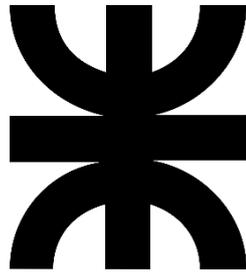


VITTI JAVIER OSCAR



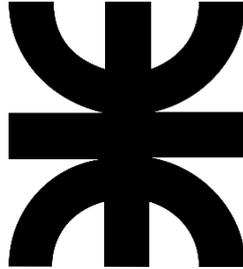
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL

Facultad Regional Reconquista

**ANÁLISIS DE LOS EFECTOS PERJUDICIALES DE LAS CARGAS ELÉCTRICAS
NO LINEALES EN VIVIENDAS UNIFAMILIARES**

Reconquista, 2023

VITTI JAVIER OSCAR



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
Facultad Regional Reconquista

**ANÁLISIS DE LOS EFECTOS PERJUDICIALES DE LAS CARGAS ELÉCTRICAS
NO LINEALES EN VIVIENDAS UNIFAMILIARES**

Proyecto Final presentado en cumplimiento de las exigencias de la Carrera Ingeniería Electromecánica de la Facultad Regional Reconquista.

Docentes:

Mg. Ing. Anton, Daniel E.

Mg. Ing. Colman, Gabriel P.

Asesores:

Ing. Mancuello, Cristian.

Ing. Talijancic, Iván.

Reconquista, 2023

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por el sostén incondicional a lo largo de toda mi formación académica, el respaldo que cada integrante me brindó ha sido fundamental y me ha impulsado a alcanzar mis metas. En particular, quiero agradecer a mi madre Mercedes por el invaluable apoyo que me dio, a mí hermana Daniela por su incansable acompañamiento, a mi hermana Lucina por su valioso aporte en la revisión lingüística y a mi padre, el ingeniero Oscar, por el inestimable apoyo técnico.

A la Facultad Regional Reconquista por proporcionarme no solo la invaluable formación profesional, sino también un espacio en el que explorar diferentes intereses intelectuales.

A mis compañeros de estudio y amigos por ser una fuente constante de colaboración y apoyo, con quienes compartir discusiones y charlas entre mates ha hecho más llevadero el camino transitado.

A todas las familias que generosamente facilitaron la realización de este estudio, brindando su tiempo y espacio para la medición de los aparatos eléctricos y permitiendo acceso a sus viviendas.

Finalmente, al Ing. Walter Capeletti y al Ing. Iván Talijancic por facilitar el préstamo de los instrumentos de medición empleados en este trabajo.



RESUMEN

En la actualidad, el aumento de dispositivos electrónicos en viviendas, incluyendo aquellos electrodomésticos con tecnologías modernas de operación y control, conllevan una mayor presencia de distorsión armónica en la red eléctrica residencial. Esto deteriora la calidad de la energía y causa problemas como el sobrecalentamiento de conductores, disparos intempestivos de protecciones y disminución del factor de potencia. Las consecuencias aparejadas a los armónicos provocan que sea necesario considerarlos y estudiarlos en detalle en instalaciones eléctricas comerciales o industriales de gran envergadura debido al impacto negativo que pueden ocasionar.

En este trabajo, se aborda la problemática de la distorsión armónica en viviendas unifamiliares con el fin de contribuir a un tema escasamente abordado. El objetivo es diagnosticar los efectos perjudiciales que las cargas no lineales acarrearán en las instalaciones eléctricas domiciliarias y proponer medidas que disminuyan tales efectos.

Con dicho propósito, se muestran los resultados de la distorsión armónica resultante de diferentes cargas eléctricas residenciales y, además, se presentan mediciones efectuadas en diferentes viviendas donde se evidencia la presencia de armónicos y su influencia en la instalación eléctrica. Para concluir, se evalúan técnicas de mitigación, como el empleo de filtros pasivos y/o activos y su posible aplicación.

Finalmente, se espera proporcionar una base para futuras investigaciones que puedan abordar de manera específica los desafíos relacionados con la distorsión armónica presente en más entornos, contribuyendo así a la eficiencia energética y a la mejora de la calidad de energía.

Palabras claves: distorsión armónica, cargas no lineales, viviendas.



ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	2
RESUMEN	3
ÍNDICE.....	4
INTRODUCCIÓN	10
CAPÍTULO 1: FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	13
1. Tipos de cargas	13
1.1. Cargas lineales	13
1.1.1. Caso límites	14
1.1.2. Caso general: impedancia compleja.....	15
1.2. Cargas no lineales	16
2. Análisis armónico	16
2.1. Series de Fourier	16
2.2. Definición matemática	17
2.3. Convergencia de las Series de Fourier.....	18
2.4. Paridad de las funciones.....	19
3. Caracterización de armónicos eléctricos.....	19
3.1. Secuencia.....	20
3.2. Armónicos en corriente y en tensión.....	21
3.3. Definiciones matemáticas	21
3.3.1. Corriente eficaz o RMS.....	21
3.3.2. Distorsión Armónica Total.....	22
3.3.3. Distorsión Total de la Demanda.....	22
3.4. Reconstrucción de la onda	23
4. Potencias	23
4.1. Potencia activa	23



4.2. Potencia reactiva	24
4.3. Potencia aparente	24
4.4. Potencia de distorsión	24
5. Eficiencia energética.....	25
5.1. Factor de potencia en cargas lineales	25
5.2. Factor de potencia en cargas no lineales y factor de distorsión	25
6. Fuentes de armónicos.....	27
CAPÍTULO 2: PROBLEMÁTICAS Y NORMATIVAS VIGENTE ASOCIADAS A LAS CARGAS NO LINEALES	28
1. Problemáticas asociadas a las cargas no lineales.....	28
1.1. Problemáticas en conductores	28
1.2. Problemáticas en motores de inducción.....	29
1.3. Problemáticas en protecciones eléctricas	30
1.4. Problemáticas en instrumentos de medición.....	31
1.5. Problemáticas en el sistema de distribución.....	32
1.5.1. Problemáticas en banco de capacitores	32
1.5.2. Problemáticas en transformadores.....	32
2. Normativa asociada a cargas no lineales	33
2.1. Normativa a nivel internacional.....	33
2.1.1. IEEE 1159-2019: Práctica recomendada para monitorear la calidad de la energía eléctrica.....	34
2.1.2. IEEE 519-2014: Prácticas recomendadas y requisitos para el control de armónicos en sistemas de energía eléctrica	34
2.1.3. Norma EN 50160: Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución	35
2.1.4. IEC 61000.....	35
2.2. Normativas vigentes a nivel nacional	39



2.2.1. Disposición ENRE 0012/2009	39
2.2.2. Resolución ENRE 0390/2001	40
2.2.3. Resolución ENRE 0184/2000	40
2.2.4. Resolución ENRE 0099/1997	40
2.2.5. Reglamento AEA	41
2.3. Normativa vigente a nivel empresa prestataria del servicio eléctrico.....	42
CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE CONTENIDO DE ARMÓNICOS EN CARGAS PARTICULARES	43
1. Consideraciones	43
1.1. Selección de cargas	43
1.2. Metodología de medición.....	44
1.2.1. Analizador de redes	44
1.2.2. Esquema de conexión.....	44
1.2.3. Ajuste.....	46
1.3. Software y tratamiento de datos.....	47
1.3.1. Implementación de macros en VBA	47
1.3.2. Descarga de datos.....	48
1.4. Metodología de medición y análisis.....	48
1.4.1. Medición de armónicos de muy corto tiempo.....	48
1.4.2. Medición de armónicos de corto tiempo	48
1.4.3. Elección	49
2. Registros y análisis de contenido de armónicos en cargas individuales.....	49
2.1. Aires acondicionados	50
2.2. Equipos de audio	52
2.3. Estabilizadores de tensión.....	54
2.4. Freezer.....	56



