

# Efecto de las fuentes de energía sustentables en la calidad de energía para redes eléctricas de distribución

Fecha enviada: 11 junio 2023

Fecha revisado: 25 julio 2023

Jorge Luis Arizpe I.<sup>1</sup> Amelia González C.<sup>2</sup> Filiberto Candia G.<sup>3</sup>

Karla Samantha Muñoz M.<sup>4</sup> Cesar Alfredo Villela B.<sup>5</sup>

## RESUMEN

En esta investigación se analiza el problema de Calidad de la Energía asociado principalmente al uso de Fuentes de Energía Sustentables (FES), en este caso con el uso de Sistemas Fotovoltaicos (SFV) conectados a la Red Eléctrica de distribución. El objetivo principal de la investigación es analizar la diferencia que existe en cuanto a Calidad de la Energía si hay variación entre un SFV y la Red eléctrica convencional. La investigación se basó en recabar información bibliográfica en diferentes fuentes de información sobre el tema la cual llevó al problema principal que es la Distorsión armónica trayendo con ella una disminución de la potencia. La Universidad Tecnológica de San Juan del Río en Querétaro México realizó una medición de Distorsión Armónica en aparatos electrodomésticos y los resultados que se obtuvieron dejan como conclusión que existe una mala calidad de la energía cuando se opera con un sistema fotovoltaico, habiendo un aumento en el porcentaje de THD (distorsión armónica total) y una disminución en la potencia, comparado con la red eléctrica convencional donde el THD disminuye y la potencia aumenta.

**Palabras clave:** Armónicos, Fuentes de energía sustentables, Calidad de la energía.

## ABSTRACT

This research analyzes the problem of Power Quality associated mainly with the use of Sustainable Energy Sources (SES), in this case with the use of Photovoltaic Systems (PVS) connected to the distribution Grid. The main objective of the research is to analyze the difference that exists in terms of Power Quality if there is a variation between a PVS and the conventional electrical grid. The research was based on gathering bibliographic information in different sources of information on the subject which

<sup>1</sup> PTC adscrito a la Facultad de Ingeniería Mecánica, y Líder del Cuerpo académico UANL-CA-460, Análisis, Protección y Operación de Sistemas Eléctricos [jorge.arizpeis@uanl.edu.mx](mailto:jorge.arizpeis@uanl.edu.mx).

<sup>2</sup> PTC adscrito a la Facultad de Ingeniería Mecánica, y Coordinadora de Ciencias básicas de la FIME-UANL. [amelia.gzz@uanl.edu.mx](mailto:amelia.gzz@uanl.edu.mx)

<sup>3</sup> PTC adscrito a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SIN I) Integrante del cuerpo Académico BUAP-CA-328 Nanotecnología para aplicaciones en sistemas energéticos y automotrices. [filinc@hotmail.com](mailto:filinc@hotmail.com)

<sup>4</sup> estudiante de la Facultad Ingeniería Mecánica Eléctrica. [karla.munozmt@uanl.edu.mx](mailto:karla.munozmt@uanl.edu.mx)

<sup>5</sup> estudiante de la Facultad Ingeniería Mecánica Eléctrica. [cesar.villelabrb@uanl.edu.mx](mailto:cesar.villelabrb@uanl.edu.mx)

led us to the main problem which is the harmonic distortion bringing with it a decrease in power. The Technological University of San Juan del Rio in Queretaro Mexico conducted a measurement of Harmonic Distortion in household appliances and the results obtained leave us as a conclusion that there is a poor quality of energy when operating with a photovoltaic system, having an increase in the percentage of THD (Total Harmonic Distortion) and a decrease in power, compared to the conventional power grid where the THD decreases and power increases.

**Key words:** Harmonics, Sustainable energy sources, Energy quality.

## INTRODUCCIÓN

Se define Calidad de la Energía como ausencia de interrupciones, sobretensiones, deformaciones producidas por armónicas y variaciones en la magnitud de la tensión eléctrica en la red (Balderas, 2015).

