

Análisis armónico de un sistema fotovoltaico operando bajo la modalidad tipo isla

Ángel Marroquín, Juan Olivares, Elizabeth Ortiz, Diana Martínez, Brenda Ugalde y Gabriela Cervantes

Á. Marroquín, J. Olivares, E. Ortiz, D. Martínez, B. Ugalde y G. Cervantes
Universidad Tecnológica de San Juan del Río, Qro. División de Química Industrial y Energías Renovables, Cuerpo Académico de Mantenimiento Industrial, Av. La Palma no. 125, Col. Vista Hermosa, San Juan del Río, Qro. C.P. 76800
Tel. 01 427 129 2000 ext. 231.
amarroquind@utsjr.edu.mx.

M. Ramos.,V.Aguilera.,(eds.). Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Handbook -©ECORFAN- Valle de Santiago, Guanajuato, 2014.

11 Introducción

Desde los inicios de la existencia del hombre, su desarrollo ha estado determinado en gran medida por la utilización de las diferentes formas de energía según las necesidades y disponibilidades de cada momento y lugar. En un inicio las energías renovables eran utilizadas en forma de biomasa, viento, agua y sol, por lo que deben ser consideradas como la base energética del desarrollo humano. Sin embargo, con la aparición de los recursos energéticos fósiles el uso de la energía se convirtió en algo muy fácil, más eficiente y barato. Esto ha ocasionado un consumo indiscriminado de este tipo de energía hasta límites insostenibles que han ocasionado que todos los en vías de desarrollo y países desarrollados, realicen continuos esfuerzos en un intento de mejorar la eficiencia de la utilización de la energía y, en definitiva, reducir el consumo de recursos fósiles. Dentro de las energías renovables, la energía solar fotovoltaica es hoy en día y sin lugar a dudas, una forma limpia y fiable de producción de energía eléctrica a pequeña escala.

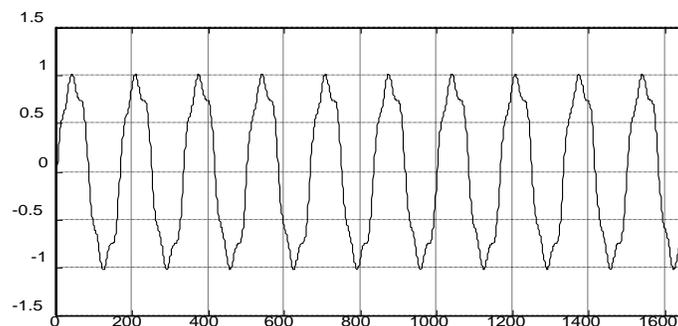
Se define como la tecnología utilizada para el aprovechamiento eléctrico de la energía solar que se deriva de las células fotovoltaicas. Mediante las células, la radiación se transforma directamente en electricidad aprovechando las propiedades de los materiales semiconductores. Normalmente se pueden distinguir tres elementos fundamentales en la estructura física de un sistema fotovoltaico:

- El campo fotovoltaico
- Sistema de acondicionamiento de la potencia
- Sistema de adquisición de datos.

11.1 Calidad de la energía

La calidad de la energía se entiende cuando la energía eléctrica es suministrada a los equipos y dispositivos con las características y condiciones adecuadas que les permita mantener su continuidad sin que se afecte su desempeño ni provoque fallas a sus componentes. Una de las perturbaciones que se presentan en estado estable corresponden a las armónicas, que son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental así la armónica 1 corresponde a 60 Hz, la 2 a 120 Hz, la 3 a 180 Hz y así sucesivamente. Esta distorsión (periódica) de la forma de onda senoidal del voltaje o corriente, es causada por la operación de equipos no lineales tales como rectificadores, equipos que utilizan dispositivos de electrónica de potencia en su operación, lámparas fluorescentes, equipo de cómputo, hornos de arco eléctrico, entre otros. Este es un fenómeno en estado estable.

