



Análisis de la contaminación armónica en sistemas eléctricos de iluminación

Analysis of harmonic pollution in electrical lighting systems

Análise da poluição harmônica em sistemas de iluminação elétrica

Franklin Hernán Vásquez-Teneda ^I
franklin.vasquez@utc.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-2442-4348>

Dennis Bayardo Vásquez Barba ^{II}
dennis.vasquez1528@utc.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0007-7200-6566>

Yuly Alejandra Urresty-Noguera ^{III}
yuly.urresty7018@utc.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0004-5649-035X>

Correspondencia: franklin.vasquez@utc.edu.ec

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

***Recibido:** 23 de abril de 2023 ***Aceptado:** 12 de mayo de 2023 * **Publicado:** 01 de junio de 2023

- I. Docente de Ingeniería en Electricidad, Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Ecuador.
- II. Estudiante de Ingeniería en Electricidad, Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Ecuador.
- III. Estudiante de Ingeniería en Electricidad, Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Ecuador.

Resumen

Los índices armónicos existentes a nivel residencial tanto de voltaje como de corriente en la red eléctrica son valores que permiten analizar la calidad de energía de los sistemas de eléctricos a nivel residencial a partir de la información disponible. En este estudio se aplicó la metodología de índices de armónicos que se generan en los sistemas de iluminación cuando se instalan luminarias incandescentes, fluorescentes y led, así como las cocinas de inducción y otros dispositivos electrónicos consideradas como cargas especiales. Se realizaron mediciones de los diferentes parámetros eléctricos a partir de sistemas independientes y combinados obteniendo valores de voltaje, corriente, potencia, factor de potencia y los armónicos generados por los mismos. Según la metodología aplicada los sistemas analizados presentan generación de armónicos dentro de los estándares reglamentarios excepto los sistemas combinados particularmente de iluminación donde supera los valores establecidos como límites en los THD de corriente por lo que se requiere aplicar un proceso para mejorar la calidad de energía.

Palabras Claves: Calidad de Energía; THD; Armónicos; Distorsión Armónica.

Abstract

The THD indices of both voltage and current in lighting systems are values that allow analyzing the power quality of lighting systems at an industrial level based on the available information. In this study, the methodology of harmonic indices that are generated in lighting systems when incandescent, fluorescent and LED luminaires are installed was applied. Measurements of the different electrical parameters were made from independent and combined systems, obtaining values of voltage, current, power, power factor and the harmonics generated by them. According to the methodology applied, the systems analyzed present harmonic generation within regulatory standards, except for combined systems between fluorescent, led and incandescent where it exceeds the values established as limits in the current THD, mainly in the third harmonic, for which it is necessary to apply a process to improve the quality of energy from the technical, technological, social and environmental point of view.

Keywords: Power Quality; THD; Harmonic; Harmonic Distortion.

Resumo

Os índices harmónicos existentes a nível residencial tanto de tensão como de corrente na rede elétrica são valores que permitem analisar a qualidade de energia dos sistemas elétricos a nível residencial com base na informação disponível. Neste estudo, foi aplicada a metodologia dos índices harmônicos que são gerados nos sistemas de iluminação quando são instaladas luminárias incandescentes, fluorescentes e led, além de fogões de indução e outros dispositivos eletrônicos considerados como cargas especiais. Foram feitas medições dos diferentes parâmetros elétricos a partir de sistemas independentes e combinados, obtendo valores de tensão, corrente, potência, fator de potência e os harmônicos gerados por eles. De acordo com a metodologia aplicada, os sistemas analisados apresentam geração de harmônicos dentro dos padrões regulamentares, com exceção dos sistemas combinados, principalmente de iluminação, onde ultrapassa os valores estabelecidos como limites no THD atual, motivo pelo qual é necessário aplicar um processo para melhorar qualidade poderosa.

Palavras-chave: Qualidade poderosa; THD; Harmônicos; Distorção harmônica.

Introducción

El aumento y uso de dispositivos electrónicos en los últimos años en el sector residencial ha generado un problema en el sistema eléctrico y consecuentemente en la red de distribución debido a la contaminación armónica, esto debido a que estos elementos realizan conversiones de energía eléctrica y conmutaciones que provocan una distorsión en la señal sinusoidal de la corriente alterna afectando su forma y amplitud.

Diferentes estudios desarrollados sobre la calidad de energía se encuentran asociado a la presencia de armónicos en la red de suministro eléctrico por lo cual se ha ejecutado varios procesos de monitoreo con el fin de analizar el comportamiento de los diversos eventos que pueden resultar perjudiciales al sistema y las soluciones pueden ser diversas en función de la particularidad que tenga las cargas conectadas instaladas.

La presencia de armónicos asociada al incremento de cargas con componentes electrónicos como las cocinas de inducción, iluminación led, ahorradores, televisiones entre otros elementos considerados como parte de la experiencia obtenida por los autores del presente artículo en la evaluación de la calidad de energía en un sistema eléctrico residencial, permiten evaluar el

comportamiento de las diferentes cargas tanto lineales como no lineales así los niveles de contaminación armónica tanto de voltaje como de corriente presentes en la red de alimentación. Los estándares establecidos para en análisis de la distorsión armónica están definidos en IEEE Std 519-1992.