2.5. Heladeras.....	56
2.6. Herramientas Portátiles	58
2.7. Hornos	59
2.8. Lavarropas.....	60
2.9. Luminarias.....	62
2.9.1. Luminarias con potencia de entrada superior a 25W	63
2.9.2. Luminarias con potencia de entrada inferior o igual a 25W	64
2.10. Microondas.....	67
2.11. Ordenadores Personales	69
2.12. Otros Aparatos	71
2.13. Reguladores de Velocidad	72
2.14. Televisores	75
2.15. Ventiladores	77
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE CONTENIDO DE ARMÓNICOS EN VIVIENDAS UNIFAMILIARES	78
1. Consideraciones	78
2. Metodología.....	78
2.1. Cloud Energy Meter.....	78
2.2. Viviendas analizadas.....	79
2.3. Registros recolectados.....	80
2.3.1. Análisis de registros	80
2.3.2. Estadística aplicada	81
3. Resultados y discusiones.	82
3.1. THD en corriente.....	82
3.2. Intensidad de corriente	84
3.2.1. Análisis intensidad de corriente vs THDi.....	86



3.2.2. Análisis de corrientes armónicas inyectadas	88
3.2.3. Análisis de la Distorsión de Demanda Total (TDD)	90
3.3. Factor de potencia	91
3.3.1. Análisis THDi vs Factor de Potencia	93
3.4. Potencia aparente	95
3.4.1. Análisis potencia aparente vs factor de potencia.....	97
3.5. Tensión y THDv.....	98
CAPÍTULO 5: ANÁLISIS Y FACTIBILIDAD DE MITIGAR LOS EFECTOS DE LA PERTURBACIÓN ARMÓNICA SOBRE APARATOS E INSTALACIONES.....	102
1. Análisis de los efectos de la distorsión armónica	102
1.1. Sobre la eficiencia energética.....	102
1.2. Sobre conductores	103
1.3. Sobre dispositivos de protección.....	104
1.3.1. Dispositivos Diferenciales de corriente Residual (DDR).....	104
1.3.2. Pequeños Interruptores Automáticos (PIAs).....	107
2. Métodos para mitigar la presencia de componentes armónicos	108
2.1. Conexión especial de transformadores.....	108
2.2. Reubicación de cargas y/o cancelación de pasos de compensación reactiva.....	108
2.3. Filtros pasivos	109
2.3.1. Filtro sintonizado.....	109
2.3.2. Filtros desintonizados.....	110
2.3.3. Otros tipos de filtros	110
2.4. Filtros activos	111
2.4.1. Convertidores limpios	111
2.4.2. Compensadores activos	112
2.5. Filtros híbridos	112



3. Factibilidad de incorporar filtros	113
3.1. Factibilidad técnica	113
3.1.1. Filtros comerciales	114
3.1.2. Consideraciones acerca del diseño de filtros pasivos.....	115
3.2. Factibilidad económica	117
3.3. Evaluación de la seguridad eléctrica en viviendas en la actualidad.....	118
3.4. Consideraciones finales.....	118
RESULTADOS	120
CONCLUSIONES	123
PERSPECTIVAS DE FUTUROS TRABAJOS	124
BIBLIOGRAFÍA	125
ANEXO I: Notación fasorial	130
ANEXO II: Desarrollo matemático de potencia eléctrica	132
ANEXO III: Desarrollo de los valores característicos de una señal eléctrica senoidal	135
ANEXO IV: Fenómeno y problemas de resonancia.....	138
ANEXO V: Macros implementadas en VBA para las mediciones particulares.....	141
ANEXO VI: Registro y detalles de cargas individuales.....	145
ANEXO VII: Evaluación de cargas individuales de acuerdo a la norma IEC 61000-3-2.....	162
ANEXO VIII: Registro detallado de las viviendas unifamiliares medidas.	165
ANEXO IX: Macros implementadas en VBA para las mediciones domiciliarias	179
ANEXO X: Algoritmos relevantes implementados desde Mathematica.....	181
ANEXO XI: Análisis de corrientes armónicas inyectadas de acuerdo a la resolución ENRE 0099/1997	184
ANEXO XII: Datasheet de los filtros comerciales	185
ANEXO XIII: Diseño y cálculo preliminar de un filtro pasivo.....	190



INTRODUCCIÓN

En la actualidad, existe un crecimiento sustancial de la cantidad de dispositivos electrónicos que se encuentran conectados a la red eléctrica en una vivienda residencial: desde equipos electrónicos de comunicación o confort (ordenadores personales, televisores, equipos de audio, etc.) hasta electrodomésticos (aires acondicionados, heladeras, lavarropas, etc.). Además, es cada vez más frecuente y necesario que estos dispositivos incorporen más sistemas electrónicos de operación y control.

Una considerable cantidad de estos aparatos es fuente emisora de distorsión armónica en la red eléctrica, donde, bajo ciertas condiciones, esta puede deformar la forma de onda, afectar la amplitud y alterar la simetría de voltaje, es decir, empeora la calidad de la energía eléctrica a nivel domiciliario. Además, la distorsión armónica trae problemas como el sobrecalentamiento de los conductores, el disparo intempestivo de protecciones y el empeoramiento del factor de potencia.

El objetivo del presente proyecto final de carrera consiste en identificar, determinar y analizar los efectos perjudiciales que las cargas no lineales acarrearán en las viviendas unifamiliares para posteriormente estudiar la factibilidad de utilizar técnicas para mitigarlos.

La metodología que se sigue a lo largo del proyecto consiste en una búsqueda bibliográfica extensiva, seguida de una investigación de campo y descriptiva, de la situación actual en viviendas de la región.

Se espera que el proyecto beneficie a la comunidad (tanto a nivel usuario como a nivel empresa prestataria del servicio eléctrico) al ofrecer información actual acerca de los efectos perjudiciales que las cargas no lineales acarrearán en las instalaciones eléctricas domiciliarias, y brindar, además, propuestas que morigeren dichos efectos.

Finalmente, para mi formación profesional, será una manera de demostrar las competencias, habilidades y actitudes adquiridas a lo largo de la carrera, las cuales se evidenciarán en el empleo de instrumentos de medición, el manejo y análisis de datos obtenidos y la generación de información a través de estadística e integración multidisciplinaria de distintas disciplinas que he atravesado a lo largo de mi formación universitaria.

Objetivo general y objetivos específicos

El objetivo general del trabajo es diagnosticar los efectos perjudiciales que las cargas no lineales acarrearán en las instalaciones eléctricas domiciliarias y proponer medidas que



disminuyan tales efectos. Para alcanzar dicho objetivo se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Identificar cuáles son las cargas no lineales que producen distorsión armónica en una vivienda unifamiliar.
- Determinar la Distorsión Armónica Total (THD) en corriente en viviendas.
- Analizar los efectos de la perturbación armónica sobre aparatos e instalaciones.
- Analizar la factibilidad de las dos técnicas que se usan actualmente para mitigar las perturbaciones armónicas: pasiva y activa.