Figura 11 Distorsión armónica



La tendencia en México, impulsada por la Comisión Federal de Electricidad, es de implantar el estándar IEEE-519 titulado “Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems”, la tabla 2.1 muestra los límites de distorsión en voltaje.

Tabla 11 Límites de distorsión de voltaje

Voltaje bus	del	Distorsión individual de voltaje (IHD)	Distorsión armónica total (THD)
<69 kV		3.0	5.0
69kV	<V _{bus} <	1.5	2.5
161 kV			
>161 kV		1.0	1.5

La cantidad de distorsión que presenta una forma de onda de tensión o corriente se cuantifica mediante un índice llamado distorsión armónica total (THD), definido para tensiones y corrientes por las ecuaciones 1 y 2, donde V₁ y I₁ son las componentes fundamentales de tensión y corriente respectivamente, y V_h y I_h los armónicos h. Todos en términos eficaces.

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (11)$$

11.2 Desarrollo

La Universidad Tecnológica de San Juan del Río, ofrece la carrera de Ingeniería en Energía Renovable, parte del equipamiento con el que se cuenta para la realización de prácticas consta de un sistema fotovoltaico conformado por tres paneles, un controlador de carga, baterías y un inversor, la fig. 3.1 muestra el sistema antes descrito.

Figura 11.1 Sistema fotovoltaico

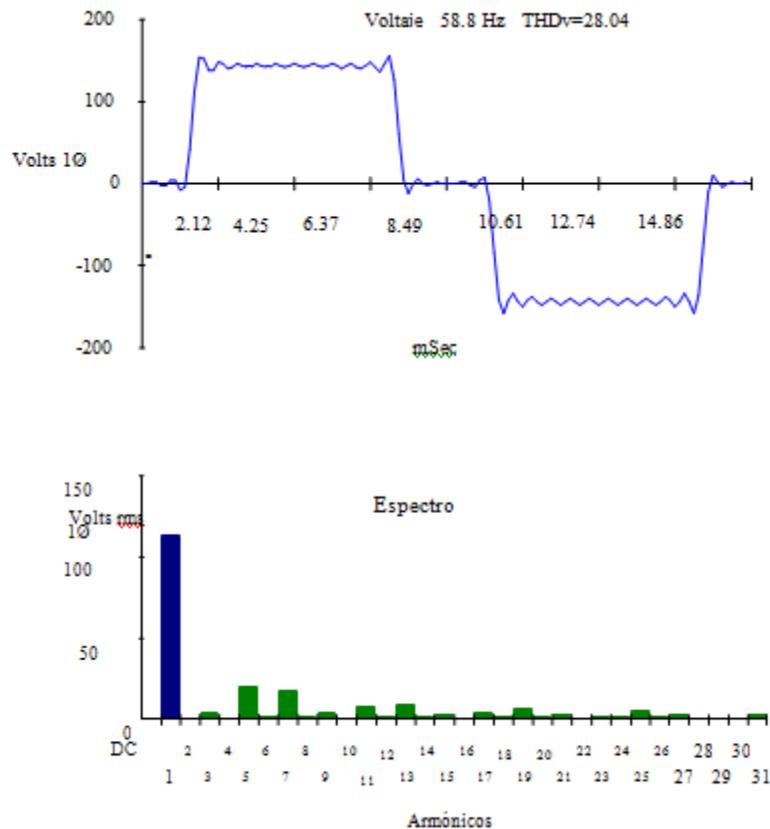


En el segundo cuatrimestre los alumnos cursaron la materia de instalaciones eléctricas, como parte de una práctica se construyó en un tablero la instalación eléctrica representando la que se puede tener en una casa habitación. La fig. 3.2 muestra los detalles de la instalación eléctrica construida de conformidad con la norma NOM 001-SEDE 2012.

