

# REDUCCIÓN DEL IMPACTO OCASIONADO POR LA DEGRADACIÓN DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA A NIVEL RESIDENCIAL

Luis Alonso Trujillo Guajardo

Paz Vicente Cantú Gutiérrez

Roberto Salinas Navarro

Mario Alberto González Vázquez

## RESUMEN

En el presente trabajo se realiza un estudio de calidad de energía en una instalación eléctrica residencial, donde se caracterizaron las cargas no lineales con respecto a su contenido armónico, así como el contenido armónico total de la instalación eléctrica con el fin de evaluar el impacto de las cargas no lineales en la vida útil de los transformadores de distribución, ya que actualmente se observa un incremento en la cantidad de dispositivos electrónicos utilizados en instalaciones eléctricas residenciales. Finalmente, en base al estudio realizado se propone un filtro como una solución para reducir el contenido armónico de la carga residencial, para así reducir la degradación de la vida útil de los transformadores de distribución.

**Palabras Clave:** armónicos, transformadores de distribución, calidad de energía.

## INTRODUCCIÓN

Hoy en día la energía eléctrica es una necesidad básica en todos los niveles, tanto industrial, comercial y doméstica, es difícil imaginar mantener el ritmo y estilo de vida actual sin la electricidad a nuestra disposición. Por esto, las compañías que se encargan del suministro de energía constantemente renuevan esfuerzos para mantener el suministro de energía a los consumidores cumpliendo con los criterios de seguridad y calidad establecidas. Estos criterios de seguridad y calidad son establecidos basándose en la observación de las perturbaciones electromagnéticas de las redes eléctricas. La calidad de la energía se define por IEEE Std. 1159 (1995) como “el concepto de aterrizar y alimentar equipo sensible de una manera adecuada para el buen funcionamiento del mismo”.

Conforme a la definición de la IEEE, las formas de onda de tensión y corriente tienen características que deben cumplir con los criterios previamente establecidos. Siendo estas características las siguientes:

- Amplitud.- Los niveles de tensión deben mantenerse constantes dentro de cierto rango establecido con respecto al nivel de tensión que se maneje en esa parte de la red eléctrica.
- Forma de onda.- Las ondas de tensión y corriente deben mantener una forma sinusoidal.  
Frecuencia.- La frecuencia que se utiliza en América son 60 Hz.
- Simetría del sistema trifásico. Se refiere a la relación que existe entre las formas de onda de tensión o corriente de las fases *a*, *b* y *c*. Las formas de onda entre fases deben ser iguales en magnitud y frecuencia y estar desfasadas  $120^\circ$  entre ellas manteniendo una secuencia a-b-c.

Teniendo en cuenta las características de las formas de onda de tensión y corriente existen diferentes fenómenos o perturbaciones que las pueden alterar, afectando así la calidad de la energía. En la Fig. 1.1 se presentan algunos fenómenos que afectan la calidad de la energía y la característica de la forma de onda con que se relacionan. El enfoque de éste trabajo es considerar la distorsión que producen las señales armónicas en las formas de onda de tensión y corriente, y analizar los efectos que estas señales distorsionadas pueden causar en los transformadores a nivel distribución.

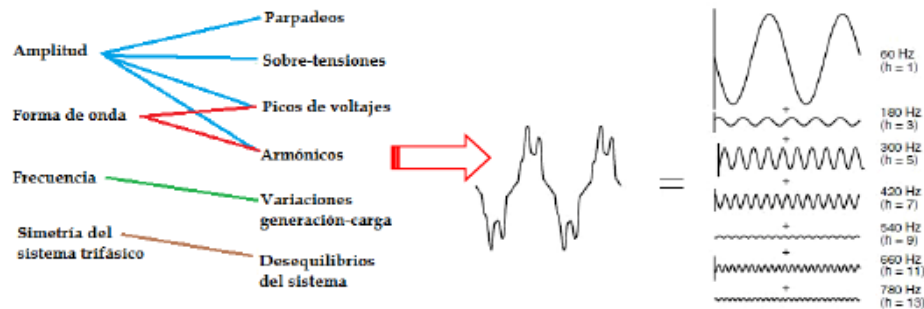


Fig. 1.1 Fenómenos que afectan la calidad de la energía.

