



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO

DIVISIÓN ACADÉMICA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA



Estudio de los parámetros eléctricos en la unión sistema fotovoltaico-red convencional de energía

TESIS

Para obtener el grado de

Maestro en Ciencias en Ingeniería

PRESENTA:

Ing. María Fernanda García Mendoza

DIRECTOR:

Dr. Germán Pérez Hernández

Cunduacán, Tabasco, México.

Junio de 2018



UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"



División
Académica
de Ingeniería
y Arquitectura



DIRECCIÓN

OFICIO DIR/DAIA/897/2018
FECHA: 21 de Mayo 2018
ASUNTO: Autorización de Impresión
Definitiva

C. ING. MARÍA FERNANDA GARCÍA MENDOZA
PASANTE DE LA MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
PRESENTE.

En virtud de haber elaborado su trabajo de Tesis denominado:

**"ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS ELECTRICOS EN LA UNIÓN SISTEMA
FOTOVOLTAICO-RED CONVENCIONAL DE ENERGÍA"**

Para obtener el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería y en el cual el Dr. Germán Pérez Hernández ha sido el Director de Tesis.

Tengo a bien autorizarle la **IMPRESIÓN DEFINITIVA** de dicho trabajo, continuando con los trámites correspondientes para su examen de obtención de grado.

Sin otro particular, le envío un afectuoso saludo.

ATENTAMENTE

DR. GERMÁN PÉREZ HERNÁNDEZ
DIRECTOR

UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO
DIVISIÓN ACADÉMICA DE
INGENIERÍA Y ARQUITECTURA



C.c.p. Archivo

Dr. GPH/Dr. JBF/apl.



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE



**División
Académica
de Ingeniería
y Arquitectura**

COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

Cunduacán, Tabasco, a 17 de Mayo de 2018

MEM/MCI/004/2018

PARA: DR. GERMÁN PÉREZ HERNÁNDEZ
DIRECTOR DE LA DAIA
DE: COMISIÓN SINODAL
ASUNTO: APROBACIÓN DE IMPRESIÓN TESIS DE MAESTRIA

Una vez hecha la revisión detallada del Trabajo de Tesis denominado:

**"ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS EN LA UNIÓN SISTEMA
FOTOVOLTAICO-RED CONVENCIONAL DE ENERGÍA"**

Desarrollado por la C. **ING. MARÍA FERNANDA GARCÍA MENDOZA** de la **Maestría en Ciencias en Ingeniería**, le comunicamos que aceptamos la impresión del trabajo, ya que el mismo ha cumplido con los requisitos necesarios.

COMISIÓN SINODAL

DR. ERIK RAMÍREZ MORALES
PRESIDENTE

DRA. LIZETH ROJAS BLANCO
SECRETARIO

DR. GERMÁN PÉREZ HERNÁNDEZ
VOCAL 1

DRA. LAURA LORENA DÍAZ FLORES
VOCAL 2

DR. JUAN GABRIEL ÁLVAREZ
RAMÍREZ
VOCAL 3

c.c.p. Archivo

CARTA DE AUTORIZACIÓN

La que suscribe, autoriza por medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice tanto física como digitalmente la tesis de grado denominada "Estudio de los parámetros eléctricos en la unión sistema fotovoltaico-red convencional de energía", ³ de la cual soy autor y titular de los Derechos de Autor.

La finalidad del uso por parte de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de la tesis antes mencionada, será única y exclusivamente para difusión, educación y sin fines de lucro; autorización que se hace de manera enunciativa más no limitativa para subirla a la Red Abierta de Bibliotecas Digitales (RABID) y a cualquier otra red académica con las que la Universidad tenga relación institucional.

Por lo antes manifestado, libero a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de cualquier reclamación legal que pudiera ejercer respecto al uso y manipulación de la tesis mencionada y para los fines estipulados en éste documento.

³ Se firma la presente autorización en la ciudad de Villahermosa, Tabasco a los 15 días del mes de junio del año 2018.

AUTORIZÓ



MARÍA FERNANDA GARCÍA MENDOZA

TESISTA

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por permitirme culminar esta etapa, ser mi guía y estar siempre caminando a mi lado.

A mis padres, por ser mi apoyo y fortaleza en todo momento para afrontar cada momento en mi vida y es por ellos el lugar donde me encuentro.

A Rafa, mi esposo, esto también es logro tuyo, por tu apoyo, por mantenerme firme en los momentos malos, por tu complicidad, amor y compañía. Nada sería posible sin tu mano sosteniendo la mía.

A mi alma máter, la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, que es base y continuidad en la adquisición de conocimientos, que ha hecho posible a través de ella, una formación íntegra como profesional, persona y juchimán.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por brindarme los medios para alcanzar una meta importante y ser pieza fundamental en mi desarrollo académico y profesional.

Al Dr. Germán Pérez Hernández, por ser parte desde hace años de mi formación como estudiante y profesional, por brindarme apoyo y orientación para lograr culminar cada etapa. Por ser mi familia en la ciencia.

Al Dr. Erik Ramírez Morales y la Dra. Lizeth Rojas Blanco por su apoyo, confianza, atención y por sus consejos, siempre de una forma sincera, por ser parte esencial de mi formación y de este proyecto.

Al Dr. Juan Gabriel Álvarez Ramírez y la Dra. Laura Lorena Díaz Flores, por su apoyo, sus observaciones y su ayuda en busca de mejorar este proyecto en sus diferentes etapas de realización y mi visión como estudiante.

DEDICATORIA

A mi Rafa.

Le doy gracias a Dios cada día por tenerte a mi lado, eres mi amigo, cómplice y gran apoyo en mi vida, me das fortaleza y me impulsas a seguir adelante. Te admiro como persona y como colega, me alientas para no creer en limitaciones y poder hacer todo lo que me proponga. Eres luz en mi vida. Te amo!

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	III
ÍNDICE DE TABLAS	IV
RESUMEN	V
ABSTRACT	VI
GLOSARIO	VII
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos.....	6
1.1.1 Objetivo General.....	6
1.1.2 Objetivo Específico.....	6
1.2 Hipótesis	6
1.3 Alcances	6
Referencias	8
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	10
2.1 Energía Solar.....	11
2.1.1 Energía Solar en México	12
2.1.2 Tecnología Solar	15
2.2 Sistemas Fotovoltaicos	18
2.2.1 Clasificación	18
2.2.2 Componentes	21
2.2.3 Inversor	23
2.3 Calidad de la energía eléctrica	26
2.3.1 Factor de potencia.....	27
2.3.2 Distorsión Total Armónica	27
2.3.3 Nivel de Tensión.....	30
Referencias	31
CAPÍTULO 3. DISEÑO EXPERIMENTAL	34

3.1	Sistema fotovoltaico interconectado	34
3.2	Inversores	37
3.2.1	Inversor Zeversolar Evershine TL5000.....	37
3.2.2	Inversor Fronius Ig Plus.....	37
3.3	Analizador de redes	38
3.4	Comprobación general del sistema	40
3.4.1	Estabilidad y limpieza del sistema fotovoltaico	41
3.4.2	Instalación y estado del inversor Zeversolar TL5000	41
3.4.3	Instalación y estado del inversor Fronius Ig Plus	42
3.5	Medición de los parámetros de la calidad de energía.....	42
3.5.1	Índices de calidad de energía.....	45
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		51
4.1	Análisis de los índices de calidad de energía	51
4.1.1	Potencia de operación.....	51
4.1.2	Factor de potencia.....	53
4.1.3	Espectro armónico.....	56
4.1.4	Distorsión armónica total	58
4.1.5	Nivel de tensión	62
Referencias		69
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES		71
CAPÍTULO 6. RECOMENDACIONES Y PERSPECTIVAS.....		74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Diagrama del Sistema fotovoltaico conectado a la red [26].	3
Figura 2.1 Generación de electricidad (Otras energías renovables: PV, eólica y geotérmica) [9].	11
Figura 2.2 Promedio de irradiancia solar.[9].	13
Figura 2.3 Promedio de irradiancia solar en México (Instituto de Investigaciones Eléctricas y SENER) [75].	14
Figura 2.4 Celdas de a) Silicio monocristalino y b) policristalino [6].	16
Figura 2.5 Sistema fotovoltaico conectado a la red.	20
Figura 2.6 Componentes de un sistema fotovoltaico [1]	22
Figura 3.1. Ubicación geográfica del Sistema Fovoltaiico.	35
Figura 3.2. Sistema fotovoltaico de la DAIA.	36
Figura 3.3. Inversor Zeversolar TL5000.	37
Figura 3.4. Inversor Fronius IG Plus.	38
Figura 3.5. Analizador de redes AEMC 3945.	39
Figura 3.6 Conexión del inversor Zeversolar al sistema fotovoltaico.	41
Figura 3.7 Conexión del inversor Fronius al sistema fotovoltaico.	42
Figura 3.8 Configuración de analizador de calidad de energía.	43
Figura 3.9 Panel de parámetros de medición.	44
Figura 3.10. Software de análisis de datos "Dataview".	44
Figura 4.1 a) Potencia generada por el SF conectado al inversor Zeversolar y b) Potencia generada por el SF conectado al inversor Fronius.	52
Figura 4.2 a) Factor de potencia Zeversolar durante 35 días y Factor de Potencia pico del día 24/07/2017 y b) Factor de potencia Fronius durante 35 días y Factor de Potencia pico del día 13/05/2017.	54
Figura 4.3 Relación entre el Factor de Potencia y la Potencia a) Inversor Zeversolar e b) Inversor Fronius.	56
Figura 4.4 Comparación entre armónicos pares y la normatividad en el inversor a) Zeversolar y b) Fronius.	57

Figura 4.5 Comparación entre armónicos impares y la normatividad a) Inversor Zeversolar y b) Inversor Fronius.	57
Figura 4.6 Distorsión total armónica de voltaje respecto a la normatividad a) Inversor Zeversolar y b) Inversor Fronius.	59
Figura 4.7 Distorsión total armónica de corriente con respecto a la normatividad a) Inversor Zeversolar y b) Inversor Fronius.	60
Figura 4.8. Relación entre la Distorsión total armónica de voltaje y la Potencia a) Inversor Zeversolar y b) Inversor Fronius.	61
Figura 4.9 Relación entre la Distorsión total armónica de corriente y la Potencia a) Inversor Zeversolar y b) Inversor Fronius.	62
Figura 4.10 Valor RMS voltaje (1 s) con respecto a los límites de voltaje establecidos a) Inversor Zeversolar y b) Inversor Fronius.	65
Figura 4.11 Desequilibrio de Tensión.....	66
Figura 4.12 Índice de variación de tensión a corto plazo a) Inversor Zeversolar y b) Inversor Fronius.	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Indicadores de calidad y sus límites.....	45
Tabla 3.2. Límites permisibles de distorsión armónica en tensión (CFE-L0000-45) [5-7].	46
Tabla 3.3. Límites de distorsión armónica de corriente (CFE-L0000-45) [5-7].	47
Tabla 3.4. Límite permisible de los indicadores de variaciones de tensión [4,9].	49
Tabla 4.1 Límites mínimos y máximos de tensión generada por el SFV (inversor Zeversolar).	63
Tabla 4.2 Límites mínimos y máximos de tensión generada por el SFV (inversor Fronius).	63

RESUMEN

En la actualidad la instalación de los sistemas fotovoltaicos interconectados a la red de servicios eléctricos es una de las principales vías alternas de generación de energía eléctrica. El inversor es uno de los esenciales componentes de un sistema fotovoltaico, ya que convierte la corriente directa obtenida de los paneles en corriente alterna para consumo convencional, sin embargo, en la conversión de una fuente lineal a una senoidal, éstos pueden ser motivo de generación de perturbaciones que, al ser inyectadas a la red de servicios eléctricos, puede generar un problema mayor en la calidad de energía suministrada en instalaciones y equipos eléctricos.

Este estudio se realizó con un sistema fotovoltaico de una capacidad de 5 KW, instalado en la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, en la División Académica de Ingeniería y Arquitectura, conectado a un inversor Fronius Ig Plus V 5.0-1 (con transformador de alta frecuencia) durante el periodo de abril-mayo y un inversor Zeversolar TL5000 (sin transformador) en el periodo de julio-agosto. Las mediciones se llevaron a cabo por medio de un analizador trifásico de la calidad de energía, con un periodo de integración de cinco minutos.

Se obtuvieron los valores de los índices de calidad de energía como son, el factor de potencia, distorsión de armónicos de voltaje y corriente, nivel de tensión y flicker, por medio de los cuales se logró determinar la calidad de energía a la salida de cada inversor.

Se demostró que el inversor Zeversolar, presentó mejores resultados de calidad de energía, a pesar de no contar con la presencia del transformador de aislamiento galvánico y sin haberse realizado en el periodo de mayor irradiancia. Se alcanzó una capacidad de generación 14% mayor en comparación del Fronius, así como un factor de potencia cercano a la unidad y armónicos y valores de desequilibrio de tensión dentro de los límites establecidos por la normatividad nacional e internacional.

ABSTRACT

At present, the installation of photovoltaic systems interconnected to the electrical services network is one of the main alternative ways of generating electricity. The inverter is one of the essential components of a photovoltaic system, since it converts the direct current obtained from the panels into alternating current for conventional consumption, however in the conversion of a linear source to a sinusoidal these can be a reason for generation of disturbances that, when injected into the electric service network, can generate a greater problem in the quality of energy supplied in electrical installations and equipment.

This study was carried out with a photovoltaic system with a capacity of 5 KW, installed in the Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, in the Division Académica de Ingeniería y Arquitectura, connected to a Fronius Ig Plus V 5.0-1 inverter (with high frequency transformer) during the April-May period and an inverter Zerversolar TL5000 (without transformer) in the period of July-August. The measurements were carried out by means of a three-phase power quality analyzer, with an integration period of five minutes.

The values of the power quality indices were obtained, such as the power factor, harmonic distortion of voltage and current, voltage level and flicker. By means of which it was possible to determine the power quality at the output of each inverter.

It was demonstrated that the inverter Zerversolar, presented better results of power quality, in spite of not having the presence of the galvanic isolation transformer and without having done it in the period of greater irradiance. A generation capacity of 14% higher compared to Fronius was achieved, as well as a power factor close to unity and harmonics and voltage imbalance values within the limits established by national and international regulations.

GLOSARIO

Aislamiento galvánico: Consiste en la separación de partes funcionales de un circuito eléctrico para prevenir el traspaso de portadores de carga.

Armónicos: Son múltiplos de la frecuencia fundamental de trabajo del sistema y cuya amplitud va decreciendo conforme aumenta el múltiplo. En el caso de sistemas alimentados por la red de 50 Hz, pueden aparecer armónicos de 100, 150, 200, etc.

Corriente alterna: Abreviada CA en español y AC en inglés (*alternating current*) se denomina a la corriente eléctrica en la que la magnitud y el sentido varían cíclicamente. La forma de oscilación de la corriente alterna más comúnmente utilizada es la oscilación senoidal con la que se consigue una transmisión más eficiente de la energía.

Corriente continua o directa: Abreviada CC en español, así como CD por influencia del inglés DC (*direct current*) se refiere al flujo continuo de carga eléctrica a través de un conductor entre dos puntos de distinto potencial y carga eléctrica, que no cambia de sentido con el tiempo y circula siempre en la misma dirección.

Efecto fotovoltaico: Es el efecto fotoeléctrico caracterizado por la producción de una corriente eléctrica entre dos piezas de material diferente que están en contacto y expuestas a la luz o, en general, a una radiación electromagnética.

Inversor fotovoltaico: Es un convertidor que transforma la energía de corriente continua procedente del generador fotovoltaico en corriente alterna. La función de un inversor es cambiar un voltaje de entrada de corriente continua a un voltaje simétrico de salida de corriente alterna, con la magnitud y frecuencia deseada por el usuario o el diseñador.

Irradiancia solar: Es la magnitud utilizada para describir la potencia incidente por unidad de superficie de todo tipo de radiación electromagnética. En unidades del sistema internacional se mide en W/m^2 .

Potencia activa: Es la cantidad total de potencia "útil" que consume un equipo eléctrico, esto quiere decir que la potencia activa es la realmente utilizada para realizar el trabajo. También se llama potencia media, real o verdadera y es debida a los dispositivos resistivos. Su unidad es el vatio (W).

4 **Potencia aparente:** Es la potencia total consumida por la carga y es el producto de los valores eficaces de tensión e intensidad. Se obtiene como la suma vectorial de las potencias activa y reactiva. Su unidad de medida es el voltamperio (VA).

Potencia reactiva: Es la potencia que necesitan las bobinas y los condensadores para generar campos magnéticos o eléctricos, pero que no se transforma en trabajo efectivo, sino que fluctúa por la red entre el generador y los receptores. Su unidad de medida es el voltamperio reactivo (Var).

Radiación solar: Es el conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el Sol. La radiación solar se distribuye desde el infrarrojo hasta el ultravioleta.

6 **Transformador:** Es un dispositivo que convierte la energía eléctrica alterna de un cierto nivel de tensión, en energía alterna de otro nivel de tensión, basándose en el fenómeno de la inducción electromagnética.

CAPÍTULO 1.

INTRODUCCIÓN

La energía solar es un recurso renovable que se ha destacado en los últimos tiempos por ser la mayor fuente de energía en la Tierra que no contamina, es obtenida mediante la captación de la luz y el calor emitidos por el Sol [1].

El potencial de la energía solar como sustituto de los combustibles fósiles aumenta a medida que el mercado de este tipo de energía prolifera, teniendo un potencial de crecimiento para el 2030 de hasta siete veces más que en la actualidad. Una de sus ramas, la energía solar fotovoltaica, ha aumentado su empleo como fuente de energía, debido a la producción del insumo más importante en la actualidad, la electricidad.

La energía solar fotovoltaica consiste en la conversión directa de la luz solar en energía eléctrica, mediante un dispositivo denominado celda solar [2]. La conversión de la luz solar en energía eléctrica es un fenómeno físico conocido como efecto fotovoltaico [3,4].

En la búsqueda de utilización de esta fuente de energía se han desarrollado tecnologías con las que es posible hacer uso de ella, y por esto se ha desplegado la instalación de los sistemas fotovoltaicos a nivel mundial [5], convirtiéndose en una de las más atractivas para la obtención de energía eléctrica, por lo que se ha aumentado su uso a gran escala. Para lograr este avance tecnológico se comienza con el estudio de la base de un sistema fotovoltaico, las celdas solares. Estas son dispositivos semiconductores que absorben un fotón de la luz visible emitida por el Sol, que inyecta un electrón a la banda de conducción del

semiconductor, que se difunde en un campo eléctrico generando electricidad en forma de corriente continua o directa (DC) [6].

Las celdas fotovoltaicas están interconectadas para formar módulos fotovoltaicos; los módulos fotovoltaicos, a su vez se combinan para formar un sistema fotovoltaico. Las celdas que forman los paneles están fabricadas de películas delgadas de semiconductores como el silicio amorfo (a-Si) con eficiencia de 4-8%, multiunión con películas delgadas de silicio amorfo y silicio microcristalino (a-Si, μ c-Si) con eficiencia de hasta 10%, otras de telurio de cadmio (CdTe) con eficiencia del 11% y selenuro de cobre Indio (CIS) y selenuro de cobre indio galio (CIGS) con eficiencias del 7-12% [7,8].

Los paneles fabricados con celdas de silicio cristalino (monocristalino o policristalino) son los de mayor disponibilidad. Estos constituyen la mayor parte del mercado, con un estimado de 90%, mientras que las películas delgadas constituyen menos del 10% [9]. Debido al considerable progreso de la tecnología, la eficiencia media de los módulos de silicio comerciales están mejorando continuamente (un 0.3% por año) y el costo está disminuyendo [10].

Para la conformación de los sistemas fotovoltaicos (es decir, la unión de varios paneles); hay dos tipos de sistemas, los conectados a la red y los sistemas independientes o autónomos (stand-alone) los cuales se utilizan principalmente en las áreas que no tienen o tienen un acceso limitado a la electricidad y en general están equipados con baterías para almacenamiento de energía. En cambio los sistemas fotovoltaicos conectados a la red están diseñados para operar en paralelo con la red de servicios eléctricos (Ver Figura 1.1), por lo general requieren un inversor, que transforma la corriente continua o directa (CD) de los módulos fotovoltaicos en corriente alterna (CA) que es inyectada a la red eléctrica [11,12]. Otros componentes que se asocian a este proceso de entrega de energía además de los inversores son los transformadores, dispositivos de protección eléctrica, el cableado y los equipos de vigilancia, así como

componentes estructurales para la instalación de los paneles como marcos de montaje fijos y sistemas de seguimiento solar [7].

Los inversores tienen una gran importancia en los sistemas fotovoltaicos, ya que tienen una responsabilidad significativa sobre la calidad de energía inyectada a la red, su principal desventaja radica en que los inversores no son sustituibles. El progreso de este tipo de sistemas es analizado en el área económica, por el hecho de poder utilizar la energía obtenida de inmediato o ser vendida a la compañía eléctrica. Cuando el recurso solar no es suficiente o ausente, la red desempeña el papel del sistema de almacenamiento y proporciona energía para cumplir los requisitos, por lo que no es necesaria la instalación de baterías [11,13].

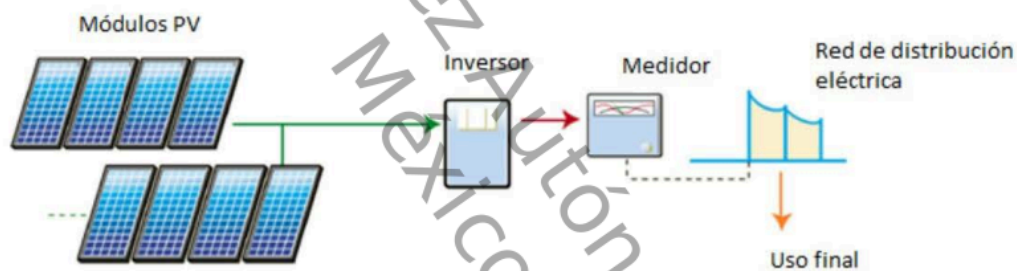


Figura 1.1 Diagrama del Sistema fotovoltaico conectado a la red [26].