Organización del trabajo

Para lograr los objetivos planteados se aborda de manera integral el problema de las cargas no lineales y la distorsión armónica en instalaciones eléctricas de viviendas unifamiliares. De esta manera, el trabajo se estructura en cinco capítulos:

En el Capítulo 1, se proporciona el marco teórico necesario para entender el comportamiento de las cargas no lineales y su estudio por medio del análisis armónico. Además, se muestra el impacto en la eficiencia energética y el origen más común que tienen las perturbaciones armónicas.

En el Capítulo 2, se presenta una visión general de los efectos perjudiciales de la distorsión armónica sobre aparatos e instalaciones eléctricas. A su vez, se expone el marco normativo internacional, nacional y de la empresa prestataria del servicio eléctrico en la zona estudiada, que regula la calidad del suministro eléctrico y establece los estándares que deben cumplir los equipos y la red eléctrica para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente.

En el Capítulo 3, se muestra un análisis detallado del contenido de armónicos en cargas eléctricas individuales. Se presentan los resultados de las mediciones llevadas a cabo *in situ* en diversos tipos de cargas, desde dispositivos electrónicos hasta electrodomésticos, con el objetivo de comprender la variabilidad en los espectros armónicos que inyectan y evaluar estos de acuerdo a la norma IEC 61000-3-2.

En el Capítulo 4, se cuantifica la Tasa de Distorsión Armónica total (THD) en corriente en las instalaciones eléctricas domiciliarias a partir de mediciones realizadas en distintas viviendas; se evalúa el THD conforme a norma IEEE 519-2014 y las resoluciones ENRE 0099/1997 y 0184/2000; y se analizan otros parámetros eléctricos (intensidad de corriente, factor de potencia y potencia aparente) y su relación con el THD en corriente.



En el Capítulo 5, se profundiza en el análisis de los efectos de la perturbación armónica de manera específica en viviendas y se cuantifican dichos efectos sobre la instalación eléctrica. Asimismo, se evalúan las técnicas actuales para mitigar las perturbaciones producidas por la presencia de armónicos, desde una perspectiva técnica y económica adecuada al contexto actual de las viviendas.

Finalmente, se resumen los resultados obtenidos a lo largo del estudio, las conclusiones a las que se arribó y los posibles proyectos e investigaciones que podrían derivarse del presente trabajo.

CAPÍTULO 1: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este capítulo se exhiben los fundamentos teóricos y matemáticos que servirán de base para el posterior desarrollo del trabajo. Se describen los tipos de cargas, en qué consiste el análisis armónico, cómo se caracterizan los mismos y las potencias en juego con el correspondiente impacto en la eficiencia energética. Finalmente, se resumen cuáles son las principales fuentes de armónicos.

1. Tipos de cargas

Las cargas eléctricas se pueden clasificar de acuerdo al comportamiento que presentan cuando se las someten a una tensión de la forma $v(t)$. De esta manera, las cargas son lineales cuando al aplicarle la onda de tensión la forma de onda de corriente resultante es idéntica a esta, manteniendo una relación de proporcionalidad y presentando un ángulo de desfase. En cambio, cuando la forma de onda de corriente se encuentra distorsionada con respecto a $v(t)$, se trata de una carga no lineal. En la curva característica tensión-corriente de la carga (ver Figura 1.1) puede visualizarse claramente si esta es lineal en su comportamiento o no.

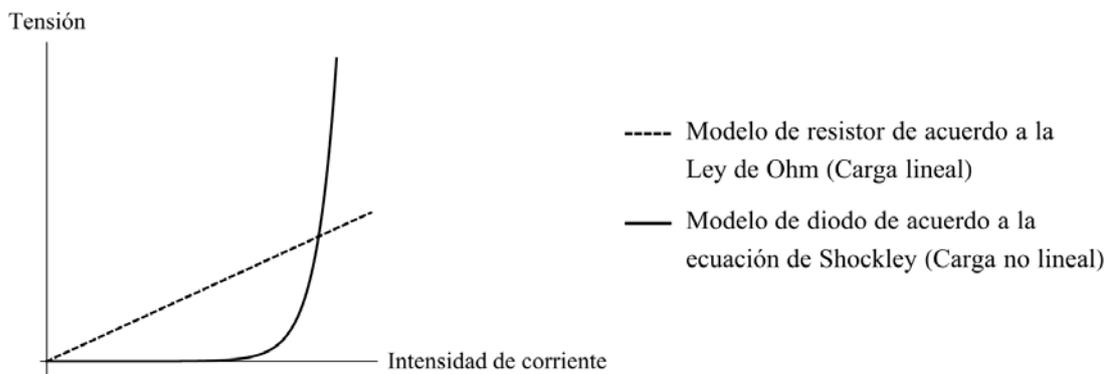


Figura 1.1. Curva característica tensión-corriente en un resistor y en un diodo¹. Fuente: elaboración propia.

1.1. Cargas lineales

Las cargas lineales se suelen encontrar representadas por medio de elementos pasivos (resistores, inductores y capacitores), los cuales solo tienen capacidad de almacenar o disipar energía, no así de amplificar y/o generarla. Al analizar las ecuaciones de estos tres elementos se obtienen los casos límites teóricos de desfase entre tensión y corriente, dado que el ángulo entre tensión y corriente no puede superar nunca los 90°.

¹ Para la relación teórica entre tensión y corriente en un diodo se utiliza normalmente el modelo matemático propuesto por William Bradford Shockley que permite aproximar el comportamiento del mismo en la mayoría de las aplicaciones.



Para los análisis posteriores se supone una onda de tensión $v(t)$ de la forma:

$$v(t) = A \text{Sen}(\omega t - \alpha)$$

En la expresión anterior A determina la amplitud máxima de la onda, ω es la frecuencia angular y α es el ángulo inicial de la tensión. A fines de simplificar el análisis, se asume que el ángulo inicial de la tensión es cero. Esta misma simplificación es común en la práctica y permite identificar en los cálculos el ángulo de desfase entre tensión y corriente de forma rápida.

1.1.1. Caso límites

Considerando que la forma de tensión anterior se aplica a elementos pasivos ideales, es decir, puramente resistivos y/o reactivos, la intensidad de corriente en los mismos será acorde a la Tabla 1.1.

	Inductor	Resistor	Capacitor
$i(t) =$	$\frac{1}{L} \int v(t) dt$	$\frac{v(t)}{R}$	$C \frac{dv(t)}{dt}$
Desarrollando $i(t)$:	$\frac{A}{L \omega} \text{Sen}(\omega t - 90^\circ)$	$\frac{A}{R} \text{Sen}(\omega t)$	$C \omega A \text{Sen}(\omega t + 90^\circ)$

Tabla 1.1. Ecuaciones del comportamiento de $i(t)$ de elementos pasivos. Fuente: elaboración propia.

En las expresiones anteriores, se ha desplazado la función coseno para que sea equivalente a la función seno y poder así visualizar, de forma más sencilla, que en todos los casos existe un factor de proporcionalidad entre $i(t)$ y $v(t)$, dejando en evidencia el desfase entre ambas funciones. Esto se resume en la Tabla 1.2:

	Inductores	Resistores	Capacitores
Factor de proporcionalidad entre $v(t)$ y $i(t)$	$\frac{1}{L \omega}$	$\frac{1}{R}$	$C \omega$
Ángulo de desfase entre $v(t)$ y $i(t)$	-90°	0°	$+90^\circ$
Coloquialmente se dice que $i(t)$:	“Atrasa a $v(t)$ ”	“En fase con $v(t)$ ”	“Adelanta a $v(t)$ ”

Tabla 1.2. Resumen de comportamiento de $i(t)$ en elementos pasivos. Fuente: elaboración propia.

