



*Análisis de armónicos en la red eléctrica de la Universidad Técnica de Manabí:  
Impacto con sistemas fotovoltaicos conectados a red*

*Harmonic analysis in the electrical network of the Technical University of  
Manabí: Impact with grid-connected photovoltaic systems*

*Análise de harmónicos na rede elétrica da Universidade Técnica de Manabí:  
Impacto com sistemas fotovoltaicos ligados à rede*

Geovani Agustin Ferrin-Guillén <sup>I</sup>

[gferrin9667@utm.edu.ec](mailto:gferrin9667@utm.edu.ec)

<https://orcid.org/0000-0002-3307-7894>

Washington Colon Castillo-Jurado <sup>II</sup>

[washington.castillo@utm.edu.ec](mailto:washington.castillo@utm.edu.ec)

<https://orcid.org/0000-0002-7011-1131>

**Correspondencia:** [gferrin9667@utm.edu.ec](mailto:gferrin9667@utm.edu.ec)

Ciencias Técnicas y Aplicadas

Artículo de Investigación

\* **Recibido:** 09 de junio de 2024 \***Aceptado:** 25 de julio de 2024 \* **Publicado:** 12 de agosto de 2024

I. Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.

II. Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador.

## Resumen

La generación solar fotovoltaica en los últimos años viene ganando terreno sobre otros tipos de fuentes de energía gracias a que el contexto de crisis climática ha empujado a las autoridades a adoptar medidas que busquen mitigar parte de las consecuencias ambientales. Esto hace que la diversificación de la matriz energética sea una prioridad para la humanidad si quiere alcanzar los objetivos de sostenibilidad propuestos. Este estudio busca evidenciar la presencia de distorsión armónica en los sistemas fotovoltaicos que alimentan las facultades de Veterinaria y Agrícola localizadas en la extensión de Lodana de la UTM. Se llevó a cabo el análisis de armónicos con la conexión ininterrumpida del analizador de red PQ Box – 100 por periodos iguales a una semana para cada inversor y se determinó que los niveles de distorsión armónica presentes en la red no violan los límites establecidos por las normativas y estándares nacionales e internacionales.

**Palabras claves:** Micro red; Distorsión Armónica; Disturbios Eléctricos; Generación Distribuida.

## Abstract

In recent years, photovoltaic solar generation has been gaining ground over other types of energy sources thanks to the fact that the context of the climate crisis has pushed authorities to adopt measures that seek to mitigate part of the environmental consequences. This makes the diversification of the energy matrix a priority for humanity if it wants to achieve the proposed sustainability objectives. This study seeks to demonstrate the presence of harmonic distortion in the photovoltaic systems that feed the Veterinary and Agricultural faculties located in the Lodana extension of the UTM. The harmonic analysis was carried out with the uninterrupted connection of the PQ Box – 100 network analyzer for periods equal to one week for each inverter and it was determined that the levels of harmonic distortion present in the network do not violate the limits established by national and international regulations and standards.

**Keywords:** Micro grid; Harmonic Distortion; Electrical Disturbances; Distributed Generation.

## Resumo

Nos últimos anos, a geração solar fotovoltaica tem vindo a ganhar terreno em relação a outros tipos de fontes de energia graças ao facto de o contexto da crise climática ter levado as autoridades a adotar medidas que procuram mitigar parte das consequências ambientais. Isto torna a diversificação da matriz energética uma prioridade para a humanidade se quiser atingir os objetivos

de sustentabilidade propostos. Este estudo procura demonstrar a presença de distorção harmónica nos sistemas fotovoltaicos que alimentam as faculdades de Veterinária e Agrícola localizadas na extensão Lodana da UTM. A análise harmónica foi realizada com a ligação ininterrupta do analisador de rede PQ Box – 100 por períodos iguais a uma semana para cada inversor e determinou-se que os níveis de distorção harmónica presentes na rede não violam os limites estabelecidos pela regulamentação e normas nacionais e internacionais .