Las señales armónicas son señales de tensión o corriente sinusoidales con frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental a la que el sistema eléctrico de potencia está diseñado para funcionar. Para medir la distorsión armónica de una señal se utiliza el término de la distorsión armónica total o THD como se presenta en el IEEE Std. 519 (1992), la cual se define como la razón de la suma de las amplitudes de las componentes armónicas en la señal con respecto a la amplitud de la componente fundamental de la señal.

Existen diferentes causas que producen la distorsión armónica en los sistemas eléctricos, en nivel residencial, la principal causa de la distorsión armónica son las cargas no lineales (Equipo electrónico, como los balastos de lámparas fluorescentes y dispositivos electrónicos en general como televisores, proyectores, computadoras, reproductores de audio y de video, impresoras, etc.). Es indiscutible que existe un amplio uso de dispositivos electrónicos actualmente y seguirá incrementándose con el paso del tiempo. Con respecto a los censos realizados por el INEGI se puede determinar que existe un crecimiento en la disponibilidad de estos dispositivos en las viviendas mexicanas ([www.inegi.org.mx](http://www.inegi.org.mx)). En la Tabla 1.1 se muestra la información de disponibilidad de computadoras personales obtenida en los censo de 2000, 2005 y 2010.

**Tabla 1.1** Disponibilidad de computadoras en viviendas habitadas.

Concepto	2000	2005	2010
<b>Total</b>	<b>21 513 235</b>	<b>24 006 357</b>	<b>28 138 556</b>
Dispone	2 011 425	4 694 927	8 279 619
No dispone	19 269 688	18 957 731	19 651 352
No especificado	232 122	353 699	207 58

De esta manera se presenta la tendencia del incremento en el uso de los dispositivos electrónicos en general, por lo que es de esperarse que la distorsión armónica producida por estos dispositivos inyectada a la red también se incremente en los próximos años.

## JUSTIFICACIÓN

### 2.1 Efectos de los armónicos en transformadores de distribución

El flujo de armónicos hacia la red puede tener un impacto destructivo en diferentes componentes de la red, siendo los transformadores de distribución que están conectados directamente a las cargas domésticas uno de los principales. Estos transformadores deben transmitir no sólo la señal de corriente fundamental sino que también las señales armónicas, esto causa un estrés adicional al que el transformador está sometido. Éste flujo de armónicos a través de los transformadores provoca que se eleve la temperatura a valores que exceden los permitidos del material aislante.

En el trabajo de Marjan Shafiee Rad (2012), se realiza un análisis de los efectos de los armónicos en los transformadores de distribución, concluyen que el incremento de las cargas que aumentan el THD afecta a seis transformadores de distribución de 100 kVA. Se concluyó que la distorsión armónica amenaza la operación segura de los transformadores, reduciendo la máxima capacidad de corriente permisible (*MCP*) a la cual el transformador puede operar y aumentando el factor de aceleración de envejecimiento (*FAE*) del mismo, perjudicando el funcionamiento y

desempeño de los transformadores. En la Fig. 2.1 se muestran estas dos características resultado de las pruebas realizadas en [4].

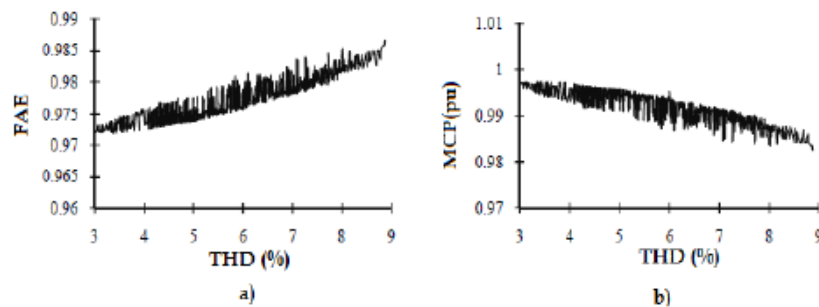


Fig. 2.1 a) FAE y b) MCP de un transformador de distribución para diferentes magnitudes de THD.