1.1.2. Caso general: impedancia compleja

En teoría de circuitos resulta muy útil combinar resistores, inductores y capacitores en un solo modelo. De esta manera surge la impedancia compleja, un número complejo cuya parte real es la resistencia y la parte imaginaria es la reactiva. Si se emplea este concepto junto a la notación fasorial (Anexo I), se puede reescribir la Ley de Ohm como:

$$I \angle (\alpha - \theta) = \frac{V \angle \alpha}{z \angle \theta} \rightarrow I = \frac{V}{Z}$$

Donde $(\alpha - \theta)$ es el ángulo de desfase existente entre tensión y corriente, comúnmente denominado con la letra griega Phi (φ). Nuevamente, para simplificar el análisis se considera α igual a cero y, por ende, φ resulta igual al ángulo de la impedancia. El mismo se puede hallar mediante la expresión:

$$\varphi = \text{ArcTan} \left(\frac{X_L - X_C}{R} \right)$$

De esta manera, los circuitos eléctricos que se puedan modelar mediante cualesquiera de los tres elementos pasivos y lineales analizados anteriormente responderán de forma similar. Al aplicar una tensión $v(t)$ al circuito, la corriente $i(t)$ resultante en régimen permanente será idéntica en forma a $v(t)$ según un factor de proporcionalidad y desfasada un ángulo φ (ver Figura 1.2).

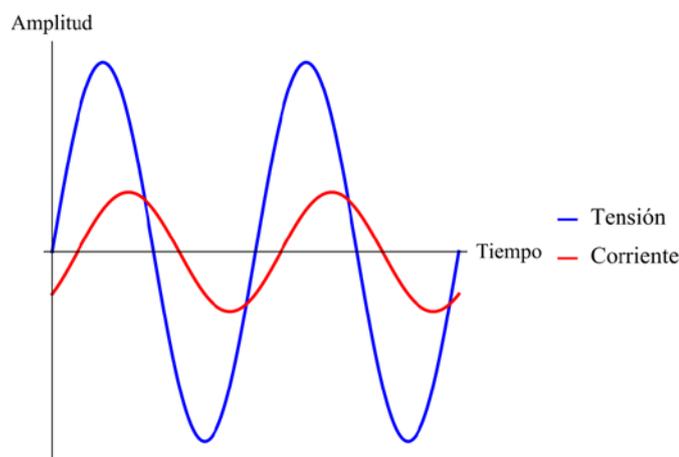


Figura 1.2. Impedancia compleja: $i(t)$ en desfase (atraso) un ángulo φ con respecto $v(t)$. Fuente: elaboración propia.

1.2. Cargas no lineales

Las cargas no lineales se suelen presentar cuando en el circuito existen elementos activos como transistores, amplificadores operacionales, circuitos integrados, etc. Los mismos tienen la capacidad de modificar y/o controlar las señales eléctricas.

La presencia de componentes activos en un circuito eléctrico indica muchas veces que se está en presencia de una carga de carácter no lineal. Esto implica que la señal de corriente no solo se puede encontrar desfasada de la señal de tensión, sino que también estará distorsionada con respecto a la misma (ver Figura 1.3).

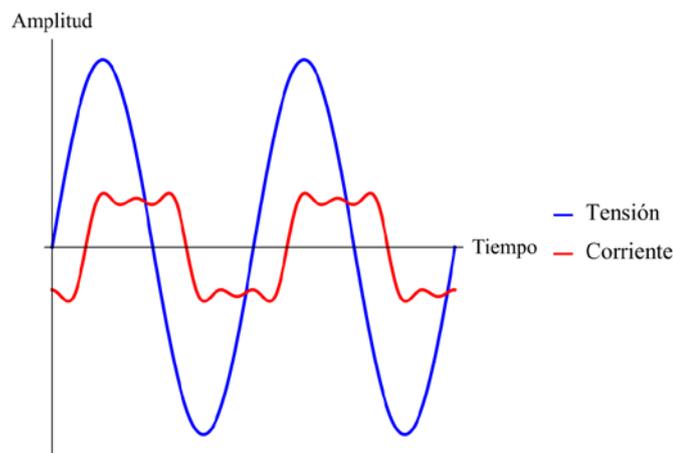


Figura 1.3. Elemento activo: desfase y distorsión de la onda $i(t)$ con respecto a $v(t)$. Fuente: elaboración propia.

2. Análisis armónico

El análisis armónico es un método de análisis que permite estudiar señales sustentado en las Series de Fourier y Transformada de Fourier. Dicho método consiste en representar la señal como una superposición de ondas más simples, es decir, como una combinación lineal de funciones trigonométricas. Por medio de él, es posible procesar y analizar una gran variedad de señales periódicas, entre ellas, las eléctricas. De esta manera, la base matemática para el estudio de las cargas no lineales es el análisis armónico.

2.1. Series de Fourier

Las series de Fourier son de gran importancia en una amplia gama de disciplinas científicas y tecnológicas debido a su capacidad para descomponer señales periódicas complejas en componentes sinusoidales simples. Entonces, “una serie de Fourier es la representación de una función como una serie de constantes multiplicadas por funciones seno y/o coseno de diferentes frecuencias” (Sadiku, 2004).



En tanto, la transformada de Fourier es una herramienta más poderosa que permite transformar una señal cualquiera del dominio temporal al dominio de la frecuencia, lo que permite analizarla y operarla en función de las frecuencias que la componen. En el dominio temporal la señal se representa en función del tiempo y, en el dominio de la frecuencia, la representación de la señal es en función de las frecuencias que la componen (Figura 1.4).

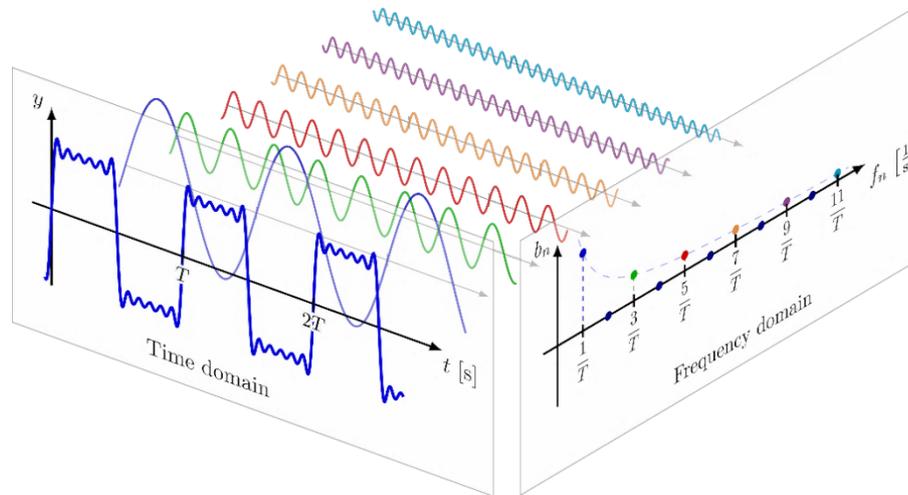


Figura 1.4. Representación de una función en el dominio de temporal y en el dominio de frecuencia. Fuente: https://tikz.net/fourier_series/

2.2. Definición matemática

Matemáticamente, sea $f(t)$ una función periódica cualquiera de periodo $2T$, se la puede expresar como serie de Fourier de la siguiente manera:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos\left(\frac{n\pi t}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{n\pi t}{T}\right) \right)$$

