

## Caracterización Armónicos de Corriente en Cargas de Uso final de Instalaciones Residenciales.

### Characterization of Current Harmonics in End Use Loads of Residential Installations.

Facundo Ponti

Centro de Investigación y Desarrollo en Ingeniería Eléctrica y Sistemas Energéticos (CIESE) (Lavaise 610, Santa Fe), Facultad Regional Santa Fe, UTN

[facuponti261@gmail.com](mailto:facuponti261@gmail.com)

Este trabajo ha sido realizado bajo la dirección de los Ing. Andrés Zottico y Ulises Manassero, en el marco del proyecto “Desarrollo de técnicas de gestión de la demanda y programación estacional del parque generador para su aplicación en el concepto de una nueva matriz energética nacional basada en el desplazamiento del consumo de gas residencial por energía eléctrica” (2020 – 2022), código ENUTNFE0007851, dirigido por el Ing. Ulises Manassero

**Resumen:** Los avances tecnológicos en los últimos años han dado origen a la inserción de nuevos dispositivos eléctricos y electrónicos en las viviendas residenciales. El uso de computadoras, televisores, rectificadores, lámparas fluorescentes, microondas, etc. han originado efectos indeseados en las redes eléctricas. Estas cargas acusan una distorsión armónica de la onda de corriente alterna por tener una impedancia alineal, esto conlleva a efectos indeseados como sobrecalentamiento de los conductores, aumento de las pérdidas eléctricas, resonancia, interferencias, etc. En este trabajo, se realizaron mediciones de calidad de energía con el fin de analizar el impacto de estas cargas alinéales en una vivienda residencial y con las mediciones obtenidas se analizaron los siguientes parámetros: Tasa de distorsión armónica de corriente, Factor de potencia, magnitudes y ángulos de fase de las corrientes armónicas. Los resultados obtenidos verificaron los efectos que producen las cargas alinéales en la instalación eléctrica.

**Palabras claves:** viviendas residenciales, distorsión armónica, calidad de energía.

**Abstract:** Technological advances in recent years have given rise to the insertion of new electrical and electronic devices in residential homes. The use of computers, televisions, rectifiers, fluorescent lamps, microwaves, etc. have caused undesired effects in the electrical networks. These loads cause a harmonic distortion of the alternating current wave by having a non-linear impedance, this leads to unwanted effects such as overheating of the conductors, increased electrical losses, resonance, interference, etc. of energy in order to analyze the impact of these non-linear loads on a residential home and with the measurements obtained, the following parameters were analyzed: Current harmonic distortion rate, Power factor, magnitudes and phase angles of the harmonic currents. Where the results obtained verified the effects produced by non-linear loads in the electrical installation.

**Keywords:** residential homes, harmonic distortion, power quality.

## Introducción

La distorsión armónica se ha estudiado principalmente en instalaciones industriales y sistemas de distribución (Elbasuony et al, 2018). Por el contrario, pocos estudios abarcan las instalaciones residenciales. En este sentido, la calidad de energía resulta de la combinación de varios factores en el sistema eléctrico. En general, la electricidad se produce, transmite y distribuye con un alto nivel de calidad a través de los sistemas de corriente alterna. Sin embargo, la proliferación de aparatos electrónicos modernos, que introducen importantes componentes armónicos en las formas de onda de corriente y tensión, junto con el uso de electrodomésticos de baja eficiencia, ha dado lugar a sistemas energéticos de baja calidad en las instalaciones residenciales (Ramirez et al, 2019). La distorsión armónica total excesiva y los factores de potencia bajos están ganando relevancia y es probable que las tarifas se modifiquen pronto para incluir los costos de la energía desperdiciada en las facturas a los usuarios finales (Ahmad et al, 2019).

En los últimos años la inserción masiva de cargas electrónicas con fuente conmutadas ha incrementado el nivel de armónicos significativamente, siendo este tipo de cargas muy frecuente en la mayoría de las viviendas residenciales (Pomilio y Deckmann, 2005). Se destacan computadoras, televisores LED, rectificadores, lámparas LED, etc.