Los armónicos son distorsiones que se presentan en las ondas sinusoidales tanto del voltaje como de la corriente producidos por el uso de cargas con impedancias no lineales, como bobinas, dispositivos de conversión de corriente alterna a continua y conmutaciones que trabajan a frecuencias diferentes que la red convencional. [1]

Las cargas instaladas dentro de una residencia absorben corrientes que dan lugar a la aparición de armónicos de orden impar (3,5,7, 9...) y en algunos casos de orden par no característicos de orden (2,4,6, 8...) producto de las asimetrías de las cargas instaladas.

El aumento y uso de dispositivos electrónicos en los últimos años en el sector residencial residencial ha generado un problema en el sistema eléctrico y consecuentemente en la red de distribución debido a la contaminación armónica, esto debido a que estos elementos realizan conversiones de energía eléctrica y conmutaciones que provocan una distorsión en la señal sinusoidal de la corriente alterna afectando su forma y amplitud.

Materiales y métodos

Diseño y alcance del estudio

Se realizó una investigación sobre la generación de armónicos en la red de alimentación eléctrica debido a las diferentes cargas existentes a nivel residencia de diseño experimental de tipo descriptivo y alcance explicativo.

Consulta de base de datos

Para el manejo de información se emplearon los datos obtenidos a través del analizador de redes monofásico - trifásico Mecatronik con un rango de voltaje $300 V_{RMS}$ / corriente de $10 A_{RMS}$ y los estándares establecidos por IEEE Std 519-1992. El estudio incluyó artículos de alta calidad.

Estrategia de adquisición de datos

Los datos fueron adquiridos y seleccionados tomando en cuenta las diferentes condiciones de funcionamiento que se puede dar en un sistema de iluminación donde se puede disponer de

luminarias incandescentes, fluorescentes y led así como sistemas de fuerza compuestos por dispositivos electrónicos e inductivos.[1]

Los parámetros requeridos para la adquisición de datos empleados para los análisis correspondientes fueron: tipos de carga, voltajes, corrientes, potencia, frecuencia. Para la búsqueda, consulta, lectura del tratamientos y análisis de datos se basó en textos, investigaciones, revistas con sustento científico entre otras referidos a la Calidad de Energía, mismas que han sido publicadas los últimos seis años, es decir, de 2017 a 2022. Los artículos elegidos fueron analizados de manera exhaustiva y selectiva según los criterios de selección. [2]

Tabla 1. Límites de distorsión armónica en voltaje -IEEE 519.

Límites de distorsión armónica en voltaje

| Nivel de tensión en la Acometida | Distorsión armónica individual | Distorsión armónica total THDv |
|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| V _n <1kV | 5,00% | 8,00% |
| V _n <1kV<69kV | 3,00% | 5,00% |
| 69kV<1kV<138kV | 1,50% | 2,50% |
| V _n >138kV | 1,00% | 1,50% |

Tabla 2. Límites de distorsión armónica en corriente -IEEE 519.

| I _{cc} /IL | TDD | h<11 | 11<h<17 | 17<h<23 | 23<h<35 | h>=35 |
|-------------------------|-------|-------|---------|---------|---------|-------|
| V _n ≤ 69kV | | | | | | |
| I _{cc} /IL <20 | 5,00% | 4,00% | 2,00% | 1,50% | 0,60% | 0,30% |

Análisis de datos

De acuerdo a los estándares del IEEE, es pertinente considerar algunos aspectos fundamentales respecto a las corrientes armónicas que son generadas particularmente por cargas de tipo no lineales es decir se encuentran formadas por elementos electrónicos así como por bobinas y condensadores generando desfases respecto al voltaje fluyendo una potencia distorsionada misma es que es considerada como pérdidas por efecto Joule mismo que se transforma en calor y que es equivalente a la potencia reactiva que se relaciona con el factor de potencia de desplazamiento.[3]

Entre los efectos que provoca el flujo de corrientes armónicas en un sistema eléctrico podemos tener los siguientes:

- Aumento de pérdidas en el sistema eléctrico por el efecto Joule.
- Sobrecalentamiento en el conductor o conductores neutro.
- Sobrecalentamiento en las máquinas (motores, generadores y transformadores).
- Vibraciones en el funcionamiento de motores y generadores.
- Falla en el banco de condensadores.
- Falla en el rendimiento de los transformadores.
- Efectos de resonancia.
- Falla en el funcionamiento de los dispositivos electrónicos.
- Interferencias en sistemas de telecomunicación.
- Falla en los sistemas de protecciones.

Tanto los efectos como las fallas dependerán de la cantidad de armónicos existentes entre la carga no lineal y la carga total del sistema procurando que esta distorsión se encuentre dentro de los límites establecidos por las normas, mismas que debe ser menor al 20% del cargo total, para lo cual la distorsión armónica en corriente debe estar dentro de los límites establecidos en IEEE-519 sin la ubicación de filtros.[4]

Es decir que los problemas de armónicos se presentan cuando las cargas no lineales superan el 20% de la carga total instalada y también por la presencia de banco de capacitores que pueden presentar condiciones de resonancia.[5]

Criterios de inclusión y exclusión

Criterios de inclusión

Para la recolección de información se incluirán las siguientes tipologías: artículos científicos, originales, análisis y casos de estudio; también se consultaron páginas oficiales del Arconel, Ministerio de Electricidad y normativas vigentes tanto a nivel nacional como internacional referentes a la temática de interés.