**Palavras-chave:** Micro-rede; Distorção Harmónica; Perturbações Eléctricas; Geração Distribuída.

## Introducción

### Presente

De acuerdo a datos proporcionados en (*World Energy Transitions Outlook 2023*, 2023) se evidencia que la expansión anual de la capacidad energética mundial ha venido desarrollándose desde el 2002 de una manera en que la capacidad proveniente de recursos renovables igualó la capacidad instalada que depende de los recursos no renovables en el año 2014 con una participación del 50% para ambas, y a partir de ese año ha superado la capacidad instalada que procede de recursos no renovables.

Para asegurar el suministro de la demanda eléctrica, la Universidad Técnica de Manabí apuesta por la diversificación en su matriz energética, impulsando propuestas sustentables aplicando conocimientos actuales en el sector eléctrico y de alto impacto que respondan a problemáticas locales. Entre estas se puede contar la implementación de energía solar fotovoltaica y eólica para alimentar determinadas cargas dentro del campus universitario a manera de Generación Distribuida (GD) (Mohamed Belrzaeg et al., 2023).

La GD, especialmente a través de sistemas fotovoltaicos, ha experimentado un notable crecimiento buscando la diversificación de la matriz energética. Sin embargo, esta integración de fuentes de recursos renovables plantea nuevos desafíos técnicos con la calidad del suministro eléctrico. Uno de los aspectos críticos es la presencia de armónicos en la red eléctrica, que pueden surgir como consecuencia de la operación de equipos electrónicos no lineales asociados a la generación distribuida como es el caso de los inversores (Zhao et al., 2022).

Un armónico se entiende como tensiones y/o corrientes presentes en un sistema eléctrico a un múltiplo de la frecuencia fundamental que se superponen produciendo la deformación de la onda

original (Plata, 2006). Su presencia provoca resonancias en serie y paralelo, el sobrecalentamiento en transformadores y banco de capacitores, entre otros, afectando la calidad de la energía suministrada, la exactitud en la lectura de los medidores y la respuesta de los elementos de protección. El contenido armónico está determinado por las amplitudes de los armónicos y por los ángulos de fase (Dghim et al., 2018).

Los términos que cuantifican el nivel de distorsión armónico en la corriente y tensión es la distorsión armónica total (THD) y la distorsión armónica individual (IHD) los cuales deben ser calculados en el Punto de Conexión común (PCC) (Zare Oskouei & Mohammadi-Ivatloo, 2020).

La presencia de armónicos generados por los inversores solares se encuentra principalmente en la corriente (Fortes et al., 2020), donde contribuyen factores como la variación estocástica de la irradiación solar incidente causada por efecto de las nubes o las horas crepusculares del día, el nivel de penetración (%) y la ubicación del sistema PV en la red (Anu & Fernandez, 2020; Vinayagam et al., 2019).

En una micro red doméstica individual se presenta un nivel de distorsión armónica superior y variaciones de tensión más pronunciadas cuando la instalación opera en modo isla y no conectada a red (Nomm et al., 2018). También si el PCC de un sistema con alta penetración fotovoltaica se encuentra a mayor distancia del transformador (Yaghoobi et al., 2019).

En diversos estudios se proponen técnicas como desconectar los módulos fotovoltaicos con un PLC durante bajos flujos de corriente y usar filtros pasivos o activos para mantener su conexión a la red (Gabr & Salem, 2018; Salem et al., 2022). Además, se recomienda aplicar filtros para controlar armónicos, como la compensación del flujo magnético, inyección armónica y filtros pasivos con PWM (Modulación por Ancho de Pulso) para una eliminación selectiva de armónicos, considerada una solución eficiente y económica (Al-duaij, 2015; Korlevska et al., 2022).

En este trabajo se propone un análisis armónico de la red eléctrica de la Universidad Técnica de Manabí en su extensión de Lodana, permitiendo comprender mejor los desafíos asociados a la generación distribuida mediante sistemas fotovoltaicos y proponer soluciones adecuadas para mejorar la calidad del suministro eléctrico.

## **Materiales y métodos**

La investigación se llevó a cabo mediante una revisión bibliográfica sobre los armónicos, su influencia en los sistemas eléctricos de potencia y las características del sistema fotovoltaico sujeto a estudio.

En este estudio se utiliza el analizador de red PQ Box – 100, proporcionado por la UTM, para realizar mediciones a la salida de los inversores del sistema fotovoltaico. El analizador de red se conecta a las tres líneas de fase, el neutro y la tierra para la medición de voltajes y corrientes.

