

Respuesta del sistema fotovoltaico a la presencia de Equipos con elementos no lineales

Santiago Rogelio Pérez Mora ¹; Héctor Josue Chancay Vera ²; Cecilia Alejandra Armijos Cortez³, José Luis Jiménez Álvarez⁴

^{1,3,4} Instituto Superior Universitario Central Técnico, Quito-Ecuador; ²Instituto Superior Universitario Bolivariano de Tecnología, Guayaquil - Ecuador, sperez@istct.edu.ec, hjchancay@itb.edu.ec, ca.armijos24@gmail.com, jluis_2280@yahoo.com

Resumen

Este artículo presenta la incidencia de equipos que despliegan equipos no lineales elementos en el sistema fotovoltaico de tercera fase, que está conectado a la red de distribución eléctrica. Se ha diferenciado recientemente en condiciones (sin cargas eléctricas). RL - RC variantes de carga que han sido aumento en las instalaciones residenciales.

Principios de funcionamiento y componentes relacionados con la conexión a la red y a la tercera fase se muestra el sistema fotovoltaico (SFT); cada uno de la tercera fase La etapa de composición del sistema fotovoltaico se centra en la "eficiencia del inversor" (corriente continua DC - corriente alterna AC), con cargas conectadas en serie (estrella configuración), a nivel de tensión de funcionamiento.

La eficiencia del inversor se muestra en los resultados que se modifica por la carga tipo de parámetros ambientales. Estos están presentes como la irradiación y nubosidad.

Palabras clave: Sistema fotovoltaico, elementos no lineales, inversor trifásico.

Abstract

This article presents the equipment incidence that deploys non-linear elements in the third-phase photovoltaic system, which is connected to the electrical distribution network. It has been recently differentiated in initial conditions (without electrical charges). RL – RC load variants that have been increased in residential installations.

The operating principles and components related to the connection to the grid and to the third phase Photovoltaic System (SFT) are shown; each of third phase Photovoltaic System composition stage is focusing on "inverter efficiency" (direct current DC – alternating current AC), with loads connected in series (star configuration), at the operating voltage level.

The efficiency of inverter is shown in the results which it is modified by the load and environmental parameters type. These are present such as irradiation and cloudiness.

Keywords: Photovoltaic system, non-linear elements, three-phase inverter.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la investigación se centra en la respuesta del Sistema Fotovoltaico en el presencia de equipos con elementos no lineales.

Se verifica el comportamiento del Sistema Fotovoltaico, enfocándose en la eficiencia del inversor trifásico. Durante este proceso de transformación, la energía se pierde en forma de calor, gestionando entonces una eficiencia del 80%, lo que significa que el 20% de la energía generado por los paneles se pierde. (Hurtado, 2019) Con el desarrollo de un sistema trifásico de generación de electricidad renovable

(generación fotovoltaica) se busca suministrar cargas (inductancias - capacitancias), con elementos no lineales, conectados simétricamente. Al analizar el problema, es obligatorio mencionar sus causas, como el voltaje deformación, que son distorsiones en la red causadas por las cargas (presencia de armónicos), el inversor industrial (DC-AC) también considerado como una carga no lineal elementos.

Sistema Fotovoltaico.

Entre los sistemas para la generación de energía eléctrica renovable mediante energía solar, la irradiación es de tres tipos:

- Sistema térmico
- Sistema termodinámico
- Sistema fotovoltaico

Este último sistema es uno de los más difundidos y utilizados en Ecuador. (Ainfar, 2018)

La energía solar fotovoltaica es aquella que transforma directamente la luz solar (irradiación) en energía eléctrica, basada principalmente en la tecnología de efecto fotovoltaico. Cuando la radiación solar

golpea una superficie de una célula fotovoltaica, crea una diferencia de potencial entre los dos superficies, lo que hace que los electrones salten de una posición a otra, generando así corriente eléctrica. (Lata y Sánchez, 2020, pg. 38)

Entre los componentes del sistema fotovoltaico se encuentran:

Inversor

Una parte fundamental de un sistema de generación fotovoltaica es la corriente continua (DC) a convertidor de corriente alterna (CA), más conocido como "INVERTER", que se utiliza para conectar los paneles fotovoltaicos con las cargas y/o a la red eléctrica. (Gonzales, 2019)

Su funcionamiento se basa en la conmutación sincronizada de interruptores unidireccionales (BJT, MOSFET o IGBT), buscando proporcionar voltajes de salida que disminuyan el armónico contenido (Verduzco, 2020).