A pesar de las actividades y resultados obtenidos en los estudios de distorsión armónica en instalaciones residenciales, la comunidad científica tiene algunas dudas sobre la gravedad del problema, ya que no hay datos de campo sistemáticos para confirmar o desaprobar las afirmaciones. Muchos creen que los armónicos de varios electrodomésticos pueden cancelarse en gran medida entre sí. Otros creen que los electrodomésticos basados en conmutación PWM de nueva generación tienen contribuciones insignificantes a los armónicos. Los hallazgos más recientes de los datos de campo se informan en (Meyer et al, 2016) (Kütt et al, 2014). Ambos artículos muestran un alto nivel de distorsiones armónicas en los sistemas residenciales europeos de BT. Pero faltan los resultados del alimentador de distribución de MT.

En este contexto, a los fines de analizar el impacto de las cargas de uso final en las instalaciones eléctricas, en este trabajo, los autores realizaron mediciones de calidad de energía con el fin de caracterizar estas cargas no lineales para luego analizar mediante factores globales, la Tasa de distorsión armónica de corriente (THDi), el Factor de potencia (FP), el Factor de Potencia de Desplazamiento (FPD), el espectro armónico y los ángulos de fase de las corrientes armónicas, entre otras variables.

## Desarrollo

Las mediciones de armónicos en las cargas eléctricas de uso final en instalaciones residenciales se efectuaron con un analizador de redes marca Dranetz, modelo 440s. El mismo está diseñado para satisfacer las normativas IEEE 1159 y IEC 61000-4-30 Clase A respecto a los requisitos de precisión y medición estándar.

La toma de datos corresponde a una medición mayor a 5 minutos donde la carga alcanza una potencia cercana a la nominal en un intervalo estable. En este caso, la medición se efectúa por captura de forma de onda de corriente post-disparo, donde la información resultante deviene del promedio de datos de 10 ciclos de la onda registrada.

El procesamiento de datos del equipo provee, a través de estas mediciones, valores de magnitudes del espectro armónico, los ángulos de fase de cada armónica, un diagrama de tendencia de potencia, la forma de onda de corriente en cada punto, la variación del valor eficaz de corriente y valores de tensión eficaz. En la fig. 1 se detalla la metodología empleada. La medición de armónicos en cada carga comprende el registro de la magnitud y fase de cada corriente armónica.

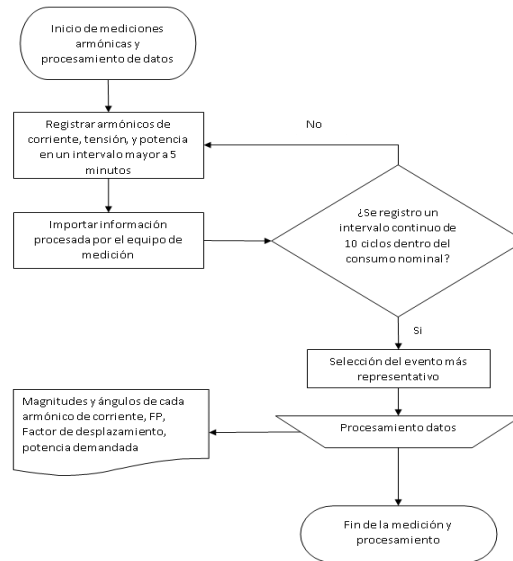


Fig. 1 Flujograma de la metodología aplicada en la medición y procesamiento de datos

Para el estudio de caracterización armónica de cada carga se registraron, además, las variables que se detallan a continuación:

**Tasa de distorsión armónica de corriente (THDi):** Es la distorsión armónica total de la forma de onda de intensidad. El cálculo se basa en la proporción del contenido de armónicos RMS frente al valor RMS del valor fundamental. Se calcula con la formula (1).

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} [\%] \quad (1)$$

Donde  $I_n$  es la corriente eficaz de cada armónica e  $I_1$  es la corriente de la componente fundamental.

