

DOI: <https://doi.org/10.56712/latam.v5i3.2186>

Efecto de las fuentes de energía sustentables en redes eléctricas de distribución

Effect of sustainable energy sources on electrical distribution networks

Allan Juárez Delgado

allan.juarezdlg@uanl.edu.mx
<https://orcid.org/0009-0004-3286-8514>
Universidad Autónoma de Nuevo León
Nuevo León – México

Blanca Reyes Valdez

yaneth.reyesvldz@uanl.edu.mx
<https://orcid.org/0009-0000-6074-3621>
Universidad Autónoma de Nuevo León
Nuevo León – México

Brian Medina Reyes

brian.medinarys@uanl.edu.mx
<https://orcid.org/0009-0001-5229-4675>
Universidad Autónoma de Nuevo León
Nuevo León – México

Jorge Arizpe Islas

jorge.arizpeisl@uanl.edu.mx
<https://orcid.org/0000-0002-5450-7515>
Universidad Autónoma de Nuevo León
Nuevo León – México

Artículo recibido: 23 de mayo de 2024. Aceptado para publicación: 07 de junio de 2024.
Conflictos de Interés: Ninguno que declarar.

Resumen


En esta investigación se utilizó la metodología de las ciencias formales en el ámbito de la investigación descriptiva, que actualmente es utilizada para temas de interés científico. Consiste en la recopilación de la información, análisis determinado y presentación de los datos graficados, obtenidos sobre un caso en la vida real, con el fin de describirlo en un contexto de investigación, donde surgió la idea de investigar una problemática dentro de las redes eléctricas domésticas en algunas zonas urbanas que cuentan con FES, en este caso nos referimos a paneles fotovoltaicos conectados a una misma red eléctrica, con el objetivo de analizar el Efecto de las FES en Redes Eléctricas de Distribución. La primera etapa de esta metodología consistió en la consulta de diversos artículos y sitios web, para descartar que existiera una investigación similar a nuestro tema y así desarrollar un artículo de investigación original. La segunda etapa consistió en la búsqueda y lectura de diversas fuentes de investigación (libros, sitios web, notas científicas, revistas científicas, documentales de interés, conferencias). Posteriormente, abordamos temas importantes de la existencia de los armónicos que se generan en la red eléctrica como definición y cálculo, determinando de esta manera, los efectos que provocan y su comportamiento dentro de un sistema eléctrico. Para su mejor comprensión en el apartado de casos de estudio, se graficaron los resultados obtenidos de dos casos analizados, obteniendo como resultado los tipos de armónicos que pasan a través de un transformador de conexión Delta-Estrella, que es considerado como un filtro de armónicos por su conexión.

Palabras clave: distorsión armónica, paneles fotovoltaicos, calidad de energía

Abstract

In this research, the methodology of formal sciences was used in the field of descriptive research, which is currently used for topics of scientific interest. It consists of the collection of information, determined analysis and presentation of graphical data, obtained from a case in real life, in order to describe it in a research context, where the idea of investigating a problem within electrical networks arose. domestic areas in some urban areas that have FES, in this case we refer to photovoltaic panels connected to the same electrical network, with the objective of analyzing the Effect of FES on Electrical Distribution Networks. The first stage of this methodology consisted of consulting various articles and websites, to rule out the existence of research similar to our topic and thus develop an original research article. The second stage consisted of searching and reading various research sources (books, websites, scientific notes, scientific journals, interesting documentaries, conferences). Subsequently, we address important issues of the existence of harmonics that are generated in the electrical network as a definition and calculation, thus determining the effects they cause and their behavior within an electrical system. For better understanding in the case study section, the results obtained from two analyzed cases were graphed, resulting in the types of harmonics that pass through a Delta-Star connection transformer, which is considered a harmonic filter. for your connection.

Keywords: harmonic distortion, photovoltaic panels, power quality

Todo el contenido de LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades, publicados en este sitio está disponibles bajo Licencia Creative Commons . 