La investigación se realizó debido al aumento en México del uso de las FES especialmente de los SFV, el objetivo es analizar la diferencia en cuanto a calidad de energía de un sistema fotovoltaico comparada con la de la red eléctrica convencional describiendo primeramente algunos parámetros mediante tablas y gráficos que definen un mal funcionamiento del sistema eléctrico llegando al problema principal mencionando sus valores máximos y mínimos permisibles por la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Los problemas de calidad de la energía son ocasionados por diferentes orígenes, estos se muestran en la Tabla 1 (Arizpe, 2013).

**MARCO CONCEPTUAL**

**ENERGÍA SOLAR**

En general, se puede definir como una forma renovable de energía, obtenida por la transformación de la radiación electromagnética que proviene del sol (Arancibia & Brown, 2010). La energía solar al ser absorbida se puede transformar en dos tipos de energía:

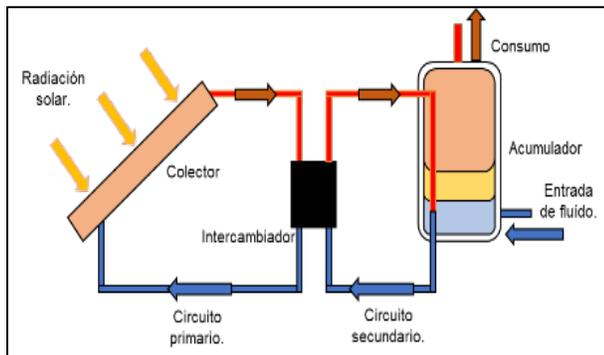
- Energía Térmica
- Energía Eléctrica Fotovoltaica

**ENERGÍA TÉRMICA**

La energía solar térmica consiste en la transformación de la energía solar en energía térmica. Se trata de una forma de energía renovable que puede tener dos fines distintos (Planas, 2011):

- Calentar directamente líquidos y gases.
- Transformarse en electricidad.

Básicamente consiste en dos circuitos cerrados con un intercambiador de calor, ver Figura 1. En el circuito primario, el fluido frío pasa por los paneles solares, la radiación del Sol lo calienta y se dirige a un intercambiador de calor donde cede energía térmica al circuito secundario. Finalmente, repite el ciclo. En el circuito secundario, el fluido caloportador, después de recibir el calor en el intercambiador se dirige al acumulador. En el acumulador el fluido caloportador cede el calor al agua almacenada en su interior. Una vez frío vuelve a dirigirse al intercambiador de calor para repetir el ciclo (Planas, 2011).

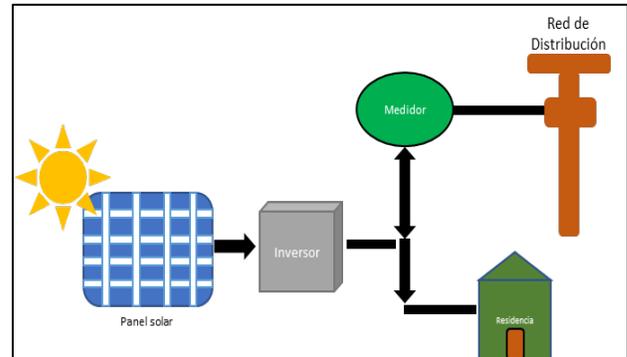


**Figura 1.** Esquema de una instalación solar térmica (Fuente: elaboración propia 2021)

**ENERGÍA ELÉCTRICA FOTOVOLTAICA**

Un Sistema fotovoltaico típico que se conecta a la red eléctrica de distribución mostrado en la Figura 2 se compone de lo siguiente:

- Arreglo fotovoltaico
- Inversor de corriente
- Medidor bidireccional



**Figura 2.** Configuración de un SFV conectado a la Red Eléctrica (Fuente propia, 2021)

El arreglo fotovoltaico consiste en un determinado número de paneles o módulos solares. El inversor de corriente se encarga de convertir la corriente directa producida por el SFV a corriente alterna en fase y a la frecuencia de la red (Balderas, 2015), finalmente, el medidor bidireccional es un elemento indispensable para el uso de un SFV, este es capaz de diferenciar entre la energía que suministra CFE y la energía que se entrega del sistema fotovoltaico (Galván, 2020).