Criterios de exclusión

Se excluyeron artículos no disponibles en versión completa, cartas al editor, opiniones, perspectivas, guías, blogs, resúmenes o conferencias. También fueron excluidos los artículos sobre

la temática que estaban duplicados y realizados en otras poblaciones diferentes a las mencionadas en este estudio.

Consideraciones éticas

Este trabajo cumplirá con las normas y principios universales de ética establecidos en las organizaciones internacionales de este campo, es decir evitar involucrarse en proyectos en los cuales la difusión de información pueda ser utilizada con fines deshonestos y garantizar la total transparencia en la investigación.

Resultados y discusión

Tabla 3. Armónicos de Voltaje [V] en la red de alimentación generada por los sistemas de iluminación.

| Armónicos | Led [W] | Led [W] | Ahorrador [W] | Incandescente [W] | Incandescente [W] | Incandescente/fluorescente [W] | Led /Incandescente [W] | Led / Ahorrador [W] | Ahorrador/Incandescente [W] | Fluorescente/Led/ahorrador [W] | Incandescente/led/Ahorrador [W] | todos |
|-----------|---------|---------|---------------|-------------------|-------------------|--------------------------------|------------------------|---------------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-----------------|
| | | | | | | 100/4 | 9/10 | | 15/10 | 40/9/10 | 9/15/10 | 9/20/15/30/100/ |
| Armónicos | 9 | 20 | 15 | 30 | 100 | 0 | 0 | 9/15 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| fundament | 124, | 125, | 124, | 124, | 123, | | 123, | 124, | | | | |
| al | 8 | 4 | 3 | 8 | 4 | 123,5 | 9 | 1 | 123,3 | 124,7 | 123,8 | 121,8 |
| 3 | 4,3 | 4,4 | 4,6 | 4,3 | 4,2 | 4,7 | 4,5 | 4,7 | 4,8 | 4,8 | 4,7 | 4,6 |
| 5 | | | | | | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | | | | | | |
| 9 | 1,3 | | 1,3 | 1,3 | | | 1,4 | 1,4 | 1,4 | | 1,3 | 1,3 |

Tabla 4. Armónicos de Corriente [mA] en la red de alimentación generada por los sistemas de iluminación.

| Armónicos | Led [W] | Led [W] | Ahorrador [W] | Incandescente [W] | Incandescente [W] | Incandescente/fluorescente [W] | Led /Incandescente [W] | Led / Ahorrador [W] | Ahorrador/Incandescente [W] | Fluorescente/Led/ahorrador [W] | Incandescente/led/Ahorrador [W] | todos |
|------------|---------|---------|---------------|-------------------|-------------------|--------------------------------|------------------------|---------------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------|
| Armónicos | 9 | 20 | 15 | 30 | 100 | 100/4 | 9/10 | sep- | 15/10 | 40/9/10 | 9/15/10 | 9/20/15/30/100/4 |
| fundamenta | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 142 | 179 | 109 | 142 | 830 | 978 | 1040 | 378 | 1188 | 409 | 68 | 1538 |
| 3 | 99 | 107 | | 99 | 25 | 74 | 126 | 257 | 228 | 159 | 6 | 274 |
| 5 | 61 | 45 | | 61 | | 40 | 71 | 124 | 116 | 29 | 3 | 138 |
| 7 | 39 | 34 | 36 | 39 | | 40 | 62 | 81 | 84 | 5 | | 106 |
| 9 | 34 | 21 | 19 | 34 | | 14 | 34 | 59 | 51 | 7 | | 52 |
| 11 | 26 | 10 | 10 | 26 | | 14 | 15 | 17 | 16 | 6 | | |
| 13 | 11 | 18 | 18 | 11 | | 14 | 16 | 24 | 24 | 4 | | 32 |
| 15 | 8 | 11 | 11 | 15 | | 11 | 16 | 21 | 21 | 5 | | 26 |
| 17 | 9 | 9 | 10 | 9 | | | 11 | 11 | | 4 | | |
| 19 | 5 | 8 | 7 | 5 | | | 11 | 13 | 12 | 4 | | |

Con base a la toma de datos de las diferentes configuraciones utilizadas para el presente estudio se obtuvo los resultados de forma individual para led, incandescente, fluorescente y ahorradores así como sus combinaciones led-fluorescente, led-incandescente, fluorescente-incandescentes, led-incandescente-fluorescente entre otras posibilidades con el propósito de valorar el comportamiento armónico en cada caso y establecer los criterios que permitan considerar como los sistemas de iluminación pueden afectar a la alimentación eléctrico residencial, estos resultados se muestran en la figura 1 se puede apreciar que la configuración que permite la utilización de los diferentes tipos de luminarias presenta un mayor consumo de corriente de componente fundamental y la configuración led-ahorrador un mayor componente en el 3er, 5to y 7mo armónico como se puede apreciar en la figura 2 y 3.