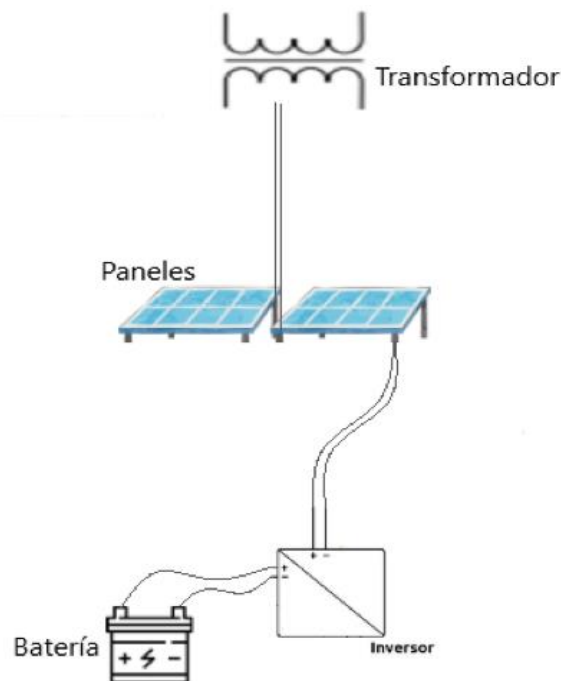
Cómo citar: Juárez Delgado, A., Reyes Valdez, B., Medina Reyes, B., & Arizpe Islas, J. (2024). Efecto de las fuentes de energía sustentables en redes eléctricas de distribución. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades* 5 (3), 2164 – 2178.
<https://doi.org/10.56712/latam.v5i3.2186>

INTRODUCCIÓN

En la última década se ha fomentado la disminución de la huella de carbono en la sociedad, incluyendo la independencia energética y dando lugar al incremento de utilización de las Fuentes de Energía Sustentables en las redes domésticas e industriales, tales como: los paneles fotovoltaicos, turbinas eólicas y calentadores solares.

Figura 1

Sistema de paneles fotovoltaicos



Por lo que surge la necesidad de realizar un análisis de la señal resultante en el lado de distribución para determinar el efecto de las FES, específicamente los paneles ya que estos aportan energía eléctrica al sistema por medio de un equipo convertidor de tensión, el cual consiste en un circuito de un regulador y un inversor, comúnmente estos equipos inyectan armónicos en la red eléctrica.

Para la transformación de energía solar a energía eléctrica, el equipo convertidor de voltaje DC-AC utiliza inversores de multinivel conformados por: diodos, capacitores conectados en cascada y con estos componentes se obtiene la tensión eléctrica de salida deseada, con diferentes niveles de tensión de entrada.

En esta investigación se espera poder considerar una disminución o cambio en la distorsión armónica de tensión causadas por las FES, analizando un transformador de distribución con arreglo de Delta-Estrella, tomando en cuenta la posible variación que pueda generar los armónicos reflejados del lado de distribución, con esto se podrá determinar si es posible un cumplimiento en THD del estándar IEEE-519.

Conceptos

Señal eléctrica

Se considera una señal eléctrica como una onda sinusoidal con variaciones en el tiempo. Representada por la ecuación (1).

$$\delta_{(t)} = |\delta_{MAX}| \text{Sen}(\omega t + \theta) \quad (1)$$

donde

$$|\delta_{MAX}| = \sqrt{2} \delta_{RMS}$$

$$\omega = 2\pi f_o$$

$$f_o = 60 \text{ Hz}$$

θ es el ángulo de fase

Armónicos

Se refiere como un componente senoidal de una onda periódica llamada fundamental, que tiene una frecuencia correspondiente a un número múltiplo de la onda de frecuencia fundamental.

Señal armónica

Esta puede ser representada en términos de una serie de Fourier, describiendo sistemas de potencia con corrientes y tensión armónicos. La ecuación (2) representa una señal armónica $\delta_n(t)$ en la cual se puede expresar la tensión o la corriente eléctrica.

$$\delta_n(t) = \sum_{n=1}^N |\delta_n|(\omega_n + \theta n) \quad (2)$$

donde

δ_n es la señal de tensión o corriente eléctrica

$$\omega_n = n\omega_0$$

Calidad de Energía

Se les denomina así a las perturbaciones dentro de las señales de tensión y corriente eléctrica de la red, en un determinado tiempo y su ubicación conectada a la red eléctrica.

Las perturbaciones se categorías según la forma de la onda:

- Transitorios.
- Interrupciones.
- Variaciones de tensión.
- Sobretensiones.
- Fluctuaciones de tensiones.
- Variaciones de frecuencias en los sistemas.
- Mala calidad de la energía eléctrica

Ésta se considera cuando hay presencia de perturbaciones como: variaciones de tensión, interrupciones, armónicos, en general eventos transitorios en sistemas eléctricos; estos pueden causar

problemas en el sistema eléctrico, afectando equipos tales como: transformadores de potencia, interruptores, instrumentación y barras o cajas derivadoras.

Distorsión Armónica Total

Es un término utilizado para cuantificar la propiedad no sinusoidal de una forma de onda $\delta(t)$ cuyo valor se representa mediante la relación del valor eficaz de todos los términos correspondientes a las frecuencias distintas de la fundamental y el valor eficaz del término correspondiente a la frecuencia fundamental.