*Recurso solar.* - En (Rodríguez-Gómez et al., 2022) se explica el comportamiento horario del consumo en la extensión de la UTM en Lodana como un consumo predominantemente diurno, coincidiendo con las actividades académicas y los periodos de mayor incidencia de la irradiación solar, que, de acuerdo a datos del Global Solar Atlas (GSA) del World Bank Group, tiene una irradiación solar de 2,253 kW-h/m<sup>2</sup> por día y 25° de temperatura promedio.

## **Procedimiento para la medición de armónicos**

Las mediciones se realizaron mediante la conexión continua del analizador en un periodo de una semana con intervalos de medición de 600 segundos. El analizador de red se conectó a cada inversor en las siguientes fechas:

- Inversor 1: miércoles 7 de febrero del 2024 al miércoles 14 de febrero del 2024
- Inversor 2: miércoles 17 de enero del 2024 al miércoles 24 de enero del 2024
- Inversor 3: miércoles 31 de enero del 2024 al miércoles 7 de febrero del 2024

## **Caracterización del sistema fotovoltaico**

Según datos obtenidos de (Intriago & Vinces, 2022) las principales características del sistema fotovoltaico son:

**Potencia instalada:** 69 kW

**Módulos fotovoltaicos:** 138 módulos TAI ENERGY 500 Wp y 96 celdas monocristalinas

**Inversores:** 3 inversores KSTAR 220 VAC a 32 kW

**Área:** 465 m<sup>2</sup>

**Inclinación:** 10°

**Horas solares activa promedio:** 4 horas

**Energía generada al día:** 276 kWh/día

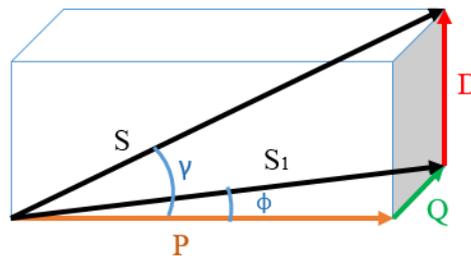
**Pérdidas estimadas en el sistema:** 10%

**Sistema de almacenamiento:** Ninguno

### Discusión de los resultados

Se llevó a cabo la toma de mediciones en los parámetros de tensión y corriente al conectar el analizador de red PQ Box-100 para cada inversor. Cada toma de datos se llevó a cabo conectando el analizador de red de manera ininterrumpida por siete días para cada inversor. Estos datos fueron importados y analizados mediante el software WinPQMobil que permitió la extracción de graficas que reflejan la distorsión armónica presente para cada línea del sistema en sus valores de tensión y corriente.

Si se violan los niveles permitidos de distorsión armónica en los parámetros de tensión y corriente, podría presenciarse la *potencia de distorsión* ( $D$ ). Debido a que esta resulta mayor que la potencia aparente sin distorsión, existe una reducción del factor de potencia y un aumento del nivel de corriente que circula en elementos de la red. Esto se explica porque se puede considerar que la potencia de distorsión se desplaza  $90^\circ$  con respecto a un eje perpendicular al plano que representa la potencia reactiva  $Q$  y potencia activa  $P$ , siendo estas perpendiculares entre si también, llevando la representación vectorial a una figura tridimensional como se muestra en la **Figura 1**.