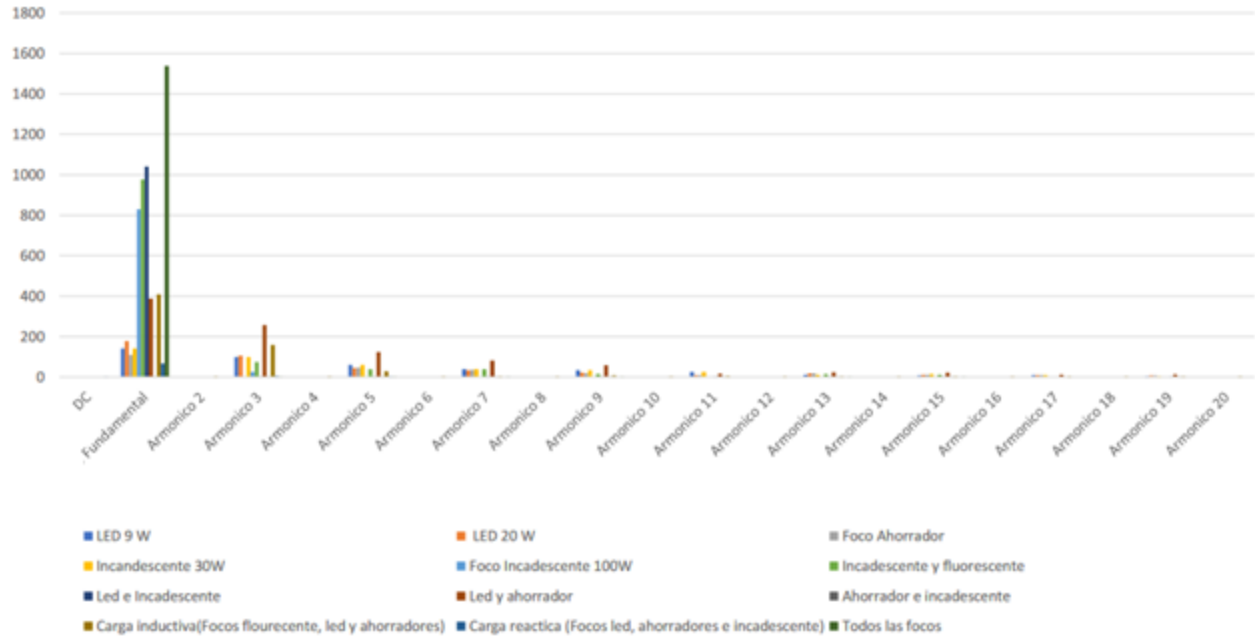


Figura 1. Comparación de los armónicos de corriente alterna en mA

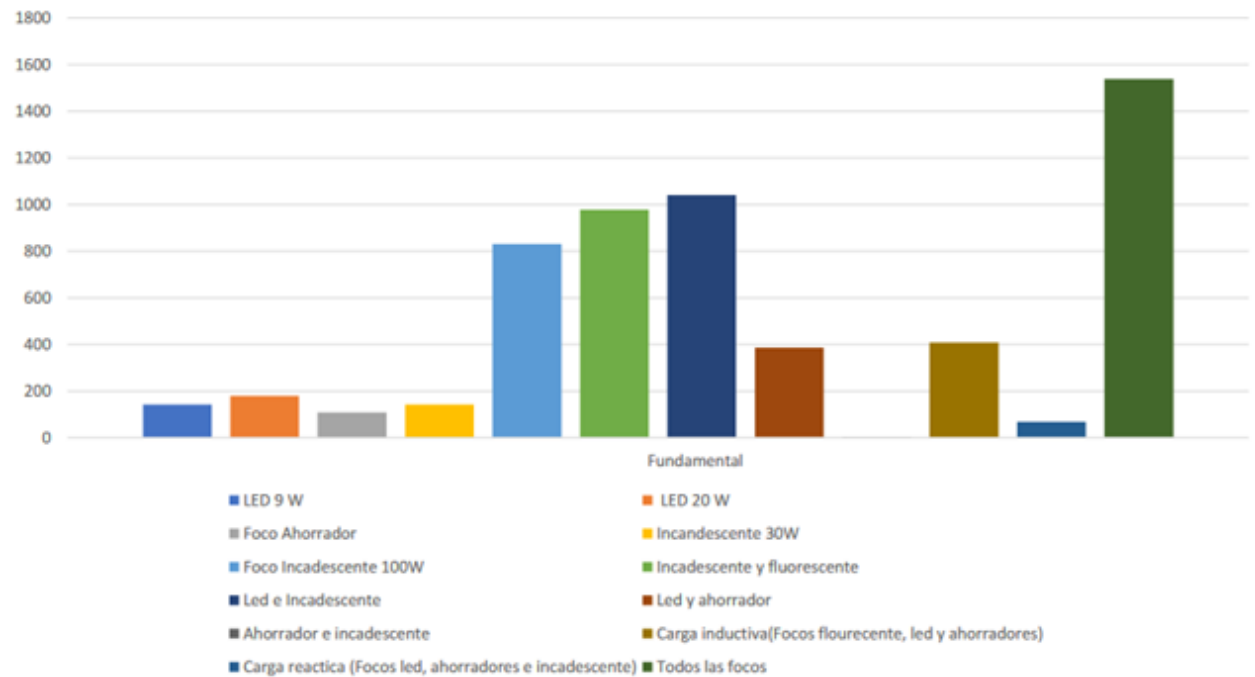


Figura 2. Comparación de los armónicos fundamentales de corriente alterna en mA

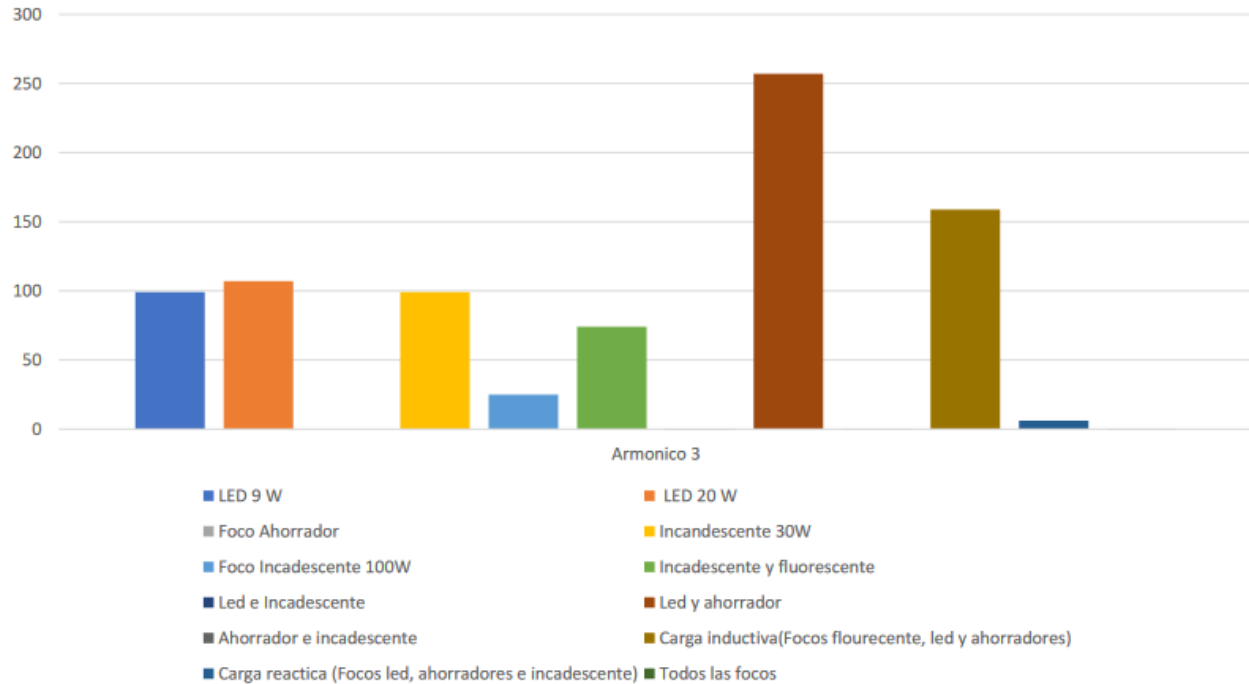


Figura 3. Armónicos de 3^{er} orden de corriente alterna en mA

Discusión

Para realizar la caracterización de las curvas obtenidas a través del analizador Mecatronik se recurre al banco de pruebas en donde se dispone de diferentes tipos de cargas a ser analizadas a través de la adquisición de los parámetros de voltaje, corriente, potencia y frecuencia. En el analizador es posible visualizar la onda que se obtiene a la salida de cada carga conectada a la red eléctrica y que luego será analizada a través de la descomposición de la misma en la fundamental y sus componentes armónicos para posteriormente conseguir una onda total lo más sinusoidal posible evitando alterar significativamente la forma de onda original que se recibe de la red [6].

Los armónicos de voltaje generados en la red dependen del ingreso de las cargas a la red, considerando que no todas ingresan al mismo tiempo. Por tal razón no se puede determinar directamente valores picos, pero mediante la medición de un sistema híbrido considerando el uso alternado y general de lámparas incandescentes, led y fluorescentes o ahorradores se puede obtener un aproximado de los armónicos de voltaje y corriente que afectan al sistema de alimentación.[7]