Figura 11.2 Instalación eléctrica construida

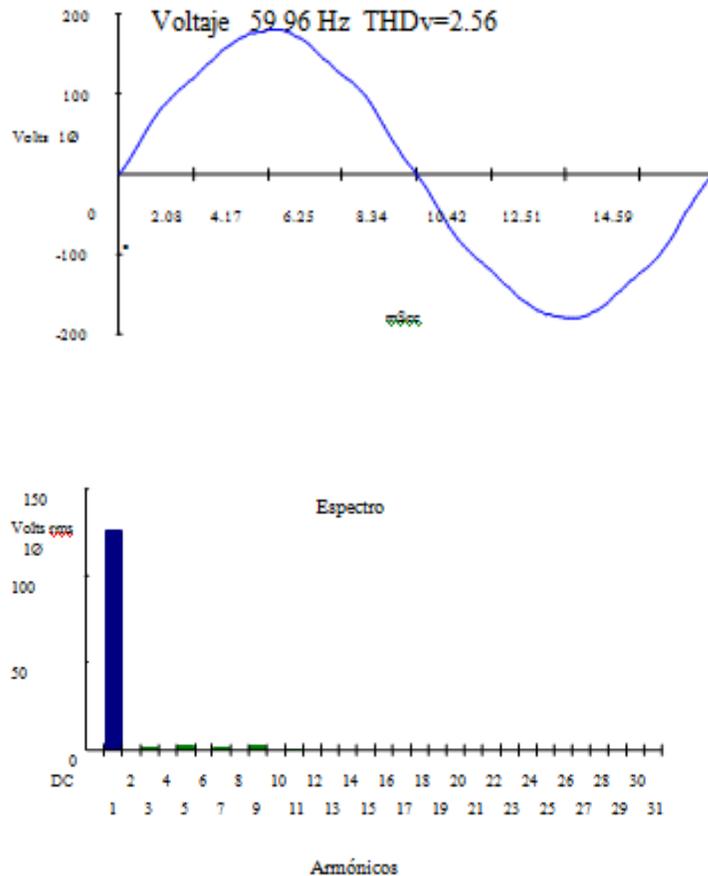
Experimentación

Utilizando un medidor de armónicos Fluke® 41B, se midieron los parámetros eléctricos en terminales del inversor, la fig. 3.3 muestra los resultados, el voltaje generado por el sistema fotovoltaico, que más tarde se suministró a la instalación eléctrica mostrada en la Fig. 3.2 mediante un cable AWG Cal. 8, que pasa por la base del medidor y llega a un centro de carga QO2 marca Square D, donde se tienen instalados dos interruptores termomagnéticos de 15 Amp a 10 kA de capacidad interruptiva marca Square D, un interruptor controla el alumbrado y el otro los contactos existentes en la instalación.

Figura 11.3 Forma de onda de voltaje medida en terminales del inversor de onda modificada

La figura muestra la forma de onda y el espectro armónico medidas en un tomacorriente ubicado en el laboratorio de termodinámica de la Universidad Tecnológica de San Juan del Río, Qro., puede apreciarse que la forma de onda presenta una ligera deformación ocasionada por equipo de cómputo y lámparas de alumbrado, encontrándose magnitudes de los armónicos 3, 5, 7 y 9 respectivamente.

Figura 11.4 Forma de onda de voltaje medida en un tomacorriente



Para conocer el comportamiento de diversos equipos electrodomésticos operando con un voltaje generado por un sistema fotovoltaico, se conectaron en los tomacorrientes de la instalación eléctrica diversos equipos entre ellos: ventilador, licuadora, tenazas para el cabello, televisor, reproductor de DVD, grabadora, batidora, incubadora de pollos, focos ahorradores, taladro, cargador de celular, plancha, sandwichera, entre otros.

Los equipos se conectaban y se dejaban operando durante cinco minutos en cada condición de alimentación de voltaje.