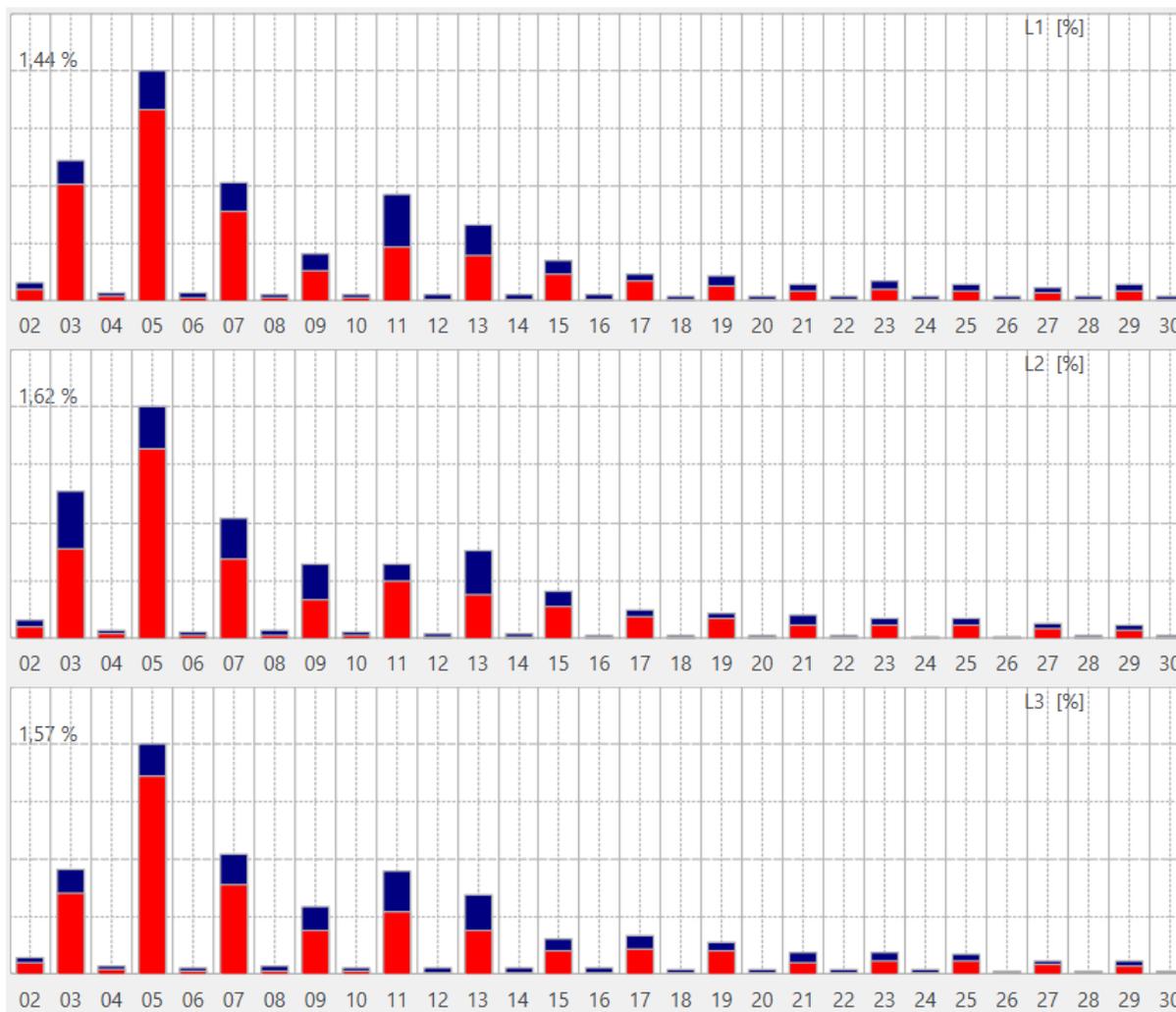


**Figura 1.** Triangulo de potencias con presencia de distorsión harmónica

En motores de inducción se producen pérdidas adicionales en el cobre del estator, en el núcleo, en el rotor y en otros componentes mecánicos. También sobre el rotor pueden inducirse pares electromagnéticos adicionales. Se inducirá tensiones en el rotor de las maquinas síncronas al girar, lo que generará calentamiento. Y en los transformadores el “efecto piel” causa un incremento en

las pérdidas del cobre, por ende, calentamiento del equipo. También habrá sobreesfuerzo del aislamiento y pérdidas en el conductor por corrientes Eddy (Badea & Ștefănescu, 2020).