Donde el valor de los términos que acompañan a las funciones trigonométricas viene dado por:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T}^T f(t) \cos\left(\frac{n\pi x}{T}\right) dt; \quad \text{Para } n = 0, 1, 2, 3 \dots$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T}^T f(t) \sin\left(\frac{n\pi x}{T}\right) dt; \quad \text{Para } n = 1, 2, 3 \dots$$



Sin embargo, la Serie de Fourier puede ser reescrita de manera más compacta de la siguiente manera:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos(n \omega_0 t - \alpha_n))$$

Donde:

$$\omega_0 = \frac{2 \pi}{T}$$

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

$$\alpha_n = \text{ArcTan}\left(-\frac{b_n}{a_n}\right)$$

2.3. Convergencia de las Series de Fourier

Existe un conjunto de condiciones, conocidas como condiciones de Dirichlet, que son suficientes para asegurar que la representación en series de Fourier de una función $f(t)$ periódica es igual a $f(t)$ para cualquier t . Esto no se cumple en una discontinuidad, en donde la representación de $f(t)$ es igual al promedio de los valores en cualquier lado de la discontinuidad. Las condiciones son:

- $f(t)$ debe ser absolutamente integrable, esto es:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)| dt < \infty$$

- $f(t)$ debe tener un número finito de máximos y mínimos dentro de cualquier intervalo finito.
- $f(t)$ debe tener un número finito de discontinuidades dentro de cualquier intervalo finito. Además, cada una de estas discontinuidades debe ser finita.

En este trabajo, se analizan señales integrables y continuas (si presentaran discontinuidades por error en la medición, estas serán finitas en cantidad), por lo tanto, siempre será posible la representación de la señal en series de Fourier.



2.4. Paridad de las funciones

De acuerdo con la paridad de las funciones la serie de Fourier se puede simplificar aún más si $f(t)$ cumple con alguna de las siguientes condiciones:

$$\text{Función Par: } f(t) = f(-t)$$

$$\text{Función Impar: } f(-t) = -f(t)$$

Entonces se tiene dos casos:

- Si la señal es simétrica alrededor del eje de las abscisas (función par), los coeficientes impares de la serie de Fourier se anulan y la función se representa por medio de una serie de senos.
- En cambio, si la señal es simétrica respecto al origen de coordenadas (función impar), los coeficientes pares de la serie de Fourier se anulan y la función se representa por una serie de cosenos.

Si bien es equivalente representar una señal de corriente y/o tensión como una función seno o coseno, en este trabajo, por convención, se optará por trabajar con una onda senoidal.

3. Caracterización de armónicos eléctricos

Los armónicos se caracterizan por su orden, amplitud y fase.

Cada armónico se expresa en función de su orden, es decir, del múltiplo entero de la frecuencia fundamental. Esto hace corresponder a las armónicas de segundo, tercer y quinto orden, las frecuencias de 100, 150 y 250 Hz respectivamente en sistemas eléctricos con frecuencias de 50 Hz (Figura 1.5). Las armónicas cuyas frecuencias son múltiplos de dos se denominan armónicos pares, el resto son impares.

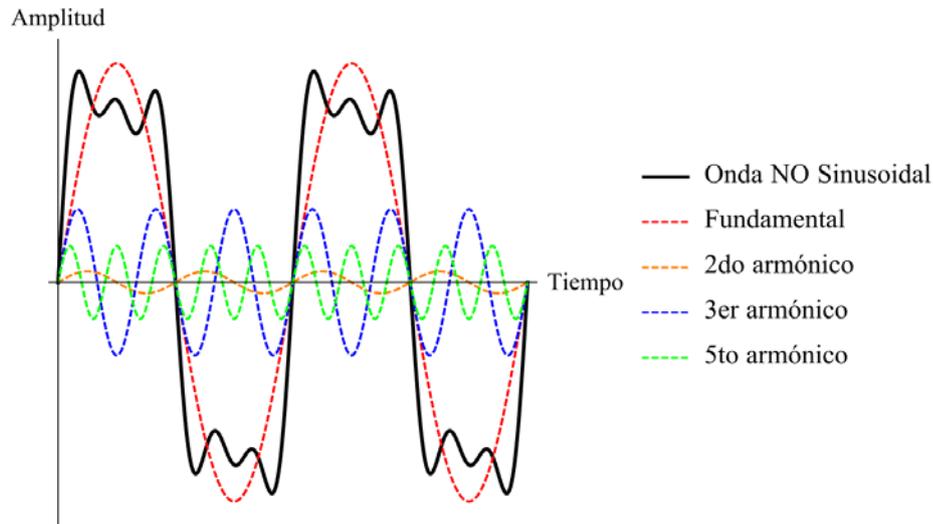


Figura 1.5. Ejemplo de la representación temporal de una señal distorsionada. Fuente: elaboración propia.

La amplitud de cada armónico indica la magnitud de contribución a la onda fundamental. En este punto es muy útil la representación gráfica del espectro armónico donde las frecuencias se representan en el eje horizontal y la amplitud de cada frecuencia se representa en el eje vertical (ver Figura 1.6).

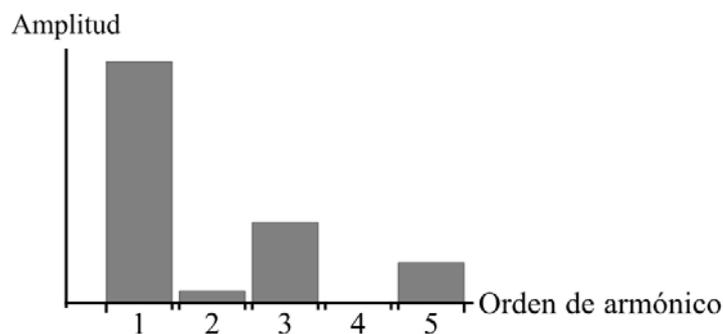


Figura 1.6. Ejemplo del espectro armónico de una señal distorsionada. Fuente: elaboración propia.

Finalmente, la fase de un armónico representa el desfase entre este y la onda fundamental, es decir, es un ángulo que indica esta posición relativa.

3.1. Secuencia

Los armónicos eléctricos también se pueden identificar a partir de su secuencia: directa, inversa u homopolar (ver Tabla 1.3). Esta clasificación se realiza considerando el ángulo de desfase entre los fasores de la onda fundamental y del armónico (en sistemas trifásicos).



Secuencia	Condición	Orden
Inversa o negativa	$3k - 1$	2, 5, 8, 11...
Homopolar o cero	$3k$	3, 6, 9, 12...
Directa o positiva	$3k + 1$	4, 7, 10, 13...
Donde k es un número entero desde 1		

Tabla 1.3. Secuencia de armónicos. Fuente: elaboración propia.

Los armónicos de secuencia directa se encuentran en fase con la onda fundamental y, por ende, producen campos magnéticos y corrientes que giran en la misma dirección que esta. En cambio, los armónicos de secuencia inversa se hallan en contrafase con la onda fundamental y desarrollan, por lo tanto, campos magnéticos y corrientes que giran en dirección opuesta. Finalmente, los armónicos de secuencia homopolar presentan una simetría radial por lo que no producen un par motor utilizable, sin embargo, las corrientes, al hallarse en fase entre sí, se suman algebraicamente.

3.2. Armónicos en corriente y en tensión

Como se mostró anteriormente, si aplicamos una tensión senoidal a una carga de carácter no lineal la corriente resultante a través de esta no será senoidal y presentará distorsión.