Tabla 11.1 Parámetros eléctricos de la batidora alimentada por el sistema fotovoltaico y por la red de CFE

SISTEMA FOTOVOLTAICO				
			Volt aje	Corriente
Frecuencia	58.89	RMS	118.2	0.45
Potencia		Pico	156.5	0.58
Watts	53.19	DC Offset	0.69	-0.02
VA	52	Crest	1.32	1.29
Vars	3	THD Rms	27.05	21
W pico	91	THD Fund	28.1	21.47
Fase	4° lead	HRMS	31.92	0.09
F.P. Total	0.97	KFactor		3.33
DPF	1			
RED DE C.F.E				
			Volt aje	Corriente
Frecuencia	59.96	RMS	127.55	0.47
Potencia		Pico	180.1	0.67
Watts	59	DC Offset	-0.15	-0.03
VA	60	Crest	1.41	1.42
Vars	0	THD Rms	2.23	7.55
W pico	128	THD Fund	2.23	7.57
Fase	1° lead	HRMS	2.85	0.04
F.P. Total	1	KFactor		1.63
DPF	1			

Se observa una disminución en la frecuencia a 58.89 Hz, para cuando el electrodoméstico es alimentado por el voltaje proveniente del sistema fotovoltaico, el dispositivo no desarrolla toda su potencia llegando tan solo a 53.19 W, el THD es del 27.05%, presenta una disminución de su velocidad y por consiguiente el dispositivo entrega poca potencia, comparada cuando es alimentada por la red de CFE, la potencia es de 59 W, se tiene una forma de onda con un THDv del 2.23%.

El equipo desarrolla toda su potencia. El voltaje suministrado por el sistema fotovoltaico es de 118.2 V se encuentra dentro del rango permisible del $\pm 10\%$.

Tabla 11.2 Parámetros eléctricos de la licuadora alimentada por el sistema fotovoltaico y por la red de CFE

SISTEMA FOTOVOLTAICO				
			Volt aje	Corriente
Frecuencia	58.89	RMS	107.26	1.41
Potencia		Pico	134.35	2.63
Watts	107	DC Offset	- 0.52	-0.07
VA	151	Crest	1.25	1.87
Vars	78	THD Rms	25.1 1	42.36
W pico	357	THD Fund	25.9 4	46.76
Fase	37° lag	HRMS	26.7 4	0.59
F.P. Total	0.71	KFactor		3.62
DPF	0.8			
RED DE C.F.E				
			Volt aje	Corriente
Frecuencia	59.96	RMS	123.88	1.76
Potencia		Pico	177.03	3.02
Watts	0.2	DC Offset	- 0.18	-0.03
VA	0.22	Crest	1.43	1.71
Vars	0.07	THD Rms	3.09 3.09	23.64
W pico	0.53	THD Fund	3.09 3.09	24.33
Fase	18° lag	HRMS	3.83	0.42
F.P. Total	0.93	KFactor		1.74
DPF	0.95			

Se observa una disminución en la frecuencia para cuando el electrodoméstico es alimentado por el voltaje proveniente del sistema fotovoltaico, el dispositivo no desarrolla toda su potencia llegando tan solo a 107 W, el THD es del 25.11%, presenta una disminución de su velocidad y por consiguiente el dispositivo entrega poca potencia, el voltaje suministrado por el sistema fotovoltaico es de 107.26 V se encuentra fuera del rango permisible del $\pm 10\%$ de variación del voltaje.

Cuando es alimentada por la red de CFE, la potencia es de 200 W, se tiene una forma de onda con un THD_v del 3.09%, el equipo desarrolla toda su potencia.