La ecuación (3) se utiliza para calcular THD.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n \neq 1}^{\infty} (\delta rms_{n1})^2}}{\delta rms_1} \quad (3)$$

donde:

δ_{n1} representa el valor eficaz de todos los términos correspondientes a las frecuencias distintas de la fundamental.

δ_1 representa el valor RMS correspondiente del componente fundamental.

∞ es el valor límite número infinito

Transformada Rápida de Fourier (FFT)

Es un algoritmo que sirve para el cálculo de la Transformada Discreta de Fourier (TFD) basado en la división del tiempo, de esta manera elimina gran parte de los cálculos repetitivos que hay que llevar a cabo si se desea resolver la TFD de manera directa. Se utiliza la FFT ya que toda señal periódica puede ser representada por la suma de series de Fourier y con este análisis se logra una representación de Fourier para señales de duración finita que se puede expresar con la ecuación (4).

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-\frac{2\pi i}{N}kn} \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (4)$$

donde:

X_k es un conjunto de números complejos

N implica multiplicaciones complejas

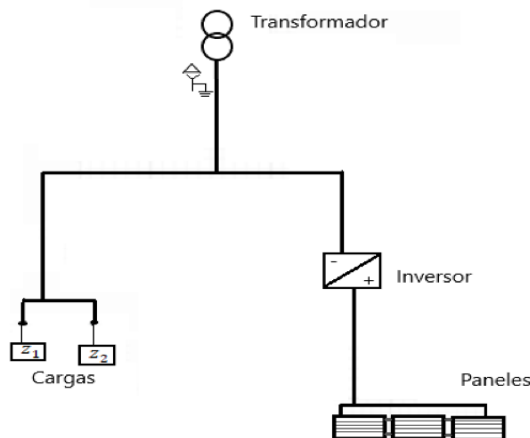
$N-1$ implica adiciones complejas por cada k

Transformador de distribución

Es un dispositivo eléctrico que por inducción electromagnética transfiere energía eléctrica de uno o más circuitos a circuitos a la misma frecuencia de 60 Hz, usualmente aumentando o disminuyendo los valores de tensión y corriente eléctricas.

Figura 2

Diagrama de equipos conectados en una red eléctrica doméstica con Paneles Fotovoltaicos



Fuente: elaboración propia.

METODOLOGÍA

Considerando que la frecuencia fundamental en México es de 60 Hz, el número de orden (n) determina el número de veces que la frecuencia de ese armónico es mayor que la fundamental: 1,2,3,4,5,6,7... n orden natural de los números.

$$f_h = n f_0 \quad (4)$$

donde:

f_h es la frecuencia del armónico

n es el orden del armónico

La Tabla 1 muestra el tipo de orden armónico tomando como base una frecuencia de 60 Hz.

Tabla 1

Número de orden de armónicos y la frecuencia correspondiente

No. de Orden (n)	1	2	3	4	5	6	7
Frecuencia (Hz)	60	120	180	240	300	360	420

Ejemplo:

Considerando una señal de tensión eléctrica senoidal de $v(t) = 100 \cos(2\pi f t)$ y $f_0 = 60$ Hz Volts se aplica a una carga no lineal, dando lugar a una corriente no senoidal. La carga lineal presenta la siguiente expresión para la corriente:

$$\delta(t) = \delta_1(t) + \delta_2(t) + \delta_3(t)$$

Calcular el valor de THD para $\delta(t)$

$$V(t) = \delta_{rms}(\omega t + \theta)$$

En la frecuencia armónica de la componente i_1 es de

$$\delta_1(t) = A_1 \text{Cos}(\omega_1 t + \theta_1)$$

donde

$$\omega_1 = 2\pi f_o$$

$$A_1 = 0.005$$

$$\theta_1 = \frac{\pi}{4}$$

En la frecuencia armónica de la componente i_2 es de

$$\delta_2(t) = A_2 \text{Cos}(\omega_2 t + \theta_2)$$

donde

$$\omega_2 = 2\omega_1$$

$$A_2 = 0.008$$

$$\theta_2 = \frac{\pi}{6}$$

En la frecuencia armónica de la componente i_3 es de

$$\delta_3(t) = A_3 \text{Cos}(\omega_3 t + \theta_1)$$

donde

$$\omega_3 = 3\omega_1$$

$$A_3 = 0.01$$

$$\theta_1 = \frac{\pi}{4}$$

La distorsión armónica total de la corriente de carga se obtiene por la ecuación 3:

$$\%THD = \frac{\sqrt{\sum_{n \neq 1}^{\infty} (I_{n1} rms)^2}}{I_1 rms^2}$$

Gráfico 1

Gráficas de las funciones de $\delta_1(t)$, $\delta_2(t)$ y $\delta_3(t)$ utilizando la herramienta de Suite Calculadora GeoGebra