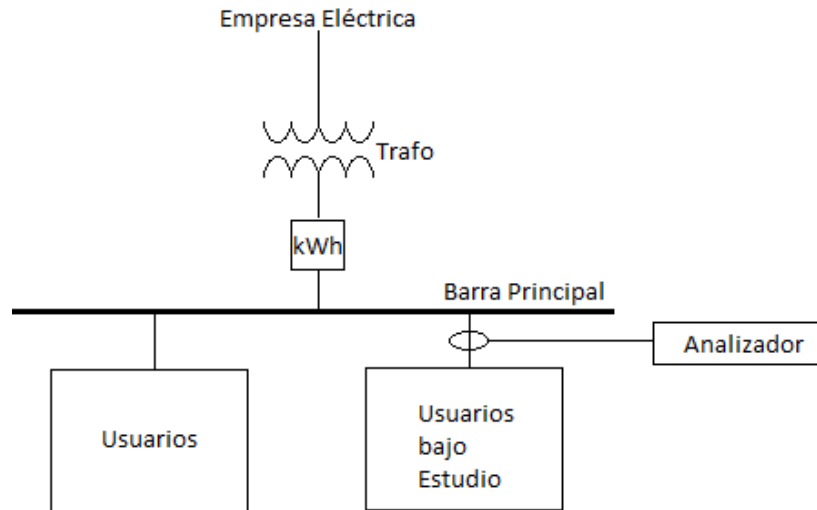


Figura 4. Ubicación del analizador Mecatronic

Los valores correspondientes al voltaje de alimentación establecen que la variación se encuentra por debajo de los 0,7 V lo que determina que se encuentra muy por debajo de los límites establecidos por la normativa vigente que es del 3%, los armónicos de voltaje para los casos analizados se establecen en un rango máximo de 4,8% en el 3er armónico, y de 1,9 % en el 9 armónico lo que implica valores inferiores a la normativa que establece valores máximos de 8%.