<b>Problema</b>	<b>Causa probable</b>
<b>Interrupciones momentáneas y de larga duración</b>	Está sujeta a gran controversia. Ciertamente una interrupción de muchos ciclos no es momentánea, las interrupciones momentáneas son clasificadas como interrupciones en el rango de 0.1 a 1.0 ciclos. Las interrupciones de menor duración son llamadas recortes. Las interrupciones de mayor duración se colapsan por un periodo de tiempo que no excede 1 minuto.
<b>Ruido</b>	Son señales eléctricas no deseadas y puede ser provocado por conexiones defectuosas en el sistema de transmisión o distribución.
<b>Distorsión armónica</b>	Consiste en tensiones o corrientes sinusoidales que tienen frecuencias que son múltiples enteros de la frecuencia del sistema de suministro.
<b>Impulsos</b>	El impulso transitorio se refiere a un cambio súbito en la condición del estado-estable de la tensión eléctrica, corriente, o ambos, es unidireccional en polaridad.

Fecha enviada: 11 junio 2023

Fecha revisado: 25 julio 2023

<b>Ranuras</b>	Es una variación de los impulsos asíncronos. Estas ranuras, son perturbaciones periódicas en la tensión eléctrica causadas por el funcionamiento normal de dispositivos con electrónica de potencia cuando la corriente es conmutada de una fase a otra.
<b>Transitorios oscilatorios</b>	Es un cambio súbito en la condición de estado-estable de la tensión eléctrica, corriente, o ambos, eso incluye los valores de polaridad positivos y negativos.
<b>Elevaciones de tensión eléctrica</b>	Son tensiones eléctricas transitorias causadas por conexión o desconexión de cargas o descargas atmosféricas. Se caracterizan por un frente de la onda estándar.

Tabla 1. Algunos problemas de la Calidad de la energía y su causa probable (Jorge Luis Arizpe Islas, 2013)

### PROBLEMAS DE CALIDAD DE ENERGÍA EN LA RED ELÉCTRICA DE CFE

En general, en una instalación eléctrica fotovoltaica la energía es discontinua y esto genera problemas, éstos se dictan de acuerdo con la especificación “CFE L0000-45”, mostrando sus rangos de operación (Electricidad, 2007).

Los principales problemas están relacionados con siguientes parámetros.

1. Tensión eléctrica
2. Frecuencia
3. Variaciones de Tensión eléctrica
4. Distorsión Armónica

**1.Tensión eléctrica.** Se establece una tolerancia de  $\pm 10\%$  de la tensión eficaz nominal en la regulación de la tensión del sistema de distribución de baja tensión ( $V_{\text{nominal}} \leq 1000 \text{ V}$ ).

**2. Frecuencia.** El nivel de control que se establece es de 59.2 Hz a 60.8 Hz.

**3.Variaciones de Tensión Eléctrica.** Cuando se conecta un SFV a la red eléctrica ésta puede sufrir variaciones en la tensión eléctrica. En la Figura 3 se muestran los límites establecidos por la CFE en la especificación “CFE G0100-04” (Electricidad., 2008).