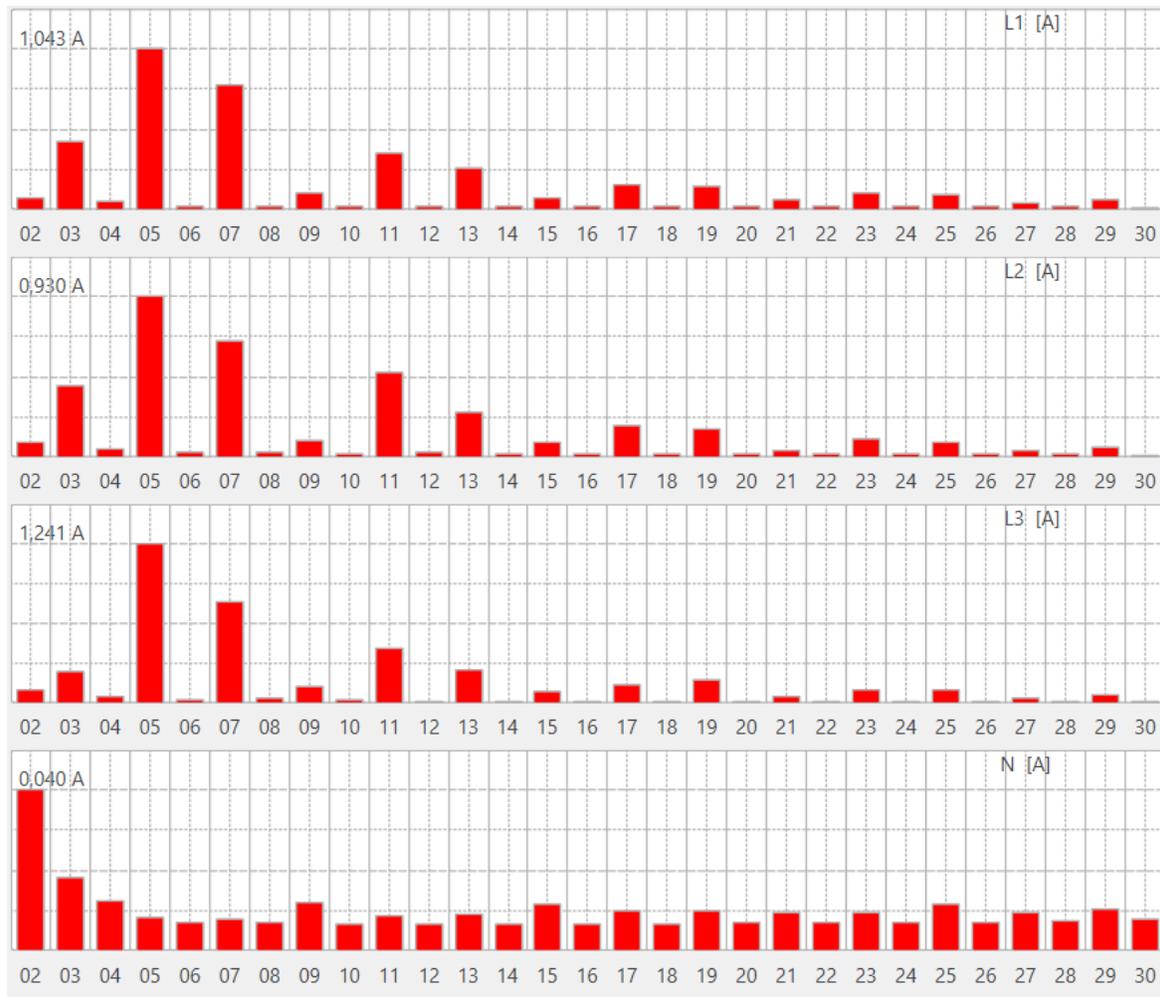
A continuación, se muestran los datos obtenidos mediante el analizador de red PQ-box 100 para todos los inversores:



**Figura 2.** Valores de distorsión armónica en la tensión en porcentaje respecto a la fundamental

En los resultados se reflejan los valores de distorsión armónica para cada fase en porcentajes de la fundamental. los componentes armónicos con mayor presencia equivalen a la 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 9<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup> y 13<sup>a</sup>, es decir, de orden impar. Siendo las de orden 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> y 7<sup>a</sup> las componentes con mayor presencia en cada fase y es la 5<sup>a</sup> la que alcanza mayores valores de distorsión armónica. Esto es un claro indicio de cargas no lineales presentes en el sistema.