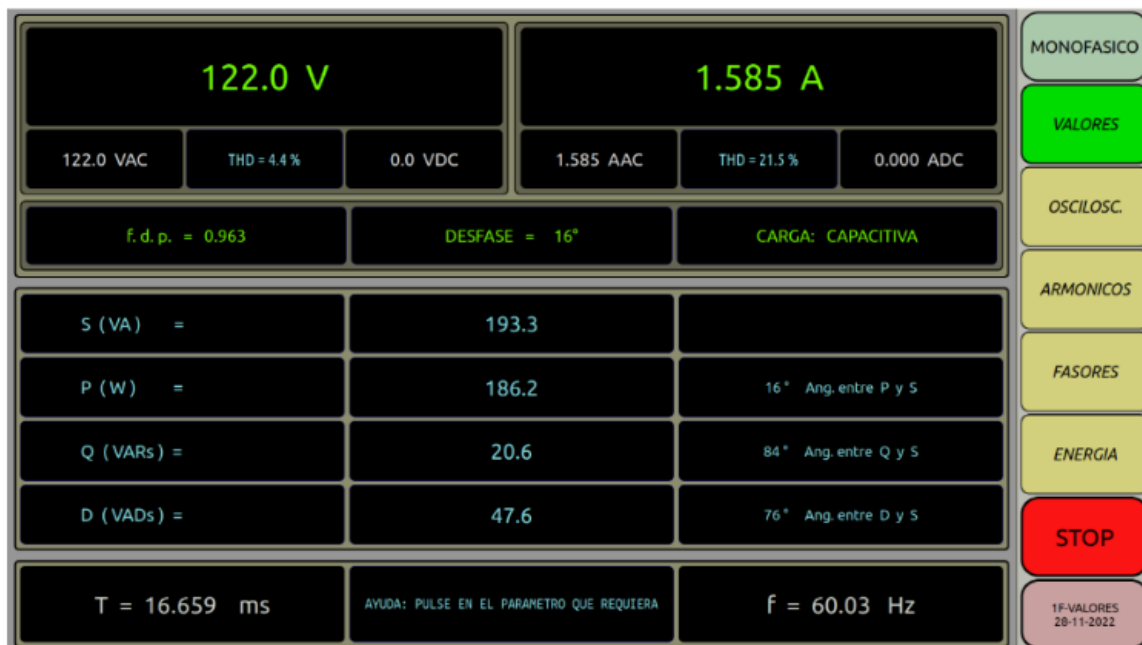


Figura 5. Resultados correspondientes al sistema analizado

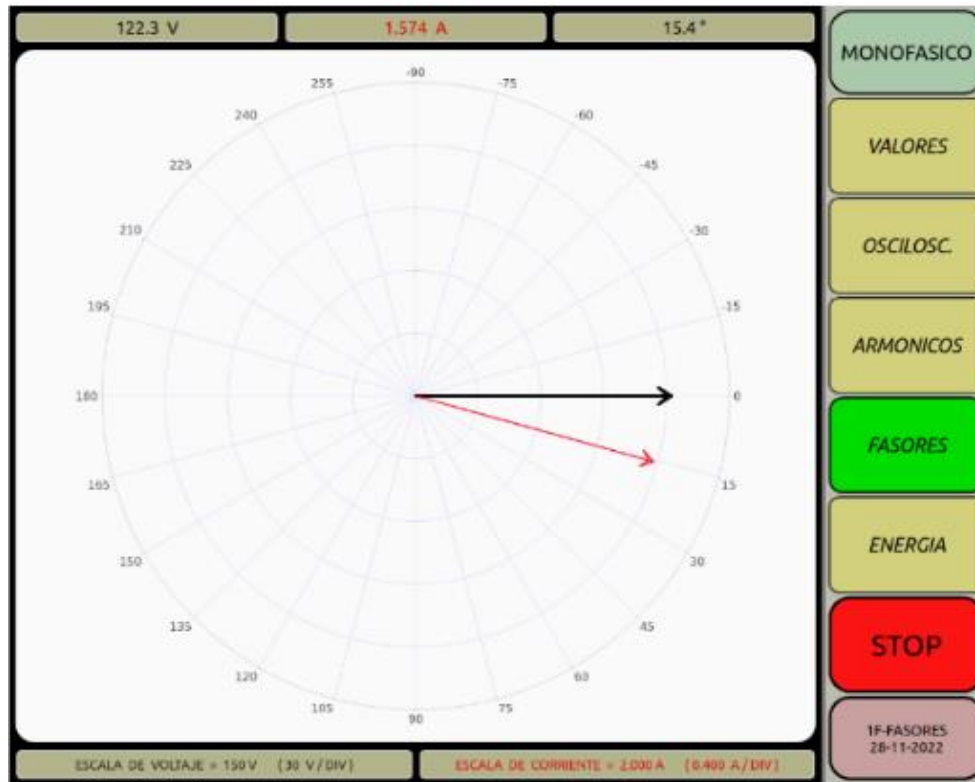


Figura 6. Desfase de la corriente con respecto al voltaje

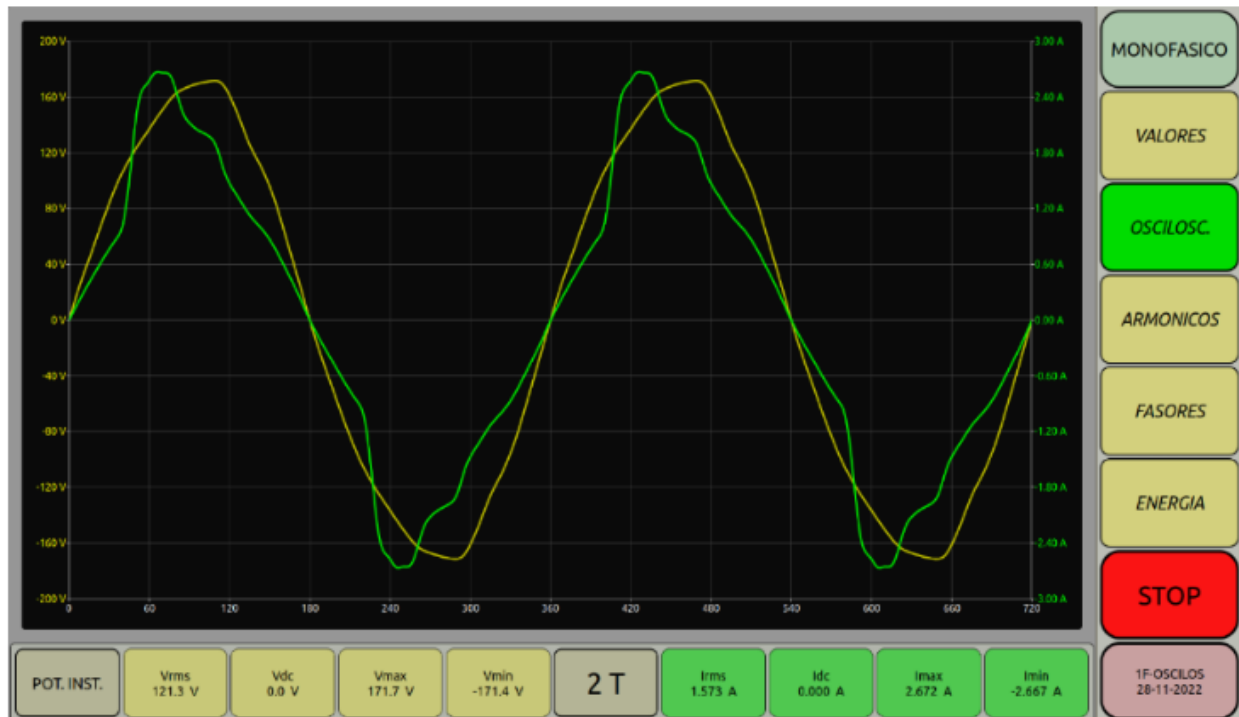


Figura 7. Curva de la corriente por la presencia de armónicos



Figura 8. Gráfico de la corriente fundamental y armónicos

Los armónicos de corriente generados por el sistema de conexión general de cargas analizado nos da un valor de $THDi = 21,5\%$ superando notablemente los límites establecidos por los estándares de IEEE-540 que para el caso de niveles inferiores de alimentación de voltaje se encuentra en el 4% lo que nos indica que los índices de armónicos en el sistema supera en 5 veces el valor establecido, esto se refleja en los valores correspondientes a la potencia reactiva que es de 20,6 VAR y la potencia de distorsión de 47,6 VAr (volta-amperios reactivos de distorsión) a pesar de que el factor de potencia (fp) es de 0,96; estableciéndose que el sistema se considera como una carga capacitiva. (figura 5)

Si bien es cierto que el factor de potencia nos indica que el sistema se encuentra dentro de los parámetros normales, en un análisis general no se puede establecer directamente que el sistema tenga una afectación por armónicos sino luego de mediciones más especializadas que no permita observar que el sistema presenta valores por potencia reactiva y por potencia de distorsión, su análisis nos permitirá evaluar el sistema y tomar la mejor alternativa como una redistribución de cargas, mejoramiento de sistema de iluminación, cambio o repotenciación de conductores y ubicación de filtros. (figura 6)

En la figura 7 se puede apreciar la distorsión que tiene la onda de la corriente eléctrica producto de las cargas conectadas, se puede apreciar que la corriente Irms es 1,575 A y la corriente máxima $I_{m\acute{a}x} = 1,672$ A por lo que la componente armónica sería de $I_{arm} = 0,97$ A misma que está distribuida en los armónicos impares que corresponde a un $THDi = 21,5\%$ y que en relación a los datos de la distorsión de potencia se debe a la composición capacitiva del circuito misma que lleva a una afectación en la vida útil de los conductores y los diferentes utilizadores.