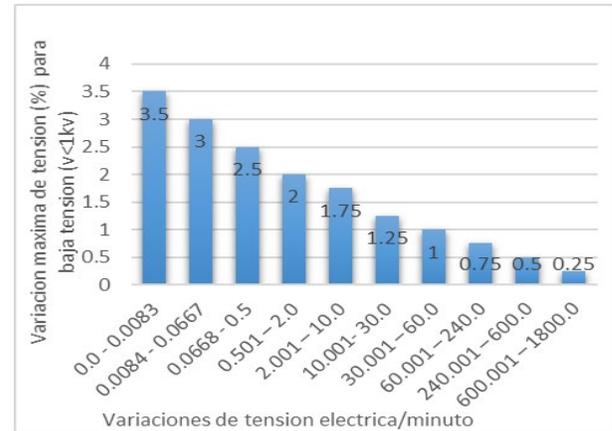


Figura 3. Límites en la variación de la tensión eléctrica para el servicio de CFE (Electricidad, 2007)

**4. Distorsión armónica.** De acuerdo con la CFE una armónica es una componente senoidal de una onda periódica no senoidal que tiene una frecuencia correspondiente a un número múltiplo entero, fraccionario o impares de la frecuencia fundamental (Electricidad, 2007). Estas contaminan la onda sinusoidal pura, esto quiere decir que las señales armónicas se suman para dar una señal distorsionada, en la Figura 4 se puede observar la señal sinusoidal a 60Hz.

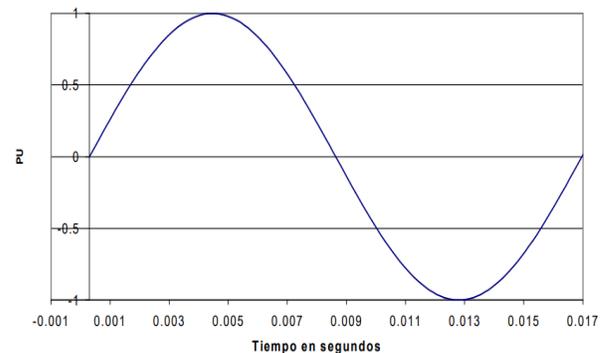
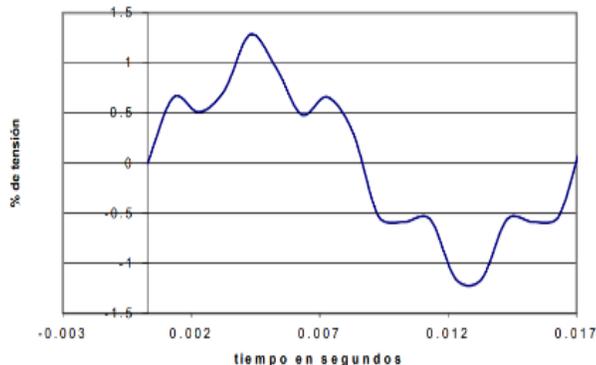


Figura 4. Forma de onda a frecuencia fundamental sin presencia de armónicos (Santiago Barcón R. G., 2012).

Las señales armónicas de tercer orden se suman a la fundamental creando una onda no sinusoidal como se muestra en la Figura 5.

# Efecto de las fuentes de energía sustentables en la calidad de energía para redes eléctricas de distribución

Fecha enviada: 11 junio 2023



**Figura 5.** Forma de onda con presencia de armónicos de en la tensión eléctrica (Santiago Barcón R. G., 2012).

La Distorsión armónica es producida por cargas no lineales, tales como aparatos utilizados tanto en la industria, comercios y residencias que hacen uso intensivo de controles basados en la electrónica de potencia (Gonzalez, Guerrero, & Ramos, 2006).

Se considera una carga no lineal cuando su impedancia cambia al aplicar una tensión eléctrica, esto es, que la corriente eléctrica requerida por la carga no es sinusoidal.

Algunas de las de las cargas no lineales son las siguientes:

- Dispositivos electrónicos de potencia (convertidores, rectificadores, entre otros)
- Dispositivos productores de arcos eléctricos (hornos de arco, luz fluorescente, máquinas soldadoras, entre otros)
- Motores eléctricos utilizados en molinos, laminación, trituración, entre otros.