**Factor de potencia de desplazamiento (FPD):** Es la relación entra la potencia activa y potencia aparente, evaluando de forma separada el flujo de potencia en su condición fundamental. Se define con la ecuación (2).

$$FPD = \cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1} \quad (2)$$

Donde  $P_1$  y  $S_1$  corresponden a la potencia activa y la potencia aparente de la componente fundamental, respectivamente.

**Factor de potencia:** Se define para condiciones de estado estacionario, una potencia activa y una potencia aparente instantánea periódica no sinusoidal con dos componentes, las componentes de frecuencia fundamental ( $P_1$  e  $S_1$ ) y la potencia armónica ( $P_H$  e  $S_H$ ). El factor se define mediante la ecuación (3)

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P_1 + P_H}{\sqrt{S_1^2 + S_H^2}} \quad (3)$$

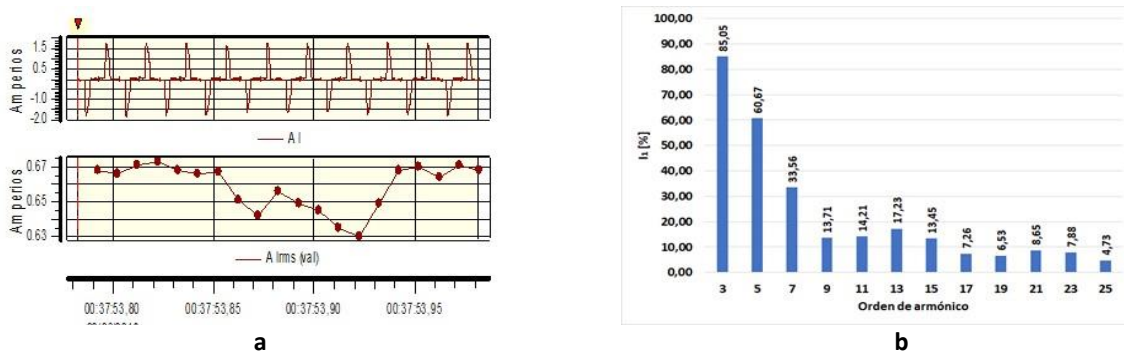
Donde  $P_H$  corresponde a la potencia activa armónica y  $S_H$  a la potencia aparente armónica.

En la elección de cargas a analizar se consideraron prácticamente todas las cargas eléctricas de uso final que se utilizan en una vivienda promedio. Las cargas de uso final medidas fueron las siguientes: impresora, aire acondicionado inverter, notebook, computadora de escritorio, heladera, ventilador, equipo de música, cargador de celular, licuadora, televisor LED, lavarropas, microondas, lámpara led 1, lámpara led 2, calientor.

## Resultados

### Demanda de potencia, forma de onda de las cargas y espectro armónico:

En base al conjunto de cargas eléctricas de uso final relevadas, se destaca que aquellas que mayor distorsión ocasionan en la onda sinusoidal corresponde a cargas de tipo electrónicas que poseen fuentes de alimentación conmutadas, las cuales utilizan técnicas de conversión de CC a CC para lograr una salida de CC uniforme. En este sentido en la Fig. 2a se muestra las formas de onda obtenidas en una computadora de escritorio. En este tipo de cargas, debido a que no hay una gran inductancia del lado de CA, la corriente de entrada a la fuente de alimentación llega en pulsos muy cortos a medida que el capacitor recupera su carga en cada medio ciclo. Una característica distintiva de las fuentes de alimentación conmutadas es su contenido de tercer armónico muy alto en la corriente.



**Fig. 2** Distorsión armónica de una computadora de escritorio: a) Forma de onda, b) Espectro armónico de corriente

Otro tipo de carga que se analizó fue el caso de un microondas que utiliza un magnetrón de cavidad resonante para elevar la tensión y desarrollar una onda electromagnética de alta frecuencia. Se observa en la Fig. 3a una forma de onda levemente deformada, caracterizada por la conformación de un segundo pico en cada semiperíodo.

