

CASO DE ESTUDIO:

DISTORSIÓN ARMÓNICA EN UN CONDOMINIO

José Joaquín Brenes Orozco - B61220

Daniel Neira Arrieta - B85625

SINOPSIS

La presencia creciente de cargas no lineales en los entornos residenciales modernos, incluyendo luminarias LED, electrodomésticos con electrónica de potencia, inversores fotovoltaicos y cargadores de vehículos eléctricos, ha incrementado los niveles de distorsión armónica en los condominios. Diversos estudios han demostrado que estas tecnologías producen corrientes altamente distorsionadas que se propagan a través de las redes internas y pueden afectar la calidad de energía [1]. Este fenómeno provoca sobrecalentamientos, reducción de la vida útil de los equipos y fallos en dispositivos sensibles [7], [8]. El presente trabajo analiza la distorsión armónica en un condominio real, apoyándose en investigación científica para evaluar su severidad y establecer lineamientos de mitigación.

DISTORSIÓN ARMÓNICA

La distorsión armónica es uno de los problemas de calidad de energía más relevantes en sistemas residenciales debido a la creciente adopción de dispositivos basados en electrónica de potencia. A diferencia de las cargas lineales tradicionales, los equipos modernos operan mediante rectificación o conversión electrónica, absorbiendo corrientes de forma no senoidal y generando componentes armónicas que se superponen a la frecuencia fundamental. Estudios recientes han modelado múltiples cargas domésticas, demostrando que electrodomésticos comunes como televisores, computadoras, refrigeradoras inverter y cargadores electrónicos pueden presentar niveles significativos de distorsión, con THD de corriente que supera el 40 % e incluso alcanza valores más elevados en condiciones específicas [1], [5].

La iluminación LED, ampliamente utilizada en viviendas y áreas comunes, constituye otra fuente importante de armónicos. Investigaciones han documentado que ciertos modelos, especialmente aquellos sin corrección activa del factor de potencia, exhiben contenido armónico elevado que puede contribuir de forma significativa a la distorsión total de la corriente en la red residencial [3]. En consecuencia, el perfil de distorsión armónica presenta variaciones considerables dependiendo del horario y del comportamiento de los usuarios, alcanzando valores entre 20 % y 50 % en las acometidas residenciales durante periodos de alta utilización de cargas electrónicas [1], [4].

A nivel de red compartida, como ocurre en condominios, los armónicos generados en cada vivienda se suman y se propagan hacia los tableros principales y el transformador. La literatura muestra que los armónicos de secuencia cero, especialmente los de tercer orden, tienden a acumularse en el conductor neutro, lo que puede provocar sobrecorrientes y pérdidas térmicas adicionales en los equipos de distribución [7], [8]. Estas condiciones incrementan la temperatura en cables y transformadores y contribuyen al envejecimiento prematuro de la infraestructura eléctrica.

Entre las cargas modernas, los cargadores de vehículos eléctricos se han convertido en una fuente emergente de distorsión significativa. Estudios en condominios con infraestructura de carga han reportado incrementos marcados en el THD de corriente, especialmente durante los ciclos nocturnos de carga, donde se observa un aumento de entre 15 % y 25 % respecto a las condiciones normales [2]. Estos cargadores, predominantemente monofásicos, generan además desequilibrios entre fases y un aumento considerable de la corriente en el neutro, afectando la estabilidad del sistema de baja tensión.