La distorsión armónica total (THD) es una medida del valor efectivo de las componentes armónicas, de tal manera que es el valor eficaz de los armónicos relativos a la fundamental es una forma de determinar el contenido armónico de la señal de tensión eléctrica ( $V_h$ ) o de la corriente eléctrica ( $I_h$ ) en una onda periódica y está dada por las siguientes ecuaciones (Gonzalez, Guerrero, & Ramos, 2006).

$$THD_{\delta} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} \delta_h^2}}{\delta_1}$$

donde:

$\delta_1$  y  $\delta_h$  componente fundamental y armónico de tensión o corriente eléctrica, respectivamente.

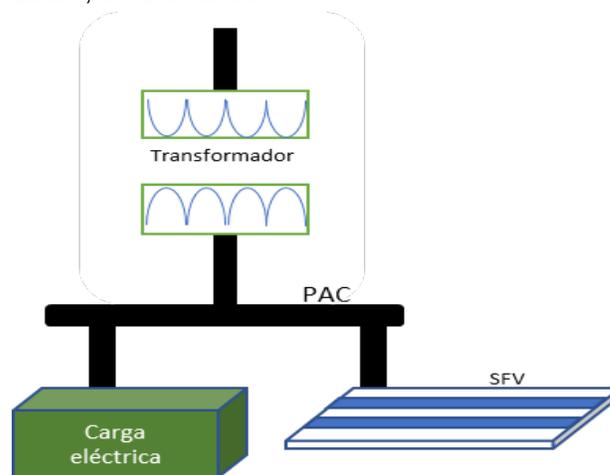
Fecha revisado: 25 julio 2023

Los límites de distorsión armónica establecidos por la CFE en la especificación “CFE G0100-04” (Electricidad., 2008) se presentan en la Tabla 2.

Clasificación de la Tensión	Baja Tensión
Tensión Eléctrica en kV	V < 1kV
Distorsión armónica total (THD <sub>t</sub> )	8.0%
Límite para armónicos individuales (THD)	6.0%

**Tabla 2.** Límites de distorsión armónica de tensión establecidos para el servicio de CFE para baja tensión (Electricidad, 2007)

Los sistemas fotovoltaicos deben de cumplir con los límites de distorsión armónica establecidos en la Tabla 4, considerando:



**Figura 6.** Esquema típico de un SFV interconectado a la red eléctrica (Fuente propia 2021)

Para sistemas eléctricos robustos la relación ICC/IL  $\geq$  1000 se tendrá una mayor tolerancia a la distorsión armónica impar, en este caso hasta un 20% de THD, tal como se muestra en la Tabla 3, mientras que la distorsión armónica para los armónicos pares se reduce en este caso al 15%. Dónde ICC. Es la corriente eléctrica en el punto de acoplamiento común (PAC) e IL. Representa la corriente eléctrica de la carga

(ICC/IL)	Componente armónico individual máximo para armónicas impares (%)					THD (%)
	h<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	h≥35	
(ICC/IL) <20	4	2	1.5	0.6	0.3	5
20≤(ICC/IL) <50	7	3.5	2.5	1	0.5	8
50≤(ICC/IL) <100	10	4.5	4	1.5	0.7	12
100≤(ICC/IL) <1000	12	5.5	5	2	1	15
(ICC/IL) ≥ 1000	15	7	6	2.5	1.4	20

**Tabla 3.** Distorsión armónica máxima permitida en corriente para tensiones menores o iguales a 69kV (Electricidad., 2008).

# Efecto de las fuentes de energía sustentables en la calidad de energía para redes eléctricas de distribución

Fecha enviada: 11 junio 2023

Fecha revisado: 25 julio 2023

## METODOLOGÍA

Se realizó una investigación bibliográfica para recabar la información más importante sobre los problemas más frecuentes en cuanto a calidad de la energía en un SFV describiéndolos y señalando los valores mínimos y máximos que son permitidos para su operación. Gracias a la investigación se llega al problema principal que se presenta en estos sistemas, el cual es la distorsión armónica.