Respecto a cargas de tipo motrices, en la Fig. 4a, se muestra la forma de onda prácticamente sinusoidal obtenida en una heladera. Los motores eléctricos presentan un circuito electromagnético convencional de tipo RL, y si están construidos de forma simétrica y con las técnicas de atenuación adecuadas de los armónicos espaciales, no constituyen una fuente de distorsión de la corriente.

En la Fig. 2b, se muestra el espectro de frecuencias correspondiente a la computadora de escritorio. Se destaca que los armónicos de orden 3, 5 y 7 son los de mayor amplitud. La armónica con mayor amplitud es la de orden 3, cuyo valor medio resultó de 85,05 %. Esta armónica posee secuencia homopolar y se relaciona de forma directa con la corriente en el conductor neutro de los sistemas trifásicos. La Fig. 3b se muestra el espectro de frecuencias de un microondas donde la armónica de mayor amplitud también corresponde a la de orden 3, con respecto a la carga con fuente conmutada (computadora de escritorio) presenta una amplitud de 50,82 %. En la Fig. 4b se muestra el espectro de frecuencias correspondiente a la heladera, la mayor amplitud corresponde a la armónica de orden 3, con respecto a la carga con fuente conmutada (computadora de escritorio) presenta 13,19% menor en amplitud.

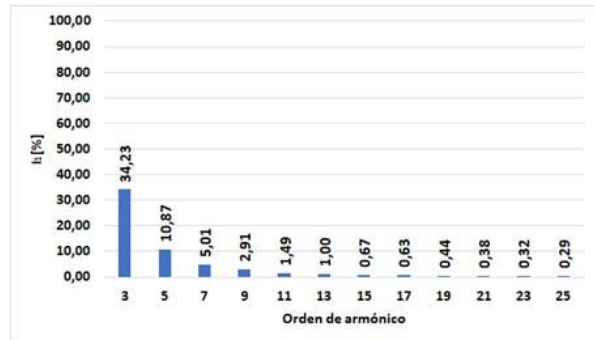
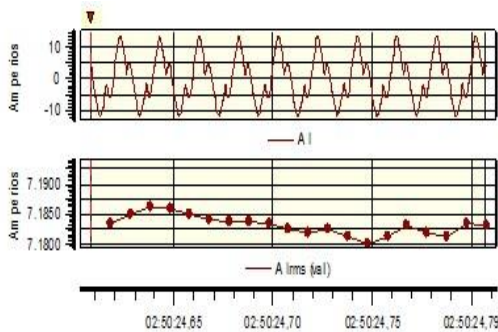


Fig. 3 Distorsión armónica de un microondas: a) Forma de onda, b) Espectro armónico de corriente

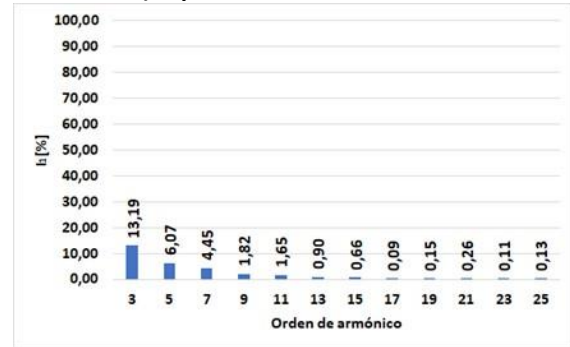
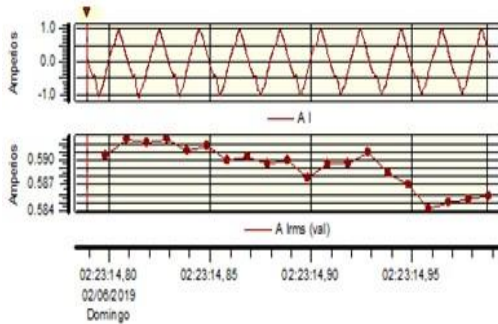


Fig. 4 Distorsión armónica de una heladera: a) Forma de onda, b) Espectro armónico de corriente

**Niveles globales de THD de corriente:**

En la Fig. 5 se representa la medición de THD de corriente para cada carga medida. Se destaca que la carga correspondiente al microondas posee la mayor tasa de THD de corriente, esto es debido a que tiene el mayor consumo de corriente con respecto a las otras cargas.