Los inversores empleados en sistemas fotovoltaicos se pueden clasificar como inversor central, inversor monofásico, módulo inversor integrado e inversor multi-string [14]. Los inversores centrales que son los que manejan la carga general de corriente producida por los paneles pueden tener desventajas significativas, entre las que se pueden mencionar, las pérdidas de energía, debido al seguimiento del punto de máxima potencia centralizado (MPPT); los cables de corriente continua de alta tensión entre los paneles fotovoltaicos e inversores, debido a la alta tensión de entrada; el diseño no flexible; las pérdidas en los diodos y el elevado costo [15], lo que provoca que este elemento pueda introducir corrientes de fuga

adicionales; que aumentan las emisiones electromagnéticas, armónicos (componentes de una señal de frecuencia secundaria que acompaña a la frecuencia fundamental, es decir ruido eléctrico). Otros disturbios como interrupciones de servicio, cortes de voltaje, sags (voltajes bajos momentáneos), brownouts (voltajes bajos permanentes) y sobrevoltaje son responsables del comportamiento defectuoso de los dispositivos de protección, del calentamiento excesivo de los equipos y la diferencia anormal de voltaje de neutro a tierra [16] y pueden disminuir la calidad de energía del inversor y así mismo la calidad de la corriente inyectada [17]. Los armónicos causan muchos efectos no deseados, tales como vibraciones mecánicas que derivan en ruido acústico. Hay muy pocos métodos para suprimir los armónicos de corriente tanto de software, que no es confiable, como de hardware, añadiendo un filtro. Sin embargo no los eliminan por completo, debido a las diferentes frecuencias en que se encuentran [18].

Independientemente del tipo de configuración que el inversor tenga, en los sistemas fotovoltaicos se dan pequeños fenómenos de desajuste que aumentan las pérdidas de potencia. Por lo que el estudio de este tipo de tecnología, se centra en los inversores, aunque el sombreado y la falta de orientación en el panel interrumpen la alimentación y generación del sistema al inversor [19,20], que puede tener un impacto significativo sobre la respuesta de la eficiencia y la calidad de la energía en todo el sistema [21]. Lo anterior se prevé en el dimensionamiento del sistema fotovoltaico, con lo que se asegura que la electricidad generada por la radiación solar sea equivalente a la energía entregada [22], por lo que las desventajas de este tipo de tecnología se relaciona con el funcionamiento del inversor.

Estos problemas de calidad de energía tienen un efecto adverso en el sistema; por lo tanto, se requiere eliminar o minimizar el contenido armónico. Los filtros pasivos han sido utilizados como una solución convencional para mitigar el contenido armónico en los sistemas de distribución como inversores, pero no logran solucionar definitivamente el problema, por lo que se necesitan estudios para evaluar distintas soluciones [16]. Con base en el análisis de calidad

energética del inversor en operación, se obtiene la forma de la onda que se produce con alguna distorsión armónica, así como la distorsión armónica total reducida (THD) y la magnitud de la armónica, que es el factor que mide la cantidad de armónicos y distorsiones definidas como la relación entre la media cuadrática (RMS) de los armónicos y el valor RMS de la frecuencia fundamental [23,24].

¹ Una innovación realizada en los inversores para alcanzar una mejor eficiencia es eliminar el transformador, ya que este último consume energía, y provoca pérdidas, por lo que disminuye la eficiencia de todo el sistema de conversión. Además, el transformador hace más pesado y grande al inversor, e incluso impide la conexión del inversor integrado al panel fotovoltaico, pero garantiza el aislamiento galvánico entre la fuente y la carga. Su eliminación da como resultado una corriente de fuga que fluye entre las terminales del panel y la línea de tierra a través de capacitancias parasitarias. Para lograr una mayor eficiencia y una menor corriente de fuga, se desarrollan distintas topologías de inversores sin transformador que están disponibles comercialmente, sin contar con un estudio amplio de la calidad de energía generada. Debido a lo anterior se requiere un estudio a fondo de factores que influyen en la calidad de energía eléctrica entregada a la red convencional [19].

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Estudiar la calidad en la producción de energía eléctrica en sistemas fotovoltaicos interconectados con diferente tecnología de inversores.

1.1.2 Objetivo Especifico

- Evaluar la calidad de la energía entregada a la red convencional por el sistema fotovoltaico.
- Estudiar el factor de potencia y armónicos que entregan diferentes tecnologías de inversores a la red servicios eléctricos.
- Obtener a partir de la comparación la tecnología del inversor con mejor producción en la calidad de energía que cumpla con la normatividad.

1.2 Hipótesis

El suministro de energía eléctrica a la red convencional mediante sistemas fotovoltaicos presenta disturbios eléctricos inyectados por el inversor, si éstos son atenuados la calidad de energía producida cumplirá con la normatividad eléctrica establecida.

1.3 Alcances

- El sistema fotovoltaico tendrá dos líneas con una potencia total instalada de 5 KW.
- Los módulos fotovoltaicos que conformarán el sistema son de silicio monocristalino, de una potencia de 265 W, Voc de 39.0 V, Isc de 9.31 A, Vmmp de 30.8 V, de la marca Sunmodule.

- El inversor Fronius IG Plus V contará con las siguientes especificaciones. Un voltaje de entrada de 600 V (DC), un rango de voltaje MPP de 230-500 V (DC), Isc de 29 A.
- El inversor Zeversolar TL5000 sin transformador, contará con un máximo voltaje de entrada de 600 V (DC), un rango de voltaje MPP de 125-620 V (DC), Isc de 2*16.5 A.
- Las condiciones climatológicas para los periodos de medición serán
- Las mediciones se realizarán en periodos de 40 días con un intervalo de 5 minutos.

Referencias

- [1] Millington KR. PHOTOELECTROCHEMICAL CELLS | Dye-Sensitized Cells. *Encycl. Electrochem. Power Sources*, Elsevier; 2009, p. 10–21. doi:10.1016/B978-044452745-5.00317-8.
- [2] Lamnatou C, Chemisana D. Photovoltaic/thermal (PVT) systems: A review with emphasis on environmental issues. *Renew Energy* 2017;105:270–87. doi:10.1016/j.renene.2016.12.009.
- [3] Sardinero IB. Instalación solar fotovoltaica conectada a red sobre la azotea de una nave industrial. Universidad Carlos III de Madrid, 2009.
- [4] Mundada AS, Nilsiam Y, Pearce JM. A review of technical requirements for plug-and-play solar photovoltaic microinverter systems in the United States. *Sol Energy* 2016;135:455–70. doi:10.1016/j.solener.2016.06.002.
- [5] Lewis NS. Research opportunities to advance solar energy utilization. *Science* (80-) 2016;351:aad1920-1-aad1920-8. doi:10.1126/science.aad1920.
- [6] Nogueira CEC, Bedin J, Niedzialkoski RK, de Souza SNM, das Neves JCM. Performance of monocrystalline and polycrystalline solar panels in a water pumping system in Brazil. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;51:1610–6. doi:10.1016/j.rser.2015.07.082.
- [7] International Energy Agency. *Solar Energy Perspectives*. París, Francia: 2011. doi:10.1787/9789264124585-en.
- [8] Haque A. 3 - Solar energy. Elsevier Inc.; 2016. doi:10.1016/B978-0-12-804448-3/00003-7.
- [9] ITRPV ITR for P. International Technology Roadmap for Photovoltaic Results 2014. 2015.
- [10] International Energy Agency IEA. *Technology Roadmap Solar Photovoltaic Energy*. 2014.
- [11] Allouhi A, Saadani R, Kousksou T, Saidur R, Jamil A, Rahmoune M. Grid-connected PV systems installed on institutional buildings: Technology comparison, energy analysis and economic performance. *Energy Build* 2016;130:188–201. doi:10.1016/j.enbuild.2016.08.051.
- [12] Colak I, Demirtas M, Kabalci E. Design, optimisation and application of a resonant DC link inverter for solar energy systems. *COMPEL - Int J Comput Math Electr Eng* 2014;33:1761–76. doi:10.1108/COMPEL-06-2013-0200.
- [13] Lukač N, Seme S, Dežan K, Žalik B, Štumberger G. Economic and environmental assessment of rooftops regarding suitability for photovoltaic systems installation based on remote sensing data. *Energy* 2016;107:854–65. doi:10.1016/j.energy.2016.04.089.
- [14] Islam M, Mekhilef S, Hasan M. Single phase transformerless inverter topologies for grid-tied photovoltaic system: A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;45:69–86. doi:10.1016/j.rser.2015.01.009.
- [15] Elkholy A, Fahmy FH, El-ela AAA, Nafeh AEA, Spea SR. Experimental evaluation.

- of 8 kW grid-connected photovoltaic system in Egypt 2016:1–13.
- [16] Mahajan V, Agwaral P, Gupta HO. dSPACE implementation of cascaded H-bridge inverter for harmonics minimization using artificial intelligence. *COMPEL Int J Comput Math Electr Electron Eng* 2014. doi:10.1108/COMPEL-06-2013-0218.
 - [17] Obi M, Bass R. Trends and challenges of grid-connected photovoltaic systems – A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;58:1082–94. doi:10.1016/j.rser.2015.12.289.
 - [18] Zhang G, Liu X, Mei L, Ouyang H, Deng X. Filter design at the output of the inverter in PMSM drives. *COMPEL - Int J Comput Math Electr Electron Eng* 2017;36:364–77. doi:10.1108/COMPEL-04-2016-0169.
 - [19] Kyamakya K. *COMPEL: The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering. COMPEL - Int J Comput Math Electr Electron Eng* 2013;32. doi:10.1108/COMPEL-10-2013-0333.
 - [20] Sridhar R, Jayasankar KC, Dash SS, Avasthy V. A Single Stage Photovoltaic Inverter With Common Power Factor Control and Maximum Power Point Tracking Circuit. *J Sol Energy Eng* 2013;136:021020. doi:10.1115/1.4025515.
 - [21] Aktas A, Ozdemir E, Karakaya A, Ucar M. Operation and performance of grid-connected solar photovoltaic power system in Kocaeli university. *J Optoelectron Adv Mater* 2013;15:559–64.
 - [22] Romantchik E, Ríos E, Sánchez E, López I, Sánchez JR. Determination of energy to be supplied by photovoltaic systems for fan-pad systems in cooling process of greenhouses. *Appl Therm Eng* 2017;114:1161–8. doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.10.011.
 - [23] Alexander SA, Thathan M. Reduction of voltage harmonics in solar photovoltaic fed inverter of single phase stand alone power system. *J Sol Energy Eng Trans ASME* 2014;136:3–6. doi:10.1115/1.4027267.
 - [24] Arahal MR, Barrero F, Ortega MG, Martín C. Harmonic analysis of direct digital control of voltage inverters. *Math Comput Simul* 2016;130:1–12. doi:10.1016/j.matcom.2016.02.001.

CAPÍTULO 2.

MARCO TEÓRICO

En la actualidad la población sigue en aumento y por ende la demanda energética con el fin de abastecer las necesidades de la vida cotidiana. Sin embargo, la obtención de energía a partir de combustibles fósiles está causando problemas ambientales como el cambio climático, calentamiento global, contaminación del aire y lluvia ácida. Por lo tanto hay una necesidad de desarrollar fuentes alternas para la generación de electricidad que estén dentro de regulaciones políticas y ambientales [1].

Desde 1990 las fuentes de energías renovables han aumentado en una tasa media anual del 2.2%, en especial las áreas de energía fotovoltaica y eólica que crecieron en una media anual de 46.2% y 24.3% respectivamente. La obtención de biogás obtuvo el tercer lugar en tasa de crecimiento con 13.2%, seguido por térmica solar con 11.7%, biocombustibles líquidos 10.4%, biocombustibles sólidos 1.5% [2].

La generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables es menos del 5% del total de energía generada (Figura 2.1) [3]. Se planea tener un valor límite del aumento de temperatura media anual de la superficie por debajo de 2 °C, con la idea de en un futuro mantenerlo en 1.5 °C, para ello se requieren muchos esfuerzos, políticas ambientales, así como la proyección y ejecución del uso de fuentes alternas de energía [4,5].

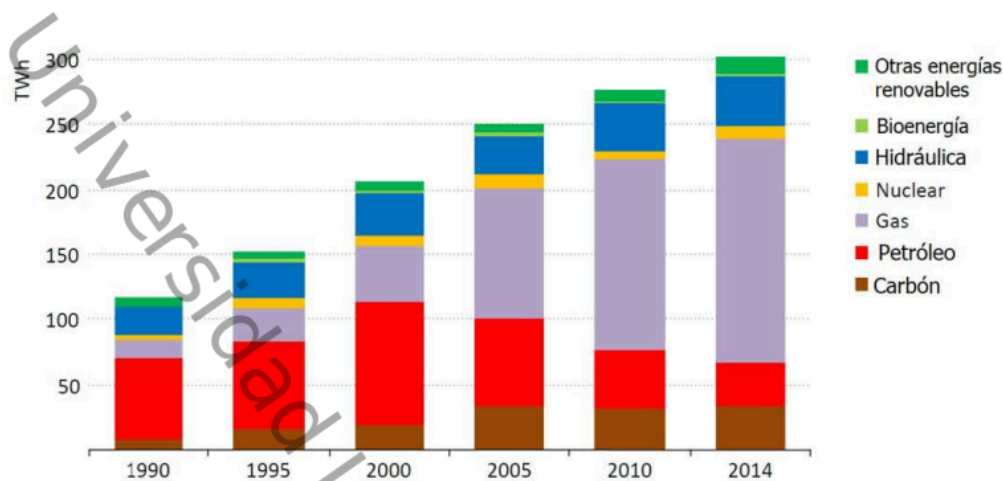


Figura 2.1 Generación de electricidad (Otras energías renovables: PV, eólica y geotérmica) [9].

2.1 Energía Solar

El Sol es la fuente más grande de energía en el planeta Tierra que es liberada por la irradiación de éste al espacio, aunque se recibe una pequeña fracción de radiación electromagnética emitida por el Sol y es vital para todo ser vivo en la Tierra. La radiación recibida es incidente, debido a la forma del planeta; cuando el Sol está a 90° de inclinación, la Tierra recibe la máxima energía posible. Al disminuir este ángulo de inclinación, se hace más grande la distancia que recorren los rayos del Sol a través de la atmósfera reduciendo su intensidad, por ello, al desplazarse del ecuador es más bajo el recurso solar.

De igual manera el eje de rotación de la Tierra influye en la radiación del Sol, al cambiar de norte a sur durante el año, esta declinación establece las estaciones del año con sus distintas intensidades de energía recibida y la misma rotación terrestre es responsable de las variaciones de la luz solar (zonas horarias) siendo la mayor hora incidente de energía, el medio día. Sin embargo, aunque el planeta recibe la radiación solar, la cantidad de ésta puede variar de acuerdo a la ubicación geográfica, hora del día, estación del año y condiciones climáticas.

La radiación igual es diferente cuando la energía emitida pasa a través de la atmósfera y parte de ella es absorbida o reflejada principalmente por la humedad y contaminantes en el aire, ésta se conoce como radiación difusa. La radiación que no es redirigida en la trayectoria a la Tierra se denomina radiación directa y lo que se conoce como irradiancia solar global, no es más que la suma de la radiación difusa y la radiación directa, éste es un factor clave en el diseño de cualquier sistema de recolección solar (medido en $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ por día en una superficie horizontal) [6].

¹⁰ La energía solar se refiere a la conversión de la luz solar en otras formas de energía que los seres humanos pueden utilizar para satisfacer sus necesidades. Ésta puede ser aprovechada por tres tipos de tecnologías: la fotovoltaica (PV), la concentración de energía solar térmica (CST) y la calefacción solar y refrigeración (SHC). La tecnología fotovoltaica, emplea la luz solar directa para generar electricidad mediante una celda fotovoltaica basado en el efecto fotovoltaico.

La energía solar térmica CST, genera electricidad indirectamente capturando el calor de la luz solar por medio de colectores para elevar un fluido a su punto de ebullición, el vapor que se obtiene impulsa una turbina que genera electricidad. La tecnología de refrigeración SHC utiliza energía térmica obtenida del Sol para el suministro de agua caliente para acondicionamiento o calefacción de diversos lugares [7]. Entre estos tipos de tecnología solar, la obtención de energía eléctrica a partir de la captura de energía solar a través de módulos fotovoltaicos se considera uno de los mercados más prometedores por su alto crecimiento en inversión, especialmente en Europa, China y Estados Unidos [1].

2.1.1 Energía Solar en México

La radiación solar se clasifica en 4 categorías, según la intensidad en el planeta. La franja o banda más favorable se encuentra en las latitudes 15°N y 35°N , y

entre 15° S y 35° S [7,8]. El territorio mexicano se encuentra entre las latitudes de 15° N a 35° N dentro de la llamada franja solar, que es una de las áreas de mayor incidencia solar de la Tierra $5 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$ [7,9]. El recurso solar dentro del país, está dentro de los mejores del mundo (Figura 2.2), con irradiancia solar anual diaria de $4.4 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$ y $6.3 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$. La capacidad instalada de México fue de 200 MW en el 2014, esto en forma de instalaciones fotovoltaicas y 56 MW de generación distribuida [8].

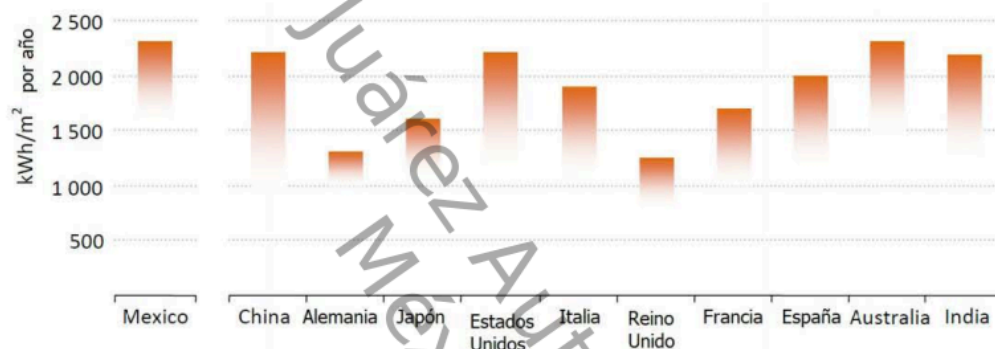


Figura 2.2 Promedio de irradiancia solar.[9]

En el año 2012, la producción de electricidad en México fue de 280.40TWh, distribuidos de la siguiente manera: 231.54 combustibles fósiles, 31.58 hidroeléctrico, 8.43 nuclear y 8.86 en otros tipos de energía (geotérmica, eólica, solar) [10,11]. Se estima que el potencial probado para la generación de energía solar es de $16.35 \text{ GWh}\cdot\text{año}^{-1}$, para la energía eólica sea de $19.80 \text{ GWh}\cdot\text{año}^{-1}$ y para la biomasa sea de $2.396 \text{ GWh}\cdot\text{año}^{-1}$ [7]. Debido a que el potencial de energía solar del país es de una capacidad instalada de 5000 GW, donde la región norte de la zona costera del Golfo de México puede alcanzar un potencial de $6.7 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}$, siendo Tamaulipas el de mayor potencia con $6.22 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$ y Veracruz con un promedio anual de $4.85 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$ (Figura 2.3) [7].

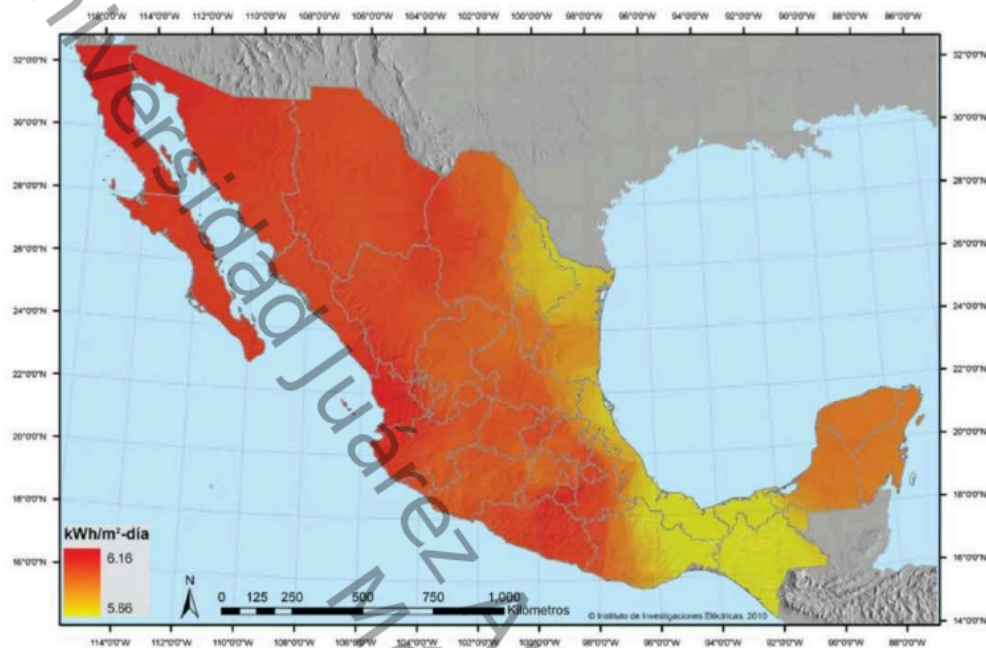


Figura 2.3 Promedio de irradiancia solar en México (Instituto de Investigaciones Eléctricas y SENER) [75].

Las condiciones ambientales en México, hacen necesario promover políticas que permitan el uso de fuentes alternativas de energía. Debido a la alta demanda de energía eléctrica se requiere buscar medidas que permitan el empleo de ésta sin dependencia de la red eléctrica convencional y para lograr el compromiso de utilizar una fuente de energía renovable y limpia [4,9,12].

La energía solar es un medio para este propósito, al ser un país que tiene un gran sector agrícola uno de los empleos de esta fuente es para el bombeo de agua, así como el acondicionamiento de agua para uso sanitario medio de la calefacción solar, el cual es el principal uso de la tecnología solar dentro de la nación [9,13]. México es una de las economías más diversas y más grandes de América Latina con un alto potencial de despliegue de energías renovables, particularmente solar y eólica. Aunque la economía mexicana se basa en los

hidrocarburos. Business as Usual (BaU) presenta perspectivas dónde se proyecta que México duplicará su consumo de energía antes de 2050 [4]. Es por esto que el gobierno está tomando ciertas medidas; una importante estrategia federal es el Programa de Desarrollo de Sistemas Fotovoltaicos (PROSOLAR) [9].

2.1.2 Tecnología Solar

El efecto fotovoltaico fue descrito por el francés Edmon¹⁷ Becquerel en 1839, él descubrió que algunos materiales producían pequeñas cantidades de corriente eléctrica cuando eran expuestos a la luz; sin embargo, no se obtuvo un conocimiento completo de ello. El efecto fotovoltaico fue estudiado de igual manera en sólidos por Heinrich Hertz en 1870. Posteriormente se realizaron celdas fotovoltaicas de selenio con eficiencias de conversión menor del 2%. Entre 1940 y 1950 se llevó a cabo el proceso de Czochralski para producir silicio cristalino y de esta forma desarrollar celdas más eficientes. A partir de ello en 1956 los Laboratorios Bell se fabricó la primera celda solar de Silicio capaz de generar una corriente eléctrica medible. En la actualidad los sistemas fotovoltaicos son una tecnología muy aprovechable tanto para zonas rurales dónde no tienen acceso a la energía eléctrica, como en zonas urbanas e industriales dónde la obtención de energía eléctrica a partir de esta fuente es favorable para solventar el consumo de la misma [6,14,15].