## 2.2 Pérdidas relacionadas con los armónicos.

Aunado a la problemática en los transformadores la corriente con contenido armónico que fluye por el cableado de los edificios domésticos o de oficinas incrementa las pérdidas asociadas con el calentamiento. Las instalaciones eléctricas de estos edificios fueron diseñadas para cargas típicas de hace 20, 30 o incluso 40 años y el equipo electrónico de hoy puede sobrecargarlas.

En el trabajo de Key, T.S. (1996), se realiza un estudio acerca de las pérdidas en el cableado debido a los armónicos, en el cual se indica que existen dos características que afectan al cableado cuando existen armónicos presentes:

- El incremento del valor RMS de la señal de corriente.
- El efecto de variación de la resistencia del cableado debido a las diferentes frecuencias de los armónicos.

El estudio realizado por Key, T.S. (1996) se realiza la simulación de la carga eléctrica típica en un edificio de oficina, de la cual concluyen que para dicho edificio se tiene un  $THD = 110\%$ . Para este contenido armónico el valor  $RMS$  de la señal de corriente se incrementa en un 50% aumentando así las pérdidas ocasionadas por  $I^2 R$ . Se puede observar que la resistencia de los

diferentes cableados se incrementa conforme se incrementa el orden y la frecuencia del armónico, el incremento de resistencia provoca el incremento de pérdidas mencionado. En la Fig. 2.2 se puede observar la variación de la resistencia con respecto al orden armónico.

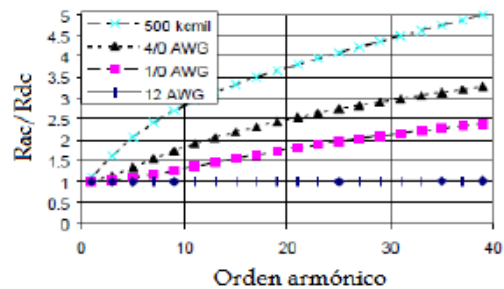


Fig. 2.2 Relación de la resistencia y el orden armónico.

### 2.3 Inyección armónica residencial.

Se realizó un estudio armónico en una residencia con la finalidad de obtener una muestra de referencia, ésta residencia se establece como una proyección del contenido armónico promedio que generarán las residencias en un futuro próximo utilizando las estadísticas del INEGI como referencia. Las mediciones se realizaron utilizando *Fluke Power Quality Analyzer 43B*. Los aparatos conectados y encendidos son los siguientes: 7 focos ahorradores 13W, 2 TV Pantalla de plasma, 1 TV TRC, 1 Refrigerador, 1 Reproductor de BD/DVD, 1 Laptop, 2 Cargadores de Celulares, 1 Consola de videojuegos.

Se realizaron mediciones para cada uno de los elementos (Ver Apéndice A) además de una medición para el punto de conexión común (PCC). Las formas de onda de la tensión y la corriente correspondientes a la medición en el PCC se muestran en la Fig. 2.3. Se puede observar claramente que mientras la señal de tensión en la Fig. 2.3 a) mantiene su forma sinusoidal, la

forma de onda de la corriente Fig. 2.3 b) se deforma considerablemente debido a la inyección de armónicos.

En la Fig. 2.3 c) se muestra el THD así como el contenido armónico de la señal de corriente para la misma medición en el PCC. El THD para esta residencia es de 43.5% que corresponde a 3.4 A aproximadamente.