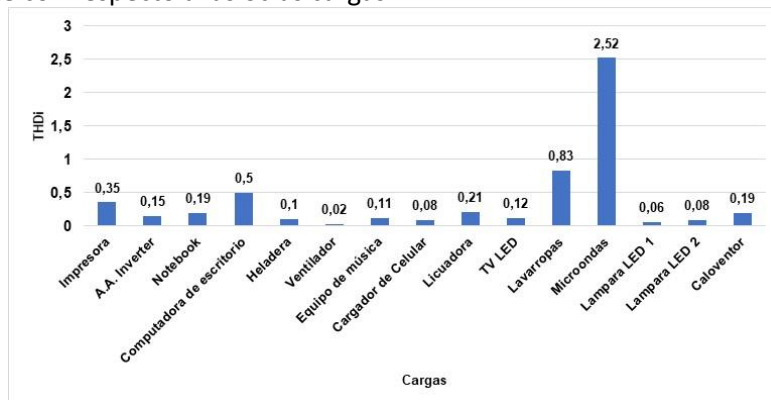


Fig. 5 THD de corriente

**Niveles globales Factor de potencia y Factor de potencia de desplazamiento:**

En la Fig. 6 se muestran los resultados de mediciones correspondientes al FP y el FPD. En las cargas con fuentes conmutadas (notebook, televisor LED, lámparas LED, cargador de celular, computadora de escritorio) se obtuvo un FP lejano a 1.

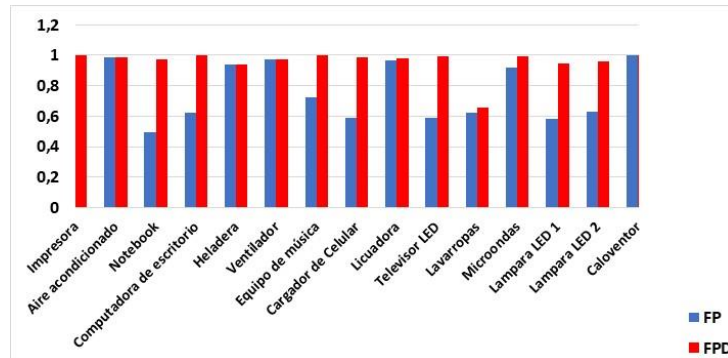


Fig. 6 Factor de potencia y Factor de potencia de desplazamiento

**Análisis de las magnitudes y ángulos de fase de las corrientes armónicas:**

En la Fig. 7 se muestra con diagramas polares y de forma individualizada la amplitud y ángulo de fase para las armónicas de corriente de todas las cargas medidas. Se observa que las armónicas con amplitudes más relevantes en la corriente (en general, las de orden 3, 5, 7) se ubican en la misma zona del diagrama polar. A medida que se consideran armónicas de mayor orden (y menor amplitud) la variabilidad en los ángulos de fase se incrementa. Esto se observa principalmente para las armónicas de orden 13 en adelante. Resulta esperable la compensación de armónicas de alta frecuencia (en general, orden >13), que a su vez poseen amplitudes relativamente bajas. En otras palabras, la conexión masiva de estas cargas en la red puede contribuir a auto-cancelar la presencia de sus armónicas de alta frecuencia, pero no a las armónicas de baja frecuencia (orden 3, 5, 7), dado que su ángulo de fase es similar, estas se adicionan entre sí de forma casi aritmética.