En la fase 1 la distorsión armónica de la 5ª componente alcanza el 1.44% de la fundamental mientras que alcanza 1,62% y 1,57% para la fase 2 y fase 3 respectivamente. Siendo la fase 3 donde existe una mayor distorsión de la onda de tensión.



**Figura 3.** Valores de corriente armónica presente para cada línea conectada a los inversores del sistema fotovoltaico.

En la **Figura 3** se evidencia la inyección de corrientes armónicas de orden 3ª, 5ª y 7ª principalmente. Produciendo un mayor impacto las de 5to orden. Con valores que superan ligeramente el valor de 1 amperio, siendo la fase 3 por donde circula el mayor valor de corriente armónica individual con 1,241 amperios respectivamente.

Existe una mayor cantidad de inyección de corrientes armónicas impares por el neutro en. Que puede deberse al tipo de conexión de la carga, donde en caso de una conexión en estrella sin neutro

la corriente de tercer orden se suma al neutro, mientras se cancela en las fases. Así mismo sucederá, si la impedancia del cable neutro es mayor en comparación con las fases, desviando la armónica de tercer orden por este. O, si es el caso de que exista un desbalance en las cargas trifásicas, ya que esto evitaría que las corrientes armónicas se cancelen completamente en el neutro, produciendo un incremento en su valor.

Entre otros factores esta la saturación del transformador, que por la presencia de armónicos inducirá el aumento en la impedancia del neutro provocando un mayor flujo de corriente con contenido armónico por dicho conductor, así como también, en el caso en que haya una conexión a tierra del neutro, que al crear un camino de baja impedancia contribuye a aumentar la distorsión en el mismo. No podemos descartar que las corrientes armónicas en el neutro pueden amplificarse también si existe resonancia entre la impedancia del sistema y las capacitancias parásitas de las cargas.

Tomando en cuenta los datos de los tres inversores, se conoce que la mayor contribución a la distorsión armónica en los perfiles de tensión y corriente es responsabilidad de los equipos electrónicos que comúnmente suelen usarse en estas edificaciones. En las facultades de veterinaria y agrícola, siendo edificios en los que se distribuyen salones de clases, oficinas, bibliotecas y baños, se cuenta con iluminación fluorescente, computadores de escritorio, PC portátiles, impresoras, dispensadores de agua, acondicionares de aire, televisores, proyectores, equipos de telecomunicaciones, entre otros. Estos son cargas no lineales responsables de la introducción de distorsión armónica en la forma de onda fundamental de la corriente que circula en el sistema.

Cabe recalcar que la fase 3 en todos los inversores presentan mayor nivel de inyección de corrientes armónicas. Esto se puede explicar conociendo la distribución de las cargas, siendo una posibilidad que exista mayor cantidad de cargas no lineales en la fase 3 si la comparamos con las otras dos fases.

Además, la predominancia de armónicas de 5ª y 7ª, 11ª y 13ª orden puede ser explicada por la penetración de la generación solar, las características del sistema fotovoltaico conectado a la red y la operación de los inversores al interactuar con las cargas, y que, al ser equipos con tecnología electrónica conmutable también influye el número de pulsos con los que el convertidor funciona. Así mismo, no hay que descartar la influencia de posibles fluctuaciones de voltaje y periodos transitorios en la red que contribuya a la generación de distorsión armónica.

## Conclusiones

En esta investigación se cumplió el objetivo propuesto con la toma de datos mediante el analizador de red PQ-box 100 para esclarecer la presencia de distorsión armónica en los parámetros eléctricos de la red que alimenta las instalaciones pertenecientes a las facultades de veterinaria y agrícola de la Universidad Técnica de Manabí en el punto de interconexión de los tableros de distribución de cada edificio, con los sistemas fotovoltaicos instalados en sus respectivas terrazas.

Aunque todos los inversores analizados muestran valores de distorsión armónica en el perfil de la tensión y es evidente la inyección de corrientes armónicas triples e impares, los niveles de distorsión armónica no violan las recomendaciones estipuladas por ARCONEL, CONELEC y la IEEE.