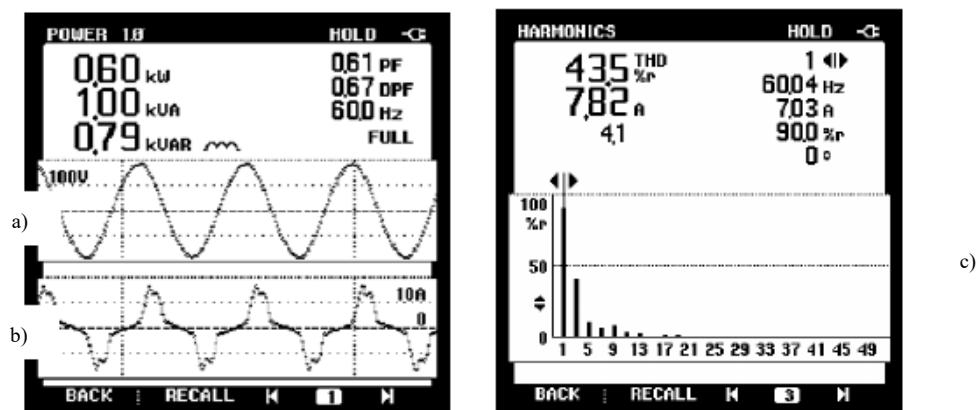


Fig. 2.3 Formas de onda de las señales de a) tensión b) corriente c) contenido armónico para la medición del PCC.

Para representar adecuadamente el consumo e inyección armónica de un bloque residencial se realizaron las mediciones de cada elemento y dispositivo por separado, de esta manera se identifican los elementos que más perjudican las formas de onda de corriente. En el Apéndice A se muestran las imágenes de las mediciones realizadas a los diversos aparatos domésticos considerados para el análisis.

## METODOLOGÍA

En esta sección se presenta una simulación de la carga residencial utilizando la información de las mediciones realizadas de cada equipo de tipo electrónico presentadas en el Apéndice A. Los equipos electrónicos analizados generan una cantidad de armónicos, y como consecuencia se genera una distorsión de la corriente considerable. A partir del estudio realizado se diseña un filtro que reduzca los armónicos inyectados a la red eléctrica por parte de estos elementos. Se presenta un esquema comparativo de la inyección armónica antes y después de la implementación del filtro.

### 3.1 Simulación de carga residencial

La carga residencial se representa por el conjunto de los elementos y dispositivos alimentados por la red eléctrica que son descritos en la sección 2.3. Cada una de las cargas es modelada por separado, representando sus características, y se conectan en conjunto. Esta carga residencial se modeló con respecto a las mediciones realizadas (Ver Apéndice A). Las simulaciones se realizaron mediante simulaciones numéricas en *Powersim ver. 9*. En la Fig. 3.1 se muestran los diferentes elementos que componen la carga residencial.