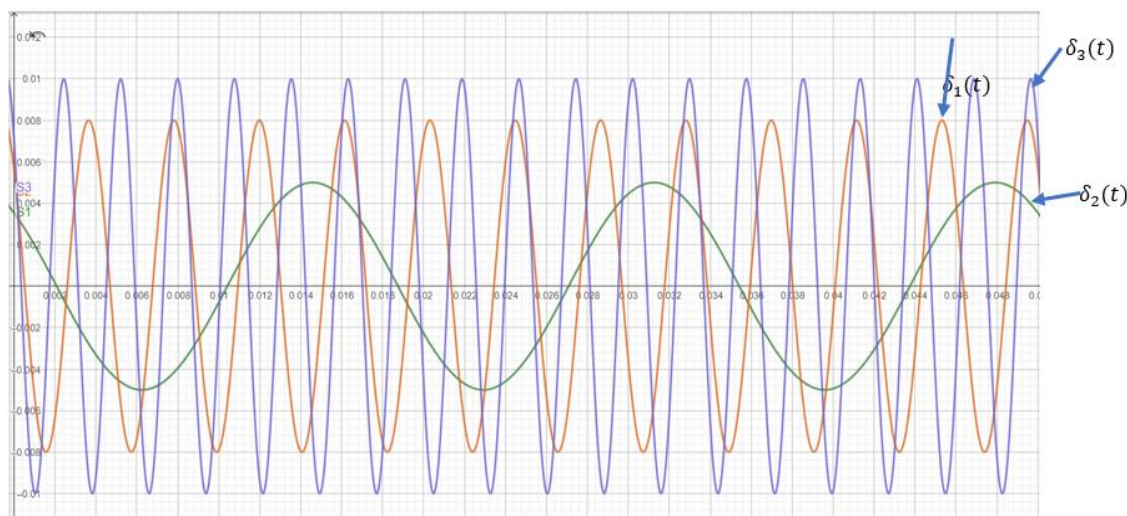
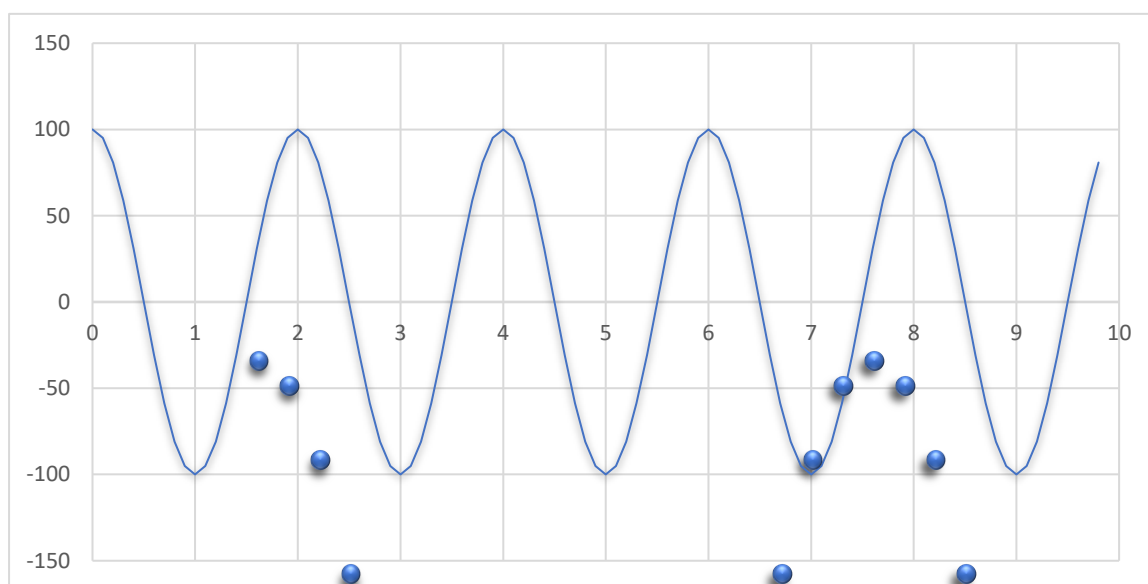