La construcción solar integrada es un concepto dónde los módulos solares funcionan como material de construcción, además que producen energía para abastecer el edificio. El término (Building-integrated) es sinónimo de la integración de módulos solares en el edificio (fachada o techo) como parte de la estructura del mismo. A las construcciones de naturaleza fotovoltaica, se les denomina BiPV, si son construcciones con instalaciones térmicas fotovoltaicas combinadas se le denomina BiPV.

El primer sistema conformado por un colector PVT fue desarrollado en 1976, era en sí un BiPVT, pero el concepto de este tipo de sistema se materializó hasta principios de 1990 cuando los sistemas BiPV comenzaron a emplearse en la construcción. Sin embargo, se presentaron ciertas situaciones en el estudio e instalación de los BiPV, ya que disminuía su rendimiento eléctrico al presentarse calentamiento en las celdas fotovoltaicas, por lo que al estudiar el problema, la solución evidente era extraer calor de las celdas fotovoltaicas y emplearlo para otros fines, por lo que se llegó a los sistemas BiPVT [16].

En la práctica, las celdas fotovoltaicas tienen eficiencias considerablemente menores debido a reflexiones ópticas, carencias en las propiedades de unión y recombinación de portadores. Hay factores que pueden influir en la elección de materiales fotovoltaicos, ya que no hay un material ideal, pero diferentes combinaciones pueden hacer un material más atractivo. Las celdas de mayor madurez comercialmente y en aplicación son las celdas solares de silicio mono y policristalino mostradas en la Figura 2.4 [14].

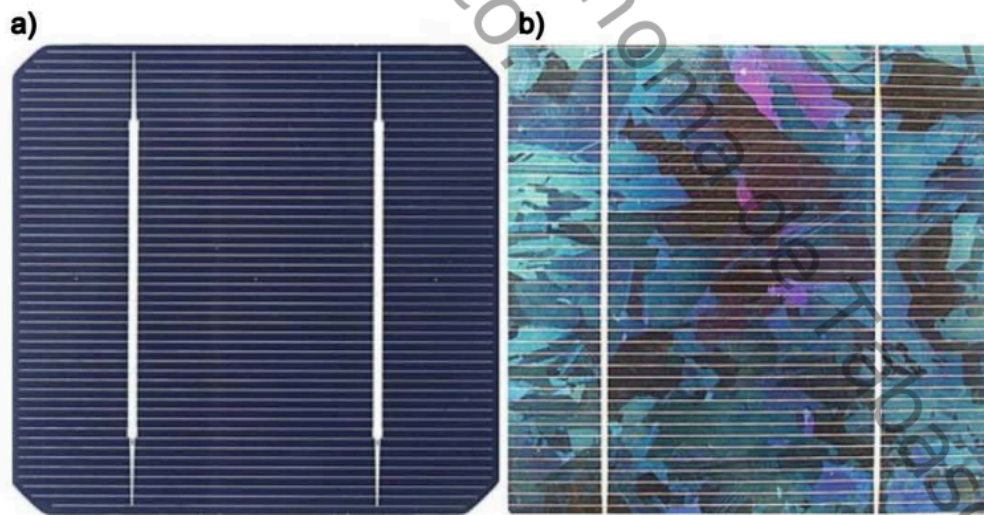


Figura 2.4 Celdas de a) Silicio monocristalino y b) policristalino [6].

A partir del año 2015 las celdas solares más comercializadas incluyen precisamente las celdas solares de silicio cristalino (69,5%), silicio multicristalino (23,9%) y CdTe (6,6%). Las eficiencias de conversión de potencia certificadas (PCE) de estos módulos solares son de 24.4% para silicio monocristalino, 19,9% para el silicio multicristalino y 18,6% para el CdTe, respectivamente. Para los módulos solares comercializados, PCE es sólo aproximadamente 2% menor que el PCE más alto certificado. Sin embargo, debido a los altos costos que genera su fabricación, el total de energía que pueden producir es sólo el 1% de la energía que se consume actualmente [17].

También se ha dado una importante conversión de energía en las celdas heterounión. La capa intrínseca de estas celdas está basada en Si, CdTe, Cu(In,Ga)Se₂ (CIGS) y haluro metálico (perovskita). Todas estas celdas han alcanzado eficiencias por encima del 20% y pueden ser fabricados a un costo relativamente bajo. También se ha investigado un absorbente abundante en el planeta y no tóxico Cu₂ZnSn(S,Se)₄, conocido como CZTS, éste ha alcanzado eficiencias teóricas de 12.6 % [18]. La desventaja de este tipo de celdas es la búsqueda por reemplazar la capa buffer estándar de CdS con otro material, ya que la toxicidad del Cadmio y su banda relativamente baja de 2.4 eV demuestra que absorbe una fracción apreciable de luz en esa capa, donde provoca una eficiencia de recolección baja [19,20].

La investigación de las celdas solares está buscando mejoras en el procesamiento, eficiencia, costo y estabilidad de los materiales en la reciente década. Esto ha dado lugar a la disponibilidad de productos comerciales. Las celdas solares de silicio ofrecen distintos beneficios como bajo coste, dureza y estabilidad a altas temperaturas las han favorecido como la mejor opción para aplicaciones fotovoltaicas. Se estudian otras tecnologías que prometen una combinación de menor costo y facilidad en su fabricación con el objetivo de reemplazar las celdas de silicio.

2.2 Sistemas Fotovoltaicos

La economía de los sistemas fotovoltaicos es determinante hoy en día, debido al crecimiento de instalaciones fotovoltaicas con conexión a la red eléctrica. Es todo un proceso el permitir una evaluación técnica para identificar posibles impactos del sistema, la estandarización, mejoras en el diseño, mejor electrónica de potencia, todo esto influye para mejorar los costos en sistemas fotovoltaicos [21].

El costo unitario de energía generada por esta fuente es comparable con el costo unitario por energías convencionales no renovables, por lo que es viable darle continuidad al uso de este tipo de fuente de energía [22].

2.2.1 Clasificación

La celda fotovoltaica (PV) o la celda solar realiza la conversión directa de la energía solar en electricidad por el efecto fotovoltaico. El circuito de las celdas fotovoltaicas es el elemento base de los sistemas fotovoltaicos, las cuales son selladas en un laminado para protección del módulo en el ambiente. Los módulos fotovoltaicos se convierten en la tecnología convencional para aplicaciones sobre conexión con baterías de almacenamiento y a la red eléctrica, es decir se clasifican como independientes, interconectados a la red de servicios eléctricos e híbridos[23].

Las principales ventajas de los sistemas fotovoltaicos son que no tienen partes móviles, no producen ningún ruido, requieren poco o ningún mantenimiento y no son contaminantes, son renovables, son confiables, su instalación puede llevarse a cabo en casi cualquier sitio [24]. Éstos pueden utilizar independientes (autónomos) como fuente de energía eléctrica al emplear una batería de almacenamiento. Éstos se aplican para proporcionar energía en satélites,

entornos agrícolas como en bombas de corriente continua (esto sin la necesidad de un inversor) [23].

Un sistema híbrido independiente de energía solar funciona similarmente, pero emplean inversores que utilizan el convertidor de salida, que genera armónicos por lo que para ello se incorporan filtros de reducción de emisiones, empleando estos y otros dispositivos electrónicos especiales que transfieren generación a la carga [25]. Debido a la ineficiente producción de electricidad en algunas regiones con menor radiación, se requieren infraestructuras paralelas al suministro de electricidad, esta es la función de un sistema conectado a la red [1].

2.2.1.1 Sistemas Interconectados

Un sistema fotovoltaico conectado a la red de servicios eléctricos (Figura 2.5) consta de una unidad de acondicionamiento de energía, un panel de distribución independiente. El módulo fotovoltaico utiliza la radiación solar por medio del efecto fotovoltaico. La unidad de acondicionamiento de energía convierte la corriente directa DC de salida en corriente alterna AC, en la misma frecuencia, tensión y calidad de energía requerida [25].

Como todo sistema, su principal componente son los módulos fotovoltaicos. Estos se pueden conectar en diferentes configuraciones que afectan directamente la estructura y topología de los componentes electrónicos del balance del sistema. Los componentes para el balance del sistema incluyen la protección de secuencia, el combinador de DC, el convertidor de DC/DC, inversor DC/AC, desconexión DC, desconexión AC, protecciones, entre otros [26].

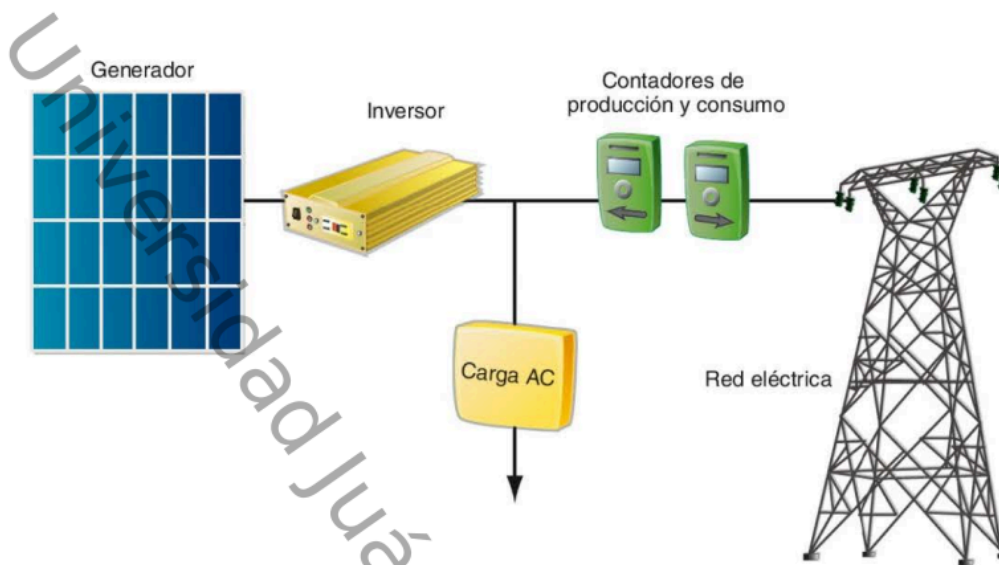


Figura 2.5 Sistema fotovoltaico conectado a la red.

Los convertidores que conectan el módulo fotovoltaico con la red implican dos tareas principales, las cuales son asegurarse que el módulo fotovoltaico opera en el punto de máxima potencia e inyectar una corriente sinusoidal a la red. El generador fotovoltaico es un conjunto de varias celdas fotovoltaicas colocadas en serie y en paralelo para producir la potencia deseada. El primer elemento es el convertidor de impulso, que elevará la energía obtenida por el módulo a un nivel adecuado para el enlace de DC conectado al inversor. El segundo elemento es el convertidor DC/AC que funciona como un controlador de corriente, que inyecta la corriente con el factor de potencia necesario a la red. El inversor debe suministrar una alimentación continua desde el bus de enlace en la línea de servicio de la red. El filtro a la salida del inversor se emplea para reducir la ondulación por componentes debido a la operación de conmutación [27]. El convertidor DC y el inversor DC/AC se encuentran entre los componentes más sensibles en un SFV, ya que éstos conectan los componentes de conmutación y condensadores [26].

Entre los costos más destacados dentro de un sistema conectado a la red en comparación de un sistema autónomo, es el del inversor. Esto se debe a que los inversores para sistemas interconectados pueden tener diferentes topologías y diferentes dispositivos electrónicos que ayudan a mejorar la calidad de la energía que se entrega a la red de servicios eléctricos y que los clasifican en diferentes tipos de inversores por sus componentes (por ejemplo los inversores multinivel e inversores de conmutación suave) [21].

Una desventaja inquietante de los sistemas conectados a la red entre los consumidores, es la restricción que se tiene con este tipo de tecnología para el uso posterior cuando sea requerido de la energía que del sistema se obtiene. Así como la falta de control a la entrada la cual tiene una relación directa con la impredecible potencia de salida que es inyectada a la red, la cual es influenciada por la variación en la irradiancia solar. Así como otros problemas con la calidad de energía inyectada, armónicos, el nivel de tensión, compensación de potencia reactiva y sincronización [21].

En la actualidad los sistemas fotovoltaicos, ya pueden contar con el monitoreo, enviando un análisis sobre el potencial energético, temperatura, pérdida de energía tanto de pequeñas como grandes plantas fotovoltaicas, esto con el fin de mejorar el rendimiento del sistema solar mediante medidas a partir de los resultados obtenidos de la monitorización [25]. La industria fotovoltaica debe ser consciente de los estándares de seguridad y calidad de la energía, ya que esto conducirá a la mayor aceptación de la energía fotovoltaica conectada a la red por parte de los usuarios de las compañías [28].

2.2.2 Componentes

Los sistemas fotovoltaicos constan de elementos principales, como lo son módulos fotovoltaicos, a los que se agregan los reguladores de carga, baterías

de almacenamiento, protecciones, control con equipos de medición y un inversor (Ver Figura 2.6) [29].



Figura 2.6 Componentes de un sistema fotovoltaico [1]

- *Módulo Fotovoltaico*

Las celdas fotovoltaicas, encargadas de convertir la energía de la luz Solar directamente en electricidad en DC por el efecto fotovoltaico. Son el elemento básico de un sistema fotovoltaico. Un conjunto de celdas forma un módulo solar en donde están conectadas eléctricamente entre sí. La unión de varios módulos forma un sistema fotovoltaico [29].

La eficiencia de los módulos fotovoltaicos (PV) ha crecido considerablemente. Las eficiencias reportadas más altas de los que se comercializan en la actualidad, con $22.8\% \pm 0.6$ para celdas de silicio cristalino (multi-C-Si), $12.3\% \pm 0.3$ para

celdas tipo *tándem* de silicio amorfo (a-Si), $18.6\% \pm 0.3$ para celdas telurio de cadmio (CdTe) y $17.5\% \pm 0.3$ para celdas de película delgada selenuro de cobre indio (CIGS) [23,30,31]. Los parámetros eléctricos manejados por los fabricantes en los módulos fotovoltaicos son el voltaje de circuito abierto (Voc), corriente de cortocircuito (Isc), corriente máxima (Imp), voltaje máximo (Vmp), la corriente/coeficiente de temperatura [30].

En el mercado, existe otra forma de clasificar los módulos fotovoltaicos, por su opacidad, donde los dos principales tipos de módulos fotovoltaicos son los opacos y los semitransparentes. En los módulos fotovoltaicos opacos, el vidrio transparente cubre la parte delantera de las celdas solares, así mismo que en la parte trasera. En el módulo fotovoltaico opaco la energía solar incidente entra en la celda solar incrementando su temperatura y disminuyendo su eficiencia. Los módulos fotovoltaicos semitransparentes pueden ser utilizados en edificios como techos o fachada, ya sea para generación eléctrica o calentamiento térmico o iluminación diurna [23].

Para comparar el rendimiento de diferentes módulos de energía solar, los siguientes datos operativos uniformes se han definido como las condiciones de prueba estándar (STC): una temperatura de celda de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, una irradiancia solar de $100\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ y masa de aire AM= 1.5. Sin embargo, STC no es representativo de las condiciones reales del entorno en la mayoría de las regiones del mundo. La temperatura del módulo puede elevarse más que la temperatura óptima (STC), causando una caída de potencia y eficiencia del módulo [32,33]. El rendimiento de los módulos fotovoltaicos se ve afectado por factores ambientales como irradiación incidente, temperatura y distribución de la radiación espectral [34,35].

2.2.3 *Inversor*

Para hacer funcionales los módulos fotovoltaicos, los inversores son un elemento inevitable. El inversor influye en la eficiencia, problemas de estabilidad de una

unidad de generación basada en energía fotovoltaica y la economía [36] . Es indispensable para la conexión a la red de servicios eléctricos de un sistema fotovoltaico que genera potencia en DC y la convierte en potencia AC que es la empleada en la red. El inversor convierte de DC a AC y regula el sistema fotovoltaico. Han evolucionado significativamente y es una de las tecnologías de más rápido desarrollo en la electrónica y sistemas de potencia en la actualidad. Ha mejorado en tamaño, peso, fiabilidad, facilidad de instalación y configuración. Existen topologías de inversores tratan de lograr mayor eficiencia y confiabilidad en estos componentes [37].

Se realizan estándares que deben cumplir los inversores para obtener una calidad de energía fiable en la conexión de sistemas a la red de servicios eléctricos, como estándares más comunes que comercialmente se manejan en este tipo de equipos estos son IEC 61727, IEEE 1547-2003, IEEE 929-2000; se fijan para los cambios de voltaje en el inversor, cambios en su frecuencia operativa, factor de potencia, armónicos. El inversor utiliza un cambio de modulación de ancho de pulso (PWM) para generar una forma de onda de AC en la salida, puede controlar la forma de onda para voltaje y corriente, ajusta y corrigen el factor de potencia [28,37].

2.2.3.1 Clasificación de los inversores

Los primeros inversores conectados a la red fueron inversores conmutados por línea por medio de tiristores de conmutación; eran voluminosos, pesados, complicados al instalar, poco fiables, baja eficiencia del 85-90%, deficiente factor de potencia y alto contenido de armónicos en AC. Estos tiristores han sido reemplazados por dispositivos de conmutación avanzados. El voltaje generado por los módulos fotovoltaicos es aplicado al inversor para producir voltaje en AC.

Los inversores más comunes actualmente en conexión a la red son los inversores string. Es una derivación del inversor centralizado, donde solo una cadena de

módulos fotovoltaicos es conectada al inversor, al ser solo una cadena el rango de potencia es bajo (típicamente 5 KW). El inversor multistring ha sido desarrollado para aumentar el nivel de potencia y conserva ventajas del inversor string, como lo es la confiabilidad, flexibilidad de diseño y eficiencia sobre el inversor centralizado.

El módulo AC también conocido como módulo fotovoltaico integrado conectado a la red, es un módulo con inversor integrado. Al ser solo un módulo fotovoltaico las pérdidas por desajustes entre módulos no existen, además es de fácil manejo para cualquier tipo de usuario. Las funciones de voltaje, MPPT, conversión de DC a AC se realizan en una sola etapa.

Los inversores centralizados se emplean en medianas y grandes instalaciones, algunos paneles fotovoltaicos se conectan en serie para crear una cadena en un sistema centralizado, estas cadenas se conectan en paralelo a la forma en un solo inversor, tiene la característica de ser de bajo costo y simplicidad. Pero como el sistema está obligado a operar con un solo MPPT para todas las matrices fotovoltaicas da como resultado una producción más baja, lo que provoca cambios en factores tales como condiciones de irradiación, temperatura, sombreado, disminuyendo así el rendimiento del sistema [28,38].

Los inversores conocidos en el mercado son reemplazados por inversores con transformadores de alta frecuencia o diseños sin transformador. El transformador le da aislamiento galvánico entre la matriz fotovoltaica y la red eléctrica, eso elimina la inyección de corriente DC a la red, pero éste aumenta en la mayoría de los casos el tamaño, peso y costo del inversor. Entonces los inversores modernos tienden a usar transformadores de alta frecuencia que reduce el tamaño y peso del sistema.

Algunos inversores ya no incluyen el transformador, tienen mayores eficiencias incluso del 98% y son menos costosos, pero para este tipo de tecnología se debe tener cuidado para resolver el problema de inyección de CD que es una

desventaja en su conexión a la red de servicios eléctricos sin aislamiento galvánico, y dependiendo del circuito del inversor puede causar fluctuaciones de voltaje entre el sistema y la tierra; pero diferentes estudios muestran que la interferencia magnética entre el sistema fotovoltaico y los inversores sin transformador no suele ser significativa y no representa peligro alguno [28].

2.3 Calidad de la energía eléctrica

La calidad de la energía eléctrica es un término naciente que se refiere a mantener el estado casi senoidal de la forma de onda de los voltajes y corriente, así como la potencia a la magnitud y frecuencia nominal [39]. Una buena calidad de energía denota la capacidad de proporcionar un suministro adecuado del servicio eléctrico de forma continua, sin interrupciones y nulas perturbaciones, por un largo periodo [40,41].

La calidad de energía, puede verse desde dos perspectivas, comercial y técnico. El punto de vista comercial es entre el proveedor y usuario, lo que conlleva a la calidad del servicio dentro de la normatividad de cada país. El punto de vista técnico se centra en la continuidad del suministro eléctrico (esto con el número y duración de interrupciones en el suministro de voltaje) y la calidad del voltaje que está relacionada con la forma de onda, frecuencia de alimentación, magnitud, variaciones de voltaje (baja tensión y sobretensiones), armónicos, entre otros [42,43]

La mala calidad de la energía eléctrica tiene efectos perjudiciales en el funcionamiento de sistemas y equipos, aumentando su temperatura o fallas en operación y disminuyendo su tiempo de vida. Es por ello que se requiere la evaluación de la calidad de energía suministrada.

Los indicadores principales que permiten evaluar la calidad de energía eléctrica suministrada son el factor de potencia, la distorsión total armónica y el nivel de tensión.

2.3.1 Factor de potencia

Este parámetro ha emergido con el incremento del consumo de potencia reactiva en la distribución eléctrica, éste expresa la eficacia del sistema de conversión, es decir cuánto de la energía producida se convierte en energía útil. Matemáticamente se define como la relación entre la potencia activa (P) y la potencia aparente (S), o de igual manera como el valor del coseno de la diferencia de fase entre la tensión y la corriente de un sistema de energía eléctrica de corriente alterna.

$$PF = \cos(\varphi) = \frac{P}{S} \quad (1)$$

Dónde φ es el valor angular de la diferencia de fase entre las dos señales senoidales [44,45].

Existen regulaciones del factor de potencia en cada país. La industria pretende mantener el valor de PF cercano a la unidad. En diversas regiones como en México un valor de PF menor de 0.95 se considera pobre. Un factor de potencia pobre generalmente es causado por la corriente distorsionada, cargas inductivas; lo que provoca el incremento de la diferencia de fase entre el voltaje y corriente en los terminales de carga [44,46].

2.3.2 Distorsión Total Armónica

Los armónicos se pueden definir como formas de onda distintas a la frecuencia fundamental.

La frecuencia de cada componente armónico es denominada frecuencia armónica. En muchos casos son ondas periódicas y definidas que se pueden

expresar por series de Fourier. Aunque la frecuencia armónica es un múltiplo de la frecuencia fundamental, puede ser un número entero o fraccionario.

Cuando son números enteros se clasifican como orden de armónico para indentificarlo. El orden se representa con la letra “n” y puede ser 1,2,3, ..., etc. El componente armónico n puede ser matemáticamente dado como:

$$i_n = I_n \text{sen } 2\pi f t \quad (2)$$

Dónde I_n es la amplitud del componente armónico de orden n.

Los armónicos enteros se dividen en dos categorías: pares e impares, así como subarmónicos e interarmónicos, dónde n es fracción.