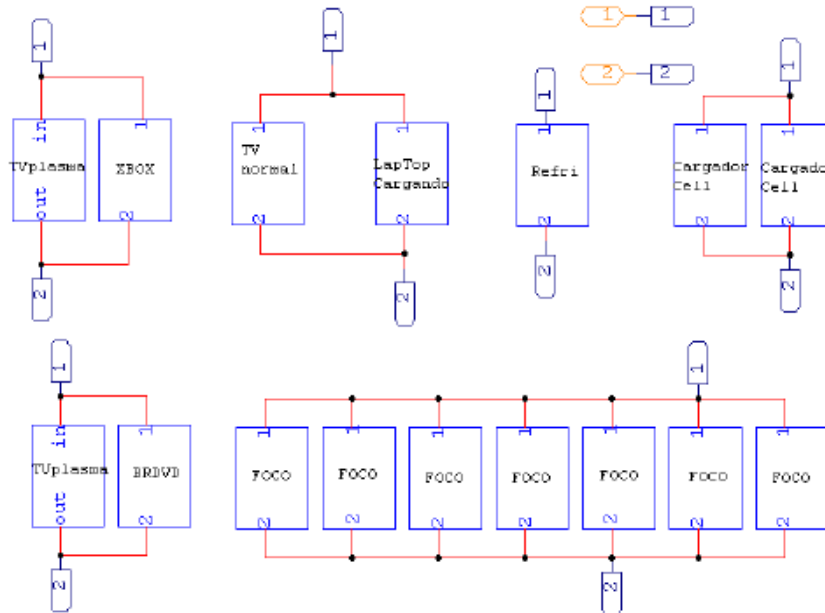


Fig. 3.1 Modelado de la carga residencial

Para representar la fuente de alimentación, se conectó el conjunto de elementos a una fuente de voltaje de 127 volts que representa una conexión monofásica. En la Fig. 3.2 se muestran las formas de onda de a) corriente y de b) voltaje en el domicilio, obtenidas de la simulación.

Se puede observar que la corriente obtenida en simulación corresponde a la señal de corriente en las mediciones realizadas en la Fig. 2.3, con lo que se comprueba que la simulación representa correctamente las mediciones realizadas.

Como ya se había mencionado es necesario reducir la inyección armónica por parte de la carga, y para esto se diseña un filtro para la carga residencial.

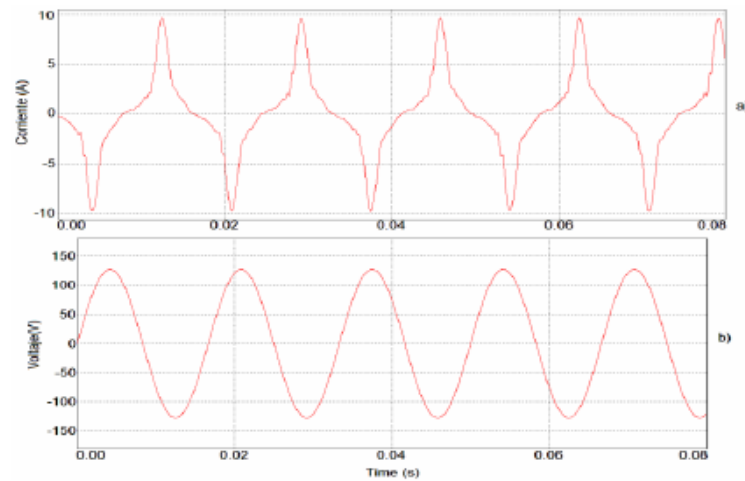


Fig. 3.2. Forma de onda de a) corriente y b) el voltaje para la carga residencial.

### 3.2 Calculo de filtro de armónicos.

Los filtros de armónicos normalmente son filtros pasa-bajos, sintonizados a una frecuencia de corte que permita el paso de la fundamental. Las frecuencias mayores a esta frecuencia de corte serán filtradas. Se selecciona un filtro de armónicos de tipo capacitivo, en el cual la frecuencia de corte está dada por:

$$f_{\text{cutoff}} = \frac{1}{2\pi RC}$$

Para optimizar el funcionamiento del filtro de armónicos, se utiliza una combinación de dos filtros, un filtro pasa-bajos y un filtro pasa-banda, ambos sintonizados para permitir el flujo de la componente fundamental (60 Hz). Para sintonizar el filtro pasa-banda es necesario determinar los valores de sus componentes, los cuales se definen por medio de las siguientes ecuaciones:

$$C_F = \frac{1}{2\pi f X_c} \quad L_F = \left( \frac{1}{2\pi f h \sqrt{C_F}} \right)^2 \quad R_F = \frac{2\pi f h L_F}{Q}$$

En donde:

$C_F$  – Valor del capacitor del filtro.

$X_c$  – Reactancia del capacitor.

$L_F$  – Valor de la inductancia del filtro.

$h$  – Orden de la frecuencia a la que se sintoniza el filtro (para este caso  $f=60\text{Hz}$ ).

$R_F$  – Valor de la resistencia del filtro.

$Q$  – Índice de la calidad del filtro (para filtros pasa-banda normalmente entre 30 y 60).