El diagnóstico

Conclusiones

Se determinó que los armónicos presentes en los circuitos formados por las lámparas de iluminación led y fluorescentes o ahorradores fluyen hacia las redes de energía que alimentan los circuitos debidos que disponen de un bajo valor de impedancia respecto a los sistemas incandescentes.

Se identificó que el valor correspondiente a la distorsión armónica total de un sistema compuesto led-ahorrador tiene un factor de potencia (fdp) de 0,718 y un $THD = 78,2\%$ que supera los límites establecidos por la norma que es del 8%, producto de este valor muy alto la curva de corrientes se muestra con un alto grado de distorsión en el 3ro, 5to y 7mo armónico.

Se evaluó el comportamiento de la condición más crítica donde se tiene sistemas mixtos con resultados que indican que el factor de potencia es de 0,963% considerado como un valor muy eficiente y el $THDi$ es del 21% superando ampliamente los límites establecidos del 8%, sin embargo, la solución no corresponde a un banco de condensadores sino mas bien a filtros que permiten mejorar la calidad de energía en el sistema eléctrico general.

Agradecimientos

Expreso mis más sinceros agradecimientos a mi familia que me inspira a ser un mejor profesional cada día y a seguir creciendo como persona, a las autoridades de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi y a su vez a autoridades y personal que hacen la Universidad Estatal del Sur de Manabí.

Referencias

1. ARCILA, José Dariel. Armónicos en sistemas eléctricos. Ieb Sa, 2010, p. 1-26
2. AYALA AGUIRRE, Gustavo; SALAZAR LOZANO, Juan David. Monografía lámparas de inducción. 2012.
3. MOORE, Philip J.; PORTUGUES, Iliana E. The influence of personal computer processing modes on line current harmonics. IEEE Transactions on power delivery, 2003, vol. 18, no 4, p. 1363-1368.
4. D. Chapman, “ARMÓNICOS CAUSAS Y EFECTOS.”
5. BEDOYA AYORA, Luis Fernando. Modelado del THD en los sistemas de iluminación de inducción residenciales. 2015. Tesis de Ingeniería Eléctrica.
6. E. Emmanuel, T. J. Gentile, D. J. Pileggi, E. M. Gulachenski, C. E. Root, “The Effect of Modern Compact Fluorescent Lights on Voltage Distortion”, IEEE Transaction On Power Delivery, Vol. 8, N° 3, Julio 1993
7. DA SILVA, Marcelo F., et al. Modelo eléctrico equivalente para lâmpadas fluorescentes sem eletrodos de indução. Eletrônica de Potência., 2012, vol. 17, p. 429-438.
8. VALLÉS, Alejandro Pérez. Localización y valoración de fuentes de distorsión armónica y/o desequilibrio en redes eléctricas. 2020. Tesis Doctoral. Universidad de Huelva. [11]
9. Jang, T.; H. Kim; H. N. Kim; "Dimming Control Characteristics of Electrodeless Fluorescent Lamps" Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol.56, pp.93, Janeiro, 2009.
10. MARTÍNEZ, Erick Hidalgo. Análisis y tendencias de las tecnologías actuales en iluminación aplicadas en el ahorro de energía eléctrica. 2013. [12] Boronet, J, Axoled Iluminación Industrial, “LALÁMPARA DE INDUCCIÓN MAGNÉTICA Y LA VISIÓN HUMANA.”
11. CHO, Kyumin, et al. Electronic ballast of the electrode-less lamp for the group lighting system. En 2009 International Conference on Electrical and Electronics Engineering-ELECO 2009. IEEE, 2009. p. I-293-I-296. [15] S. Mingsong, H. Songling, and Z. Wei, “MODELING AND ANALYSIS OF ELECTRODELESS LAMP SYSTEM,” Abstract IEEE, April 2013.

12. DA SILVA, Marcelo Freitas, et al. Analysis and design of a single-stage high-power-factor dimmable electronic ballast for electrodeless fluorescent lamp. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, vol. 60, no 8, p. 3081-3091.
13. MORA, I. Balastro electrónico para lámpara fluorescente basado en un amplificador clase E operando a una frecuencia mayor a 1 MHz. 1998. Tesis Doctoral. Tesis de Maestría. Cenidet, Cuernavaca, Mor.(México).
14. ANG, Yong-Ann, et al. Rapid analysis & design methodologies of high-frequency LCLC resonant inverter as electrodeless fluorescent lamp ballast. En 2007 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems. IEEE, 2007. p. 139-144.
15. LINCANGO SIGCHA, Edgar Guillermo. Modelación del THD en los sistemas de alimentación residencial. 2015. Tesis de Licenciatura.

© 2023 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).