Armónicos impares: los armónicos tienen frecuencias que son múltiplos enteros impares de la frecuencia fundamental (n= 3,5,7...etc.), pueden ser expresados como:

$$i_n = I_n \text{sen } 2\pi n f t \quad (3)$$

Armónicos pares: los armónicos tienen frecuencias que son múltiplos enteros pares de la frecuencia fundamental (n= 2,4, 6, ..., etc.), pueden ser expresados de igual manera como:

$$i_n = I_n \text{sen } 2\pi n f t \quad (4)$$

Forma de onda no senoidal: La onda no senoidal se constituye por la combinación de componentes armónicos pares e impares y componentes fundamentales. Se puede expresar como:

$$i = \sum_{n=1,2,3,4,...} i_n = \sum_{n=1,2,3,4,...} I_n \text{sen } 2\pi n f t \quad (5)$$

Interarmónicos: son armónicos que tienen frecuencias que son mayor a la fundamental pero no son múltiplos enteros de ésta. Matemáticamente se define como:

$$i_n = I_n \text{sen } 2\pi n f t \quad (6)$$

Dónde $n > 1$, pero no entero: 1.2, 1.5, 2.7, ..., etc.

Subarmónicos: se presentan a menudo en forma de onda no senoidal, en frecuencias más pequeñas que la frecuencia fundamental. Se expresan de la siguiente forma:

$$i_n = I_n \sin 2\pi n f t \quad (7)$$

Dónde $n < 1$; 0.2, 0.5, 0.7, ..., etc. [39].

Los armónicos afectan la calidad de la energía aumentando las pérdidas de un sistema eléctrico hasta en un 20%, del cual el 27% es debido a los armónicos y empeoran el factor de potencia.

Los armónicos pueden ser de orden 2 al 100 o incluso aumentar este rango, sin embargo, para fines de estudio se analizan los de orden 1 al 25 por sus magnitudes significativas. Estos distorsionan la forma de onda de voltaje y corriente. Por lo que se evalúan por medio de la distorsión armónica total (THD) que se define como la relación de armónicos totales al valor de la frecuencia fundamental, es una medida del valor efectivo de la tensión armónica (THDv) o corriente (THDi) en una forma de onda distorsionada [39,45].

Este índice se calcula de la siguiente forma para voltaje:

$$THDv = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 \dots + V_n^2}}{V_1} \quad (8)$$

Dónde V_1 es el componente de voltaje fundamental y los demás son otros componentes.

Y para el caso de corriente se expresa como:

$$THDi = \frac{\sqrt{i_2^2 + i_3^2 + i_4^2 \dots + i_n^2}}{i_1} \quad (9)$$

Dónde i_1 es el componente de la corriente fundamental y los demás son otros componentes [47].

2.3.3 Nivel de Tensión

El desequilibrio en un sistema de alimentación, bifásico o trifásico se define como la desviación de la magnitud de la tensión de una de las fases, es decir cuando no tienen una magnitud similar, esto se interpreta como un desequilibrio de voltaje, también debido a la fuente, carga, conexión a tierra incorrecta.

Se puede calcular el desequilibrio o desbalance de tensión dividiendo la desviación máxima del promedio de cada voltaje entre el promedio de los tres voltajes y se expresa de forma porcentual [39].

Se pueden dar distintas perturbaciones o fenómenos que influyen en el nivel de tensión, tales como:

Caída de tensión: es una perturbación en la tensión, éste cae a un nivel muy bajo por un corto periodo de tiempo [39,47].

Hinchamiento de tensión: es cuando se da una caída de tensión de corta duración y el nivel se ve aumentado instantáneamente, tomando valores muy altos en un lapso pequeño [39].

Flicker (parpadeo): es una variación indeseada de la frecuencia del sistema. Se refiere a variaciones continuas y rápidas en la magnitud de la corriente de carga que causa variaciones de voltaje.

Interrupción: es un tipo especial de interrupción donde el corte de energía ha ocurrido por más de 60 s [39].

Referencias

- [1] Gonçalves P, Sampaio V, Orestes M, González A. Photovoltaic solar energy : Conceptual framework 2017;74:590–601. doi:10.1016/j.rser.2017.02.081.
- [2] Renew K. s t a t i s t i c s Key Renew able s Trends 2016.
- [3] Mallak M Al, Jeena N, Pendergrass I, Varma S, Kim J, Daim T. Technology Forecasting: Case of Solar Technology 10 2017:163–76. doi:10.1007/978-3-319-54537-0.
- [4] Elizondo A, Pérez-cirera V, Strapasson A, Carlos J, Cruz-cano D. Mexico ' s low carbon futures : An integrated assessment for energy planning and climate change mitigation by 2050. Futures 2017;93:14–26. doi:10.1016/j.futures.2017.08.003.
- [5] Bhowmik H, Amin R. Efficiency improvement of flat plate solar collector using reflector. Energy Reports 2017;3:119–23. doi:10.1016/j.egyr.2017.08.002.
- [6] History B. Solar Technology. 2011. doi:10.1007/978-0-85729-844-7.
- [7] Pérez-denicia E, Fernández-luqueño F, Vilariño-ayala D, Manuel L, Maldonado-lópez LA. Renewable energy sources for electricity generation in Mexico: A review. Renew Sustain Energy Rev 2017;78:597–613. doi:10.1016/j.rser.2017.05.009.
- [8] International Energy Agency. Mexico Energy Outlook. París, Francia: 2016.
- [9] Arenas-aquino AR. Public policy performance for social development: solar energy approach to assess technological outcome in Mexico City Metropolitan Area. Environ Sci Pollut Res 2017. doi:10.1007/s11356-017-8387-9.
- [10] Hernández-escobedo Q, Rodríguez-garcía E, Saldaña-flores R. Solar energy resource assessment in Mexican states along the Gulf of Mexico. Renew Sustain Energy Rev 2015;43:216–38. doi:10.1016/j.rser.2014.10.025.
- [11] Mundo-hernández J, Celis B De, Hernández-alvarez J, Celis-carrillo B De. An overview of solar photovoltaic energy in Mexico and Germany. Renew Sustain Energy Rev 2014;31:639–49. doi:10.1016/j.rser.2013.12.029.
- [12] Paredes S, Garcia-heller V. Renewable Energy 2016;93:168–79. doi:10.1016/j.renene.2016.02.065.
- [13] Arunkumar T, Mageshbabu D, Madhu B, Bharathwaaj R, Prakash N. A Review of integrating solar collectors to solar still. Renew Sustain Energy Rev 2017;77:1069–97. doi:10.1016/j.rser.2016.11.223.
- [14] Cells S, Irvine S. Solar Cells an 2017:1097–109. doi:10.1007/978-3-319-48933-9.
- [15] Jaaz AH, Hasan HA, Sopian K, Ha M, Haji B, Zaidi SH. Design and development of compound parabolic concentrating for photovoltaic solar collector : Review 2017;76:1108–21. doi:10.1016/j.rser.2017.03.127.
- [16] Gautam KR, Andresen GB. Performance comparison of building-integrated combined photovoltaic thermal solar collectors (BiPVT) with other building-integrated solar technologies. Sol Energy 2017;155:93–102. doi:10.1016/j.solener.2017.06.020.
- [17] Shah A. Thin-Film Silicon Solar Cells. In: Lausanne, editor. McEvoy's Handb.

- Photovoltaics, Elsevier; 2018, p. 235–307. doi:10.1016/B978-0-12-809921-6.00008-2.
- [18] Stuckelberger M, Biron R, Wyrsh N, Haug F, Ballif C. Review : Progress in solar cells from hydrogenated amorphous silicon. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;76:1497–523. doi:10.1016/j.rser.2016.11.190.
 - [19] Naghavi N, Abou-Ras D, Allsop N, Barreau N, Bücheler S, Ennaoui A, et al. Buffer layers and transparent conducting oxides for chalcopyrite Cu(In,Ga)(S,Se)₂ based thin film photovoltaics: present status and current developments. *Prog Photovoltaics Res Appl* 2010;18:411–33. doi:10.1002/pip.955.
 - [20] Crovetto A, Huss-hansen MK, Hansen O. How the relative permittivity of solar cell materials influences solar cell performance. *Sol Energy* 2017;149:145–50. doi:10.1016/j.solener.2017.04.018.
 - [21] Anzalchi A, Sarwat A. Overview of technical specifications for grid-connected photovoltaic. *Energy Convers Manag* 2017;152:312–27. doi:10.1016/j.enconman.2017.09.049.
 - [22] Okoye CO. Optimal sizing of stand-alone photovoltaic systems in residential buildings 2017;126. doi:10.1016/j.energy.2017.03.032.
 - [23] Sahota L, Tiwari GN. Review on series connected photovoltaic thermal (PVT) systems : Analytical and experimental studies. *Sol Energy* 2017;150:96–127. doi:10.1016/j.solener.2017.04.023.
 - [24] Fara L, Craciunescu D. Output Analysis of Stand-Alone PV Systems : Modeling , Simulation and Control. *Energy Procedia* 2017;112:595–605. doi:10.1016/j.egypro.2017.03.1125.
 - [25] Ramakrishna S, Singh SN. Monitoring system for photovoltaic plants : A review 2017;67:1180–207. doi:10.1016/j.rser.2016.09.088.
 - [26] Cai B, Liu Y, Ma Y, Huang L, Liu Z. A framework for the reliability evaluation of grid-connected photovoltaic systems in the presence of intermittent faults. *Energy* 2015;93:1308–20. doi:10.1016/j.energy.2015.10.068.
 - [27] Bouhafs A, Lokmane BM, Mohamed D. Grid connected photovoltaic system , for a 800 W. *Energy Procedia* 2015;74:414–22. doi:10.1016/j.egypro.2015.07.639.
 - [28] Jana J, Saha H, Das Bhattacharya K. A review of inverter topologies for single-phase grid-connected photovoltaic systems. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;0–1. doi:10.1016/j.rser.2016.10.049.
 - [29] Chermitti A, Boukli-hacene O, Meghebbar A, Bibitriki NA. Design of a library of components for autonomous photovoltaic system under Matlab / Simulink. *Phys Procedia* 2014;55:199–206. doi:10.1016/j.phpro.2014.07.029.
 - [30] Boutana N, Mellit A, Haddad S, Rabhi A, Pavan AM. An explicit I-V model for photovoltaic module technologies. *Energy Convers Manag* 2017;138:400–12. doi:10.1016/j.enconman.2017.02.016.
 - [31] Kahoul N, Chenni R, Cheghib H, Mekhilef S. Evaluating the reliability of crystalline silicon photovoltaic modules in harsh environment. *Renew Energy* 2017;109:66–72. doi:10.1016/j.renene.2017.02.078.

- [32] Klugmann-radziemska E, Wcisło-kucharek P. Photovoltaic module temperature stabilization with the use of phase change materials. *Sol Energy* 2017;150:538–45. doi:10.1016/j.solener.2017.05.016.
- [33] Coskun C, Toygar U, Sarpdag O, Oktay Z. Sensitivity analysis of implicit correlations for photovoltaic module temperature: A review. *J Clean Prod* 2017;164:1474–85. doi:10.1016/j.jclepro.2017.07.080.
- [34] Eke R, Betts TR. Spectral irradiance effects on the outdoor performance of photovoltaic modules. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;69:429–34. doi:10.1016/j.rser.2016.10.062.
- [35] Zhou J, Zhang Z, Liu H, Yi Q. Temperature distribution and back sheet role of polycrystalline silicon photovoltaic modules. *Appl Therm Eng* 2017;111:1296–303. doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.10.095.
- [36] Zeng Z, Shao W, Chen H, Hu B, Chen W, Li H, et al. Changes and challenges of photovoltaic inverter with silicon carbide device ☆. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;78:624–39. doi:10.1016/j.rser.2017.04.096.
- [37] Athari H, Niroomand M, Ataef M. Review and Classification of Control Systems in Grid-tied Inverters. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;72:1167–76. doi:10.1016/j.rser.2016.10.030.
- [38] Yilmaz S, Dincer F. Impact of inverter capacity on the performance in large-scale photovoltaic power plants – A case study for Gainesville , Florida. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;79:15–23. doi:10.1016/j.rser.2017.05.054.
- [39] Surajit Chattopadhyay, Madhuchhanda Mitra SS. *Electric Power Quality*. India: 2011.
- [40] A. Moreno-Muñoz (Ed.). *Power Quality (Technologies, Mitigation)*. España: 2002.
- [41] Mindykowski J, Tarasiuk T. Problems of power quality in the wake of ship technology development. *Ocean Eng* 2015;107:108–17. doi:10.1016/j.oceaneng.2015.07.036.
- [42] Barros J, Diego RI. A review of measurement and analysis of electric power quality on shipboard power system networks. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;62:665–72. doi:10.1016/j.rser.2016.05.043.
- [43] Dempsey P, Armstrong S, Rea JA, Herring J, Sopoc M. Electrical Power and Energy Systems Survey on demand side sensitivity to power quality in Ireland 2016;83:495–504. doi:10.1016/j.ijepes.2016.04.003.
- [44] Saribulut L. Electrical Power and Energy Systems A simple power factor calculation for electrical power systems 2014;62:66–71. doi:10.1016/j.ijepes.2014.04.024.
- [45] Kalair A, Abas N, Kalair AR, Saleem Z, Khan N. Review of harmonic analysis , modeling and mitigation techniques. *Renew Sustain Energy Rev* 2017;78:1152–87. doi:10.1016/j.rser.2017.04.121.
- [46] Outline C. Nonisolated Power Factor Correction Circuits 2017:155–87. doi:10.1016/B978-0-08-100925-3/00008-2.

CAPÍTULO 3.

DISEÑO EXPERIMENTAL

En el capítulo se presentan las actividades dentro de la metodología realizada durante el proceso de la investigación. La siguiente información detalla el procedimiento empleado, equipos y materiales utilizados en cada tarea.

3.1 Sistema fotovoltaico interconectado

El sistema fotovoltaico interconectado a la red convencional de energía que fue objeto de estudio, se encuentra ubicado en las instalaciones de la División Académica de Ingeniería y Arquitectura, de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, en el municipio de Cunduacán, Tabasco. Las coordenadas de la ubicación del sistema fotovoltaico son 18° 4'24.27" latitud Norte y 93° 9'52.72" longitud Oeste.

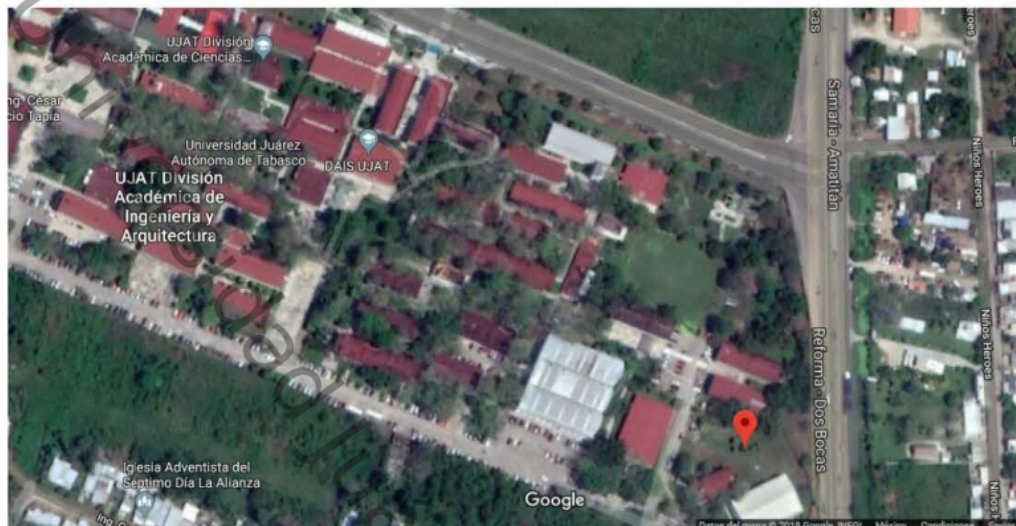


Figura 3.1. Ubicación geográfica del Sistema Fotovoltaico.

El sistema fotovoltaico consta de 18 paneles de 265 watts (voltaje a circuito abierto, Voc de 39 V y corriente de corto circuito, Isc, de 9.31 A en condiciones estándares de medición, STC) de marca SolarWorld con una potencia pico instalada de 4770 watts. Los paneles tienen una configuración de dos ramas que constan de nueve paneles cada una (ver Figura 3.2), con una separación entre ambos de cinco centímetros con la finalidad de liberar una parte de la fuerza del viento que incide sobre los paneles y evitar problemas a causa del fenómeno de dilatación.

La conexión en serie de los paneles se realizó con el conductor que incluye cada panel, mientras que el paralelo se ejecutó en los buses integrados por el inversor. Antes de conectar los conductores al inversor se instaló una caja de conexiones que contiene el dispositivo de protección contra sobrecorriente y sobrevoltaje. Posteriormente a la instalación del SFV se colocó el conductor de puesta a tierra. La medición de la resistencia a tierra se llevó a cabo con un instrumento de la marca HIOKI modelo 3150, utilizando el método de los tres polos, alcanzando 2.8

ohms, por lo que requirió un electrodo adicional de tierra, conforme a la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012, *Instalaciones Eléctricas (Utilización)* [1].



Figura 3.2. Sistema fotovoltaico de la DAIA.

Se realizó el cableado de lado de corriente directa (CD) y corriente alterna (CA). En el lado de CD se utilizó un ducto metálico flexible liquidtight, albergando dentro de él los conductores del arreglo fotovoltaico. Para hacer los empalmes se utilizaron condulets tipo T; en dos de sus entradas se utilizó un conector tipo membrana para los dos conductores y en el tercero se conectó el ducto liquidtight para posteriormente unirse con los demás conductores mediante una caja de conexiones. De esta caja de conexiones salió el ducto metálico galvanizado hacia el gabinete que aloja las protecciones de CD. Por otro lado, para la etapa de CA se introdujeron en el ducto 4 conductores, que van desde el inversor pasando por el gabinete que aloja las protecciones hasta el tablero de interconexión de la red local. Finalmente se realizó la conexión de los interruptores y del inversor, así mismo la interconexión con el sistema convencional.

3.2 Inversores

3.2.1 Inversor Zerversolar Evershine TL5000

El inversor de la marca Zerversolar modelo Evershine TL5000 mostrado en la Figura 3.3, es un inversor sin transformador con dos rastreadores MPP. Tiene una capacidad de 5000 Watts de salida, con un rango de voltaje de entrada de 125-520 V DC y una corriente máxima de entrada de 22.8 A y un máximo rendimiento de 96.5-97.3%.



Figura 3.3. Inversor Zerversolar TL5000.

3.2.2 Inversor Fronius Ig Plus

El inversor de la marca Fronius modelo Ig Plus V 5.0-1 (Figura 3.4), es un inversor central para acople con la red de servicios eléctricos, dispone de un transformador de alta frecuencia que asegura la separación galvánica entre el lado de corriente continua y la red, por lo que garantiza la máxima seguridad posible.

La unidad de control y regulación comienza con la supervisión de la tensión y frecuencia de red cuando los módulos solares disponen de suficiente energía después del alba.

El equipo trabaja extrayendo la máxima potencia posible de los módulos solares, esta función se denomina "Maximum Power Point Tracking" (MPPT). El inversor interrumpe completamente la conexión de la electrónica conductora a la red y detiene el servicio cuando deja de ser suficiente la energía disponible para la alimentación a la red. Tiene una capacidad de 5000 Watts de salida, con un rango de voltaje de entrada de 230-500 V DC y una corriente máxima de entrada de 23.4 A y un máximo rendimiento de 96.2%.

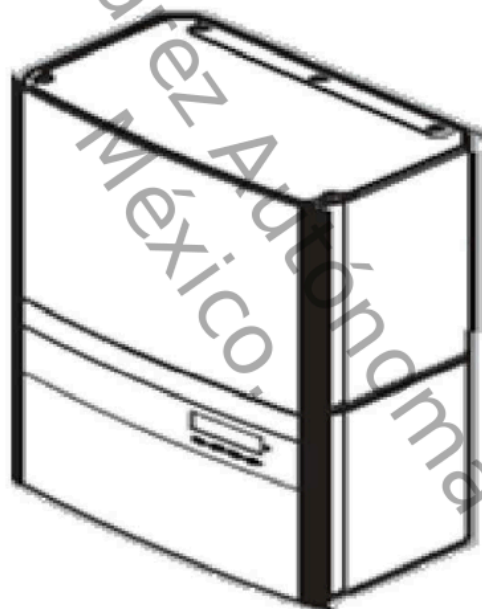


Figura 3.4. Inversor Fronius IG Plus.

3.3 Analizador de redes

El PowerPad Modelo 3945-B indicado en la Figura 3.5, es un analizador trifásico de la calidad de la energía eléctrica, cuyo fin es el diagnóstico de la calidad de

energía en redes mono, bi y trifásicas de bajo voltaje. Con el que se puede obtener características de una red, así como sus variaciones con respecto al tiempo. Dentro de sus principales funciones son la medición de voltaje RMS hasta de 480 V (fase-a-neutro) o 830 V (fase-a-fase) para sistemas de dos, tres o cuatro hilos; medición de corrientes RMS hasta de 6500 Arms, medición de frecuencia (en sistemas de 41-70 Hz), cálculo de parpadeos (flicker) de corta duración, cálculo de desbalance de fases (sólo en sistemas de 3 fases), cálculo de factor de potencia, de factores distorsión de armónica total, entre otros.

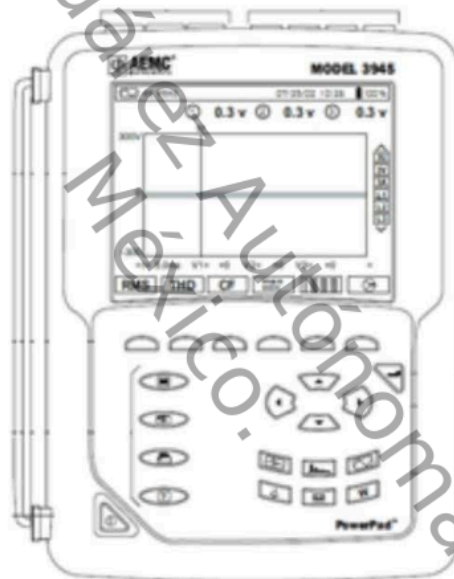


Figura 3.5. Analizador de redes AEMC 3945.

Se puede realizar una frecuencia de muestreo de 256 muestras por ciclo, tiene un tamaño de memoria de 4 MB, alimentación por CA y batería, así como sensores auxiliares en la medición de distintas instalaciones.

- Sensor de corriente CA modelo SR193.
Rango nominal: 1000 A CA para $f \leq 1$ kHz.