"El principio básico consiste en convertir la corriente continua con la tensión nominal de doce o veinticuatro voltios de corriente continua (12-24 Vcc) a una onda con frecuencia de 60 Hertz (60 Hz) y una tensión de 400 voltios de corriente alterna" (Editores S.R.L, 2017).

A su vez, los inversores se clasifican según dos parámetros dados:

- Potencia de salida nominal.
- Tipo de onda: cuadrada, seno, sinusoidal modificado (cuasi-seno).

De los paneles solares, se derivan señales cuadradas que hacen entrar muchas modificaciones en las cargas que alimenta el inversor. La selección de un buen inversor reducirá el contenido armónico y tendrá "una forma mucho más suave lo más cerca posible de la sinusoidal. Una de las principales ventajas de un inversor con más de una etapa o nivel es la reducción de las perturbaciones en la carga tanto en tensión como en corriente". (Cortés, Gómez, Betancur, Carvajal, & Guerrero, 2020). Este inversor fotovoltaico (CO3208-1N), sin transformador, ha sido especialmente diseñado para suministrar energía a la red trifásica. El inversor trifásico CO3208-1N tiene una pantalla gráfica que permite la visualización de valores de energía, potencia de corriente y parámetros operativos del sistema fotovoltaico. (Lucas-Nülle LabSoft, 2018)

Panel Fotovoltaico

Un panel fotovoltaico es un conjunto de placas rectangulares, que consisten en células fotovoltaicas cubierta por un marco de vidrio anodizado y aluminio. Mediante el uso de semiconductores, energía solar (radiación) se convierte en energía eléctrica de corriente continua. (Grijalva & Vélez, 2020)

El emulador de la planta de energía solar Lucas-Nülle (CO3208-1P) consiste en un DC controlado fuente de alimentación. Un algoritmo de control especial asegura que la respuesta de corriente y tensión

es análoga a la de los módulos fotovoltaicos. Al interactuar con el inversor fotovoltaico, que se comporta como un inversor real en una instalación real. (Lucas-Nülle LabSoft, 2018)

Elementos no lineales.

Estos son aquellos cuya impedancia cambia con el voltaje aplicado. El cambio impedancia significa que la corriente consumida por la carga no lineal no será sinusoidal incluso cuando está conectado a una tensión sinusoidal. (Electricidad aplicada, 2020)

Estas corrientes no sinusoidales contienen corrientes armónicas que interactúan con el impedancia del sistema de distribución de energía para crear distorsión de voltaje que puede afectar

tanto el equipo del sistema de distribución como las cargas conectadas a él. (Cruceira, 2019)

Hoy en día, el uso de varios sistemas electrónicos en la red ha llevado a la tensión y distorsiones actuales. Esto conducirá a una calidad de energía insuficiente, que es un muy factor importante para la operación exitosa de varias cargas. La calidad de la energía puede ser entendido como el bajo nivel de interferencia en la red, es decir, mínimo armónico distorsión, cambio de tensión, interrupción y sobretensión en el suministro, recepción o uso del poder. (Esparza, Mata, & Castañeda, 2006).

Las cargas industriales, comerciales y residenciales utilizan una gran cantidad de controles basados en equipo electrónico de potencia, y el equipo electrónico de potencia es la fuente de armónica distorsión en la red.

Principales fuentes armónicas de emisión. Podemos establecer las siguientes 4 categorías (Esparza, Mata, & Castañeda, 2006):

1. Accionar dispositivos electrónicos (convertidores, rectificadores, etc.).
2. Dispositivos de producción de arco (hornos de arco, luz fluorescente, máquinas de soldadura, etc.).
3. Dispositivos ferromagnéticos (transformadores, motores de inducción, etc.)
4. Motores eléctricos que mueven cargas de par muy variable (laminadores, trituradoras, etc.)

2. METODOLOGÍA

Los equipos incluidos en la investigación son:

Comienza con la conexión de la red trifásica y la alimentación de 220V alimentación con la estación transformadora (200V / 400V), seguida de la trifásica transformador de regulación y el transformador de aislamiento (400V/400V). Está sistema de acumulación en el que interactúan con el sistema fotovoltaico, compuesto por el emulador de la central eléctrica y la transformación de CC a CA (el inversor trifásico).

