a la integración de sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica: Recurso solar y predicción de generación," Tesis de grado, Escuela Técnica superior de ingenieros de telecomunicación, 2014.
- [5] L. Hassaine, "Implementación de un control digital de potencia activa y reactiva para Inversores. Aplicación a sistemas fotovoltaicos conectados a red," Tesis doctoral, Universidad Carlos III, Madrid, 2010.
- [6] C. Caballero, L. Cortez, G. Muñoz, and J. Castañeda, "Filtro activo de potencia para compensar la distorsión armónica de un sistema fotovoltaico autónomo," 2016. [Online]. Available: www.ecorfan.org/bolivia
- [7] L. Chao and Z. Xunjun, "Analysis and solution of voltage overvoltage problem in grid connection of distributed photovoltaic system," in *China International conference on electricity distribution*, 2018, pp. 1–4. DOI: 10.1109/CICED.2018.8592177.
- [8] S. Torres, F. Jurado, D. Granados, and Luna Lozano, "Eficiencia en paneles solares," *Revista del diseño innovativo eficiencia en paneles solares*, vol. 2, pp. 1–13, Mar. 2018, [Online]. Available: www.ecorfan.org/taiwan
- [9] B. Hachim, D. Dahlioui, and A. Barhdadi, "Electrification of rural and arid areas by solar energy applications case study: Boumhaout village in south of Morocco," in *Proceedings of 2018 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference, IRSEC 2018*, 2018, pp. 1–4. DOI: 10.1109/IRSEC.2018.8702978.
- [10] D. Domínguez and B. Salvatierra, "Análisis de calidad de energía eléctrica en sistemas fotovoltaicos conectados a la red," Trabajo de titulación, Universidad politécnica salesiana, Cuenca, 2016.
- [11] U. Yadav and A. Gupta, "Current harmonic mitigation in grid tied solar photovoltaic system via PRES," in *IEEE International conference on recent advances and innovations in engineering, ICRAIE - Proceeding*, Dec. 2020, pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICRAIE51050.2020.9358290.
- [12] B. N. Rao, P. Krishna, and V. Yarlagadda, "Mitigation of Photovoltaic Solar System Harmonics using Shunt Active Power Filter," in *Proceedings of the 4th International Conference on Computing Methodologies and Communication, ICCMC 2020*, Mar. 2020, pp. 566–571. DOI: 10.1109/ICCMC48092.2020.ICCMC-000105.
- [13] B. Tana and S. Varela, "Mitigación de armónicos basado en el control predictivo de corriente mediante un filtro de potencia activo conectado al sistema de distribución," Universidad politécnica Salesiana, Quito, 2022.

- [14] S. Cheng, N. Zhang, X. Cui, and Z. Fu, "Research on Reactive Compensation technology based on SVC-APF," *IEEE Advanced information technology, electronic and automation control conference (IAEAC)*, vol. 3, pp. 1–5, 2018, DOI: 10.1109/IAEAC.2018.8577530.
- [15] M. M. Mansouri, S. Hadjeri, and M. Brahami, "New method of detection, identification, and elimination of photovoltaic system faults in real time based on the adaptive Neuro-fuzzy system," *IEEE J Photovolt*, vol. 11, no. 3, pp. 1–9, May 2021, DOI: 10.1109/JPHOTOV.2021.3051145.
- [16] M. Aly, E. Ahmed, and M. Shoyama, "Ageing mitigation control method for power devices in multilevel inverters in standalone PV systems," *IEEE International conference Electrical Engineering Department, Aswan University, Aswan*, pp. 1–5, 2014, DOI: 10.1109/ECCE.2018.8557707.
- [17] S. Dalai, R. Sahu, and C. Tripathy, "Harmonic mitigation in single - phase grid connected photovoltaic system using SPWM inverter," *International Conference on Computational Intelligence for Smart Power System and Sustainable Energy*, pp. 1–6, 2020, DOI: 10.1109/CISPSSE49931.2020.9212280.
- [18] I. Pérez, "Cálculo de parámetros de filtros pasivos de armónicos," *Ingeniería Energética - Aplicación de la computación*, vol. 33, pp. 1–10, 2012.
- [19] F. de L. Senior and J. Cohen, "A practical approach to power factor definitions: transmission losses, reactive power compensation, and machine utilization," *IEEE Power Engineering society general meeting*, pp. 1–7, 2006, DOI: 10.1109/PES.2006.1709175.
- [20] M. Rashid and A. M. Knight, "Local power control by LV distributed PV for feeder power factor correction and overvoltage mitigation," Calgary, 2020. DOI: 10.1109/ICPS48389.2020.9176748.
- [21] S. I. Salcu, A. M. Iuoras, N. C. Szekely, M. Bojan, C. G. Rusu, and G. I. Fasola, "Active Power factor compensation based on a geometric phase control scheme," in *2020 IEEE 11th International symposium on power electronics for distributed generation systems*, Sep. 2020, pp. 1–6. DOI: 10.1109/PEDG48541.2020.9244319.
- [22] H. Liu *et al.*, "Reactive Power Optimization of Power Grid with Photovoltaic Generation Based on Improved Particle Swarm Optimization," in *2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Asia, ISGT 2019*, 2019, pp. 1536–1540. DOI: 10.1109/ISGT-Asia.2019.8880890.
- [23] E. L. v. Bautista, R. J. Â. Guerrero, J. M. F. Bone, C. J. v. Lozano, I. A. A. Cheres, and T. J. O. Arboleda, "Una revisión del suministro de energía renovable y las tecnologías de eficiencia energética," *Polo del conocimiento*, vol. 7, no. 4, pp. 2012–2046, 2022, DOI: 10.23857/pc.v7i4.3934.
- [24] A. Mihai, "Voltage control design for grid connected photovoltaic systems," *ECAI International conference*, vol. 10, pp. 1–4, 2018, DOI: 10.1109/ECAI.2018.8679077.
- [25] A. Vélez, "Estudio de la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos y su impacto socio económico en la zona rural del Cantón Chone, Manabí, Ecuador," *Revista de investigaciones, medioambiente y tecnología: RIEMAT*, vol. 3, pp. 1–7, 2018.
- [26] M. Halpin and R. Burch, "IEEE Recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems," *IEEE Power and energy society transmission and distribution committee*, pp. 1–29, 2014, DOI: 10.1109/IEEEESTD.2014.6826459.
- [27] Chere-Quiñónez, B. F., & Vélez-Quiroz, A. M. (2021). Evaluación de modelos de micro red eléctrica y su gestión energética. Análisis documental. *Domino de las Ciencias*, 7(6), 949-960.
- [28] Erazo Ávila, L. A. ., & Guamán Segarra, J. C. . (2022). Análisis de la eficiencia energética en los sistemas de distribución de bajo voltaje por medio de la reducción de armónicos. *Sapienza: International Journal of Interdisciplinary Studies*, 3(6), 154–163. <https://doi.org/10.51798/sijis.v3i6.505>