Gráfico 2

Gráfica de la función $\delta(t)$ resultante hecha en el programa Excel



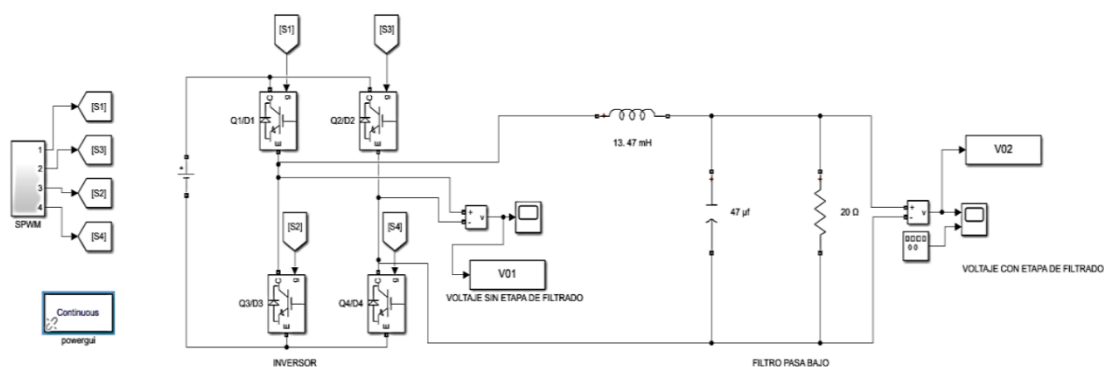
Casos de estudio

Caso I: FFT para cálculo de armónicos

Se considera el estudio sobre el Análisis de armónicos generados en inversores de los paneles fotovoltaicos autónomos residenciales realizado por la Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Ecuador.

Figura 3

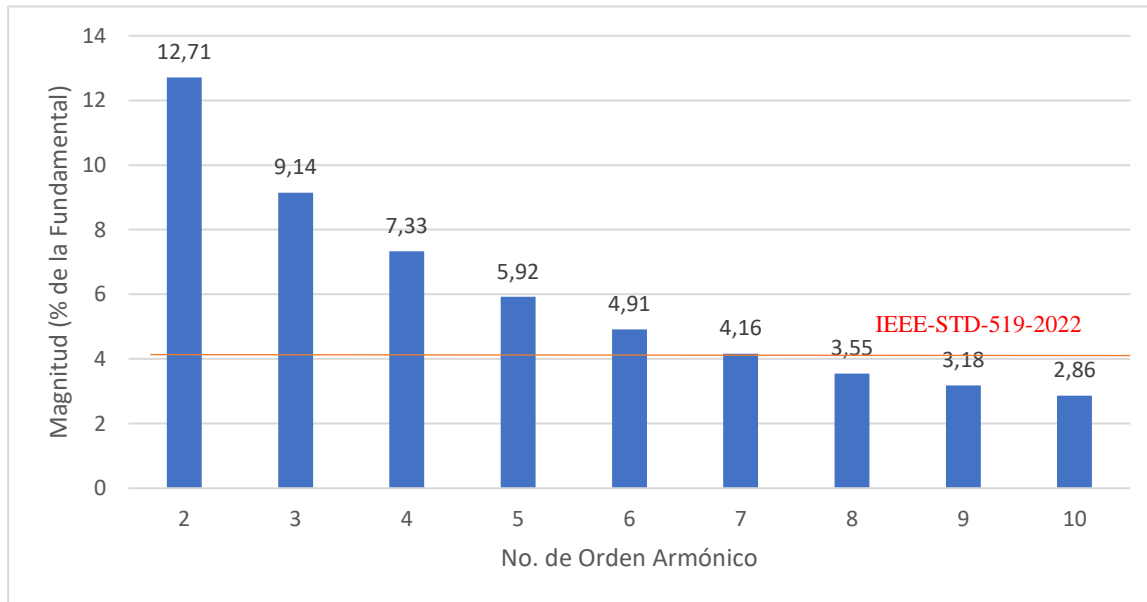
Inversor monofásico simulado en Simulink



Para el modelado del inversor monofásico analizado en Simulink de Matlab, se consideraron tres componentes principales en su electrónica: El controlador SPWM (Sine Pulse Width Modulator) encargado de realizar los pulsos para el disparo de los IGBTs; el inversor conformado por cuatro transistores IGBTs en configuración puente H; por último, la etapa de filtrado del tipo RLC. La figura 3 muestra el diseño implementado del inversor monofásico en puente H.¹⁸

Gráfico 3

Distorsión armónica individual de corriente



Utilizando el FFT de Matlab obtuvieron el THD en la corriente, el cual es de 21.96%, como se muestra en la Figura 5, mostrando que el armónico de orden 2 presenta 12.71% de distorsión, siendo este el orden con mayor porcentaje de distorsión.