El nivel de tensión a 450V (tensión de funcionamiento del inversor), se desarrolla en el CO32081N7 modulo con la input en sincronía con La trifásico abastecimiento red. Para verificar la eficiencia del inversor, se mide sin carga, para tomar la primera datos, y los datos de la placa se comparan

con los datos medidos. La irradiancia máxima simulado por el emulador de la planta de energía solar es 1000W/m² (100%).

Los datos se recogen al 100%, 75%, 50% y 25% de irradiancia, con el máximo (8) paneles activados del emulador de la central solar. 61 datos de tensión (V), corriente (A), potencia (W), frecuencia (F), porcentaje total de armónicos distorsionados (THD%) de cada línea con una frecuencia de 5 segundos durante 5 minutos a 60Hz fueron tomadas. El estado de la red de suministro se verifica, si es principalmente capacitivo o inductivo, los datos se recogen cuando la red es puramente capacitiva, en ese momento, la industria utiliza reactivos para que los capacitivos se inyecten en la red para compensar la potencia reactiva usado.

Una vez que los datos SFT se toman sin carga, activar la carga RL (carga resistiva variable y carga inductiva trifásica), manteniendo constante la carga resistiva y variando la carga inductiva, al terminar de enlazar la carga RC (carga resistiva variable y trifásica capacitivo carga), mantenimiento la resistivo cargar constante y variable la capacitivo cargar.

En ambos conexiones, 100% irradiación este mantenido.

Las cargas RL y RC se conectaron en la configuración de estrellas de serie, esta configuración se utilizó ya que el análisis se centra en la eficiencia del inversor y la conexión de las cargas no afectan al consumo de energía.

La investigación se realizó en las instalaciones de las "ENERGÍAS ALTERNATIVAS" laboratorio del curso de Electricidad del INSTITUTO SUPERIOR TECNOLÓGICO TÉCNICO CENTRAL (ISTCT).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos en estado inicial (tabla 4) se utilizan para determinar la eficiencia del inversor, y se toman de la alimentación de la red de distribución eléctrica y paneles fotovoltaicos al inversor trifásico CO3208-1N.

Al conectar el módulo inversor trifásico (CO3208-1N) a la red, el se reservó el equipo sin carga, obteniendo:

Eficiencia del Inversor

Al verificar la eficiencia del inversor, su inicial, teórico y práctico condiciones bajo condiciones de irradiación 100%, la diferencia del 2% se presenta por el la naturaleza de la red de distribución y la condición de que el inversor se carga y, siendo una carga, varía según la potencia consumida por el inversor.

Para calcular la eficiencia de conversión se utilizó la fórmula siguiente:

Corriente continua alimentada por el generador solar.

Se indica la variación de la eficiencia según el porcentaje de irradiación (figura 1) por la energía de corriente continua suministrada por el generador solar: cuanto menor sea el porcentaje de irradiación, cuanto menor sea la potencia suministrada por el generador solar.

$$\eta_p = P_{AC} \div P_{PC}$$

η_p = Eficiencia de conversión.

P_{AC} = Corriente alterna de potencia.

P_{PC} = Corriente continua alimentada por el generador solar.

Se indica la variación de la eficiencia según el porcentaje de irradiación (figura 1) por la energía de corriente continua suministrada por el generador solar: cuanto menor sea el porcentaje de irradiación, cuanto menor sea la potencia suministrada por el generador solar.

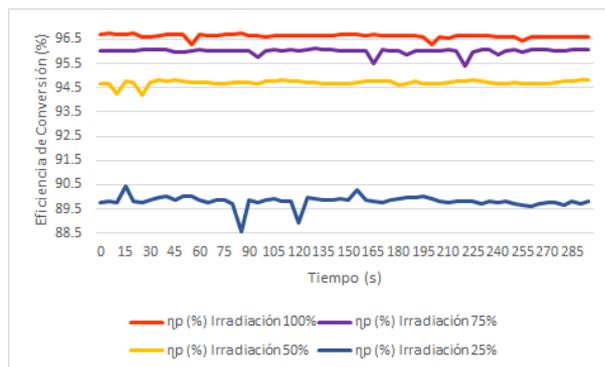


Figura 1 Eficiencia de conversión de inversores sin carga.