## Referencias

1. Al-duaij, E. O. S. (2015). Harmonics Effects in Power System. 5(2).
2. Anu, G., & Fernandez, F. M. (2020). Identification of Harmonic Injection and Distortion Power at Customer Location. 2020 19th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 1-5. <https://doi.org/10.1109/ICHQP46026.2020.9177869>
3. Badea, N., & Ștefănescu, V. (2020). Evaluation of harmonic effects on the power system distribution. The Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati. Fascicle III, Electrotechnics, Electronics, Automatic Control and Informatics, 43(1), 10-18. <https://doi.org/10.35219/eeaci.2020.1.02>
4. Dghim, H., El-Naggar, A., & Erlich, I. (2018). Harmonic distortion in low voltage grid with grid-connected photovoltaic. 2018 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2018.8378851>
5. Fortes, R. R. A., Buzo, R. F., & De Oliveira, L. C. O. (2020). Harmonic distortion assessment in power distribution networks considering DC component injection from PV inverters. Electric Power Systems Research, 188, 106521. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106521>
6. Gabr, W. I., & Salem, W. A. (2018). Impact of Grid Connected Photovoltaic System on Total Harmonics Distortion (THD) of Low Voltage Distribution Network: A Case Study. 2018 Twentieth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), 608-614. <https://doi.org/10.1109/MEPCON.2018.8635216>

7. Intriago, J. D., & Vinces, M. (2022). Energizar el campus de la extensión Lodana de la Universidad Técnica de Manabí con generación de electricidad fotovoltaica: Etapa 1 [Tesis de grado]. Universidad Técnica de Manabí.
8. Korlevska, M., Atanasovski, M., Kostov, M., & Trpezanovski, L. (2022). Impact of PV Type Dispersed Generation on Harmonic Distortion on Distribution Networks. 2022 57th International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST), 1-4. <https://doi.org/10.1109/ICEST55168.2022.9828752>
9. Mohamed Belrzaeg, Mohamed Abou Sif, Emad Almabsout, & Umar Ali Benisheikh. (2023). Distributed generation for Microgrid technology. *International Journal of Scientific Research Updates*, 6(1), 083-092. <https://doi.org/10.53430/ijrsru.2023.6.1.0062>
10. Nomm, J., Ronnberg, S., & Bollen, M. (2018). Harmonic voltage measurements in a single house microgrid. 2018 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 1-5. <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2018.8378921>
11. Plata, E. A. C. (2006). Calidad del servicio de energía eléctrica. Centro de publicaciones Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. <https://doi.org/10.13140/2.1.1678.3688>
12. Rodríguez-Gámez, M., Vázquez-Pérez, A., Loor-Castillo, G. A., Guerrero, J. M., Villacreses-Viterí, C. G., & Núñez Alvarez, J. R. (2022). Energy Repowering Using Photovoltaic Microgrids—A Case Study in the Province of Manabí in Ecuador. *International Journal on Engineering Applications (IREA)*, 10(3), 167. <https://doi.org/10.15866/irea.v10i3.20485>
13. Salem, W. A. A., Gabr Ibrahim, W., Abdelsadek, A. M., & Nafeh, A. A. (2022). Grid connected photovoltaic system impression on power quality of low voltage distribution system. *Cogent Engineering*, 9(1), 2044576. <https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2044576>
14. Vinayagam, A., Aziz, A., Pm, B., Chandran, J., Veerasamy, V., & Gargoom, A. (2019). Harmonics assessment and mitigation in a photovoltaic integrated network. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 20, 100264. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2019.100264>
15. World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway; Preview. (2023, marzo 28). <https://www.irena.org/Publications/2023/Mar/World-Energy-Transitions-Outlook-2023>

16. Yaghoobi, J., Zare, F., Rehman, T., & Rathnayake, H. (2019). Analysis of High Frequency Harmonics in Distribution Networks: 9 – 150 kHz. 2019 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 1229-1234. <https://doi.org/10.1109/ICIT.2019.8755071>
17. Zare Oskouei, M., & Mohammadi-Ivatloo, B. (2020). Integration of Renewable Energy Sources Into the Power Grid Through PowerFactory. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-44376-4>
18. Zhao, E., Han, Y., Lin, X., Liu, E., Yang, P., & Zalhaf, A. S. (2022). Harmonic characteristics and control strategies of grid-connected photovoltaic inverters under weak grid conditions. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 142, 108280. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108280>

© 2024 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).