Tabla 2

Datos de las componentes armónicas

Corriente armónica	L1 (%)	Cumple con el estándar
h3	9.14	X
h5	5.92	X
h7	4.16	X
h9	3.18	✓

En las Tablas (2 y 3) se muestran los 4 primeros registros de los armónicos individuales de corriente generados en la simulación. Se debe mencionar que en base al estándar IEEE 519-2022, la distorsión armónica permisible es hasta 4%.

Tabla 3

Datos de las componentes armónicas

Corriente armónica	L1 (%)	Cumple con el estándar
h2	12.71	X
h4	7.33	X
h6	4.91	X
h8	3.55	✓

Caso II: Análisis de sistemas trifásicos de Transformadores conexión Delta-Estrella

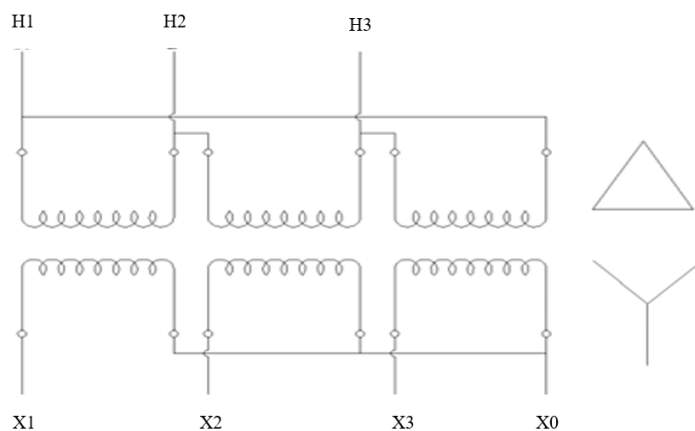
Este caso de estudio se centra en la tensión armónica que se genera por las cargas y su transmisión en equipos conectados en la red de distribución, en este caso a un transformador trifásico con arreglo de Delta-Estrella. En el análisis de las cargas se da enfoque a las corrientes armónicas de 2° a 13° orden, siendo estas las cuales suelen tener un mayor porcentaje de distorsión en la señal.

Esto se considera un análisis del comportamiento de corrientes armónicas en los transformadores de distribución trifásicos.

La trampa de armónicos es un término coloquialmente dado al fenómeno que ocurre con las armónicas que se transmiten de las cargas a un transformador trifásico con arreglo de Delta-Estrella, Figura (4), pero en el cual quedan atrapadas por la conexión delta, haciendo que esta mitigue la THD que pueda llegar a la red de distribución.

Figura 4

Esquema de conexión de un transformador delta-estrella realizadas



Para efectos de realizar las mediciones en las pruebas de armónicos a través de un transformador con arreglo de Delta-Estrella, se utilizaron los siguientes equipos:

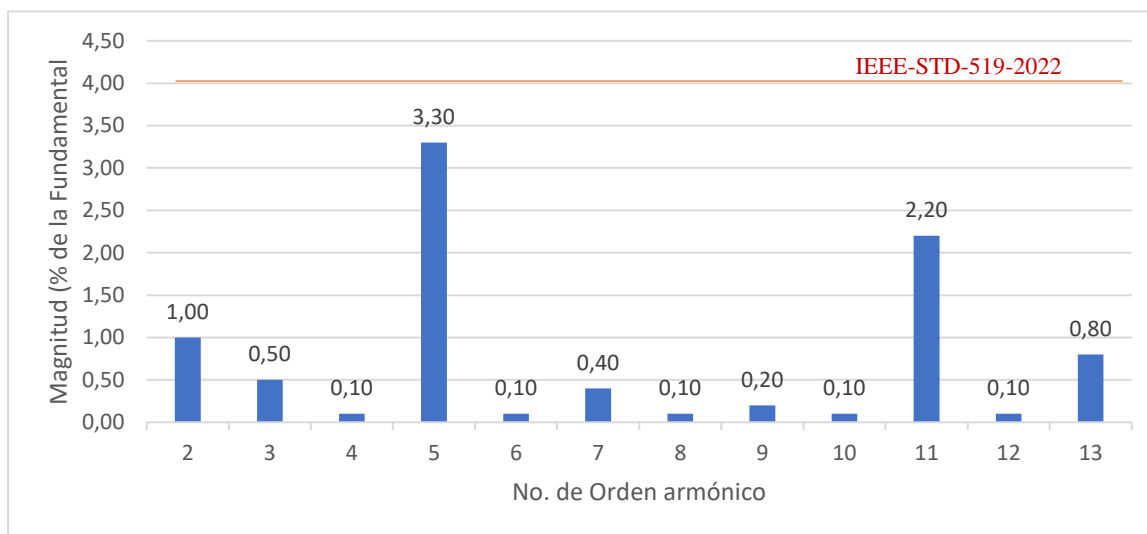
- Phase Shift Transformer tipo autotransformador 260kVA 480/497x2 marca Magnetron.
- Phase Shift Transformer tipo autotransformador 260kVA 480/497x2 otra marca.
- Variador de Velocidad de 260kVA 12 pulsos marca Baker Hughes
- Banco de carga resistivo 700kW LPV700 marca AVTRON
- Analizador de potencia WT230 marca YOKOGAWA
- Fuente de alimentación de 480V