- Rango de medición: 3A a 1200ACA máx. ($I > 1000$ A no continuamente).
 Señal de salida: 1 mV CA/A CA.
- Sensor de corriente CA modelo MN93.
 Rango nominal: 200 A CA para $f \leq 1$ kHz.
 Rango de medición: 2A a 240ACA máx. ($I > 200$ A no permanente).
 Señal de salida: 5 mV CA/A CA.
 - Sensor de corriente CA modelo MN193.
 Rango nominal: 5 A y 100 A CA
 Rango de medición: 5A: 0.005 A a 6ACA máx. (1A a 1200 A en la razón 1000/5) 100 A: 0.1 A a 120 ACA máx.
 Señal de salida: 5A:200 mV/A CA; 100 A: 10mV/ACA.
 - Sensor de corriente CA modelo AmpFlex.
 Rango nominal: 3000 ACA.
 Rango de medición: 10 A a 6500 ACA máx.
 Señal de salida: 140 mV CA/3000 ACA a 50 Hz.
 - Sensor de corriente CA modelo MR193.
 Rango nominal: 1000 ACA, 1400 ACD máx.
 Rango de medición: 10 A a 100 ACA, 10 A a 1300 APico CA+CD.
 Señal de salida: 1 mV /A

Este equipo es acompañado de un software de análisis (Data View), éste es un paquete de software basado en Windows que permite configurar, realizar ensayos o registros desde la computadora, de igual manera en que se realizaría en el instrumento. También se elaboran y modifican informes de acuerdo a las necesidades del usuario.

3.4 Comprobación general del sistema

Se llevó a cabo la comprobación general del sistema fotovoltaico, previo a la instalación del inversor, verificando el buen estado físico y funcionamiento de

cada componente, para evitar problemas ajenos al inversor que puedan afectar la calidad de la energía.

3.4.1 Estabilidad y limpieza del sistema fotovoltaico

Se verificó que la estructura no tenga signos de deterioro como deformaciones por el peso, corrosión o grietas y aflojamientos en las uniones, esto de manera visual. Además, se revisó que los paneles estén bien sujetos a la estructura, y que no se observen secciones sombreadas debido a la vegetación u otros factores externos, así como su limpieza. Se comprobó que los conductos de protección y la canalización estén en perfecto estado en cada parte del sistema fotovoltaico.

3.4.2 Instalación y estado del inversor Zerversolar TL5000

Posterior a la revisión del estado general del sistema fotovoltaico, se procedió a la instalación del inversor marca Zerversolar TL5000 de 5 KW sin transformador conectado a los terminales positivos y negativos de cada rama de los módulos fotovoltaicos, así como su conexión a tierra y a cada una de las líneas de la red de servicios eléctricos (Figura 3.6). Se verificó que los valores de tensión de circuito abierto y el diferencial de tensión estuvieran de acuerdo a su valor nominal.

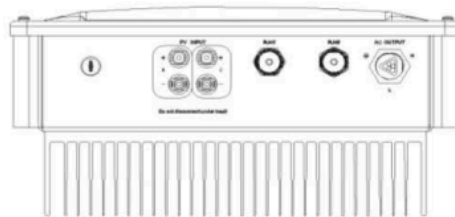


Figura 3.6 Conexión del inversor Zerversolar al sistema fotovoltaico.

3.4.3 Instalación y estado del inversor Fronius Ig Plus

Al finalizar las mediciones de calidad de energía del sistema fotovoltaico con el inversor Zeversolar, se procedió a su desconexión y a la instalación del inversor Fronius Ig Plus V de 5 KW. De forma similar que el inversor Zeversolar, el inversor Fronius fue instalado después de la revisión general del estado del sistema para su puesta en marcha. Se conectó a los terminales positivos y negativos de cada rama de los módulos fotovoltaicos, así como su conexión a tierra y a cada una de las líneas a la red de servicios eléctricos, así como al neutro (ver Figura 3.7). Una vez realizada su conexión se procedió a la medición de la tensión de circuito abierto y el diferencial de tensión corroborando que estuvieran de acuerdo a su valor nominal.

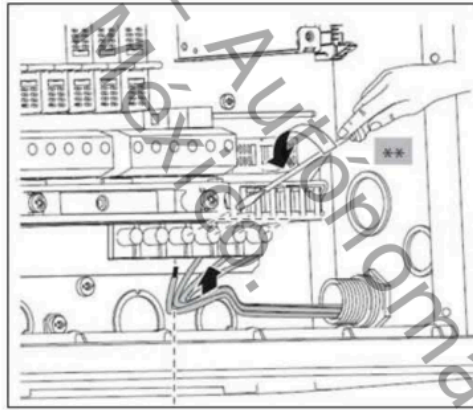


Figura 3.7 Conexión del inversor Fronius al sistema fotovoltaico.

3.5 Medición de los parámetros de la calidad de energía

La medición se llevó a cabo con el analizador trifásico de calidad de energía y los sensores de voltaje conectados a cada una de las líneas justo antes de la unión sistema fotovoltaico- red convencional de energía, y los sensores de corriente conectados a cada línea del inversor en la salida de corriente alterna. Se

determinaron los parámetros eléctricos tales como potencia, factor de potencia, voltaje, corriente, distorsión armónica totales y armónicos que el inversor induce a la red convencional de energía.

Se efectuó la medición durante 35 días del 19 de julio – 23 de agosto de 2017 con el inversor Zeyersolar y del 20 de abril – 24 mayo de 2017 con el inversor Fronius, con un intervalo de integración de cinco minutos.

- La configuración de la conexión eléctrica, la elección de los sensores empleados y los parámetros eléctricos analizados fueron seleccionados del menú del analizador de calidad de energía, mostrado en la Figura 3.8 y Figura 3.9.
- Las pinzas de voltaje y de corriente se conectaron a la salida del inversor, a ambas líneas y el neutro.

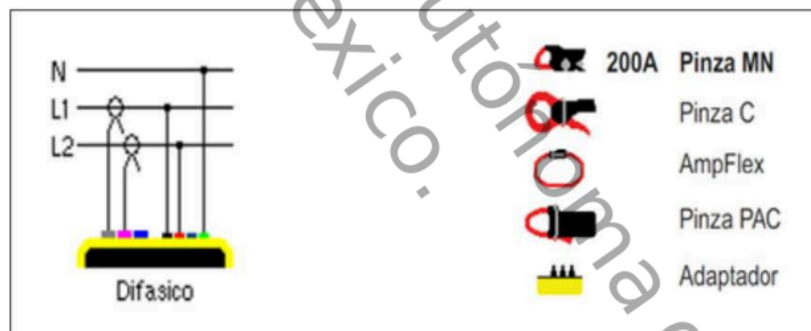


Figura 3.8 Configuración de analizador de calidad de energía.

Una vez finalizado el periodo de medición, se procesaron los datos en una PC a través del software Data View versión 03.07.0003 del cual se obtuvo un informe de los valores obtenidos (Figura 3.10) y se llevó a cabo un análisis de los índices de calidad de energía y su comparación con los límites establecidos.

10/20/05 04:09 PM

CONFIGURACION 1

☒ Hz ☒ Urms ☒ Uthd ☒ Ucf
☒ Vrms ☒ Vthd ☒ Vcf ☒ Vunb ☒ VPST
☒ Arms ☒ Athd ☒ Acf ☒ Aunb ☒ Akf
☒ W ☒ VAR ☒ VA
☒ PF ☒ DPF ☒ Tan

☒ Vh 00 → 50 ◊ solamente impares
☒ Ah 00 → 50 ◊ solamente impares

Figura 3.9 Panel de parámetros de medición.

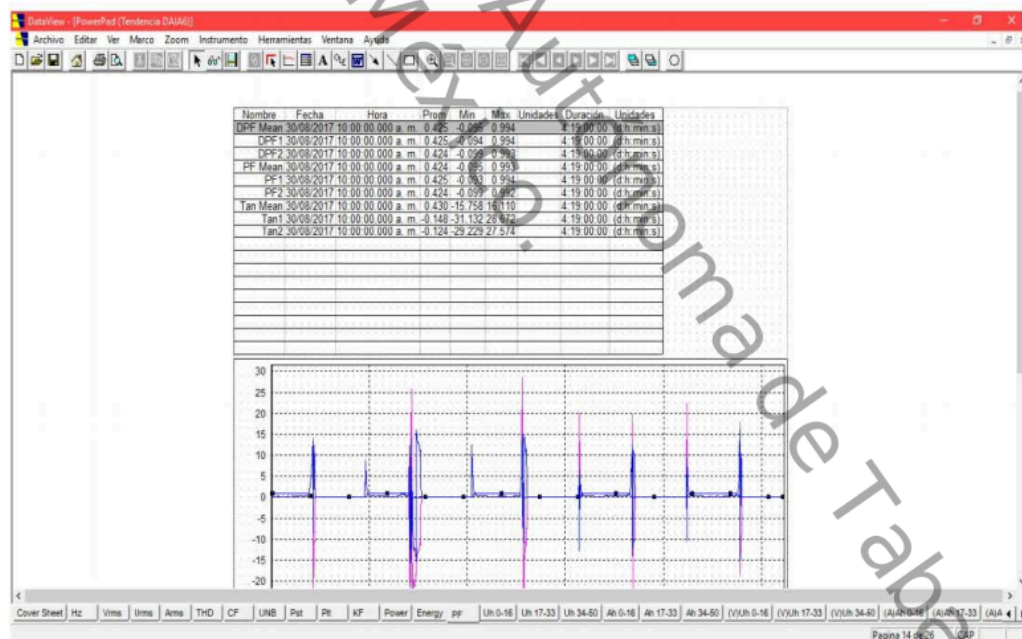


Figura 3.10. Software de análisis de datos "Dataview".

3.5.1 Índices de calidad de energía

Los índices que determinan la calidad de energía son indicados en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Indicadores de calidad y sus límites.

Indicadores	Perturbaciones	Límites
FP	Factor de Potencia	0 - 1
THDv	Distorsión armónica de tensión	8%
THDi	Distorsión armónica de corriente	5-20%
N.T	Nivel de tensión	± 10 % Vn

a) Factor de potencia

El factor de potencia es la relación entre la energía que se convierte en trabajo y la energía eléctrica que un circuito o dispositivo consume. Su valor depende de las características del propio circuito, es adimensional [2,3]

Como se establece en la resolución num. Res/119/2012 de la Secretaría de Energía del Diario Oficial de la Federación, publicada el día martes 22 de mayo de 2012, las fuentes interconectadas a media y alta tensión, deben tener un factor de potencia aproximado de 0.95 [4]. Se obtendrá directo de las mediciones con el analizador de la calidad de energía eléctrica.

El factor de potencia resulta de la relación de la potencia aparente S (potencia total que la fuente de generación aporta) y la potencia reactiva P (potencia que se emplea para producir trabajo).

$$f_p = \frac{P}{S} \quad (10)$$

Debido a que la potencia reactiva es menor que la aparente, el factor de potencia siempre estará entre los valores de $0 \leq f_p \leq 1$. En condiciones de corriente y voltajes senoidales se determinará como la diferencia de fase entre la tensión y la corriente de un sistema de corriente alterna [3]:

$$f_p = \frac{V_{RMS} I_{RMS} \cos(\varphi)}{V_{RMS} I_{RMS}} = \cos(\varphi) \quad (11)$$

b) Distorsión armónica total

El parámetro TDH (en inglés, Total Harmonic Distortion) se utilizará para conocer la distorsión que los armónicos producen en el sistema. Se mide para tensión y corriente (Tabla 3.2).

Tabla 3.2. Límites permisibles de distorsión armónica en tensión (CFE-L0000-45) [5–7].

Tensión [KV]	Componente armónico individual máximo de tensión (CAIMT) %	Armónica total de tensión (DATT ó TDH _v)
Menor de 1	6	8
De 1 a 35	5	6.5
Mayor de 35	2	3

c) Distorsión armónica total de voltaje

La distorsión armónica de voltaje se determinará de la siguiente manera:

$$TDH_v = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^H V_h^2}{V_1^2}} \times 100 \quad (12)$$

Dónde TDH_v es la distorsión armónica total de tensión expresada en porcentaje; V_h^2 : es el valor eficaz rms, para el armónico “h” (para $h=1,2,\dots,40$) expresado en voltios. V_1^2 es el componente de frecuencia fundamental de tensión (voltaje nominal del punto de medición expresado en voltios); h el número de armónica, en el cual H es 25 como mínimo.

También puede calcularse a partir de la siguiente expresión:

$$V'_h = \frac{V_{hm}^2}{V_1^2} \times 100 \quad (13)$$

Dónde V'_h es el componente armónico individual de tensión; V_{hm}^2 es el componente armónico de mayor amplitud de tensión y V_1^2 es el componente de tensión de frecuencia fundamental.

d) Distorsión armónica total de corriente

Los límites en la distorsión armónica de corriente se determinan por el tamaño de la carga con respecto al sistema del que es alimentado y es una relación entre la corriente de corto circuito (I_{cc}) y la corriente de demanda máxima o máxima corriente de carga (I_L), a la frecuencia fundamental [8]. Se recomienda no sobrepase el 5% y 20% para consumidores pequeños (Tabla 3.3).

Tabla 3.3. Límites de distorsión armónica de corriente (CFE-L0000-45) [5–7].

Impedancia relativa (I_{cc}/I_L)	Componente armónico individual máximo de corriente, para armónicos impares (CAIMC) %					Distorsión armónica total de demanda (DATD)%
	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h > 35$	
$(I_{cc}/I_L) < 20$	4	2	1.5	0.6	0.3	5
$20 < (I_{cc}/I_L) < 50$	7	3.5	2.5	1	0.5	8
$50 < (I_{cc}/I_L) < 100$	10	4.5	4	1.5	0.7	12
$100 < (I_{cc}/I_L) < 1000$	12	5.5	5	2	1	15
$(I_{cc}/I_L) > 1000$	15	7	6	2.5	1.4	20

La distorsión armónica de corriente también se puede calcular de la siguiente forma:

$$TDH_i = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^H I_h^2}{I_1^2}} \times 100 \quad (14)$$

Dónde TDH_i es la distorsión armónica total de corriente expresado en %; I_h^2 es la componente de la “h” armónica de corriente (para $h=1,2,\dots,40$); I_1^2 es la corriente nominal del punto de medición y h es el número de armónica, donde H es 25 como mínimo.

La distorsión armónica de corriente también puede ser dividida en componente de armónico individual máximo de corriente [3]:

$$I'_h = \frac{I_{hm}^2}{I_1^2} \times 100 \quad (15)$$

Dónde I'_h es el componente armónico individual de tensión; I_{hm}^2 es el Componente armónico de mayor amplitud de corriente; I_1^2 es el componente de corriente de frecuencia fundamental (corriente nominal del punto de medición).

e) Nivel de Tensión

De los valores de voltaje obtenidos de la medición se procederá a calcular lo siguiente:

$$\Delta V_k (\%) = \frac{V_k - V_n}{V_n} \times 100 \quad (16)$$

Donde:

ΔV_k : Variación de voltaje en el punto de medición, en el intervalo $k= 10$ min.

V_k : Voltaje eficaz (rms) medido en cada intervalo de medición $k= 10$ min.

V_n : Voltaje nominal en el punto de medición [8].

También de acuerdo a la normatividad hay dos tipos de indicadores que son medidas del flicker (fluctuaciones de tensión):

- 2 ■ Indicador de variación de tensión a corto plazo (Pst): Evalúa la severidad de las variaciones periódicas de amplitud de la tensión a corto plazo, con intervalos de observación de 10 minutos y es adimensional.
- 2 ■ Indicador de variaciones de tensión a largo plazo (Plt): Evalúa la severidad de las variaciones periódicas de amplitud de la tensión a largo plazo, con intervalos de observación de 2 horas y se calcula con valores sucesivos de Pst y es adimensional.

2 La combinación para severidad de variaciones periódicas de amplitud de la tensión causadas por varias instalaciones se calculará de la siguiente manera:

$$P_{st} = \sqrt[3]{\sum_t P_{sti}^3} \quad (17)$$

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_t P_{lti}^3} \quad (18)$$

En la siguiente tabla (Tabla 3.4), se encuentran los límites permisibles para una fuente de energía en un alimentador de media tensión, no debe presentar niveles de emisión individuales que se encuentren fuera de lo establecido.

Tabla 3.4. Límite permisible de los indicadores de variaciones de tensión [4,9].

Indicador	Límite
E_{Psti}	0.35
E_{Plti}	0.25

Referencias

- [1] Comité Consultivo Nacional de Normalización de Instalaciones Eléctricas. Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012, Instalaciones Eléctricas (Utilización). 250: 2012.
- [2] Elkholy A, Fahmy FH, El-ela AAA, Nafeh AEA, Spea SR. Experimental evaluation of 8 kW grid-connected photovoltaic system in Egypt 2016:1–13.
- [3] Morales Vidal CA, René. GJ. Caracterización de la calidad de la energía eléctrica mediante monitoreos de parámetros eléctricos en dependencias de la UNAM, según su actividad preponderante. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO (UNAM), 2016.
- [4] SECRETARÍA DE ENERGÍA (SENER). DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN (PRIMERA SECCIÓN, RESOLUCIÓN 119). México: 2012.
- [5] COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD (CFE). DESVIACIONES PERMISIBLES EN LAS FORMAS DE ONDA DE TENSIÓN Y CORRIENTE EN EL SUMINISTRO Y CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA (ESPECIFICACIÓN CFE L0000-45). México: 2005.
- [6] International Electrotechnical Commission (IEC). IEC 61000-3-6-2008. 2008.
- [7] Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). IEEE-519-2014. 2014.
- [8] MONTALUISA ADP. Evaluacion De La Calidad De Energia Electrica En Instalaciones Fotovoltaicas Conectadas a La Red De Bajo Voltaje. 2015.
- [9] International Electrotechnical Commission. IEC 61000-3-3-2018. 2018.

CAPÍTULO 4.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se describe el análisis de los datos obtenidos de la medición en el caso de estudio, así mismo se verificó el estado de la calidad de energía de acuerdo a las normas y regulaciones vigentes. Se presentan los resultados obtenidos del análisis de los parámetros que determinan la calidad de energía, como factor de potencia, espectro armónico, distorsión de armónicos, desequilibrio de tensión y flicker.

4.1 Análisis de los índices de calidad de energía

4.1.1 Potencia de operación

El análisis de potencia se realizó con condiciones de operación en las dos líneas del sistema. Para el inversor Zeversolar la potencia en cada línea es similar entre sí, es decir existe una distribución proporcional durante el periodo de medición de 35 días en base a los resultados presentados en la Figura 4.1 a), donde se observa una potencia pico de 4558.24 W, es decir el 96% del valor nominal, lo que significa que no hay grandes pérdidas en la producción del sistema fotovoltaico, se puede atribuir las pequeñas disminuciones en la potencia a las condiciones climatológicas del periodo de medición con precipitación acumuladas mensual de 100-200 mm [1]. Sin embargo, aun con la presencia de este factor que es de suma importancia para la operación de un sistema fotovoltaico, no se ve disminuida la producción de energía.

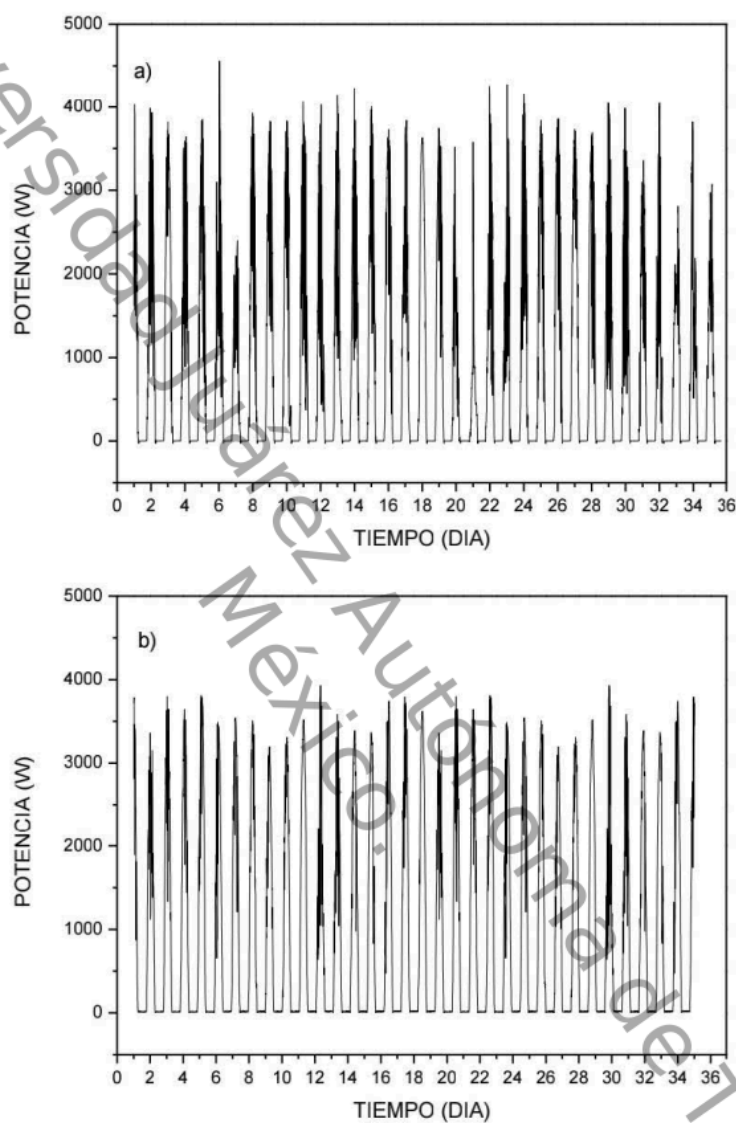


Figura 4.1 a) Potencia generada por el SF conectado al inversor Zerversolar y b) Potencia generada por el SF conectado al inversor Fronius.

En cambio, el inversor Fronius llegó a una potencia máxima de 3929.50 W como se aprecia en la Figura 4.1 b), esto es un 82% de lo que el sistema puede

alcanzar, lo cual se considera bajo, a pesar de que las mediciones se realizaron en la época de mejores condiciones para la generación de energía fotovoltaica, ya que en los meses de abril y mayo se cuenta con una radiación directa mensual de 6.98 y 5.79 $\text{KWh}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{día}^{-1}$ que son los mayores promedios durante todo el año, a su vez es la temporada de menores precipitaciones (50-100 mm), menor radiación difusa y mayores horas de luz al día (12.5 y 12.9 h) [2,3], a diferencia de los meses de julio y agosto en los cuales se realizó la medición del inversor Zeversolar.

4.1.2 Factor de potencia

En el inversor Zeversolar se presentan decrementos al iniciar la operación, que es cuando el inversor exige energía para lograr la estabilización y cuando se va ocultando el Sol al terminar el día, ya que deja de capturar suficiente radiación y éste actúa linealmente en bajos valores de irradiancia [4], como se observa en la Figura 4.2 a), es decir en momentos que no tiene suficiente energía que convertir.

El inversor Zeversolar mantiene un factor de potencia de 0.99 cuando está al máximo en operación, se puede apreciar en la gráfica de potencia pico de un día en la Figura 4.2 a). Los valores entregados por el sistema conectado a este inversor están dentro de la normatividad, ya que por encima de 0.95 se evitan penalizaciones por parte de la Comisión Federal de Electricidad [5].