Tabla 11.3 Parámetros eléctricos del taladro alimentado por el sistema fotovoltaico y por la red de CFE

SISTEMA FOTOVOLTAICO				
			Volt aje	Corriente
Frecuencia	58.89	RMS	115.62	1.66
Potencia		Pico	148.29	2.22
Watts	181.31	DC Offset	0.72	-0.02
VA	191.41	Crest	1.28	1.34
Vars	40.07	THD Rms	26.15	12.02
W pico	308.17	THD Fund	27.09	12.1
Fase	13° lag	HRMS	30.2	0.2
F.P. Total	0.95	KFactor		1.89
DPF	0.98			
RED DE C.F.E				
			Volt aje	Corriente
Frecuencia	59.96	RMS	123.75	2
Potencia		Pico	176.86	3.26
Watts	0.24	DC Offset	-0.18	-0.03
VA	0.25	Crest	1.43	1.63
Vars	0.01	THD Rms	3.13	13.74
W pico	0.58	THD Fund	3.13	13.88
Fase	3° lag	HRMS	3.87	0.27
F.P. Total	0.99	KFactor		1.25
DPF	1			

Se observa una disminución en la frecuencia 58.89 Hz, para cuando el taladro es alimentado por el voltaje proveniente del sistema fotovoltaico, el dispositivo no desarrolla toda su potencia llegando tan solo a 181.31 W, el THD es del 26.15%, presenta una disminución de su velocidad y por consiguiente el dispositivo entrega poca potencia, el voltaje suministrado por el sistema fotovoltaico es de 115.62 V, se encuentra dentro del rango permisible del $\pm 10\%$ de variación del voltaje .

El consumo en corriente disminuye a 1.66 A. Cuando es alimentada por la red de CFE, la potencia es de 240 W, se tiene una forma de onda con un THDv del 3.09%, el equipo desarrolla toda su potencia, la corriente consumida por el equipo es de 2 A.

Tabla 11.4 Parámetros eléctricos de una grabadora alimentada por el sistema fotovoltaico y por la red de CFE

SISTEMA FOTOVOLTAICO				
			Volt aje	Corriente
Frecuencia	58.89	RMS	118.52	0.12
Potencia		Pico	156.4	0.18
Watts	12.31	DC Offset	- 0.91	-0.01
VA	14.41	Crest	1.32	1.45
Vars	1.07	THD	27	53.11
		Rms		
W pico	28.17	THD	28.0	62.68
		Fund	4	
Fase	8° lag	HRMS	31.95	0.06
F.P. Total	0.82	KFactor		**OL**
DPF	0.99			
RED DE C.F.E				
			Volt aje	Corriente
Frecuencia	59.96	RMS	125.78	0.12
Potencia		Pico	179.61	0.17
Watts	11	DC Offset	0.06	0.02
VA	14	Crest	1.43	1.41
Vars	1	THD	2.56	52.57
		Rms		
W pico	31	THD	2.56	61.8
		Fund		
Fase	6° lead	HRMS	3.22	0.06
F.P. Total	0.81	KFactor		8.87
DPF	0.99			

Se observa una disminución en la frecuencia a 58.89 Hz, para cuando la grabadora es alimentada por el voltaje proveniente del sistema fotovoltaico, el dispositivo desarrolla toda su potencia llegando a 12.311 W, el THD es del 27%, el voltaje suministrado por el sistema fotovoltaico es de 118.62 V, se encuentra dentro del rango permisible del $\pm 10\%$ de variación del voltaje.

El consumo en corriente es de 0.12 A. Cuando es alimentada por la red de CFE, la potencia es de 11 W, se tiene una forma de onda con un THDv del 2.56%, el equipo desarrolla toda su potencia, la corriente consumida por el equipo es de 0.12 A.