RESULTADOS

Se obtuvieron los resultados del gráfico 4 al realizar la prueba primero con el variador de velocidad conectado directamente al banco resistivo sin el arreglo del transformador Delta-Estrella.

Gráfico 4

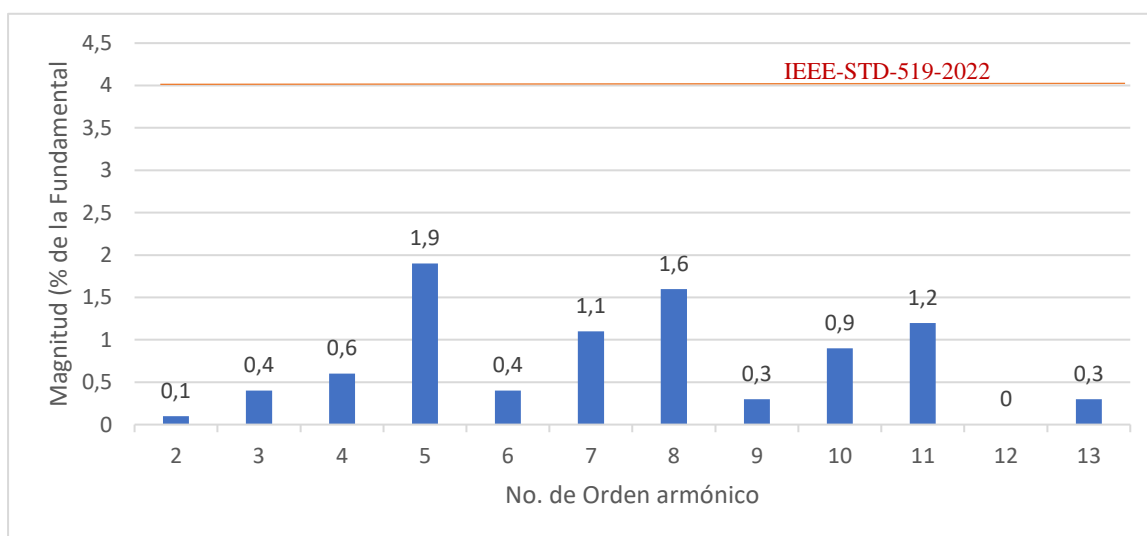
Componentes armónicas sin transformador



Para este caso el THD(V) es de 4.10% lo cual está en el límite de lo recomendado por la IEEE 519. Se utilizó un segundo estudio utilizando en el sistema un transformador con arreglo de Delta-Estrella, obteniendo los datos del gráfico 5.

Gráfico 5

Componentes armónicas con transformador Delta-Estrella



Con los resultados obtenidos en la segunda prueba, se observa que se consigue cumplir con lo establecido por la IEEE519 en el parámetro de la tensión eléctrica, demostrando la reducción de los armónicos de manera individual, por ende, reduciendo el THD(v) hasta un valor aceptable de 3.44%.

Tabla 4

Corrección de armónicas

h	Sin transformador	Con transformador	Diferencia
2	1	0.1	90%
3	0.5	0.4	20%
4	0.1	0.6	-500%
5	3.3	1.9	42%
6	0.1	0.4	-300%
7	0.4	1.1	-175%
8	0.1	1.6	-1500%
9	0.2	0.3	-50%
10	0.1	0.9	-800%
11	2.2	1.2	45%
12	0.1	0	100%
13	0.8	0.3	63%

CONCLUSIONES

Por lo del Caso 1, a partir del h8 se puede considerar que los armónicos asociados a la operación de los paneles fotovoltaicos son los que cumplen con la recomendación indicada por la IEEE-519.