### 3.3 Implementación del filtro y resultados obtenidos.

En esta sección se presenta la metodología de cálculo del filtro y la sintonización para la carga de tipo residencial presentada en la sección 3.1. El filtro se compone de dos ramas: la rama pasa-banda a 60 Hz y la rama  $H$  del filtro pasa-bajos sintonizada para drenar el contenido armónico a tierra evitando que se inyecte a la red. Lo anterior se muestra en la Fig. 3.3.

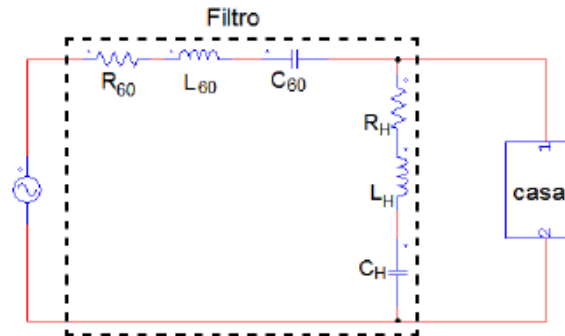


Fig. 3.3 Filtro para la reducción del contenido armónico.

El filtro implementado reduce considerablemente el contenido armónico inyectado por la carga a la señal de corriente, en la Fig. 3.4 se puede ver una comparación entre ambas señales.

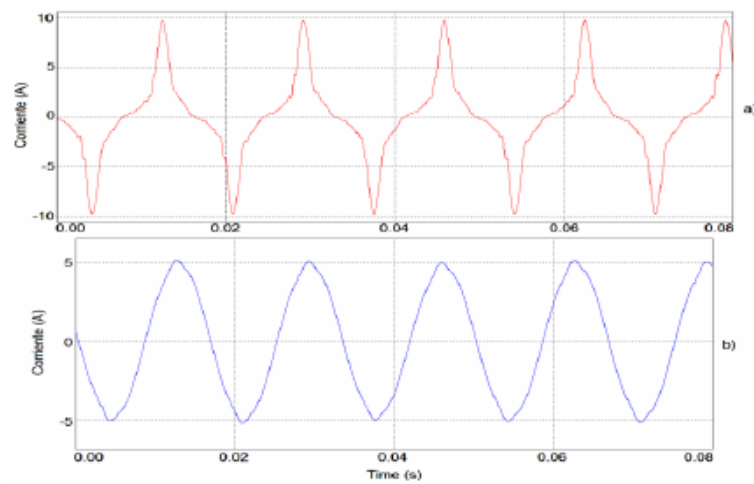


Fig. 3.4 a) Señal de corriente residencial sin filtrado b) con el filtro propuesto implementado.

La forma de onda de la corriente filtrada presenta una mejoría notable con respecto a la forma de onda sin filtro, aproximándose mucho a una señal sinusoidal. De igual manera, los valores de la señal filtrada se ven mejorados con respecto a la señal sin filtro. En la Tabla 3.1 se muestra una comparación de tres parámetros de las señales mostradas en la Fig. 3.4. Y se puede notar una gran reducción de la distorsión armónica al igual que una reducción de los picos de la señal de corriente.

Con las evidencias obtenidas de las simulaciones, se puede determinar que el filtro propuesto reduce considerablemente la inyección de corrientes armónicas a la red eléctrica por cada residencia, se puede asegurar que reduciendo el contenido armónico en los bloques residenciales se reducirán los efectos de las problemáticas descritas en la sección 2. El método de solución propuesto representa una solución viable para éstas problemáticas que pueden presentarse en el futuro.

Tabla 3.1 Comparación de las características de las señales.

Señal sin filtro	Señal filtrada
<b>Pico de señal de Corriente</b>	
9.485 A	5.137 A
<b>Valor RMS</b>	
3.937 A	3.428 A
<b>%THD<sub>r</sub></b>	
57.19%	2.55%

#### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las cargas de tipo electrónico en un sistema eléctrico residencial presentan un contenido armónico considerable. El contenido armónico en la corriente de cada aparato electrónico es de 75% en promedio, y en el PCC el % THD de la corriente es aproximadamente 43%, lo que ocasiona una inyección altamente distorsionada a la red, lo que puede ocasionar problemas de calentamiento en el transformador, reduciendo la capacidad máxima de operación y acelerando el envejecimiento del mismo.