Tabla 11.5 Parámetros eléctricos de un televisor alimentado por el sistema fotovoltaico y por la red de CFE

SISTEMA FOTOVOLTAICO				
			Volt aje	Corriente
Frecuencia	58.89	RMS	118.02	0.63
Potencia		Pico	156.74	2.72
Watts	53	DC Offset	-	-0.03
VA	74	Crest	1.33	4.29
Vars	24	THD Rms	27.2	69.67
W pico	412	THD Fund	28.3	97.12
Fase	28° lead	HRMS	32.1	0.44
F.P. Total	0.71	KFactor		**OL**
DPF	0.88			
RED DE C.F.E				
			Volt aje	Corriente
Frecuencia	59.96	RMS	127.47	0.66
Potencia		Pico	180.25	2.17
Watts	45	DC Offset	-	-0.03
VA	84	Crest	1.41	3.28
Vars	15	THD Rms	2.33	81.95
W pico	386	THD Fund	2.33	142.99
Fase	19° lead	HRMS	2.97	0.54
F.P. Total	0.54	KFactor		28.34
DPF	0.95			

Se observa una disminución en la frecuencia 58.89 Hz, para cuando el televisor es alimentado por el voltaje proveniente del sistema fotovoltaico, el dispositivo desarrolla toda su potencia llegando a 53 W, el THD es del 27.25%, el voltaje suministrado por el sistema fotovoltaico es de 118.02 V.

Se encuentra dentro del rango permisible del $\pm 10\%$ de variación del voltaje, el consumo en corriente es de 0.63 A. Cuando es alimentada por la red de CFE, la potencia es de 45 W, se tiene una forma de onda con un THDv del 2.56%, el equipo desarrolla toda su potencia, la corriente consumida por el equipo es de 0.66 A.

Tabla 11.6 Parámetros eléctricos de un foco ahorrador alimentado por el sistema fotovoltaico y por la red de CFE

SISTEMA FOTOVOLTAICO				
			Volt aje	Corriente
Frecuencia	59.04	RMS	118.19	0.57
Potencia		Peak	157.77	2.72
Watts	30.31	DC Offset	1.08	-0.02
VA	67.41	Crest	1.33	4.76
Vars	9.07	THD Rms	27.2 4	88.26
W pico	339.17	THD Fund	28.3 1	187.72
Fase	20° lead	HRMS	32.1 6	0.47
F.P. Total	0.45	KFactor		**OL**
DPF	0.94			
RED DE C.F.E				
			Volt aje	Corriente
Frecuencia	59.96	RMS	124.19	0.32
Potencia		Peak	178.13	0.84
Watts	20.14	DC Offset	- 0.08	0
VA	39.42	Crest	1.43	2.64
Vars	18.39	THD Rms	3.19	68.66
W pico	123.61	THD Fund	3.2	94.43
Fase	41° lead	HRMS	3.97	0.22
F.P. Total	0.53	KFactor		20.08
DPF	0.76			

Se observa una disminución en la frecuencia 59.04 Hz, para cuando el foco ahorrador es alimentado por el voltaje proveniente del sistema fotovoltaico, la potencia desarrollada por el dispositivo es de 30.31W, el THD es del 27.24%, el voltaje suministrado por el sistema fotovoltaico es de 118.19 V, se encuentra dentro del rango permisible del $\pm 10\%$ de variación del voltaje, el consumo en corriente es de 0.57 A. Cuando el foco es alimentado por la red de CFE, la potencia es de 20.19 W, se tiene una forma de onda con un THDv de 3.19%, el equipo desarrolla toda su potencia, la corriente consumida por el equipo es de 0.32 A. Esto es debido a que el foco ahorrador tiene balastro electrónico.

11.3 Efectos y consecuencias de los armónicos

Cualquier señal que circule por la instalación eléctrica, ya sea de corriente o de tensión, y cuya forma de onda no sea senoidal, puede provocar daños en ella o en los equipos conectados a la misma, entre ellos destacan: Calentamiento de conductores, disparo de protecciones sin causa aparente, resonancia, vibraciones y acoplamientos, deterioro de la forma de onda de tensión (achataamiento), tensión entre neutro y tierra distinto de cero. Lo que trae como consecuencia el calentamiento de motores asíncronos, en cables y capacitores. De acuerdo con la especificación de la CFE G0100-04, relativa a Interconexión a la red eléctrica de baja tensión de sistemas fotovoltaicos con capacidad hasta 30 kW, los niveles de tensión deben de tener una tolerancia del $\pm 10\%$ de la tensión eficaz nominal en la regulación de tensión de sistemas de distribución de baja tensión para sistemas menores o iguales a 1000 V. En el apartado de regulación de la frecuencia el nivel de control establecido es de 59.2 Hz a 60.8 Hz. Los límites de distorsión armónica de tensión en el punto común de acoplamiento (PAC) son los mostrados en la tabla 3.7.