De esta forma solo se analizarán aquellos menores a h8 en este documento. Se debe apreciar como el arreglo Delta-Estrella en un transformador trifásico funciona como amortiguador de armónicos ya que, estos se atenúan en los individuales hasta un 100% en el lado de distribución.

Trabajos futuros

Es necesario modelar el panel fotovoltaico con el afán de determinar los Inter armónicos que puedan estar asociados. Esto debido a que las mediciones no muestran la presencia de estos en la red.

REFERENCIAS

¿Por qué la frecuencia es 60hz en México? (s. f.). <https://todosloshechos.es/por-que-la-frecuencia-es-60hz-en-mexico>

Análisis de sistemas de potencia. (s. f.). En Google Docs (2° edición). John J. Grainger, William D. Stevenson Jr. https://drive.google.com/file/d/17jmw6XQ717q-GrQMTSHKMRbk1_aJ8LWD/view

Arcila, J. (s. f.). ARMÓNICOS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS. ingenieros.es. Recuperado 24 de febrero de 2024, de https://www.ingenieros.es/files/proyectos/Armonicos_en_sistemas_electricos.pdf

Bequette, F., Las Energías renovables: un nuevo impulso. France. Retrieved from <https://policycommons.net/artifacts/9782693/las-energias-renovables/10687604/> on 24 Feb 2024. CID: 20.500.12592/08kpvbb

C. Meza, J.J. Negroni, F. Guinjoan, D. Biel. "Modelado y control discreto basado en el balance energético de sistemas fotovoltaicos conectados a red".

Calidad de Energía Eléctrica - IECOR. (2015, 28 diciembre). IECOR. <https://www.iecor.com/calidad-de-energia-electrica/>

Calidad de Energía Eléctrica - IECOR. (2015, 28 diciembre). IECOR. <https://www.iecor.com/calidad-de-energia-electrica/>

Cherian, E., Bindu, G. R., & Nair, P. S. C. (2016). Pollution impact of residential loads on distribution system and prospects of DC distribution. *Engineering Science And Technology, An International Journal*, 19(4), 1655-1660. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2016.09.018>

NORMA Oficial Mexicana NOM-002-SEDE/ENER-2014, Requisitos de seguridad y eficiencia energética para transformadores de distribución. Publicado el viernes de agosto del 2014, sitio www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/181641/NOM_002_ENER_2014.pdf

NOTA: Ejercicio obtenido de: Hart, D. W. (2001). *Electrónica de Potencia* (2.a ed., Vol. 1). Isabel Capella. <https://www.bing.com/search?q=electr%C3%B3nica+de+potencia+Daniel+W.+Hart+&qs=ds&form=QBRE>

NOTA: Figuras y datos obtenidos de Simbaña, A. P. B., Ramírez, S. M., & Caiza, C. I. Q. (2023). Análisis de armónicos generados en inversores de los sistemas fotovoltaicos autónomos residenciales: Analysis of harmonics generated in inverters of residential autonomous photovoltaic systems. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 4(2), 3128-3141.

Perdomo García, M. A. (2016). Efecto de la distorsión armónica en transformadores.

Revisión IEEE-519 2014 Resumen de cambios clave para la mitigación de armónicos. (2015, enero 27). Mtecorp.com; MTE Corporation.


Reyes Calderón, G. (1996). *Armónicas en Sistemas de Distribución de Energía eléctrica* (Doctoral dissertation, Universidad Autonoma de Nuevo Leon).

RTR Energía S.L. (noviembre). Los armónicos y la calidad de la energía eléctrica. RTR Energía. Recuperado 24 de febrero de 2024, de <http://fotosdeelectricidad.es/wp-content/uploads/2012/11/Armonicos.-RTR.pdf>

Rubio, A. (2019, 4 febrero). ¿Qué es la perturbación y el filtrado de perturbaciones? Paneles Digitales y Analizadores de Red. <https://www.instrumentaciondigital.es/perturbacion-filtrado-de-perturbaciones/>

Schmidt, A. L. (2013). Fft: Transformada rápida de fourier. Estudiante de Ingeniería en Sistemas de Computación. Universidad Nacional de Sur. Bahía Blanca, Argentina. Marzo 2013.

Tipos de señales eléctricas y electrónicas. (2023, 21 marzo). MICROCHIPOTLE.
[5] CFE, (2008) "Desviaciones permisibles en las formas de onda de tensión y corriente en el suministro y consumo de energía eléctrica" CFE L000-45.

Todo el contenido de **LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades**, publicados en este sitio está disponibles bajo Licencia [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) .