Se propone un filtro para reducir el contenido armónico inyectado a la red con la finalidad de reducir los efectos en los transformadores de distribución que alimentan a los bloques residenciales. Los resultados obtenidos en simulaciones numéricas muestran que el filtro propuesto es una opción viable y efectiva para su implementación real, reduciendo así la inyección de armónicos a la red.

Continuando con el trabajo realizado, se busca realizar la implementación física del filtro y realizar mediciones para comprobar su funcionamiento así como evaluar su desempeño, costos y beneficios.

#### BIBLIOGRAFÍA

- IEEE std 1159-1995. Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.  
Página web. [www.inegi.org.mx/](http://www.inegi.org.mx/)
- IEEE Std. 519 1992. Recommended Practices and Requirements For Harmonic Control in Electrical Power Systems.
- Marjan Shafiee Rad, Maryam Kazerooni (2012). Analysis of The Grid Harmonics and Their Impacts on Distribution Transformers, 1-5, *IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI)*.
- Key, T.S. (1996). Costs and benefits of harmonic current reduction for switch-mode power supplies in a commercial office building, vol.2, 1101-1108, *IEEE Transactions on Industry Applications*.
- Dirk Brechtken (2006). Effects of Harmonics and Compact Design to the Rating of Low Voltage Transformers, *IEEE Power Engineering Society General Meeting*.
- Ranjana Singh (2010). Energy Loss Due to Harmonics in Residential Campus – A Case Study, 1-6, *45th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*.
- Pomilio, J.A. (2007). Characterization and Compensation of Harmonics and Reactive Power of Residential and Commercial Loads, 22 (2), 1049-1055, *IEEE Transactions on Power Delivery*.
- Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan (2012). *Electrical Power Systems Quality*. Location: McGraw-Hill.
- Muhammad Rashid (2004). *Electronica de Potencia*. Location: Pearson Prentice Hall

ANEXO 1

FORMAS DE ONDA Y CONTENIDO ARMÓNICO DE LA CORRIENTE DE DISPOSITIVOS

ELECTRÓNICOS MEDIDOS

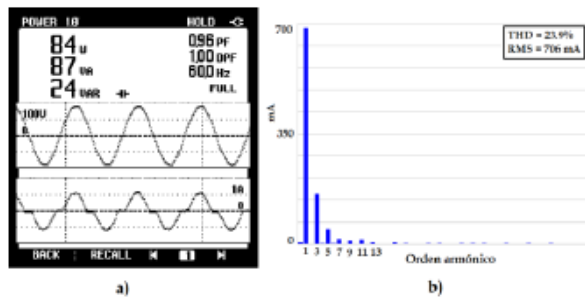


Fig. A.1 a) Formas de onda y b) Contenido armónico de una televisión de plasma.

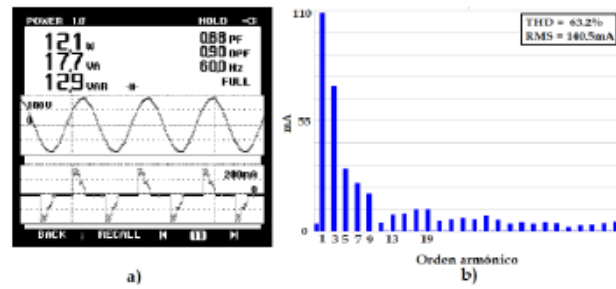


Fig. A.2 a) Formas de onda y b) Contenido armónico de una lámpara ahorradora.