Fuente: (Armijos y Jiménez, 2021)

Los datos proporcionados por el inversor con carga RL registrada:

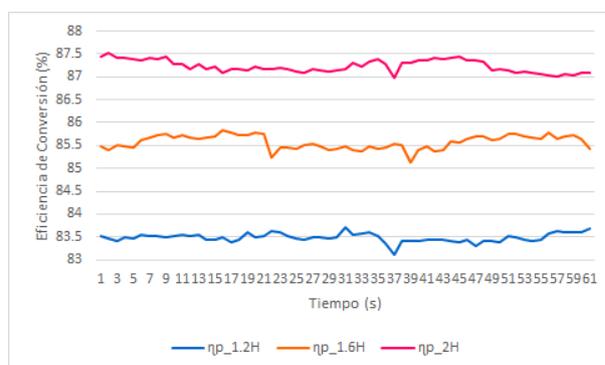


Figura 2 Eficiencia de conversión del inversor con carga RL.

Fuente: (Armijos y Jiménez, 2021)

En la curva la desviación de la eficiencia de conversión con respecto a su media es de 1,54% en promedio.

Se puede visualizar que la eficiencia del inversor aumentó mientras que la carga inductiva también aumento, la resistencia se mantuvo constante. Los datos calculados son los siguientes:

Por lo tanto, se puede decir que la carga RL es directamente proporcional a la eficiencia de conversión del inversor fotovoltaico, es decir, cuanto mayor sea la carga, mayor será la eficiencia. En el momento de tener una carga inductiva, la intensidad se retrasará con respecto a la tensión.

Datos proporcionados por el inversor con carga RC:

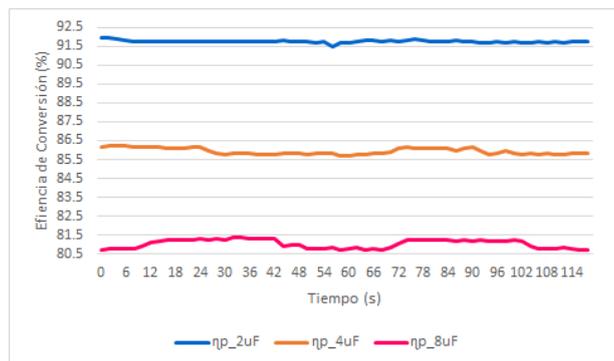


Figura 3: Eficiencia de conversión de inversores con carga RC. Fuente: (Armijos y Jiménez, 2021)

En la curva se puede visualizar que la desviación de la eficiencia de conversión con respecto a su media es de 4,40% en promedio.

Aquí se refleja que la eficiencia del inversor disminuye a medida que la carga capacitiva aumenta, por lo que tiene que:

Cuando hay una carga RC, será inversamente proporcional a la eficiencia de conversión del inversor fotovoltaico, es decir, cuanto mayor sea la carga, menor será la eficiencia y el al revés.

Variación de Tensión y Corriente

Visualizando la curva (Figura 4) se puede identificar que cuanto menor sea la carga inductiva, cuanto mayor sea la tensión.

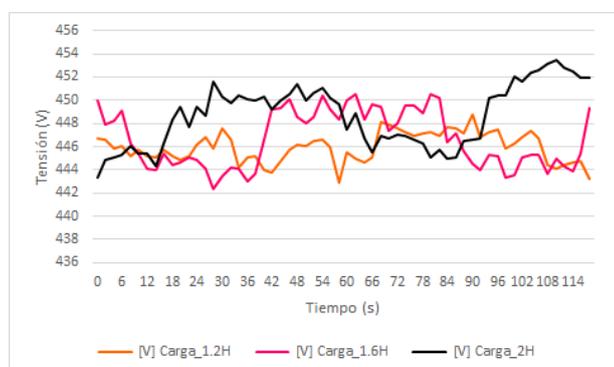


Figura 4: Variación de tensión con carga RL. Fuente: (Armijos y Jiménez, 2021)

En la Figura 5 la tensión es menor a medida que aumenta la carga.