Para el caso del inversor Zeversolar se atribuye a su tecnología sin transformador, debido a que está demostrado que los transformadores son elementos que pueden provocar un bajo factor de potencia [6]. Además de cumplir con las especificaciones del equipo, ya que este inversor promete un factor de 0.97 a 0.99 con un rango del 20 al 100% de carga [7]. El inversor Fronius presenta un factor de potencia máximo de 0.867 tal como se muestra en la Figura 4.2 b) en la medición general y en factor de potencia pico de un día, este valor

está por debajo del límite establecido en el Diario Oficial de la Federación de 0.95.

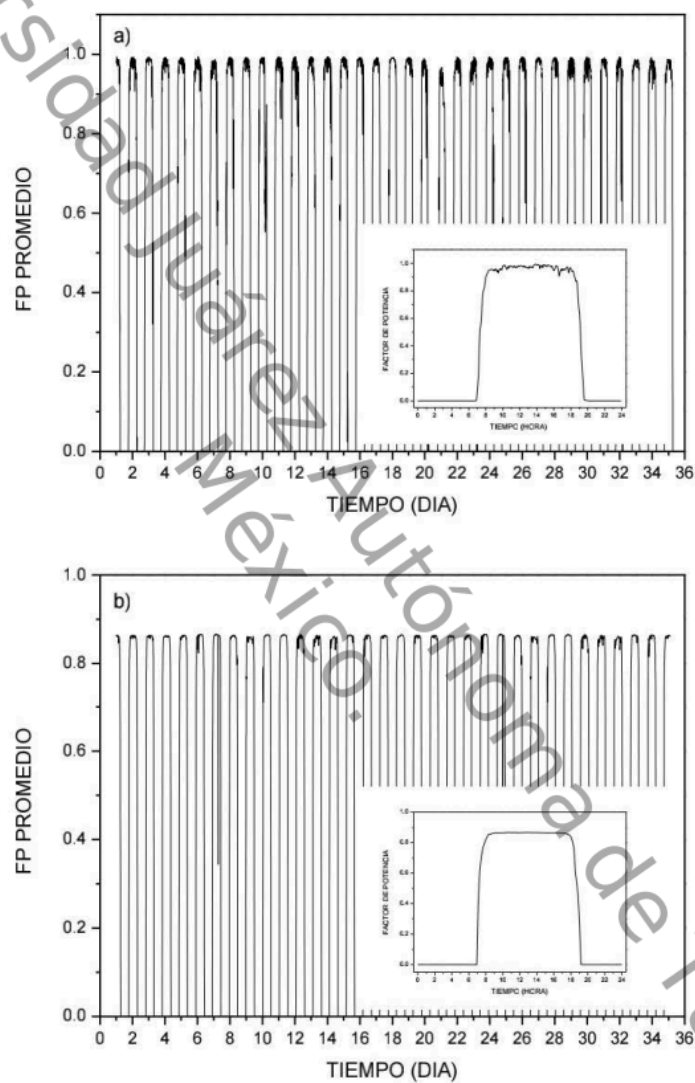


Figura 4.2 a) Factor de potencia Zeversolar durante 35 días y Factor de Potencia pico del día 24/07/2017 y b) Factor de potencia Fronius durante 35 días y Factor de Potencia pico del día 13/05/2017.

Esto puede deberse a que al pasar la energía por un transformador disminuye el factor de potencia por la corriente de magnetización que puede generarse dentro de su núcleo; lo cual normalmente sucede por la corriente distorsionada y las cargas inductivas (cargas por las que circula electricidad dentro de una bobina, en este caso dentro del transformador) provoca el incremento de la diferencia de fase entre el voltaje y corriente en los terminales de carga [8], debido a su topología con transformador promete un factor de potencia cercano a la unidad, solo cuando se obtenga la potencia nominal [9].

De igual manera los valores por debajo de la normatividad se pueden atribuir al consumo de energía reactiva que presentan los filtros en los inversores, esto de acuerdo a estudios experimentales realizados, dónde los filtros no se desconectan aun cuando el sistema fotovoltaico esté por finalizar su operación.

Además de que a menores valores de generación de potencia, se presentan valores más pequeños de factor de potencia [4,10], ya que uno depende del otro, debido a que este parámetro es una relación entre la potencia aparente y reactiva que muestra el aprovechamiento de la potencia que se genera, al presentar valores cercanos a la unidad nos indica que del 90 al 100% de la capacidad de generación del sistema se convierte en energía útil, esta correlación se muestra en la Figura 4.3 a) y Figura 4.3b) dónde se aprecia una correlación positiva entre la potencia generada y el factor de potencia, de acuerdo a la R^2 ajustada de 99% para ambos casos de la variabilidad de los datos lo cual hace el modelo certero.

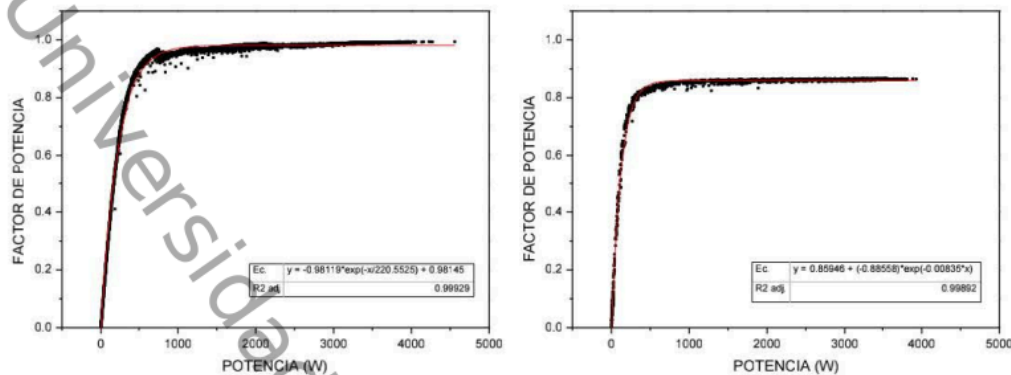


Figura 4.3 Relación entre el Factor de Potencia y la Potencia a) Inversor Zeversolar e b) Inversor Fronius.

4.1.3 Espectro armónico

En los resultados del análisis del espectro armónico se reportan del armónico uno al 50, en el cual se realizó una comparación de los armónicos que están dentro de las líneas de emisión del inversor con los valores establecidos en la normatividad en México e internacionalmente [11,12].

Los espectros armónicos del inversor Zeversolar presentado en la Figura 4.4 a) y la Figura 4.5 a), muestran valores mínimos para los armónicos tanto pares como impares, los cuales no afectan las líneas de transmisión en condiciones de operación, tomando en cuenta que los armónicos del 25 al 50 cotidianamente no representan perturbaciones que puedan afectar el funcionamiento de los equipos.

A pesar que la mayoría de armónicos se encuentran dentro de los límites en algún momento por la mañana cuando el inversor se está estabilizando se hacen presentes los valores más altos en los armónicos 3,5 y 7 al ser armónicos impares que se presentan de lado de la corriente alterna, los cuales son los que mayor afectación provocan en las instalaciones eléctricas [13], pero aún muy por debajo de los límites establecidos.

En el inversor Fronius los armónicos pares no se hacen presentes en la Figura 4.4 b) a diferencia de los armónicos impares en la Figura 4.5 b) que se encuentran

de forma similar que en el Zeversolar; dónde el armónico 3 y 5 tienen un valor 0.2 mayor y los otros se encuentran en los mismos valores, pero todos dentro de la normatividad.

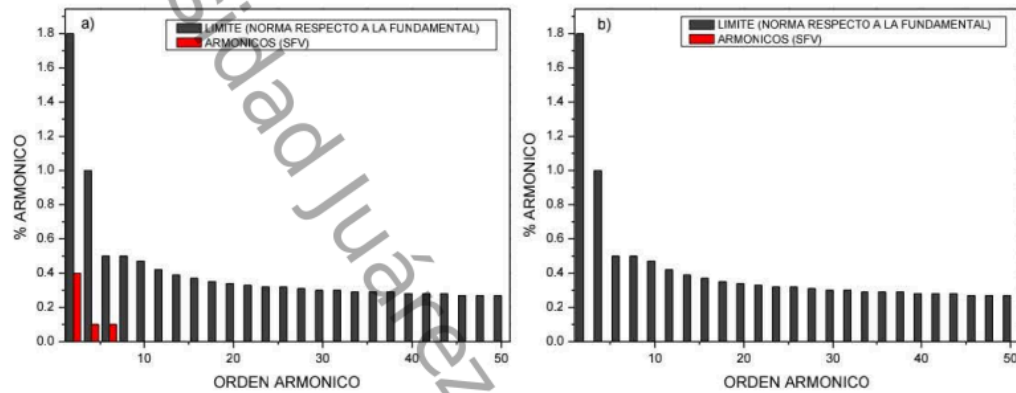


Figura 4.4 Comparación entre armónicos pares y la normatividad en el inversor a) Zeversolar y b) Fronius.

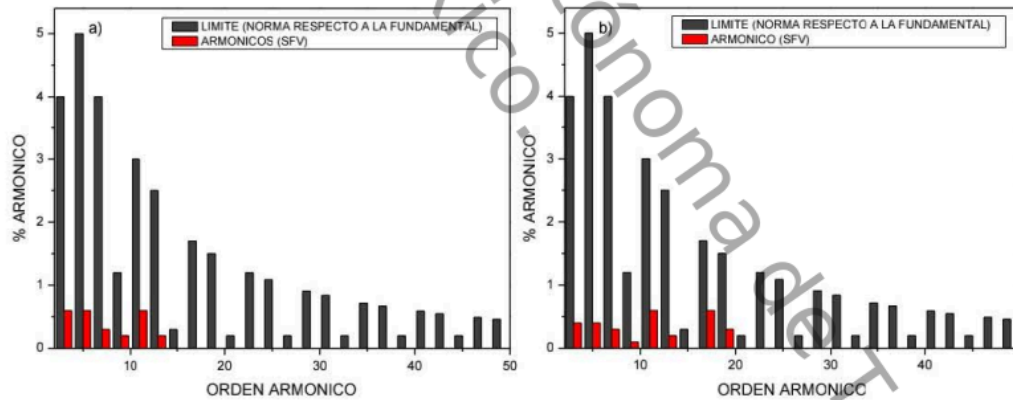


Figura 4.5 Comparación entre armónicos impares y la normatividad a) Inversor Zeversolar y b) Inversor Fronius.

4.1.4 Distorsión armónica total

El análisis de la distorsión armónica de voltaje y de corriente en cada una de las líneas del sistema se realizó de forma similar a los valores armónicos. La distorsión armónica nos describe la desviación de estos armónicos, presentando diferentes porcentajes de distorsión, siendo normalmente los componentes de armónicos impares los que mayor distorsión armónica ocasionan.

Sin embargo estos valores se encuentra dentro de los rangos permitidos en México [14,15]. Para voltaje los valores de distorsión armónica deben ser por debajo del 6.5% y de acuerdo a los datos obtenidos para el inversor Zeversolar y Fronius los mayores valores registrados fueron ¹ en las primeras horas de la mañana y para ambos equipos se encuentran dentro de los valores establecidos en la Figura 4.6 a) y b).

Sin embargo la distorsión armónica del inversor Fronius son un poco mayores a los del inversor Zeversolar, a pesar de que son valores pequeños de distorsión, se puede presentar valores mayores debido a un voltaje contaminado o un nivel de tensión variable [8]. Aunque la presencia de esta distorsión en el voltaje es común debido al tipo de señal no lineal que se obtiene a la salida del inversor, es decir propio de su función [16] .

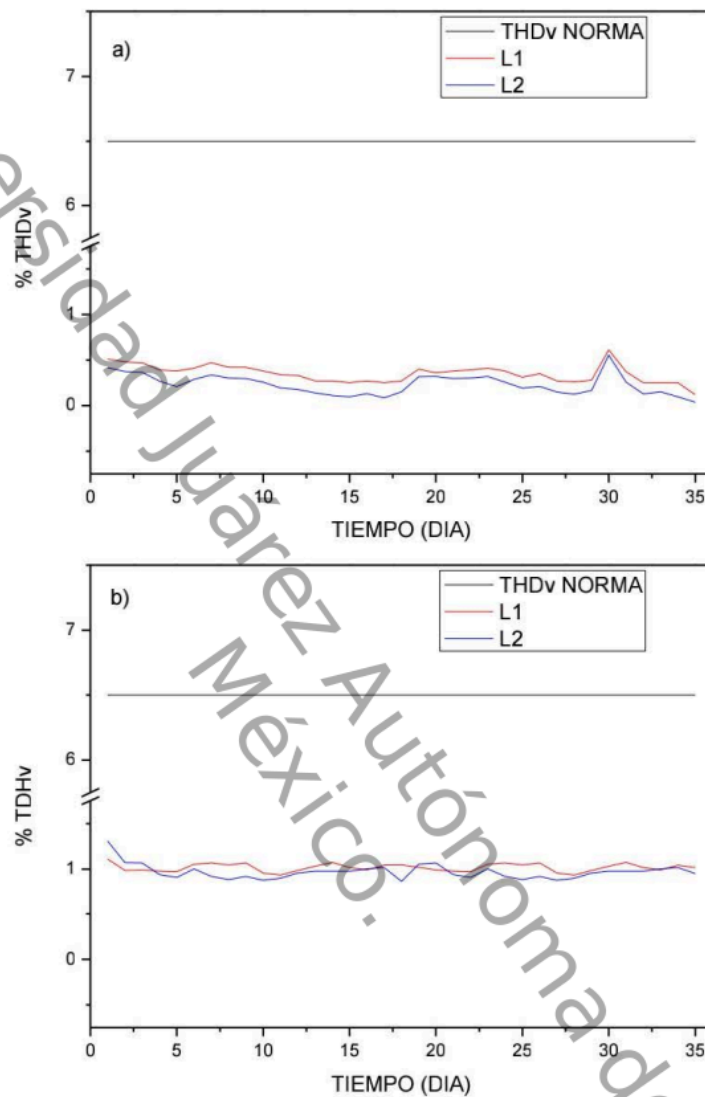


Figura 4.6 Distorsión total armónica de voltaje respecto a la normatividad a) Inversor ZeverSolar y b) Inversor Fronius.

Los valores de distorsión armónica de corriente de acuerdo a la normatividad en México deben ser menor al 5%, presentándose valores cercanos a las primeras horas de la mañana entre 6-9 am y por la tarde entre 5-6 pm e, es decir en horarios donde el inversor está trabajando con poca generación de energía o está

por terminar su operación. Además que los valores más altos de THDi son influenciados por la disminución de corriente RMS [16,17].

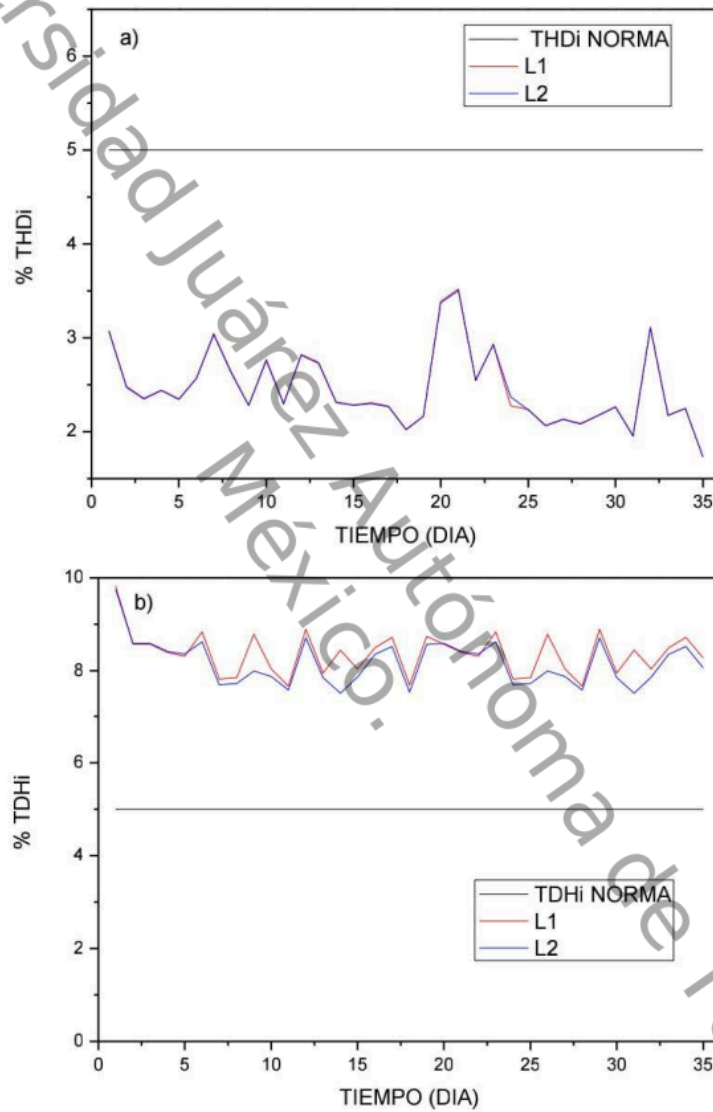


Figura 4.7 Distorsión total armónica de corriente con respecto a la normatividad a) Inversor Zeversolar y b) Inversor Fronius.

Los niveles de distorsión armónica en ambas líneas son muy similares, lo que indica una distribución de carga proporcional conectada al punto de medición para el inversor Zeversolar que se muestra en la Figura 4.7 a); en cambio el inversor Fronius que se muestra en la Figura 4.7 b) valores del total de su medición por encima de la norma entre el 8 y 10%. Esto puede ser causado por la inversión del flujo de potencia en la unión SFV-Red Convencional cuando se alcanzan los valores más altos de potencia suministrada por el sistema. De igual manera la distorsión armónica de corriente se relaciona con el funcionamiento del inversor, ya que el fabricante promete una THDi menor al 3%, pero esto solo cuando se opera cercano al 30% de la potencia nominal [8,18].

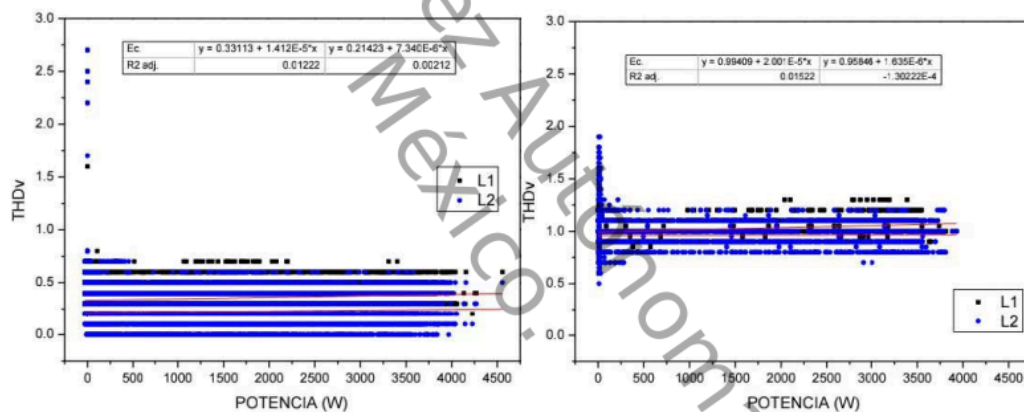


Figura 4.8. Relación entre la Distorsión total armónica de voltaje y la Potencia a) Inversor Zeversolar y b) Inversor Fronius.

En la Figura 4.8 a) y Figura 4.8b) se muestra una relación entre la distorsión armónica de voltaje con la potencia generada en cada uno de los inversores. no hay una correlación en ambos parámetros, a pesar de que a bajos valores de potencia se presentan los valores más altos de distorsión armónica de voltaje, una vez que logra estabilizarse los valores de THDv se mantienen relativamente constantes [10], además la R^2 ajustada de 1.2 y 1.52 respectivamente demuestra

que el efecto sobre la variable de respuesta al cambiar de un nivel a otro es muy pequeño, por lo que el modelo no representa una correlación entre ambos parámetros.

En la Figura 4.9 a) y Figura 4.9b) se aprecia una relación entre la distorsión armónica de corriente con la potencia, ya que se observa que a menor potencia generada, el contenido de armónicos decrece linealmente, por lo que se establece un modelo que describe una correlación negativa, con una R^2 ajustada de 88 y 95% respectivamente, que confirma la correlación entre la distorsión armónica de corriente y la potencia generada. Este tipo de correlación demuestra que el sistema genera valores de distorsión armónica mayores cuando el inversor opera por debajo del 30% del total de su capacidad, y conforme se alcanza este porcentaje disminuye la distorsión [4,10,19].

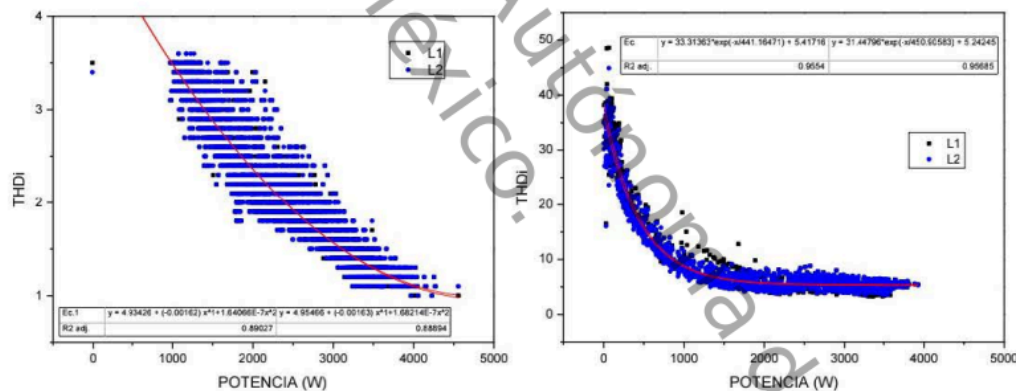


Figura 4.9 Relación entre la Distorsión total armónica de corriente y la Potencia a) Inversor Zerversolar y b) Inversor Fronius.

4.1.5 Nivel de tensión

a. Voltaje RMS

Las variaciones de voltaje se definen por su magnitud RMS (raíz media cuadrática), es decir su voltaje efectivo. La tensión en el inversor Zerversolar se

encuentra en un rango de 106 – 111 V en cada línea en la Figura 4.10 a), encontrándose dentro del rango establecido por la normatividad (Ver Tabla 4.1). Los resultados del inversor Fronius muestran un rango de voltaje de 118 – 132 V (Ver Tabla 4.2) dónde se observa una distribución que no es completamente proporcional en cada línea como se observa en la Figura 4.10 b).

La tensión que manejan los inversores es de 127 V comúnmente, sin embargo la tensión nominal de los suministros de electricidad es de 110 V y la tolerancia debe estar en un rango estrecho del $\pm 10\%$ [20] .

Tabla 4.1 Límites mínimos y máximos de tensión generada por el SFV (inversor Zeversolar).