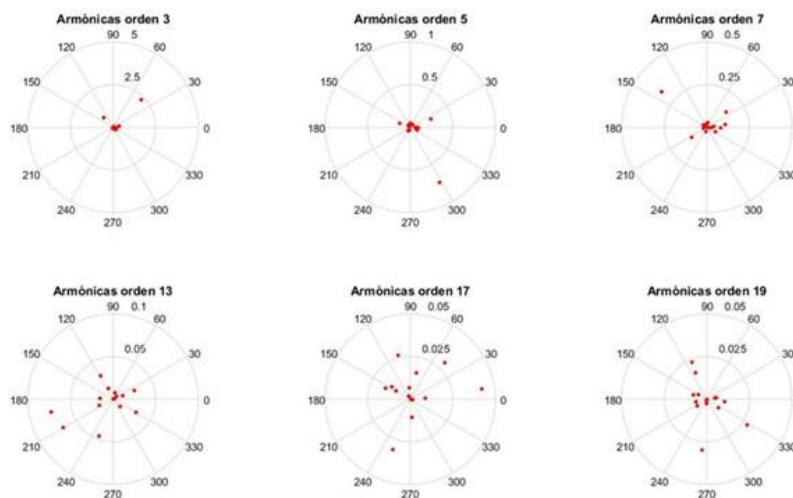


Fig. 7 Amplitud y fase de las armónicas de corriente para el conjunto de cargas medidas

## Conclusiones

En el trabajo se identifica que las cargas no lineales con diferente tecnología pueden afectar en distinto modo a la onda de corriente. Se destaca como carga más perjudicial para la red las que poseen fuente conmutada, en segundo lugar, las fuentes con inversores y por último las cargas motrices.

Los armónicos que más prevalecieron fueron los impares de órdenes bajos, tales como el 3, 5, 7 y 9. Destacando, además, que los mismos no presentan un efecto de autocancelación para el conjunto de cargas evaluadas, pues los ángulos de fase resultan similares para órdenes de armónicos de diferentes cargas. En efecto, se destaca que las componentes de corriente del tercer armónico retornan por el neutro en un sistema trifásico, por lo cual la aplicación cada vez mayor de fuentes de alimentación conmutadas puede contribuir a una potencial sobrecarga de los conductores neutros. En lo que refiere a la red de distribución, la inyección a la red de estos componentes armónicos, por parte de usuarios residenciales, puede contribuir al fenómeno de desclasificación en los transformadores de distribución, ocasionando sobrecalentamientos y pérdida de eficiencia en los mismos.

## Referencias

- Ahmad, A., Kashif, S.A.R., Saqib, M.A., Ashraf, A., Shami, U.T. (2019). Tariff for reactive energy consumption in household appliances, *Energy*, vol. 186, article 115818.
- Elbasuony, G.S., Abdel-Aleem, S.H.E., Ibrahim, A.M., Sharaf, A.M. (2018). A unified index for power quality evaluation in distributed generation systems, *Energy*, vol. 149, pp. 607-622.
- Kütt, L., Saarijärvi, E. Lehtonen, M., Mölder, H., Vinnal, T. (2014). Harmonic load of residential distribution network – case study monitoring results. *Electric Power Quality and Supply Reliability Conference*, Rakvere, pp. 93-98, 11-13.
- Meyer, J., Castaneda, A. B., Domagk, M. Schegner, P. (2016). Assessment of prevailing harmonic current emission in public low voltage networks. *IEEE Trans. on Power Delivery*.
- Pomilio, J. A., Deckmann, S. M. (2005). Characterization and compensation for harmonics and reactive power of residential and commercial loads. *Anais do 8º Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência, COBEP 2005*, Recife, 14-17.
- Ramirez-Ramirez, A., Jimenez-Reyes, V. F., Velez-Enriquez, J. A., Leal-Ortiz, S., & Garcia-Guzman, J. (2019). Study of harmonic content and influence of common electrical appliances used in residential installations. *2019 IEEE International Conference on Engineering Veracruz (ICEV)*. doi:10.1109/icev.2019.8920620