El modelo matemático de Fourier demuestra que una función periódica cualquiera puede descomponerse en una suma de funciones senoidales, siendo la primera una función senoidal fundamental con la misma frecuencia que la función original y el resto de las frecuencias múltiplos exactos de la frecuencia fundamental (Gonzalez, Guerrero, & Ramos, 2006).

Para el análisis de una señal periódica finita implica la ecuación de la forma trigonométrica definida por:

$$f(t) = \sum_{k=0}^{\infty} ak\cos(k\omega t) + bksin(k\omega t)$$

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(k\omega t) dt$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(k\omega t) dt$$

donde:

$a_k$ ,  $b_k$  representan las componentes senoidales pares e impares de la señal, respectivamente.

$k = 1$  representa la señal fundamental

$k > 1$  los armónicos.

## CASO DE ESTUDIO

De una medición de distorsión armónica total realizada en diferentes aparatos electrodomésticos de los cuales se hace una comparativa de los resultados de un Sistema eléctrico doméstico con un SFV, Esta medición fue realizada en la Universidad Tecnológica de San Juan del Río de Querétaro en México. En la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos.

## RESULTADOS

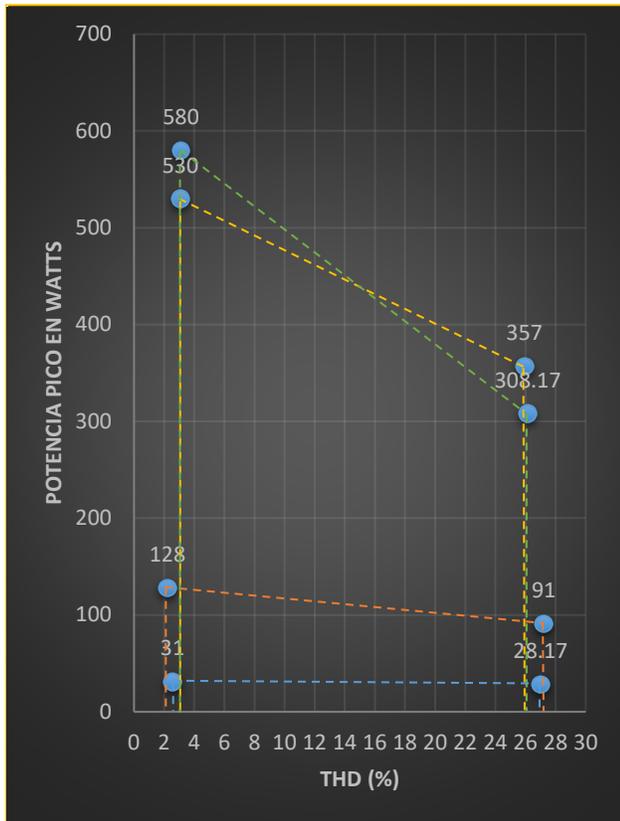
Electrodoméstico	Potencia (w)	Potencia pico (w)	THD (%)
<b>Batidora</b>			
SFV	53.19	91	27.05
Red Eléctrica	59	128	2.23
<b>Licuada</b>			
SFV	107	357	25.11
Red Eléctrica	200	530	3.09
<b>Taladro</b>			
SFV	181.31	308.17	26.15
Red Eléctrica	240	580	3.13
<b>Grabadora</b>			
SFV	11	28.17	27
Red Eléctrica	12.31	31	2.56

**Tabla 4.** Distorsión Armónica Total de medición en diferentes aparatos (Angel Marroquin, 2014).

En la Tabla 4, se muestra el efecto del SFV sobre la potencia de cada uno de los aparatos electrodomésticos, así como el nivel de distorsión armónica total que se presenta en el mismo aparato, pero conectado en un sistema fotovoltaico y la red eléctrica.