Límite (V)		Valor Medido Zeversolar (V)			
$\pm 10 \%$		L1		L2	
Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
99	121	107.1	111.8	108.2	113.9

Tabla 4.2 Límites mínimos y máximos de tensión generada por el SFV (inversor Fronius).

Límite (V)		Valor Medido Fronius (V)			
$\pm 10 \%$		L1		L2	
Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
114.3	139.7	119	129.1	121.7	132.4

El inversor Fronius trabaja con un voltaje de salida mayor que el del inversor Zeversolar, debido a que es un equipo con transformador de alta frecuencia, esto favorece la eficiencia en todo el rango de tensiones de entrada por la conmutación automática del transformador, por lo que al recibir una señal de tensión baja puede elevarla en busca de compensar la operación del sistema, ya

que entre sus funciones principales es la de proporcionar no solo aislamiento galvánico, sino la ampliación de voltaje [17,21,22].

Además de que éste inversor trabaja con un gestor de módulos que localiza el punto de máxima potencia (MPP), es decir localiza y modifica los valores de tensión y corriente ideales para que el inversor trabaje en el MPP [18,23] y el sistema es capaz de compensar cargas lineales y no lineales, de modo que busca el equilibrio, para lograr la eliminación de armónicos, corrección del factor de potencia y la regulación del voltaje de salida [24].

De igual manera el modo de trabajo del inversor Zerversolar es el de un equipo sin transformador por lo que la operación del equilibrio de la carga aumenta el voltaje de un punto y disminuyen el voltaje en otro [25]. Al carecer de transformador mantienen un voltaje constante por medio de un condensador flotante, que ayuda con el problema de sobrevoltaje que pueden generar los desequilibrios, pero en ocasiones a un voltaje relativamente menor a los inversores con transformador [26,27].

También depende de la configuración en serie de los módulos fotovoltaicos puede aumentar la tensión de salida con la tecnología multinivel logran aumentar la tensión en corriente alterna sin necesitar el transformador [25]. Las variaciones que se aprecian pueden denominarse caídas de tensión momentáneas ya que son de corta duración y se hacen presentes debido a que los inversores fotovoltaicos por su modo de operación son sensibles a las fluctuaciones del voltaje [28].

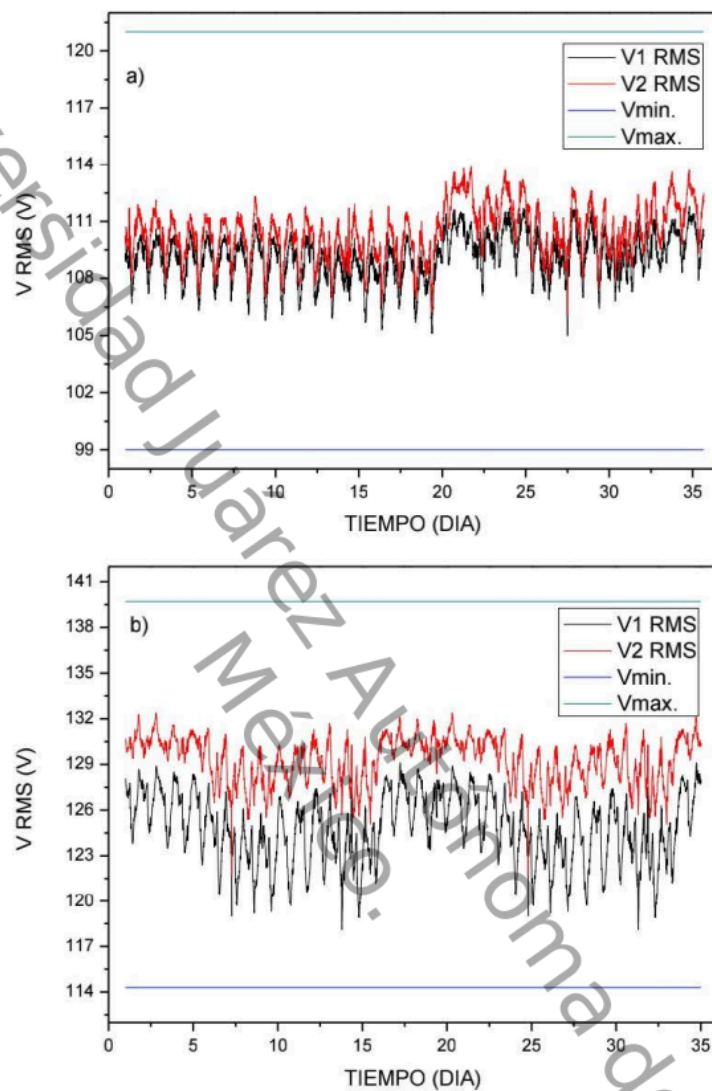


Figura 4.10 Valor RMS voltaje (1 s) con respecto a los límites de voltaje establecidos a) Inversor Zversolar y b) Inversor Fronius.

b. Desequilibrio de tensión

El desbalance en el nivel de tensión aparece cuando las tensiones no tienen una relación proporcional entre sí. Los desbalances mayores a 5% se deben a que las cargas en las líneas no siempre son iguales, lo que provoca que el sistema

trate de compensarlo, solo se permite un rango de variación de tensión de $\pm 5\%$ del valor nominal [11,29]. El desequilibrio de tensión para el inversor Zeversolar se encuentra entre -3.36 a 1.64% como se muestra en la Figura 4.11 a). En el inversor Fronius el desequilibrio de tensión se encuentra entre -0.007 y -0.092 Figura 4.11 b), es decir un rango muy pequeño lo que dice que la tensión en ambas líneas es proporcional entre sí y cercanas a la tensión nominal, así como que el transformador trabaja de forma correcta el voltaje [20].

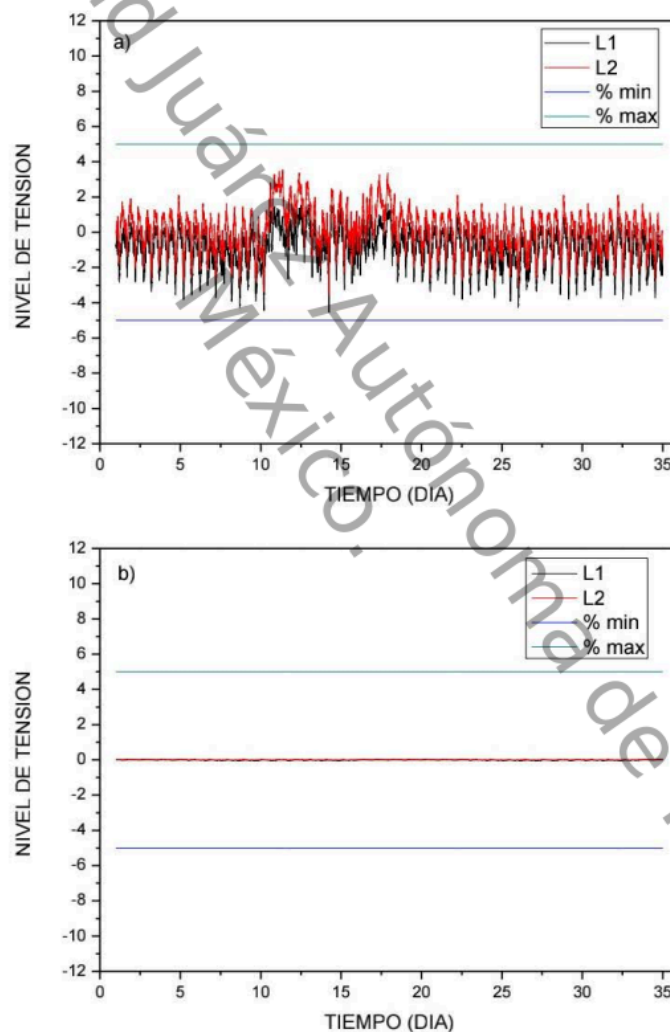


Figura 4.11 Desequilibrio de Tensión.

La variación de la tensión o desequilibrio depende de la carga total de la fase a la que es instalada [20]. Para este caso se observa un menor desequilibrio de tensión menor en el inversor Fronius, debido que trabaja a valores más cercanos al voltaje nominal y es apreciable que las cargas en cada línea son similares y que en cada medición no existe una disminución o aumento de voltaje con respecto al valor de tensión anterior.

c. Flicker

Para la determinación del flicker se empleó el indicador de la variación de tensión a corto plazo (Pst) que se mide en un intervalo de 10 minutos, y su límite es de 0.35. El inversor Zenersolar presenta un Pst de 0.2-0.34 como máximo en algunos momentos durante el tiempo que está en funcionamiento el sistema, éstos se encuentran dentro de los límites establecidos como se observa en la Figura 4.12a). Sin embargo para el inversor Fronius que se muestra en la Figura 4.12b), el indicador de la variación a corto plazo se encuentra en un rango de 0.18 a 0.59, es decir por encima del valor Pst establecido. Esto es debido a que la señal de voltaje tiene mayor presencia de oscilaciones, aunque es cercano al valor de tensión nominal, difiere entre una medición y otra, mostrando una variación en la tensión lo que provoca un mayor valor del índice Pst. Esta variación se hace presente por una mayor producción de potencia reactiva, que puede notarse en el bajo factor de potencia del equipo.

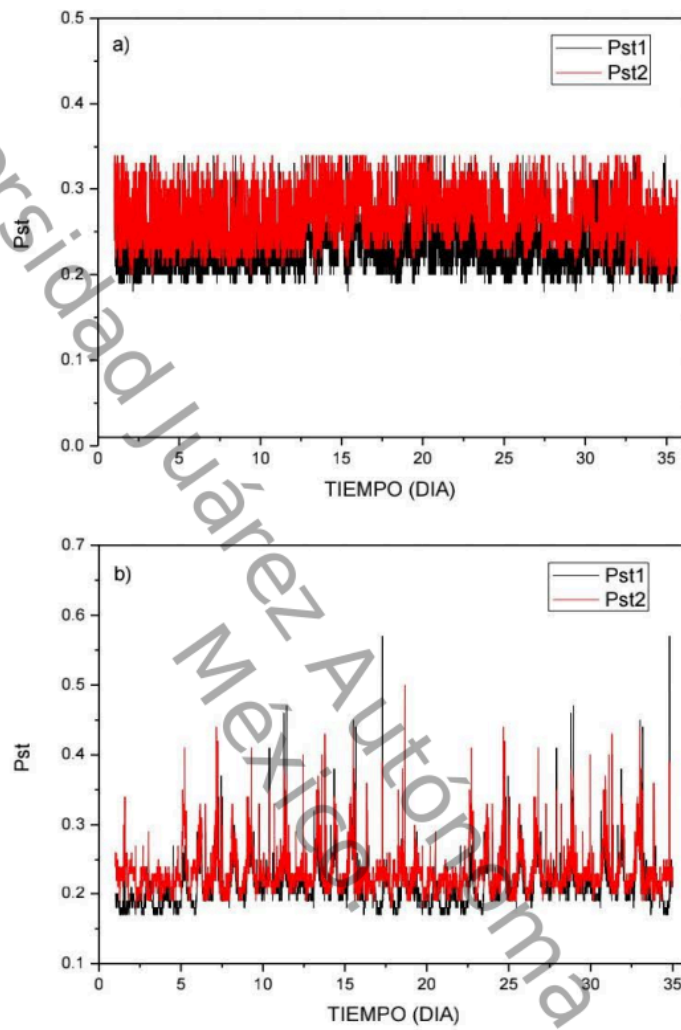


Figura 4.12 Índice de variación de tensión a corto plazo a) Inversor Zeversolar y b) Inversor Fronius.

Referencias

- [1] CONAGUA- SMN (Sistema Meteorológico Nacional). Climatología. Resúmenes Mens Temp y Lluvia 2017.
- [2] COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA (CONAGUA). SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL 2017.
- [3] NASA. Atmospheric Science Data Center 2017.
- [4] Elkholy A, Fahmy FH, El-ela AAA, Nafeh AEA, Spea SR. Experimental evaluation of 8 kW grid-connected photovoltaic system in Egypt 2016:1–13.
- [5] Morales Vidal CA, René. GJ. Caracterización de la calidad de la energía eléctrica mediante monitoreos de parámetros eléctricos en dependencias de la UNAM, según su actividad preponderante. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO (UNAM), 2016.
- [6] Nogueira CEC, Bedin J, Niedzialkoski RK, de Souza SNM, das Neves JCM. Performance of monocrystalline and polycrystalline solar panels in a water pumping system in Brazil. Renew Sustain Energy Rev 2015;51:1610–6. doi:10.1016/j.rser.2015.07.082.
- [7] Zerversolar. Installation and Operating Instructions, 2015.
- [8] González-castrillo P, Romero-cadaval E, González-romera E, Barrero-gonzález F, Guerrero-martínez MA. Influencia de una Instalación Fotovoltaica de una Red de Distribución 2007.
- [9] Fronius. Manual de Instrucciones de Inversores para Instalaciones Fotovoltaicas Acopladas a la Red, 2012.
- [10] Had M. Power quality experimental analysis of grid-connected photovoltaic systems in urban distribution networks 2017:1–6. doi:10.1016/j.energy.2017.05.088.
- [11] SECRETARÍA DE ENERGÍA (SENER). DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN (PRIMERA SECCIÓN, RESOLUCIÓN 119). México: 2012.
- [12] International Electrotechnical Commission. IEC 61000-3-2-2018. 2018.
- [13] Zhang G, Liu X, Mei L, Ouyang H, Deng X. Filter design at the output of the inverter in PMSM drives. COMPEL - Int J Comput Math Electr Electron Eng 2017;36:364–77. doi:10.1108/COMPEL-04-2016-0169.
- [14] COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD (CFE). DESVIACIONES PERMISIBLES EN LAS FORMAS DE ONDA DE TENSIÓN Y CORRIENTE EN EL SUMINISTRO Y CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA (ESPECIFICACIÓN CFE L0000-45). México: 2005.
- [15] Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). IEEE-519-2014. 2014.
- [16] Janik P, Kosobudzki G, Schwarz H. Influence of increasing numbers of RE-inverters on the power quality in the distribution grids: A PQ case study of a representative wind turbine and photovoltaic system 2017;11:155–67. doi:10.1007/s11708-017-0469-3.
- [17] Ahmad Z, Singh SN. Single phase transformerless inverter topology with reduced

- leakage current for grid connected photovoltaic system. *Electr Power Syst Res* 2018;154:193–203. doi:10.1016/j.epsr.2017.08.031.
- [18] Campelo Ramos I. Caracterización de la generación fotovoltaica y el consumo de un edificio de uso industrial. Carlos III de Madrid, Escuela Politécnica Superior, 2013.
- [19] Le M, Konji T. Power Quality Field Measurements on Photovoltaic System n.d.;2.
- [20] Shahnian F, Ghosh A. High Penetration of Rooftop Photovoltaic Cells in Low Voltage Distribution Networks : Voltage Imbalance and Improvement 2014;69–95. doi:10.1007/978-981-4585-27-9.
- [21] Ahmad Z, Singh SN. Improved modulation strategy for single phase grid connected transformerless PV inverter topologies with reactive power generation capability. *Sol Energy* 2018;163:356–75. doi:10.1016/j.solener.2018.01.039.
- [22] Islam M, Mekhilef S, Hasan M. Single phase transformerless inverter topologies for grid-tied photovoltaic system: A review. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;45:69–86. doi:10.1016/j.rser.2015.01.009.
- [23] Cáceres M, Prieb CWM, Vera LH, Busso AJ. Development of an electrical characterization device for single-phase pv grid-connected inverters. *Energy Procedia* 2014;57:188–96. doi:10.1016/j.egypro.2014.10.023.
- [24] Goel BSS. Adaptive Harmonic Detection Control of Grid Interfaced Solar Photovoltaic Energy System with Power Quality Improvement 2015;96:37–45. doi:10.1007/s40031-014-0125-9.
- [25] Shayestegan M, Shakeri M, Abunima H, Reza SMS. An overview on prospects of new generation single-phase transformerless inverters for grid-connected photovoltaic (PV) systems. *Renew Sustain Energy Rev* 2018;82:515–30. doi:10.1016/j.rser.2017.09.055.
- [26] Salmi T, Bouzguenda M, Gastli A, Masmoudi A. Review of Common-Mode Voltage in Transformerless Inverter Topologies for PV Systems 2012:589–96.
- [27] Yang X, Wang Y, Reliability EA. A Novel Transformerless Single-Phase Three-Level Photovoltaic Inverter 2011:317–24.
- [28] Bletterie B. Sensitivity of Photovoltaic Inverters to Voltage Sags - Test Results for a Set of Commercial Products I DMS Impact on the Technical and Economical Performance of the Distribution Systems I n.d.:349.
- [29] International Electrotechnical Commission. IEC 61000-3-3-2018. 2018.

CAPÍTULO 5.

CONCLUSIONES

Se cumplió con el objetivo principal de este proyecto, el estudiar la calidad en la producción de energía eléctrica en sistemas fotovoltaicos interconectados con diversas tecnologías (con transformador y sin transformador). Se realizaron mediciones a la salida del inversor Zegersolar (sin transformador) durante los meses de julio-agosto en intervalos de integración de cinco minutos, de igual manera para el inversor Fronius (con transformador) en los meses de abril-mayo.

La calidad de energía entregada por el sistema fotovoltaico, así como el factor de potencia y armónicos que entregan diferentes tecnologías de inversores a la red convencional de energía, fue evaluada y el inversor Zegersolar generó una potencia de 4558.24 W, es decir el 96 %. El análisis de los parámetros eléctricos estableció los valores de los índices que determinan la calidad de energía. Se encontró un factor de potencia de 0.99, distorsión armónica de voltaje de 0.2-0.7 %, distorsión armónica de corriente 2-3.5 %, un voltaje RMS 106-111 V, un desequilibrio de tensión de 3.36 a 1.64 % y un Pst de 0.2-0.34. Se determinó que todos los índices se encontraron dentro de los límites permitidos en la normatividad mexicana e internacional, con valores que sustentan una buena calidad de energía generada.

Esto indica que el inversor es fiable y cumple con mitigar disturbios propios de la conversión de energía fotovoltaica a energía eléctrica. A pesar de ser un inversor con una topología sin transformador que en teoría puede causar mayores perturbaciones en la calidad de la energía, debido a que no cuenta con un transformador que permite el aislamiento galvánico, pero que en este caso se

tiene mediante interruptores adicional del lado de corriente alterna, lo que permite un mejor control en el nivel de los parámetros eléctricos y con la ventaja de aumentar la eficiencia total del equipo.

El inversor Fronius (con transformador) fue medido durante el periodo de mayor irradiancia anual, generó una potencia de 3929.50 W, que es el 82 % de la capacidad del SFV. Del análisis de calidad de energía se obtuvo un factor de potencia de 0.867, distorsión armónica de voltaje de 0.8-1.4 %, distorsión armónica de corriente de 7.6-10 %, un voltaje RMS 118-132 V, un desequilibrio de tensión entre -0.007 y -0.092, así como un Pst de 0.18-0.59. De acuerdo a esto se obtienen valores de distorsión de voltaje, voltaje RMS y desequilibrio de tensión entre los límites establecidos por la normativa, esto debido a que el inversor cuenta con un transformador de alta frecuencia con aislamiento galvánico con protecciones propias de los inversores modernos contra polarización inversa, sobretensiones transitorias a la entrada y salida, sobrecarga en la salida, lo que regula el voltaje. Sin embargo, el factor de potencia, la distorsión armónica de corriente y el Pst se mostraron fuera de los límites establecidos, lo cual para este caso el transformador de alta frecuencia requiere numerosas etapas de potencia que reduce la eficiencia del equipo y el transformador no siempre logra mantener una impedancia constante, provocando perturbaciones en la conversión de la energía.

De acuerdo a los resultados se compararon ambas tecnologías en la cual el inversor Zeversolar, reflejó mejor producción e índices de calidad de energía dentro de la normatividad mexicana. El inversor Zeversolar presenta un mejor control de disturbios en la salida, además de una mejor capacidad de generación en contraste con el inversor Fronius que logra una generación del 86% e índices fuera de los límites indicados a pesar de que el periodo de medición fue en la época de mayor radiación anual en la ubicación del sistema fotovoltaico.

El inversor Zeversolar, a pesar de no contar con un transformador que significaría mayor problema en la conversión de corriente directa a alterna cumple con las

especificaciones indicadas por el fabricante al tener un control de los distintos parámetros eléctricos que influyen en la conversión tanto en la capacidad total generada como a menor porcentaje, además de una mejor eficiencia en su funcionamiento que es reflejada en los resultados, a diferencia del inversor Fronius que tiene un margen pequeño para control de disturbios y es más sensible a la presencia de los mismos a menor potencia generada.

CAPÍTULO 6.

RECOMENDACIONES Y PERSPECTIVAS

Se recomiendan las siguientes actividades para trabajos futuros:

1. Llevar a cabo mediciones en temporada de nublados, para evaluar el comportamiento de los inversores Zeversolar y Fronius en periodos soleados y de baja irradiancia.
2. Evaluar la calidad de energía inyectada por ambos inversores de forma simultánea.
3. Realizar un estudio comparativo de la calidad de energía obtenida entre inversores con transformador de diferentes marcas.
4. Realizar un estudio de la calidad de energía obtenida entre inversores sin transformador de diferentes marcas.
5. Considerar el dimensionamiento del SFV para cada inversor que se coloca a prueba.
6. Efectuar la medición de los parámetros de calidad de energía con distintos instrumentos o analizadores de redes de diferentes marcas, para corroborar los valores obtenidos.
7. Analizar los parámetros de calidad de energía a la salida en CA del inversor, pero de igual manera a la entrada, para evaluar mejor el trabajo del inversor respecto a lo que recibe del SFV.
8. Comparar la calidad de energía inyectada por el SFV a la red de servicios eléctricos con respecto a la energía suministrada por CFE.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

ANEXOS

Journal of Modern Power Systems and Clean Energy

Journal Metrics 2016

Speed

Days from submission to first decision – 2016

Number of days from submission of the manuscript to first decision.

80

Days from acceptance to online publication – 2016

Number of days from acceptance at publisher to published online.

25

Usage

Downloads – 2016

Springer measures the usage on the platforms according to the COUNTER (Counting Online Usage of Networked Electronic Resources) standards.

138,088

Usage Factor – 2015/2016

The Springer Journal Usage Factor 2015/16 was calculated as suggested by the COUNTER Code of Practice for Usage Factors. It is the median value of the number of downloads in 2015/16 for all articles published online in that particular journal during the same time period. The Usage Factor calculation is based on COUNTER-compliant usage data on the SpringerLink platform.

701

Mentions and articles discussed via Social Media platforms – 2016

Additional research-impact indices, known as alternative metrics, are offering new evaluation alternatives. One of those is a researchers' reputation made via their footprint on the social web. The social media statistics are provided by Altmetric. They monitor article mentions on Twitter, Facebook, Google+, Reddit, Blogs, News articles, Policy documents and Faculty of 1000 reviews.