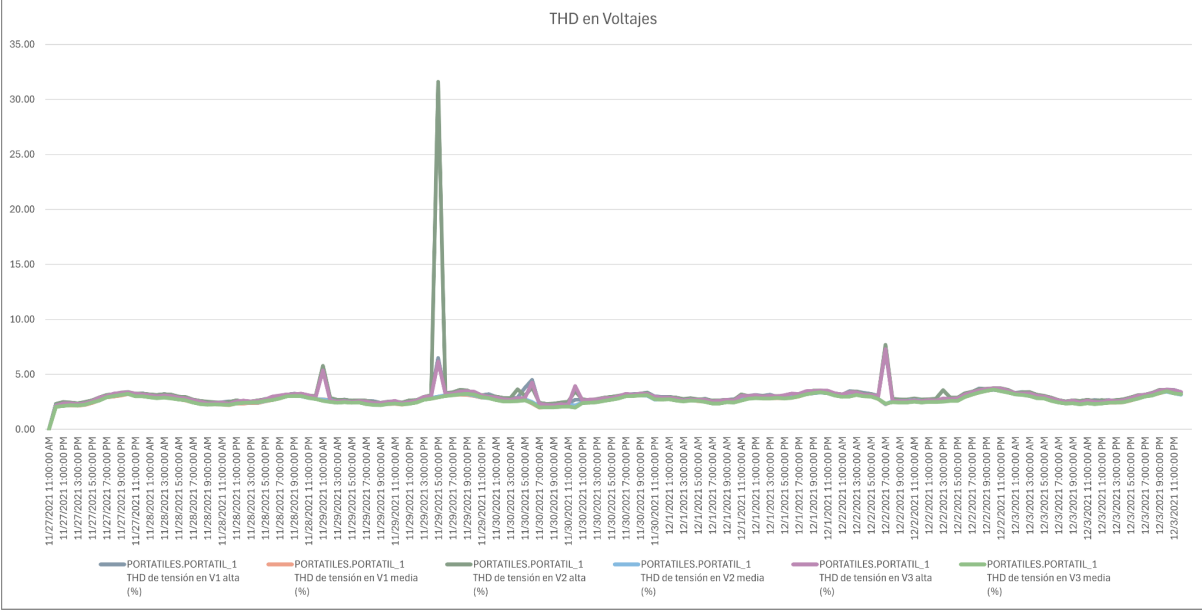
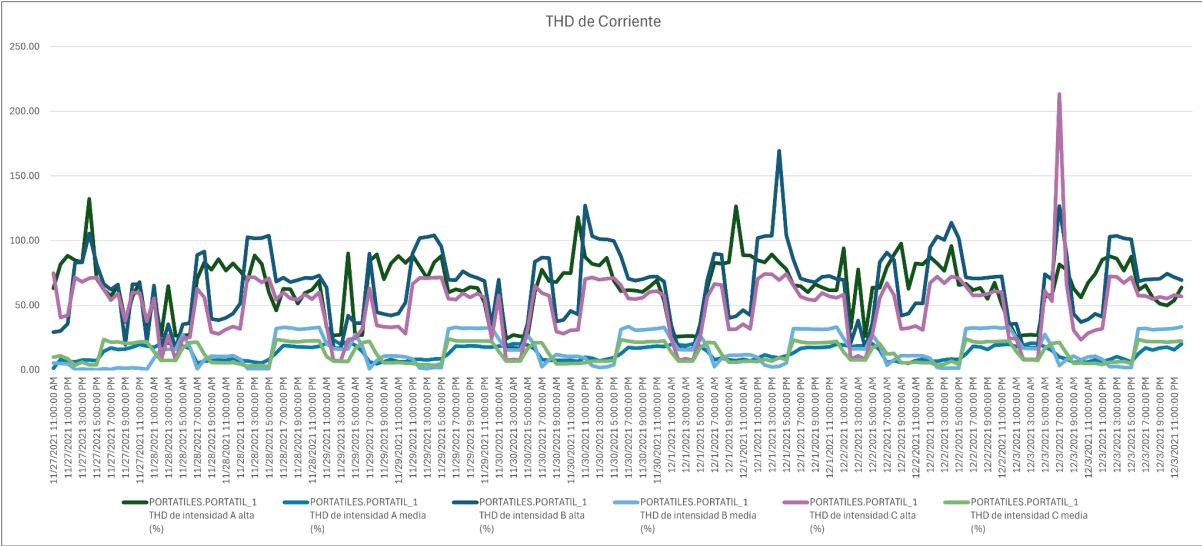
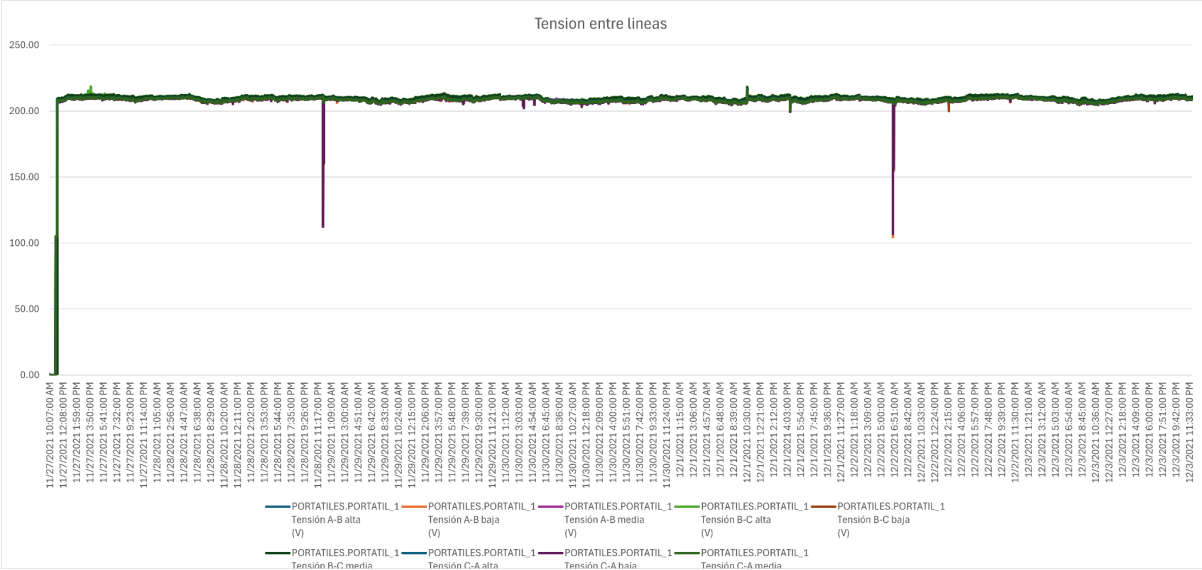
Aunque la distorsión de tensión suele mantenerse dentro de los límites aceptados gracias a la rigidez del transformador, se han registrado picos de distorsión asociados a la conmutación de cargas electrónicas, fallas momentáneas en inversores o interacciones resonantes con bancos de capacitores mal diseñados [7]. Estos eventos pueden afectar el funcionamiento de equipos sensibles, como UPS, variadores de frecuencia o sistemas de control.