En tanto, los armónicos en tensión son producidos debido a la presencia de los armónicos en corriente. Ya que, cuando estos circulan a través de las impedancias de transformadores y líneas de alimentación, se producen caídas de voltaje distorsionadas que alteran la forma de onda fundamental de la tensión. Esta tensión distorsionada alimenta luego las cargas, tanto lineales como no lineales, afectando la calidad de toda la red de suministro eléctrico.

3.3. Definiciones matemáticas

Las siguientes definiciones son válidas tanto para el caso de las señales de corriente como de tensión en un circuito eléctrico con presencia de armónicos. Por simplicidad, solo se definirán de acuerdo con la señal de corriente.

3.3.1. Corriente eficaz o RMS

La corriente eficaz o RMS (valor cuadrático medio, por sus siglas en inglés) en un circuito eléctrico es igual a:

$$I_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}$$

Siendo posible calcular la anterior expresión por medio de:

$$I_{\text{RMS}} = \sqrt{I_{\text{CC}}^2 + I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}$$

Donde I_{CC} es el valor de la componente continua de corriente, I_1 la componente de frecuencia fundamental de corriente y I_n las componentes armónicas de corriente.

En este trabajo se registró hasta la armónica de orden 36 y la componente de corriente continua es despreciable frente a las demás, por lo que la corriente eficaz se halla mediante:

$$I_{\text{RMS}} = \sqrt{\sum_{n=1}^{36} I_n^2}$$

3.3.2. Distorsión Armónica Total

La Distorsión Armónica Total (THD, por sus siglas en inglés) es una manera de determinar el contenido armónico total en una señal y resulta en una relación entre el contenido armónico de una señal y la onda fundamental. Su valor porcentual puede ir desde cero a infinito.

$$\text{THD}_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} * 100\%$$

A los fines de este trabajo, siempre se trabaja con una distorsión armónica de estado estable. Es decir, aquella que es producida bajo la operación continua de la carga y sin presencia de transitorios como ser cortocircuito, descargas atmosféricas, apertura y/o cierre de interruptores.

3.3.3. Distorsión Total de la Demanda

La Distorsión Total de la Demanda (TDD, por sus siglas en inglés) es la relación entre el valor eficaz del contenido armónico (considerando componentes armónicos hasta el orden 50) y la corriente de demanda máxima expresados como porcentaje.



$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L} * 100\%$$

Donde I_L es la corriente máxima de carga, correspondiente al promedio de las corrientes de demanda máxima de los últimos 12 meses por lo general.

3.4. Reconstrucción de la onda

En este trabajo la reconstrucción de las señales (que se verán en el Capítulo 3) se realiza a través del software Wolfram Mathematica 12.0 a partir de la siguiente expresión:

$$f(t) \cong \sum_{n=1}^{36} (A_n \text{Sen}(n \omega t))$$

Esta reconstrucción aproximada de la señal se debe a las limitaciones propias del instrumento de medición, el cual registra y almacena hasta el armónico de orden 36 y no almacena la fase de cada uno ni la componente de corriente continua, que sería igual al término a_0 .

4. Potencias

A continuación, se definen las potencias eléctricas en juego en una instalación eléctrica con presencia de armónicos:

4.1. Potencia activa

La potencia activa (P) es el valor medio de la potencia instantánea y es aquella que realiza un trabajo útil, relacionada de manera directa con el rendimiento de las máquinas eléctricas. Por definición se calcula mediante la siguiente expresión:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt$$

Donde $p(t)$ es la potencia instantánea. Si se asume una tensión y una corriente senoidal, la potencia se puede expresar, según se muestra en el Anexo II, en términos de valores eficaces como:

$$P = V_{RMS} I_{RMS} \text{Cos}(\varphi)$$

4.2. Potencia reactiva

La potencia reactiva (Q) es la potencia necesaria para magnetizar las cargas inductivas y/o establecer los campos eléctricos en las cargas capacitivas presentes en un circuito. Se encuentra en cuadratura con la potencia activa, por lo que su expresión será:

$$Q = V_{RMS} I_{RMS} \text{Sen}(\varphi)$$

4.3. Potencia aparente

La potencia aparente (S) es la potencia real que demandará una carga determinada. Esta potencia es útil para dimensionar las máquinas e instalaciones eléctricas en condiciones nominales, ya que en este valor está incorporado el desfase entre tensión y corriente y, como se verá más adelante, la distorsión armónica.

En cargas lineales, las dos potencias anteriormente mencionadas (activa y reactiva) conforman un triángulo de potencias como se observa en la Figura 1.7:

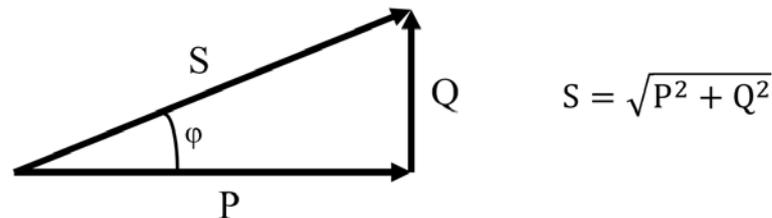


Figura 1.7. Triángulo de potencias. Fuente: elaboración propia.

4.4. Potencia de distorsión

En un circuito con presencia de cargas no lineales no se cumple la siguiente igualdad:

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

Por ende, en aquellos sistemas en los que la distorsión en tensión se puede despreciar (pero no así la distorsión armónica en corriente) se utiliza el concepto de pirámide de potencias. De esta manera, se agrega la potencia de distorsión (D), producto de las corrientes armónicas, a la ecuación anterior:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$$

De esta forma, se puede visualizar gráficamente en la pirámide de potencias (ver Figura 1.8) todas las potencias intervinientes, donde S_1 es la potencia aparente demandada si la carga tuviera un comportamiento lineal.

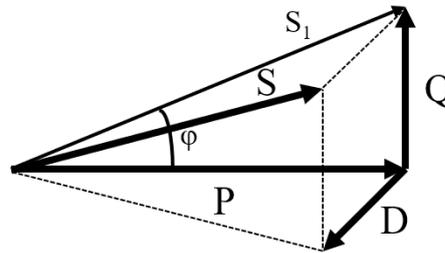


Figura 1.8. Pirámide de potencias. Fuente: elaboración propia.

5. Eficiencia energética

El análisis de la eficiencia energética tiene como objetivo reducir el consumo de energía necesario para proporcionar determinados productos y/o servicios. En el caso concreto de cargas eléctricas, se busca que se entregue la potencia final de diseño con el menor consumo posible. De esta manera, se define el factor de potencia (FP) como:

$$FP = \frac{\text{Potencia útil}}{\text{Potencia demandada}} = \frac{P}{S}$$

5.1. Factor de potencia en cargas lineales

En el caso de cargas lineales y de carácter monofásico, las potencias activas y aparentes se expresan como:

$$P = V_{RMS} I_{RMS} \cos(\varphi)$$

$$S = V_{RMS} I_{RMS}$$

Por lo que el factor de potencia queda definido de la siguiente manera:

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{V_{RMS} I_{RMS} \cos(\varphi)}{V_{RMS} I_{RMS}} = \cos(\varphi)$$

Es importante notar que solo para el caso de cargas lineales, es decir, donde la forma de onda de tensión y de corriente sean iguales, el factor de potencia es igual al coseno del ángulo de desfase entre tensión y corriente.