5

Impact

Impact Factor – 2016

Journal Impact Factors are published each summer by Clarivate Analytics via Journal Citation Reports®. Impact factors and ranking data are presented for the preceding calendar year.

1.532**5 Year Impact Factor – 2016**

The 5-year journal Impact Factor is the average number of times articles from the journal published in the past five years that have been cited in the JCR year. It is calculated by dividing the number of citations in the JCR year by the total number of articles published in the five previous years.

1.572**SNIP – 2016**

Source Normalized Impact per Paper (SNIP) measures contextual citation impact by weighting citations based on the total number of citations in a subject field. The impact of a single citation is given higher value in subject areas where citations are less likely, and vice versa.

1.404**SJR – 2016**

SCImago Journal Rank (SJR) is a measure of scientific influence of scholarly journals that accounts for both the number of citations received by a journal and the importance or prestige of the journals where such citations come from.

1.131

Journal of Modern Power Systems and Clean Energy

Study of the power quality supplied by a photovoltaic system of 5kW interconnected to the electrical service network

--Manuscript Draft--

Manuscript Number:		
Full Title:	Study of the power quality supplied by a photovoltaic system of 5kW interconnected to the electrical service network	
Article Type:	Original Research	
Funding Information:	Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT-2016-PFI-DAIA-02)	Dr. Germán Pérez-Hernández
Abstract:	One of the main challenges in the generation of electrical energy from photovoltaic systems is the idea of a high cost of acquisition, as well as the lack of environmental culture and the assumption of a poor power quality supplied to the electrical service network. To address this problem, a feasibility study was first proposed to implement a photovoltaic system for the generation of electrical energy in a teaching building of our university. After the installation, we characterized the photovoltaic system in order to analyze the power quality generated by the system. The study of the power quality provided to the electrical service network showed that the electrical parameters comply with the Mexican and international official regulations. We obtained parameters such as power factor, with values above 0.9; total harmonic distortion, with values lower than 1.6% for voltage, and 20% for current; short term flicker, with values lower than 0.34, and voltage level with no more than 10%; these parameters show the quality and reliability of the energy supplied by the photovoltaic system. It was determined that the economic investment for the acquisition of photovoltaic panels and its components is recoverable in 8-12 years.	
Corresponding Author:	Germán Pérez-Hernández Universidad Juárez Autónoma de Tabasco MEXICO	
Corresponding Author Secondary Information:		
Corresponding Author's Institution:	Universidad Juárez Autónoma de Tabasco	
Corresponding Author's Secondary Institution:		
First Author:	María Fernanda García-Mendoza	
First Author Secondary Information:		
Order of Authors:	María Fernanda García-Mendoza Rafael Torres-Ricádez Erik Ramírez-Morales Lizeth Rojas-Blanco Manuel Gonzalez-Solano Jessica de Dios-Suárez Germán Pérez-Hernández	
Order of Authors Secondary Information:		
Author Comments:		

1 **Study of the power quality supplied by a photovoltaic system of**
2 **5kW interconnected to the electrical service network**

3 M.F. García-Mendoza^a, R. Torres-Ricárdez^a, E. Ramírez-Morales^a, L. Rojas-
4 Blanco^a, M. Gonzalez-Solano^a, J. de Dios-Suárez^a, G. Pérez-Hernández^{a*}

5
6 ^aUniversidad Juárez Autónoma de Tabasco, Avenida Universidad S/N, Zona de
7 la Cultura, Col. Magisterial, Villahermosa, Centro, Tabasco 86040, México.

8 *Corresponding autor (G. Pérez-Hernández), e-mail: german.perez@ujat.mx

9
10 **ABSTRACT**

11 One of the main challenges in the generation of electrical energy from photovoltaic
12 systems is the idea of a high cost of acquisition, as well as the lack of environmental
13 culture and the assumption of a poor power quality supplied to the electrical service
14 network. To address this problem, a feasibility study was first proposed to implement a
15 photovoltaic system for the generation of electrical energy in a teaching building of our
16 university. After the installation, we characterized the photovoltaic system in order to
17 analyze the power quality generated by the system. The study of the power quality
18 provided to the electrical service network showed that the electrical parameters comply
19 with the Mexican and international official regulations. We obtained parameters such as
20 power factor, with values above 0.9; total harmonic distortion, with values lower than
21 1.6% for voltage, and 20% for current; short term flicker, with values lower than 0.34, and
22 voltage level with no more than 10%; these parameters show the quality and reliability of

23 the energy supplied by the photovoltaic system. It was determined that the economic
24 investment for the acquisition of photovoltaic panels and its components is recoverable in
25 8-12 years.

26 **Keywords:** Photovoltaic systems, Renewable energy, Consumption Energy, Power
27 Quality, Power Factor, Conventional Electric Grid.

28 1. INTRODUCTION

29 Nowadays, photovoltaic systems represent one of the cleanest and simplest ways to
30 produce electricity; it does not produce pollutants for the environment since it does not
31 consume any fossil fuel [1, 2]. The interest of some countries towards this technology is
32 due to several factors, such as the costs that have declined significantly in recent years;
33 0.44 and 0.77 USD/W in Europe and Asia, respectively. In the last 10 years, the
34 photovoltaic market showed an increase of 1000% of the accumulated solar capacity
35 worldwide. This strengthened global demand and competition decreasing costs of this type
36 of technology [3, 4].

37 One of the main advantages of photovoltaic panels are their durability, up to 25 years [3,
38 5], their reliability in operation, sporadic and low cost of maintenance [6, 7] and the fact
39 that they do not produce noise. In addition, panels can be designed for a wide range of
40 powers, can be autonomous systems or interconnected to the electrical service network [5,
41 8].

42 The design of a photovoltaic system (PVS) is based on a better conversion of solar energy
43 to electric power, considering the power required by the user, the environmental
44 conditions and the solar radiation fluctuations [9]. Nevertheless, the generated energy that

45 is supplied to the electrical service network presents some drawbacks due to the inverter
46 used for the conversion of direct current (DC) obtained in panels to an alternating current
47 (AC), which modifies the voltage, actual current and generates distortion in the waveform
48 [10, 11]. Therefore, it is important to evaluate the electrical parameters to determine the
49 power quality delivered to the electrical grid [11].

50 In the present work, a photovoltaic array design and a load analysis of the building fed by
51 the PVS was proposed. All this work is intended to know the economic feasibility and
52 recovery time of the investment.

53 **2. EXPERIMENTAL**

54 **2.1. Load analysis of the building and installation of the photovoltaic system.**

55 The building is located in the Academic Division of Engineering and Architecture of the
56 Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, in the municipality of Cunduacán, Tabasco.
57 The measurement period covered 40 days, from August 1 to September 10, 2016. The
58 location coordinates of the photovoltaic system are $18^{\circ} 4'24.27''$ N latitude and 93°
59 $9'52.72''$ W longitude. The charge analysis was performed with a three-phase meter in
60 order to know the effective power of the building. The measurements were divided in two
61 stages of 20 days each one. In the first stage the building effective power without the
62 energy supplied by the PVS was analyzed and in the second stage the energy supplied by
63 the PVS was taken into account.

64 The PVS consists of 18 SolarWorld panels of 265 watts (open circuit voltage of $V_{oc} = 39$
65 V and short circuit current of $I_{sc} = 9.31$ A at standard measurement conditions, STC) with
66 an installed peak power of 4770 Watts and the current inverter Fronius IG plus V5.01 with

67 an output power capacity of 5000 Watts, input voltage range of 230-500 V and a maximum
68 current input of 23.4 A. The panels present a configuration of two branches, nine panels
69 per each one with a separation of two centimeters between them. This allowed the panels
70 to be free of excessive air force on them and to avoid the dilation phenomenon.

71 The serial connection of the panels was done with its own wire, while the parallel
72 connection was installed with the plugs of the inverter. Before connecting the conductors
73 to the inverter a connection box was installed, which contains a protection against
74 overcurrent and overvoltage. After that, the earth ground was connected. Grounding
75 resistance was measured with the HIOKI 3150 instrument using the three pole method.
76 The measured value was of 2.8 Ohms; this indicates that an additional electrode is not
77 required in accordance to the Official Mexican Standard (NOM-001- SEDE-2012).

78 **2.2. Economic feasibility study.**

79 The economic feasibility of the PVS at the university facilities was studied comparing the
80 total cost of the system with the possible energy payment to the electricity company
81 (Comisión Federal de Electricidad, CFE). It was considered the energy consumption of
82 all the equipment in the building during a 25 year period, this represents the average
83 lifetime of the PVS with an efficiency up to 82.5 %. The H-M tariff was used, which is
84 applied to medium voltage services equal or greater than 100 kW. The projection of the
85 total amount of energy consumed considered the increase of the CFE pricing during the 8
86 previous years which was calculated from 2008 to 2016.

87 **2.3. Characterization of the conventional PVS-network.**

88 The characterization of the union PVS-conventional energy network was evaluated using
89 a three-phase FLUKE 435-II analyzer of the quality of electrical energy. This allows to
90 evaluate the inverter function in the PVS; the effectiveness mitigating disturbances during
91 the generation of alternating current as well as the supply and consumption of energy. We
92 determined electrical parameters such as power, voltage, total harmonic distortion, power
93 factor, harmonics, flicker, among others using the LabView software of the three-phase
94 analyzer. The measurement period covers 14 days, from April 25 to May 8 of 2017, with
95 10-minute intervals. Finally, the power quality injected into the network with respect to
96 the obtained power [10] was evaluated under operating conditions in the two lines of the
97 system.

98 **3. RESULTS**

99 **3.1. Measurement of power consumption of the building and installation of the** 100 **system.**

101 The power consumption in the building during the measurement period is shown in figure
102 1. It can be seen that the average consumption was 12 kW during the day at scheduled
103 active work (8:00 a.m. to 8:00 p.m.) and 4 kW at night (8:00 pm to 8:00 am). The
104 maximum peak on day 11 when the PVS is not connected can be attributed to the use of
105 air conditioning equipment for extended periods. It is expected to observed a decrease in
106 the energy consumption of the building when the PVS is connected due to the supply of
107 electrical energy coming from the PVS. A higher energy consumption with the PVS
108 connected to the building supply is explained by the low generation of electrical energy
109 because of the decrease in irradiation during different intervals of the day.

110 3.2. PVS feasibility analysis.

111 The information provided by the Federal Electricity Commission (CFE) is used in the
112 elaboration of the 25-year feasibility projection. It was considered the annual cost as well
113 as the average tariff increments, the 20.54% increase in the 2009/2010, the 45.99%
114 increase during the period of 2016/2017, and the average 7.21% increase from 2009 to the
115 first quarter of 2017. The PVS produces on average 20 kWh / day providing 7300 kWh /
116 year. Taking into account the average rate of 0.045 USD \$/kWh of 2016, the cost of energy
117 consumption in 2017 was \$ 478.56 USD (price of the base year).

118 Using the relation $Costo_{anual_n} = P(1 + i)^n$ [10], where n is the year in which the cost is
119 required; P, is the price of the base year; i, is the average annual increase from 2009 to
120 2017, we can determine the cost of energy consumption in a projection of 25 years.

121 It can be showed from figure 2 that the total cost of energy paid to CFE in a 25-year
122 projection is about \$33453.52 USD. Meanwhile, the installation cost of the PVS is \$9538
123 USD and the investment is recovered in about 12 years. It is worth mentioning that the
124 estimated recovery time may be shorter as a consequence of the implementation of public
125 policies aimed at reducing or eliminating the subsidy for electricity consumption.

126 3.3. Power quality analysis of the PVS.

127 Figure 3 A) shows the power reached during the 14 days. The average value of maximum
128 power is 4439 W, 93% of the total nominal value indicated by the manufacturer. It
129 represents no large losses in energy production of the PVS. The small energy losses are

130 caused by location-specific environmental factors [12] such as the operating temperature
131 of photovoltaic modules which were very close to 50 °C [16].

132 The power factor keeps a maximum average value of 0.96 during the week. As shown in
133 Figure 3 B), it can be assumed that the PVS does not affect the power quality of the electric
134 company. It presents a decrease on the values of power factor during different periods of
135 the day. The first one, when the inverter requires energy to accomplish stabilization in
136 operation, the second when the PVS does not capture enough solar radiation at the end of
137 the day [10]. The power factor is related to the current and consumed energy by the
138 system.

139 The results of the analysis with respect to the harmonic spectrum are comparable with the
140 values established by the international norms in Mexico [14, 15]. Figure 4 A) and 4 B)
141 represent data obtained from the first to 50 harmonics. The data shows minimum ranges,
142 which do not affect the transmission lines in sunny day operating conditions for both even
143 and odd harmonics. This is observed especially in harmonics from 40 to 50 which do not
144 represent disturbances that can affect the operation of equipment [16]. Usually the fifth
145 and seventh harmonics show the greatest effects in electrical installations because they
146 cause unwanted phenomena such as the pulsation which causes mechanical vibrations and
147 therefore acoustic noise [17]. However, the values obtained are at very low levels
148 according to the country regulations.

149 An analysis of the harmonic distortion for both voltage and current in each of the lines of
150 the system was carried out. The harmonic distortion describes the percentage of deviation
151 of these harmonics. The components of odd harmonics are which produce a major
152 distortion. Figure 5 shows the relation between the harmonic distortion of current and

153 voltage for each line and the generated power. The harmonic distortion is higher at the
154 hours of less power generated by the inverter, but meets the international and Mexican
155 standards [18–20]. In Mexican regulations, the harmonic voltage distortion values are
156 below 6.5%, and data shows the highest value for this parameter was 1.6% for both lines
157 of the system. Regarding the harmonic distortion of the current it should not be greater
158 than the range of 5 to 20%. The results show values above this interval in the first hours
159 in the morning because of low irradiance or low power output [10] .

160 The voltage variation of the electric power system in response to the variation of the load
161 (flicker) measured in a 10 minutes interval is shown in Figure 6 A). The maximum value
162 obtained is 0.34 at certain times of the day; the limit is 0.35. However, this is observed
163 while the system is not in operation, so this parameter is considered to follow the national
164 and international norm [14, 21].

165 The unbalance in the level of tension appears when voltages do not have a proportional
166 relation to each other. The unbalances greater than 5% are due to the fact that the loads in
167 the phases are not always equal, which causes the system to try to compensate it. A voltage
168 variation range of $\pm 10\%$ of the nominal value is allowed [14, 21]. The stress level analysis
169 presented in Figure 6 B) shows that the percentage of variation does not exceed the
170 permissible limits. At the end of the measurement and when the Analyzer is disconnected
171 from the inverter a voltage drop is observed.

172 **CONCLUSIONS**

173 The results obtained from the estimated projection of the total cost of energy consumed
174 by the university building and the energy produced by the PVS permitted to determine the

175 recovery time of investment in approximately 12 years, i.e. less than 50% the timelife of
176 photovoltaic modules.

177 The main electrical parameters of power quality meet the values of the Mexican and
178 international norms during the periods of greatest power generation. This indicates that
179 the inverter is reliable and complies with the mitigation of disturbances of the photovoltaic
180 system for energy conversion no matter what technology is used. The inverter is able to
181 correct disturbances of the direct current in which the harmonics are even as well as the
182 odd harmonics of the alternating current, improving the power factor and the voltage
183 disturbances. This is possible because the inverter has a load transformer, whose property
184 is to isolate the loads from the source, and allows a certain load which avoid the injection
185 of disturbances to the distribution network.

186 The disturbances are a consequence of the low levels of irradiation, which can be
187 controlled or mitigated through the inverter. The recommendation is to focus efforts in the
188 improvement of the inverter in order to mitigate disturbances in the periods of low power,
189 and hence to diminish disturbances to the electrical network generated by photovoltaic
190 systems of greater installed capacity.

191 **ACKNOWLEDGEMENT**

192 This work was partially supported by the project UJAT-2016-PFI-DAIA-02.

193 **REFERENCES**

- 194 1. Kaartemo V (2016) Creation and Shaping of the Global Solar Photovoltaic (PV)
195 Market. In: Climate Change and the 2030 Corporate Agenda for Sustainable
196 Development. pp 227–247
- 197 2. Jana J, Saha H, Das Bhattacharya K (2016) A review of inverter topologies for
198 single-phase grid-connected photovoltaic systems. Renew Sustain Energy Rev 0–1

- 199 . doi: 10.1016/j.rser.2016.10.049
- 200 3. Nacer T, Hamidat A, Nadjemi O, Bey M (2016) Feasibility study of grid connected
201 photovoltaic system in family farms for electricity generation in rural areas. *Renew*
202 *Energy* 96:305–318 . doi: 10.1016/j.renene.2016.04.093
- 203 4. Sawin JL, Seyboth K, Sverrisson F (2016) *Renewables 2016: Global Status Report*
- 204 5. Haque A (2016) 3 - Solar energy. Elsevier Inc.
- 205 6. Allouhi A, Saadani R, Kousksou T, et al (2016) Grid-connected PV systems
206 installed on institutional buildings: Technology comparison, energy analysis and
207 economic performance. *Energy Build* 130:188–201 . doi:
208 10.1016/j.enbuild.2016.08.054
- 209 7. Obi M, Bass R (2016) Trends and challenges of grid-connected photovoltaic
210 systems – A review. *Renew Sustain Energy Rev* 58:1082–1094 . doi:
211 10.1016/j.rser.2015.12.289
- 212 8. Chowdhury SA, Mourshed M (2016) Off-grid electrification with solar home
213 systems: An appraisal of the quality of components. *Renew Energy* 97:585–598 .
214 doi: 10.1016/j.renene.2016.06.017
- 215 9. Guney MS (2016) Solar power and application methods. *Renew Sustain Energy*
216 *Rev* 57:776–785 . doi: 10.1016/j.rser.2015.12.055
- 217 10. Elkholy A, Fahmy FH, El-ela AAA, et al (2016) Experimental evaluation of 8 kW
218 grid-connected photovoltaic system in Egypt. 1–13
- 219 11. Tran QT, Truong AV, Le PM (2016) Reduction of harmonics in grid-connected
220 inverters using variable switching frequency. *Int J Electr Power Energy Syst*
221 82:242–251 . doi: 10.1016/j.ijepes.2016.03.027
- 222 12. Tina GM (2016) Simulation Model of PV and PV/T module/String under non-
223 uniform Distribution of Irradiance and Temperature. *J Sol Energy Eng* 139:1–12 .
224 doi: 10.1115/1.4035152
- 225 13. Muralidharan R (2016) Parameter extraction of solar photovoltaic cells and
226 modules using current – voltage characteristics. 0750: . doi:
227 10.1080/01430750.2016.1144525
- 228 14. SECRETARÍA DE ENERGÍA (SENER) (2012) DIARIO OFICIAL DE LA

- 229 FEDERACIÓN (PRIMERA SECCIÓN, RESOLUCIÓN 119). México
- 230 15. International Electrotechnical Commission (2018) IEC 61000-3-2-2018
- 231 16. Rampinelli GA, Gasparin FP, Bühler AJ, Krenzinger A (2015) Assessment and
- 232 mathematical modeling of energy quality parameters of grid connected
- 233 photovoltaic inverters. 52:133–141 . doi: 10.1016/j.rser.2015.07.087
- 234 17. Zhang G, Liu X, Mei L, et al (2017) Filter design at the output of the inverter in
- 235 PMSM drives. COMPEL - Int J Comput Math Electr Electron Eng 36:364–377 .
- 236 doi: 10.1108/COMPEL-04-2016-0169
- 237 18. COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD (CFE) (2005) DESVIACIONES
- 238 PERMISIBLES EN LAS FORMAS DE ONDA DE TENSIÓN Y CORRIENTE
- 239 EN EL SUMINISTRO Y CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA
- 240 (ESPECIFICACIÓN CFE L0000-45). México
- 241 19. International Electrotechnical Commission (IEC) (2008) IEC 61000-3-6-2008
- 242 20. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (2014) IEEE-519-2014
- 243 21. International Electrotechnical Commission (2018) IEC 61000-3-3-2018

Estudio de los parámetros eléctricos en la unión sistema fotovoltaico-red convencional de energía

INFORME DE ORIGINALIDAD

5%

ÍNDICE DE SIMILITUD

FUENTES PRIMARIAS

1	pure.udem.edu.mx Internet	114 palabras — 1%
2	faolex.fao.org Internet	84 palabras — 1%
3	ri.ujat.mx Internet	73 palabras — < 1%
4	adnsolar.eu Internet	59 palabras — < 1%
5	Yuanlong Cui, Shuangqing Tian, Jie Zhu, Stamatis Zoras, Yiming Shao. "Energy and Stochastic Economic Assessments of Photovoltaic Systems in the East Midlands", Energies, 2023 Crossref	34 palabras — < 1%
6	www.scribd.com Internet	32 palabras — < 1%
7	Charafeddine Mokhtara, Belkhir Negrou, Nouredine Settou, Abdessalem Bouferrouk, Yufeng Yao. "Optimal design of grid-connected rooftop PV systems: An overview and a new approach with application to educational buildings in arid climates", Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021	30 palabras — < 1%

-
- | | | |
|-------|--|---------------------|
| 8 | es.slideshare.net
<small>Internet</small> | 29 palabras — < 1 % |
| <hr/> | | |
| 9 | link.springer.com
<small>Internet</small> | 28 palabras — < 1 % |
| <hr/> | | |
| 10 | eprints.uanl.mx
<small>Internet</small> | 26 palabras — < 1 % |
| <hr/> | | |
| 11 | eps.fiu.edu
<small>Internet</small> | 25 palabras — < 1 % |
| <hr/> | | |
| 12 | Zibo Yao, Jiangjiang Wang, Ning Zhao, Haowen Jiang. "Thermodynamic performances of a power-to-X system based on solar concentrating photovoltaic/thermal hydrogen production", Energy Conversion and Management, 2024
<small>Crossref</small> | 24 palabras — < 1 % |
| <hr/> | | |
| 13 | Ersan Kabalcı. "Introduction to multilevel voltage source inverters", Elsevier BV, 2021
<small>Crossref</small> | 22 palabras — < 1 % |
| <hr/> | | |
| 14 | amyd.quimica.unam.mx
<small>Internet</small> | 21 palabras — < 1 % |
| <hr/> | | |
| 15 | www.mdpi.com
<small>Internet</small> | 19 palabras — < 1 % |
| <hr/> | | |
| 16 | de.scribd.com
<small>Internet</small> | 18 palabras — < 1 % |
| <hr/> | | |
| 17 | hdl.handle.net
<small>Internet</small> | 18 palabras — < 1 % |
-

18

Internet

18 palabras — < 1%

19

www.kin.energy
Internet

18 palabras — < 1%

20

Agustín Granja, Teófilo de Souza, Pedro Sobrinho, Daniel Santos. "Study of Power Quality at the Point of Common Coupling of a Low Voltage Grid and a Distributed Generation System of 7.8 kWp in a Tropical Region", Energies, 2018
Crossref

17 palabras — < 1%