La literatura también ofrece diversas estrategias de mitigación, entre ellas el uso de filtros pasivos sintonizados, filtros activos, transformadores K-rated y configuraciones híbridas que combinan ambos enfoques [7], [9]. Adicionalmente, se recomienda la selección de equipos certificados con límites de emisión armónica y el seguimiento de buenas prácticas en la instalación de luminarias LED y sistemas de carga de vehículos eléctricos [3], [5]. Modelos avanzados de análisis y simulación han permitido desarrollar metodologías que facilitan predecir la propagación de armónicos y optimizar soluciones para redes residenciales con alta penetración de cargas no lineales [4], [6], [9].

En conjunto, la teoría demuestra que la distorsión armónica en condominios es un fenómeno creciente y directamente relacionado con el uso intensivo de electrónica de potencia. Su comprensión es esencial para evaluar adecuadamente la calidad de energía y para definir estrategias de mitigación que permitan proteger la infraestructura eléctrica y mejorar la confiabilidad del sistema.

CASO REAL

Las mediciones utilizadas en este estudio provienen del tablero principal de un Condominio, donde se instaló un analizador portátil para registrar tensión, corriente y contenido armónico durante varios días.



Análisis de Distorsión Armónica en un Condominio Residencial

Para evaluar el comportamiento de la calidad de energía en un condominio residencial, se utilizan mediciones continuas de tensión, corriente y contenido armónico de varios días. El análisis se centró en el THD de tensión, THD de corriente, y en la evolución de los armónicos individuales (1° , 3° y 5°). Los resultados permiten identificar tendencias claras, compararlas con el comportamiento descrito en la teoría y establecer hipótesis sobre las causas de las distorsiones observadas.

1. Comportamiento del THD de Tensión

Los valores de THD de tensión se mantienen, durante la mayor parte del periodo medido, entre 2 % y 4 %, lo cual se encuentra dentro de los límites recomendados por IEEE 519 para sistemas residenciales de baja tensión (≤ 5 %). Sin embargo, aunque estos valores cumplen formalmente con la normativa, siguen considerándose relativamente altos para un sistema residencial y evidencian la presencia sostenida de cargas no lineales que afectan la forma de onda de la tensión.

Estos picos no representan un comportamiento normal del sistema y sugieren la ocurrencia de fenómenos transitorios asociados a cargas electrónicas de potencia. Estudios previos han demostrado que la conmutación abrupta de inversores, fallas en cargadores electrónicos o el comportamiento anómalo de UPS pueden generar picos súbitos de distorsión armónica en la tensión [7], [8].

A pesar de estos picos, la red muestra una buena rigidez: los armónicos de corriente elevados no se traducen en distorsiones de tensión sostenidas, lo cual coincide con lo reportado en residenciales donde el transformador es capaz de suavizar el impacto de armónicos de corriente generados por múltiples viviendas [3]. Sin embargo, la presencia de estos eventos extremos justifica una revisión más detallada de equipos electrónicos de mayor potencia que puedan haber inducido estas perturbaciones.