Tabla 11.7 Límites de distorsión armónica de tensión

Tensión en kV	Clasificación de tensión	Distorsión armónica total en %	Límite para armónicos individuales en %
V<1kV	Baja tensión	8.0%	6.0

11.4 Conclusiones

Se ha realizado el monitoreo de parámetros eléctricos en distintos electrodomésticos utilizando dos fuentes de voltaje: a) sistema fotovoltaico operando en la modalidad tipo isla y b) el suministrado por la red de la C.F.E., para los dispositivos que utilizan resistencias eléctricas en su funcionamiento no se observan problemas, por otro lado electrodomésticos tales como: licuadora, batidora, taladro, televisor, foco ahorrador, grabadora, presentan una disminución en la potencia, el inversor está entregando una frecuencia por debajo de lo permitido por la especificación CFE-G0100-04 en todos los casos, el inversor es de onda senoidal modificada, el valor de la distorsión armónica total en voltaje THDv que se midió en terminales en la mayoría fue de 27%, este valor rebasa lo establecido en la especificación antes mencionada, la variación de voltaje está relacionada con las condiciones de radiación solar incidente sobre los módulos fotovoltaicos, los equipos que utilizan motores al ser alimentados con un bajo voltaje, estos demandan más corriente lo que se traduce en un sobrecalentamiento lo cual incide directamente en un envejecimiento acelerado de su aislamiento sólido.

La solución al problema de los armónicos es eliminar los síntomas y no el origen, ya que los aparatos que crean los armónicos generalmente constituyen una pequeña parte de la carga y eliminar su uso no es posible, además de que modificar esos equipos para que no causen armónicos tampoco es factible. Lo que queda es reducir los síntomas incrementando la tolerancia del equipo y del sistema a los armónicos o modificar los circuitos y los sistemas para reducir su impacto, y atrapar o bloquear los armónicos con filtros. En casos de sobrecarga, daño de equipo o diseño inapropiado, estas causas que generan armónicos pueden ser corregidas, modificando o reemplazando dichos equipos.

11.5 Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Tecnológica de San Juan del Río, por el apoyo brindado para la presentación del presente trabajo, de igual manera al cuerpo académico de mantenimiento industrial y energía por las observaciones realizadas que contribuyeron al mejoramiento del mismo y a los estudiantes del grupo ER02SM-12 de la Carrera de Energías Renovables de la Universidad Tecnológica de San Juan del Río.

11.6 Referencias

Especificación CFE G0100-04 (2009). “Interconexión a la red eléctrica de baja tensión de sistemas fotovoltaicos con capacidad hasta de 30 kW” Sandoval, Rodrigo.

Iyo Horikoshi (2009). Análisis de las componentes armónicas de los inversores fotovoltaicos de conexión a red. Universidad Carlos III de Madrid, Escuela Politécnica Superior. Proyecto de Fin de Carrera.

Std IEEE 519 (1992). “Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems”

Especificación CFE L0000-45 (2005). “Perturbaciones permisibles en las formas de onda de tensión y corriente del suministro de energía eléctrica”

Ángel Marroquín de Jesús (2011). “Calidad de la energía en sistemas eléctricos industriales” Editorial Académica Española. ISBN: 978-3846560945.

Ángel Marroquín de Jesús (2013). “Notas del curso energía renovable” tercer cuatrimestre Universidad Tecnológica de San Juan del Río, Qro.

Manual del equipo Fluke 41 B (2000).