5.2. Factor de potencia en cargas no lineales y factor de distorsión

Ahora bien, en el caso de cargas no lineales, si bien la definición del factor de potencia es única, ahora las potencias involucradas difieren de las anteriores debido a la presencia de armónicos, por lo que se las reescribe como:

$$P = V_1 I_1 \cos(\varphi)$$

$$S = V_{RMS} I_{RMS}$$

De esta manera, el factor de potencia queda expresado como:

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{V_1 I_1 \cos(\varphi)}{V_{RMS} I_{RMS}} = \frac{V_1}{V_{RMS}} \frac{I_1}{I_{RMS}} \cos(\varphi)$$

Esta expresión general para el factor de potencia incorpora el factor de distorsión (FD), tanto en tensión como en corriente, producto de las armónicas que pueden existir en ambas señales. Sin embargo, el factor de distorsión en tensión, en la mayoría de los casos, se puede aproximar a 1 sin que tenga este un efecto apreciable (como se demostrará en el Capítulo 4), por lo que queda:

$$\frac{V_1}{V_{RMS}} \cong 1$$

Y entonces se puede reescribir la expresión del factor de potencia como:

$$FP = \frac{I_1}{I_{RMS}} * \cos(\varphi)$$

$$FP = FD * \text{Factor de desplazamiento}$$

Donde el Factor de Distorsión (FD) indica el grado de distorsión armónica presente en una señal de corriente eléctrica y el Factor de desplazamiento mide el desfase entre la onda de tensión y de corriente.

A fines de este trabajo, resultará útil relacionar el factor de distorsión con el THD en corriente, para ello se desarrolla la expresión del factor de distorsión llegando a:

$$FD = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_i^2}}$$

$$I_{RMS} = I_1 * \sqrt{1 + THD_i^2}$$



Donde la última ecuación permite visualizar y calcular rápidamente la relación existente entre la corriente eficaz, su componente fundamental y el THD en corriente presente en la señal.

6. Fuentes de armónicos

Como se mencionó anteriormente, la fuente de armónicos de corriente proviene de la conexión a la instalación eléctrica de cargas no lineales. Existe una infinidad de tipos y variedades de cargas de este carácter, por lo que se mencionaran aquellas más importantes y las que puedan tener mayor impacto en una instalación eléctrica.

Como primera aproximación para identificar cargas no lineales se pueden considerar aquellas que se componen parcial o en su totalidad por elementos electrónicos (diodos, puentes rectificadores, transistores, tiristores, circuitos integrados, etc.). Esto hace que en la actualidad las fuentes de armónicos provengan principalmente de televisores, ordenadores, cargadores de dispositivos electrónicos, lámparas LED, dispositivos electrónicos de potencia (convertidores, rectificadores, variadores de velocidad, fuentes conmutadas), dispositivos productores de arcos eléctricos (hornos de arco, lámparas de descarga, máquinas soldadoras) y electrodomésticos con tecnología *inverter* (lavarropas, heladeras, aires acondicionados, microondas).



CAPÍTULO 2: PROBLEMÁTICAS Y NORMATIVAS VIGENTE ASOCIADAS A LAS CARGAS NO LINEALES

En este capítulo se resumen los principales problemas que producen la presencia de armónicos en los elementos más importantes de una instalación eléctrica, es decir, sobre conductores, motores, protecciones eléctricas, instrumentos de medición y finalmente, sobre el sistema de distribución. Seguidamente, se describe la normativa vigente a diferentes niveles, es decir: internacional, nacional y de acuerdo a la empresa prestataria del servicio eléctrico.

1. Problemáticas asociadas a las cargas no lineales

Como se observó en el Capítulo 1, las corrientes armónicas demandadas por cargas no lineales se traducen en un aumento de la potencia requerida a la red de distribución, siendo la consecuencia más inmediata un aumento en la intensidad de corriente eficaz del circuito.

De manera general, los efectos nocivos producidos por las corrientes armónicas en instalaciones domiciliarias se pueden desglosar teniendo en cuenta el elemento de la instalación perjudicado:

- Conductores.
- Motores de inducción.
- Protecciones eléctricas.
- Instrumentos de medición.
- Sistema de distribución.

1.1. Problemáticas en conductores

Los conductores de la instalación son afectados en todos los niveles por la presencia de armónicos en corriente. Esto se debe a que el incremento de la corriente eficaz se relaciona de manera directa con un incremento en las pérdidas en forma de calor por efecto Joule:

$$\text{Pérdidas por calor} = I_{\text{RMS}}^2 R_{\text{conductores}}$$

A su vez, aumentan las pérdidas por efecto pelicular en sistemas de corriente alterna. Este fenómeno se origina porque la variación de campo magnético es mayor en el centro de un conductor, lo que ocasiona que exista una mayor reactancia inductiva. Debido a esto, la corriente se establece con mayor facilidad en la periferia del conductor, aumentando la resistencia efectiva.



Las pérdidas por el efecto pelicular se ven afectada por los armónicos de corriente puesto que estas tienen una frecuencia más alta que la fundamental y, por ende, la resistencia efectiva será aún mayor para estas corrientes. Se recuerda que la reactancia inductiva es función de la frecuencia según:

$$X_L = 2 \pi n F L$$

Donde n es el orden del armónico, F la frecuencia del sistema y L el coeficiente de autoinducción. Si se grafica la anterior ecuación se observa la relación lineal entre n y X_L (ver Figura 2.1).

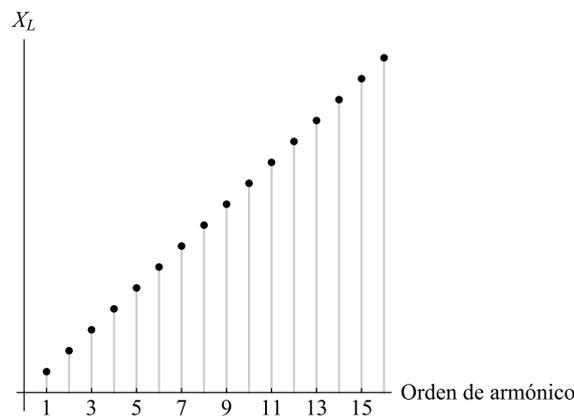


Figura 2.1. Relación entre X_L y orden del armónico. Fuente: elaboración propia.

Si bien en baja y media tensión este fenómeno suele ser desestimado, no deja de existir, y llegado el caso, puede ser factible de estudio en sistemas en donde los armónicos de orden elevado son de importancia.

Cabe destacar el análisis en el conductor neutro, en donde se suman algebraicamente los armónicos de secuencia homopolar y como resultado, la corriente puede llegar a ser mayor que la existente en cada una de las fases. De esta manera, el conductor neutro puede quedar expuesto a un sobrecalentamiento excesivo ya que no dispone de un interruptor automático y, a su vez, puede provocar una diferencia de potencial peligrosa entre el conductor neutro y tierra.

1.2. Problemáticas en motores de inducción

Los motores de inducción están diseñados para operar con ondas senoidales, siendo la corriente fundamental la que genera el trabajo mecánico útil. Ahora bien, si un motor es alimentado con una onda de tensión distorsionada, sus componentes armónicas pueden generar un calor excesivo por el incremento del efecto pelicular y de las corrientes de Foucault, siendo

los motores monofásicos más sensibles que los trifásicos (Grajales et al., 2004). Esto impacta de manera directa en la vida útil y eficiencia del motor.

Dado que la corriente fundamental produce el par motor en el sentido de giro del motor a una velocidad definida por su frecuencia, los armónicos de secuencia inversa producen pares motores en sentido inverso, cuyas velocidades de rotación dependen del orden del armónico. Esta interacción entre diferentes pares motores causa vibración y esfuerzos en las partes mecánicas. Si bien los armónicos de secuencia homopolar no producen pares rotativos, si generan un calentamiento adicional al motor ya que originan campos magnéticos que se suman al fundamental.