2. Tensiones entre Líneas y Posibles Sags Momentáneos

Al analizar la gráfica de tensión entre líneas, se observa un comportamiento estable en los alrededores de 205–210 V para la mayor parte del registro. No obstante, aparecen caídas abruptas por debajo de 150 V e incluso cercanos a 100 V en ciertos momentos. Estos eventos, aunque puntuales, son significativos y podrían indicar:

- Conexión de cargas de alta demanda, generando caídas momentáneas en el alimentador.
- Transitorios asociados a equipos con electrónica de potencia.
- Condiciones de sobrecarga temporal o fallos breves en la red interna del condominio.

Los descensos de tensión coinciden, temporalmente, con algunos incrementos en el THD tanto de tensión como de corriente, lo cual refuerza la posibilidad de que equipos electrónicos —como bombas, variadores o cargadores de vehículos eléctricos— estén generando transitorios complejos, consistentes con lo reportado en estudios similares [2], [7].

3. Análisis del THD de Corriente

El comportamiento del THD de corriente es significativamente más severo que el de tensión. A lo largo del periodo de medición, los valores varían de manera frecuente entre 40 % y 100 %, con múltiples picos que superan 120 %, y un evento extremo que alcanza aproximadamente 200 %.

Estas magnitudes son consistentes con las tendencias señaladas en la literatura para ambientes residenciales con alta presencia de cargas no lineales. Electrodomésticos con electrónica de potencia, refrigeradoras inverter, iluminación LED y equipos electrónicos de entretenimiento pueden generar THD de corriente superiores al 40–70 % [1], [3], [5]. El registro obtenido en este condominio confirma este comportamiento y sugiere que existe una porción significativa de cargas de este tipo distribuidas en los apartamentos.

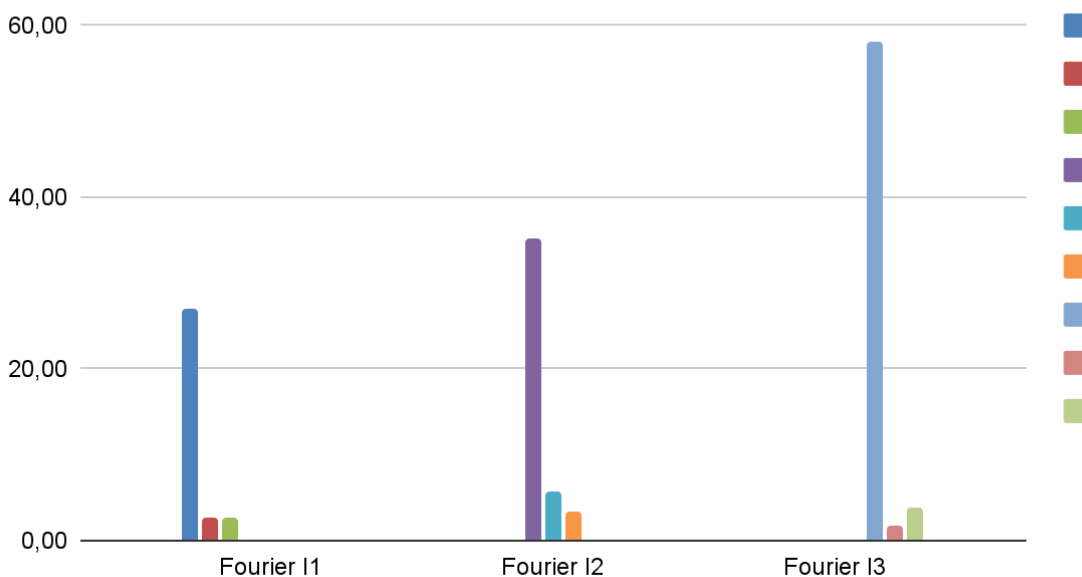
Además, se aprecia repetitividad diaria: durante las tardes y noches —cuando aumenta el uso de electrodomésticos— el THD de corriente tiende a elevarse. Este patrón coincide con el reportado en estudios residenciales donde el perfil armónico depende fuertemente del comportamiento del usuario, alcanzando sus valores más altos en horarios de mayor ocupación [1], [4].

La Fase B destaca particularmente por presentar picos más altos y recurrentes que las demás fases. Esto podría deberse a una concentración de cargas no lineales o a la presencia de un equipo específico de mayor impacto (por ejemplo, una bomba con variador o un cargador monofásico de vehículo eléctrico). Investigaciones en condominios con EV chargers han demostrado que estos dispositivos pueden aumentar el THD en una fase entre 15 % y 25 % durante los periodos de carga, especialmente en sistemas monofásicos [2]. El comportamiento observado en este caso sugiere un fenómeno similar.