Fecha enviada: 11 junio 2023

Fecha revisado: 25 julio 2023



**Figura 7.** Comportamiento de la Potencia (w) y del THD (%) de un SFV contra la Red eléctrica de CFE (Fuente: elaboración propia 2021)

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para cada resultado se observa en la gráfica que en el SFV la potencia cae y la distorsión armónica aumenta lo contrario que cuando los aparatos son conectados a la red eléctrica, aquí la potencia aumenta y la distorsión es menor.

En la Figura 7 se muestra el comportamiento para una carga con un comportamiento de resistencia constante que se ve afectado por el contenido armónico, esto es, la potencia máxima decrece en un 13% con el incremento del THD hasta de 91%, mientras que cuando se tiene una carga electrónica con un comportamiento de potencia constante la potencia máxima obtenida disminuye en un 11% ante un incremento del contenido armónico del 91% de la señal de tensión eléctrica.

### CONCLUSION

Se debe observar que los problemas de calidad de la energía también están asociados a los sistemas

fotovoltaico y en general a las fuentes de energía sustentable. Regularmente no se habla de los problemas de Calidad de la energía que existen en los sistemas fotovoltaicos, observando los resultados de la medición de la Distorsión armónica en electrodomésticos conectados a un SFV y a la red eléctrica convencional muestra una clara diferencia entre los dos sistemas, la distorsión armónica debida a los SFV repercute directamente en la potencia de los mismos y por lo tanto existe un incumplimiento de las especificaciones dictadas por CFE vistas anteriormente, en los 4 casos. La distorsión armónica no sólo viaja hacia el sistema por su baja impedancia, sino que también afecta a la carga conectada en el PAC.

### BIBLIOGRAFÍA

- Balderas, S. M. (2015). Calidad de la energía en sistemas de generación renovable. *Constructor Eléctrico*, 68.
- Jorge Luis Arizpe Islas, S. N. (2013). *Calidad de Energía y Sistemas Eléctricos de Potencia*. Monterrey NL. : Multidisciplinas de la Ingeniería.
- Arancibia, C., & Brown, R. B. (2010). Instituto de geofísica de la UNAM. *Energía del sol*, 8.
- Galván, G. (2020). CCEEA. Retrieved from <https://cceeex.mx/blog/energia-solar-fotovoltaica/como-funciona-el-medidor-bidireccional-de-cfe>.
- Electricidad, C. F. (2007). *Desviaciones permisibles en las formas de onda de tensión y corriente en el suministro y consumo de energía eléctrica*. México : Especificación CFE L0000-45.
- Electricidad., C. F. (2008). *INTERCONEXIÓN A LA RED ELÉCTRICA DE BAJA TENSIÓN DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS*. México: Especificación CFE G0100-04.
- Gonzalez, M. S., Guerrero, J. A., & Ramos, L. A. (2006). Las cargas no lineales, su repercusión en las instalaciones eléctricas y sus soluciones. *Revista conciencia Tecnológica*, 6.
- Santiago Barcón, R. G. (2012). *Calidad de la Energía: Factor de potencia y filtrado de armónicos*. México: MC Graw Hill.

## Efecto de las fuentes de energía sustentables en la calidad de energía para redes eléctricas de distribución

**Fecha enviada: 11 junio 2023**

**Fecha revisado: 25 julio 2023**

Ángel Marroquín, J. O. (2014). *Análisis de un sistema fotovoltaico operando bajo la modalidad tipo isla*. Querétaro : Universidad Tecnológica de San Juan del Río.

Planas, O. (13 de Julio de 2011). *Energía Solar* . Obtenido de Energía Solar : [solar-energia.net/energia-solar-termica](http://solar-energia.net/energia-solar-termica)