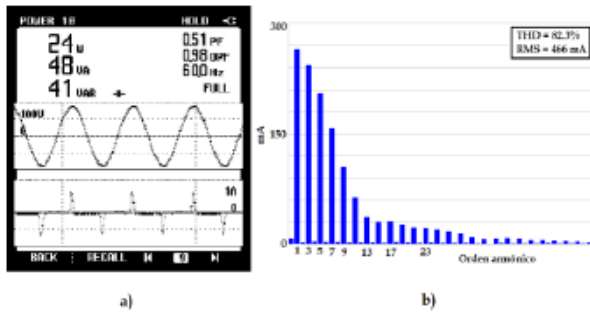


Fig. A.3 a) Formas de onda y b) Contenido armónico de un reproductor DVD.

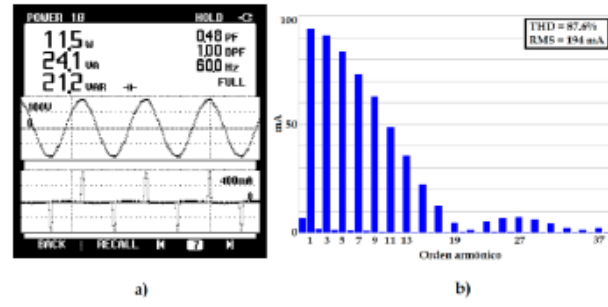


Fig. A.4 a) Formas de onda y b) Contenido armónico de un portátil.

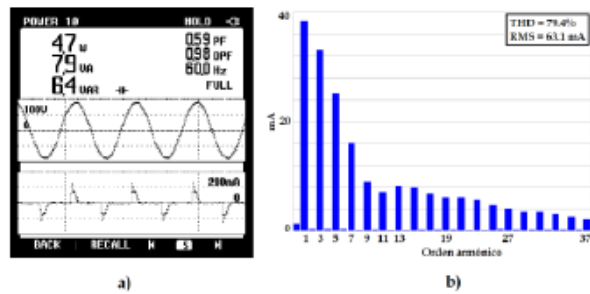


Fig. A.5 a) Formas de onda y b) Contenido armónico de un cargador de celular.

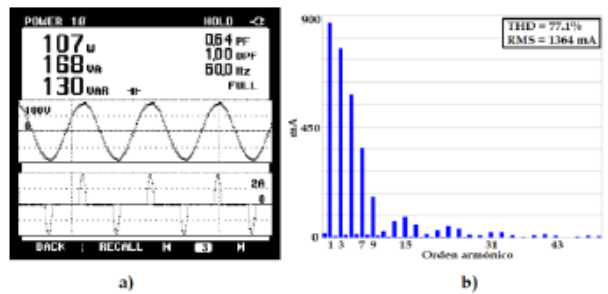


Fig. A.6 a) Formas de onda y b) Contenido armónico de una consola de videojuegos.

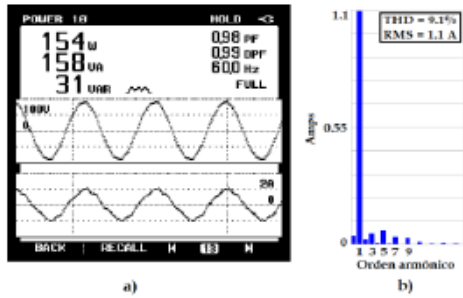


Fig. A.7 a) Formas de onda y b) Contenido armónico de una televisión TRC.

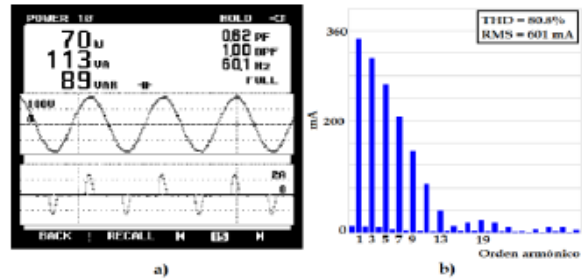


Fig. A.8 a) Formas de onda y b) Contenido armónico de un refrigerador.