4. Armónicos Individuales: 1°, 3° y 5°

- 1er armónico
 - Se observan fluctuaciones entre 10 % y 40 %, lo cual indica deformación en la frecuencia y magnitud de onda de corriente. Esto es común cuando existen cargas con variadores o fuentes de potencia conmutadas operando en modos variables [5].
- 3er armónico
 - El 3er armónico presenta valores sostenidos entre 2 % y 4 %, con picos ocasionales. Dado que los armónicos de orden 3 son de secuencia cero, tienden a sumarse en el neutro del sistema, lo que puede generar sobrecorrientes en dicho conductor [8]. Su presencia constante sugiere la operación simultánea de múltiples cargas monofásicas no lineales, como luminarias LED o equipos electrónicos pequeños.
- 5to armónico
 - Los picos del 5to armónico superan en ocasiones el 10 %, lo que podría atribuirse a interacción entre cargas con rectificación de onda completa y variadores de velocidad. El 5to armónico es uno de los más frecuentes en sistemas residenciales con alta presencia de electrónica de potencia [6].
 - La combinación de estos armónicos confirma un entorno eléctrico con predominio de cargas no lineales, consistente con los perfiles residenciales modernos descritos en [9].

Espectro de Fourier para 1er, 3er y 5to armónico en el momento de máxima demanda



CONCLUSIÓN

El análisis de las mediciones confirma que este condominio presenta un nivel de distorsión armónica elevado, impulsado principalmente por cargas no lineales distribuidas en las viviendas y posiblemente por equipos de mayor potencia conectados a fases específicas. El THD de tensión se mantiene mayormente dentro de los límites permitidos, aunque eventos aislados indican la presencia de perturbaciones transitorias significativas. Por otro lado, el THD de corriente es sistemáticamente alto, con valores que exceden ampliamente los rangos recomendados para instalaciones residenciales.

La evidencia coincide plenamente con las tendencias reportadas en la literatura científica: los condominios modernos, al concentrar grandes cantidades de aparatos con electrónica de potencia, presentan perfiles armónicos elevados que requieren monitoreo continuo y estrategias de mitigación, incluyendo filtros activos o pasivos, cargas distribuidas de manera equilibrada entre fases y selección adecuada de equipos electrónicos con menor emisión armónica [7], [9].

REFERENCIAS

- [1] ScienceDirect, “Modelado de distorsiones armónicas por cargas no lineales en casas.” Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123025005614>
- [2] ProQuest / SIBDI, “Impacto de los cargadores de vehículos eléctricos en condominios, con datos de casos reales en Bangkok, Thailand.” Disponible en: <https://www.proquest.com/docview/3217722664/fulltextPDF/3C44D424ACB9435FPQ/1?accountid=28692&sourcetype=Scholarly%20Journals>
- [3] IEEE Xplore / SIBDI, “Uso masivo de lámparas LED en sectores residenciales y su impacto significativo en los armónicos.” Disponible en: <https://ieeexplore.proxyucr.elogim.com/document/9808589>
- [4] ProQuest / SIBDI, “Distorsión de armónicos con los equipos modernos, luces y carros eléctricos en residenciales. Identificación de etapas para el modelado, propagación y análisis.” Disponible en: <https://www.proquest.com/docview/1995199269/fulltextPDF/FCE987B8AEB24845PQ/1?accountid=28692&sourcetype=Scholarly%20Journals>
- [5] IEEE Xplore / SIBDI, “Características de los armónicos producidos por electrodomésticos basados en electrónica de potencia, su nivel de cancelación y comparación con zonas comerciales e industriales.” Disponible en: <https://ieeexplore.proxyucr.elogim.com/document/7563330>

[6] ScienceDirect / SIBDI, "Modelado de distorsiones armónicas residenciales a causa de motores, inversores y otros equipos." Disponible en:
<https://sciencedirect.proxyucr.elogim.com/science/article/pii/S0378779618301597>

[7] IEEE Xplore / SIBDI, "Estudio de distorsiones armónicas en residenciales y alternativas de compensación reactiva en residenciales de baja tensión." Disponible en:
<https://ieeexplore.proxyucr.elogim.com/document/6128873>

[8] IEEE Xplore / SIBDI, "Impacto de los armónicos en las cargas residenciales." Disponible en: <https://ieeexplore.proxyucr.elogim.com/document/6268306>

[9] IEEE Xplore / SIBDI, "Esquema para mitigación de las distorsiones armónicas en sistemas de distribución de residenciales modernos." Disponible en:
<https://ieeexplore.proxyucr.elogim.com/document/7165670>