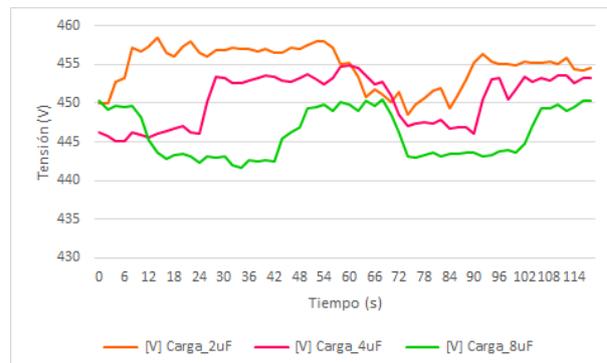


Figura 5: Variación de tensión con carga RC. Fuente: (Armijos y Jiménez, 2021)

Según Abate, S., McDermott, T., Rylander, M., Smith, J. (2015) Estas funciones describir cómo el inversor inteligente cambia su potencia de salida activa y reactiva en respuesta a los cambios de tensión.

Por ejemplo, la función volt-var ralentiza la tasa de inyección de potencia real para evitar sobretensiones en los puntos de interconexión. Función volt-var. (Abate, S., McDermott, T., Rylander, M., Smith, J. 2015).

A medida que el voltaje se eleva por encima de V_{reg} debido a un evento de potencia (como una caída de carga o un aumento en la salida activa fotovoltaica), el inversor tomará potencia reactiva (región inductiva) y de manera similar acercar el voltaje a V_{reg} . Si el voltaje cae por debajo de V_{reg} , el inversor proporciona energía reactiva, al igual que un banco de condensadores controlado por voltaje, elevando el tensión más cercana a V_{reg} .

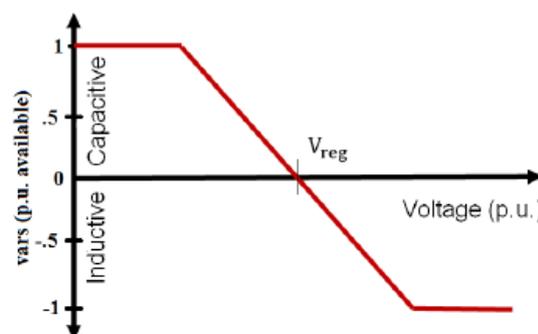


Figura 6: Curva de ajuste volt-var. Fuente: (Abate, S., McDermott, T., Rylander, M., Smith, J., 2015)

El siguiente gráfico muestra una desviación promedio de 0.026A

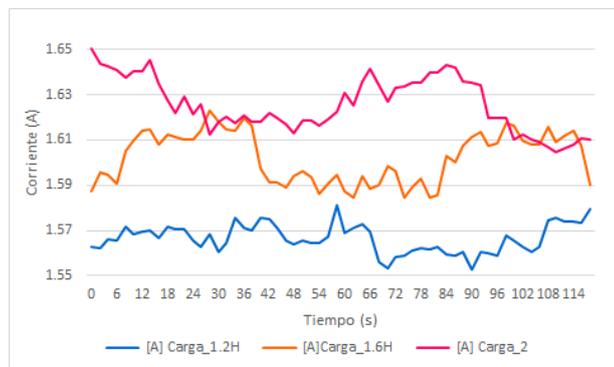


Figura 7: Variación de corriente con carga RL.
 Fuente: (Armijos y Jiménez, 2021)

Al igual que con la carga de RL, la variación de corriente no es considerable, pero hay una desviación superior a 0,072A en promedio.

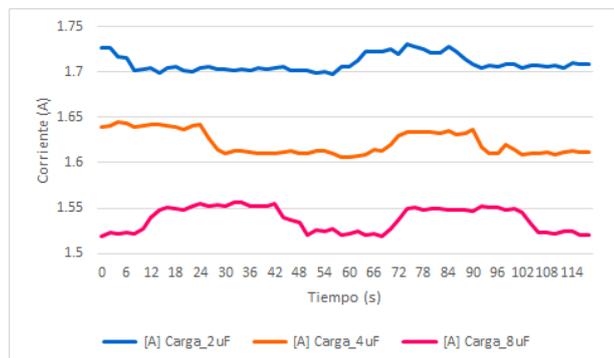


Figura: 66 / 2000 Variación de corriente con carga RC
 Fuente: (Armijos y Jiménez, 2021)

THD (DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL)

Evaluando la corriente, tenemos los siguientes datos, tomados sin carga para verificar el cantidad de armónicos que entran por la red de suministro:

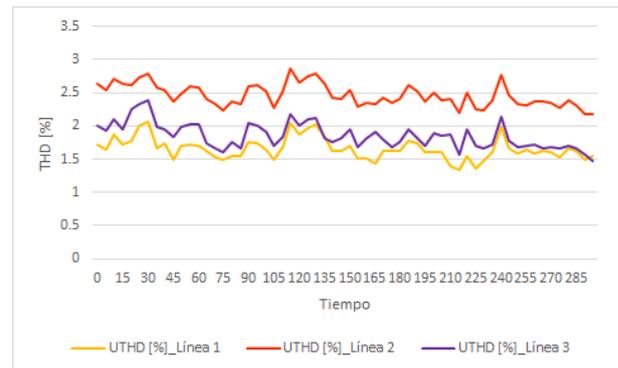


Figura 8: Porcentaje de THD en las líneas (equipos sin carga).
 Fuente: (Armijos y Jiménez, 2021)

El cuadro 8 muestra los datos sin carga (S/C) y con carga (RL-RC).

La variación de THD con carga de RC tiende a disminuir a medida que aumenta la carga capacitiva, a diferencia de la carga inductiva en la que no hay tendencia definida.

Cabe señalar que la distorsión armónica, cuando no hay carga en la línea 1, no tienen una alta variación, y las distorsiones tanto en RL como en RC permanecen dentro de un rango de -1%.

En la línea 1 la desviación THD con respecto a su media es de 0,14% en promedio.

En la línea 2 la desviación THD con respecto a su media es de 0,17% en promedio.

En la línea 3 la desviación THD con respecto a su media es de 0,17% en promedio.

Estas variaciones ocurren con y sin carga.

CONCLUSIONES

Cuando hay una carga inductiva hay una caída de tensión más alta y por lo tanto la tensión baja, mientras que si la carga es capacitiva hay una caída de tensión más baja y por lo tanto el voltaje se eleva, pero la investigación se basa en la eficiencia de el inversor, que actúa como un generador donde cuanto mayor es la inductancia, el mayor es la tensión y cuanto mayor es la capacitancia, menor es la tensión.

En el artículo, la eficiencia del inversor se evalúa con una energía solar emulador de planta como fuente DC y la conexión de red ISTCT. La eficiencia

se comparan para diferentes cargas, manteniendo la alimentación de CC suministrada por el generador solar. sin el uso de acumuladores de energía. En todos los casos es evidente que la eficiencia no fue inferior al 80%.

Los efectos nocivos debido al flujo de una distorsión en la onda fundamental (armónicos) son más representativos en los sistemas de distribución eléctrica, dependiendo del tipo de cargas, principalmente en electrónica de potencia y control sistemas.

A medida que la irradiación solar disminuye, se considera que hay una caída en el eficiencia del inversor y los paneles que afectan al nivel de tensión deseado si se trata de una carga RL o RC.

Las variaciones de tensión generan fallos en el equipo eléctrico (motores, transformadores, generadores, etc.) y cables de alimentación se sobrecalientan, acortando su vida útil y aumento significativo de la pérdida de energía.

Aunque la variación actual no es significativa tanto en cargas RL como en cargas RC, se puede verificar que la corriente es ligeramente superior cuando hay cargas de RC, en RL carga casi constante.

Es importante verificar el equipo antes de hacer una conexión híbrida, por lo que que los instrumentos a interferir pueden funcionar correctamente y no verse afectados por corrientes parásitas (armónicas).

El laboratorio de energía renovable no tiene la capacidad de conectar equipos con elementos no lineales como rectificadores, convertidores, arco hornos, máquinas de soldadura, entre otros, por esta razón los elementos que son se conectan con más frecuencia en los equipos electrónicos.

Siendo una manera sol-dependiente los datos en esta investigación fueron obtenidos considerando 100% de irradiación a los paneles solares, con el fin de tener datos más precisos, pero debe tenerse en cuenta que el clima en la ciudad de Quito, y en el sector del Inca, no es todo el tiempo en ese porcentaje.

Los inversores que se utilizan para conectarse a la red suelen requerir muy buena

parámetros, (tales como desconexión en caso de pérdida de la red, protecciones, estabilidad de la tensión de salida) por lo que el dispositivo debe seleccionarse correctamente.

El inversor no sólo tiene la función de conversión DC/AC, sino que también tiene el función de maximizar el rendimiento de la célula solar y proteger el sistema de fallos.

REFERENCIAS

- [1] Abate, S., McDermott, T., Rylander, M., Smith, J. (2015). Smart inverter settings for improving distribution feeder performance. 2015 IEEE Power and Energy Society Meeting 2015. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2015.7286560>.
- [2] Ainfar. (July 16, 2018). what are the most widely used renewable energy sources in our country? Retrieved from Ainfar: <https://ainfar.net/blog/cuales-las-fuentes-energiarenovables-mas-utilizadas-pais>
- [3] TecnoSol Blog. (August 26, 2016). Batteries for solar energy. Concepts and types of batteries. Solar energy batteries. Retrieved from Blog TecnoSol:
- [4] <https://tecnosolab.com/noticias/baterias-para-energia-solar-tipos/>
- [5] Cortés, C., Gómez, G., Betancur, F., Carvajal, S., & Guerrero, N. (2020). Experimental analysis of the performance of a solar photovoltaic system with centralized inverter and micro inverters: case study Manizales. *Revista Tecnológicas*, 47(23) 1-21. <https://doi.org/10.22430/22565337.1403>
- [6] Crucerira, E. (2019). Implementation of a solar photovoltaic generation system with grid integration [Engineering Thesis, Universidad Técnica del Norte]. Retrieved from Degree Work: <http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/10103/2/04%20MEL%20076%20RABAJO%20GRADO.pdf>
- [7] Department of Electrical Engineering. (September 2012). Design and evaluation of solar inverter for different power factor loads. *Energy and Power Engineering*. <http://dx.doi.org/10.4236/epe.2012.45042>

- [8] Editores S.R.L. (2017). Current inverters for photovoltaic systems. *Revista Ingeniería Eléctrica*, 326, 54-57. https://www.editorssrl.com.ar/sites/default/files/e326_estabilizadores_work_inversores_corriente.pdf
- [9] Esparza, M. Mata, A., & Castañeda, Antonio, A. (2006). Nonlinear loads, their impact on electrical installations and their solutions. *Conciencia Tecnológica*, (32), 0. [Date of Consultation March 27, 2021]. ISSN: 1405-5597. Available at: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94403211>
- [10] Gonzales, M. (2019). Smart inverters in solar photovoltaic energy systems.
- [11] *Universitarios Potosinos Journal*, 24-29. <http://www.uaslp.mx/ComunicacionSocial/Documents/Divulgacion/Revista/Dieciseis/universitarios%20potosinos%20238.pdf#page=26>
- [12] Grijalva, C., & Vélez, F. (2020). Study and Implementation of a Photovoltaic System Applied to Luminaires: Case Study Unidad Educativa Dr. Francisco Falquez Ampuero. [Degree Work, Universidad Politécnica Salesiana] Retrieved from Degree Work: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/186464/UPS-GT002920.pdf>
- [13] Hurtado, C. (February 21, 2019). Inverters. Retrieved from *Renewable Energies*: <https://quelepasaamicasa.com/energias-renovables/inversores/>
- [14] INVERSORA. (February 5, 2018). Inverter conversion efficiency. Retrieved from
- [15] INVERSORA. https://es.hfjnge.com/blog/inverter-conversion-efficiency_b94
- [16] Lata, M., & Sánchez, A. (October 12, 2020). Electrical power quality analysis of a basic hospital system [Degree work, Universidad de Cuenca]. Retrieved January 19, 2021.
- [17] Lucas-Nülle LabSoft. (2018). Inverter efficiency. Retrieved from LabSoft.
- [18] Lucas-Nülle. (2018). CO3208-1N Three-phase inverter. Retrieved from LabSoft.
- [19] Power Plants. (November 17, 2017). What is and how to detect a harmonic. Retrieved from *Power Plants*: <https://www.luzplantas.com/que-es-y-como-detectar-unarmonico/>
- [20] Pilco, D., & Jaramillo, J. (2008). Photovoltaic systems for lighting: panels. Retrieved from <https://www.utpl.edu.ec/jorgeluisjaramillo/wp-content/uploads/2010/06/renluxpaneles-fv.pdf>
- [21] Verduzco, J. (April 6, 2020). DC (12v) to AC (120v) inverter. Department of Biomedical Engineering, Universidad Politécnica del Bicentenario