1.3. Problemáticas en protecciones eléctricas

En esta sección se tratará el caso de las protecciones domiciliarias que se componen como mínimo de un pequeño interruptor automático (PIA) de acuerdo con IEC 60898-1 y de un dispositivo de protección diferencial (DDR) de alta sensibilidad y de actuación no retardada según AEA 90364-7-770.

Los PIA, comúnmente conocidos en el ámbito residencial como termomagnéticas, son dispositivos de protección contra sobrecargas y cortocircuitos. Estos están compuestos por dos elementos: un disparador térmico y un disparador magnético; el primero actúa en caso de sobrecarga prolongada y el segundo actúa en caso de cortocircuito.

En instalaciones eléctricas los contactos directos e indirectos siempre están asociados a una corriente de defecto que no vuelve a la fuente por los conductores activos. Los DDR están diseñados, entonces, para la protección de personas, equipos e instalaciones frente a los contactos con las partes activas y/o que se encuentran tensionadas de manera accidental.

La presencia de cargas no lineales puede derivar en disparos intempestivos en las protecciones previamente mencionadas. En el caso de los PIAs, estos se pueden disparar ante la presencia de armónicos, aunque la corriente no exceda de valor de disparo, ya sea por:

- Sobrecalentamiento excesivo del bimetálico por efecto pelicular.
- Disparo magnético por el valor pico excesivo de corriente.

Por otro lado, en las protecciones diferenciales, estos disparos intempestivos por la presencia de armónicos se deben a una derivación de muy baja impedancia a tierra en:

- Las capacidades parásitas de elementos de electrónica en cargas no lineales.
- Los filtros capacitivos de algunos dispositivos electrónicos.

Esto se explica recordando que la impedancia de un capacitor disminuye de forma inversamente proporcional con la frecuencia:

$$X_C = \frac{1}{2 \pi n F C}$$

Donde n es el orden del armónico, F la frecuencia del sistema y C es la capacitancia. Si se grafica la anterior ecuación se observa la relación entre n y X_C (ver Figura 2.2).

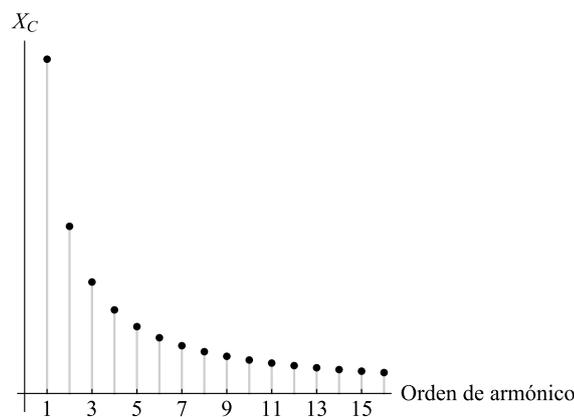


Figura 2.2. Relación entre X_C y orden del armónico. Fuente: elaboración propia.

1.4. Problemáticas en instrumentos de medición

Existen instrumentos de medición digitales diseñados para hallar el valor eficaz de la señal asumiendo que la misma es una senoide pura. De esta manera, en primera instancia se encuentra el valor pico o promedio de la señal y luego, mediante las siguientes relaciones, detalladas en el Anexo III, se calcula el valor eficaz:

$$V_{RMS} = \frac{V_{Pico}}{\sqrt{2}}$$

$$\text{Factor de Forma} = \frac{V_{RMS}}{V_{promedio}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}}$$

$$V_{promedio} = \frac{2 V_{Pico}}{\pi} \therefore V_{RMS} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} V_{promedio}$$

Notar que:

- Para hallar el valor promedio se considera un período, ya que de otra manera el valor medio sería cero (cada valor de la onda positiva tiene su opuesto negativo).



- El factor que acompaña al valor promedio se denomina factor de forma y relaciona el valor eficaz y el valor medio, dando una idea aproximada de la forma de onda.

Ahora bien, si la señal esta distorsionada debido a la presencia de armónicos, se debe procurar que el instrumento sea capaz de medir el verdadero valor medio cuadrático o, por sus siglas en inglés, que sea TRMS, de esta manera se evitan errores de medición producto de suposiciones erróneas.

1.5. Problemáticas en el sistema de distribución

El sistema de distribución es el responsable del suministro eléctrico final a los consumidores. Entre sus principales componentes se encuentran los conductores (ya trabajados anteriormente), los transformadores de potencia y de medida y los bancos de capacitores. Todas estas partes se hallarán afectadas si en la red existe la presencia de armónicos, tanto de corriente como de tensión.

1.5.1. Problemáticas en banco de capacitores

Como se mostró previamente, la reactancia de un capacitor es inversamente proporcional a la frecuencia, por lo que las corrientes armónicas de mayor orden circulan con mayor facilidad a través estos caminos de menor impedancia. De esta manera, estos dispositivos corren el riesgo de sufrir sobrecargas y calentamiento excesivo.

Puede presentarse un problema aún más grave si los capacitores y las inductancias en el sistema de distribución forman un circuito resonante a una frecuencia muy próxima a alguna frecuencia armónica de importancia presente (ver Anexo IV). Como resultado de esto, se pueden establecer valores de corriente o sobretensiones muy elevadas debido a los armónicos.

1.5.2. Problemáticas en transformadores

Los armónicos también tienen un impacto negativo en los transformadores. El aumento en el valor eficaz de la corriente resulta en pérdidas adicionales en el cobre de los devanados. Además, las corrientes armónicas de orden elevado aumentan las pérdidas en los núcleos debido a las corrientes de Foucault. En los núcleos de los transformadores laminados también pueden surgir vibraciones, generando ruido y calentamiento.

En transformadores triángulo-estrella, las corrientes armónicas homopolares se suman algebraicamente en el conductor neutro del devanado secundario. Esto se refleja en una corriente en el devanado primario que puede provocar sobrecalentamiento y posibles fallas en el transformador.



Debido a todos estos efectos, los transformadores se suelen desclasificar en presencia de armónicos, o bien, deben estar especialmente diseñados para lidiar con ellos. Siendo el factor K , un valor que se utiliza para evaluar la capacidad de un transformador para resistir los efectos térmicos generados por las corrientes armónicas.

En resumen, las corrientes armónicas en el transformador ocasionan pérdidas adicionales (tanto por efecto Joule como por Foucault), reduciendo de esta manera la capacidad de carga del transformador y su vida útil, como así también aumentando los costos de mantenimiento y operación.

2. Normativa asociada a cargas no lineales

Para asegurar que las problemáticas previamente mencionadas no resulten perjudiciales para la integridad de los sistemas eléctricos, fue necesario establecer límites sobre los niveles de distorsión permisibles tanto a nivel usuario como a nivel empresa prestataria del servicio eléctrico.

A continuación, se expondrá la normativa existente a diferentes niveles, esto es, a nivel internacional, nacional y empresa prestataria del servicio eléctrico. Se hará especial énfasis en aquellas que a lo largo del trabajo se mencionen o empleen, es decir, relevante para la realización de este trabajo.

2.1. Normativa a nivel internacional

A nivel internacional, se cuenta con normativas de diferentes organizaciones:

El Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (IEEE, por sus siglas en inglés) es una asociación mundial de ingenieros de origen estadounidense que desarrolla y publica estándares y normas para una amplia variedad de tecnologías y aplicaciones.

Las normas EN son un conjunto de normas técnicas desarrolladas por el Comité Europeo de Normalización (CEN) para garantizar la calidad y la seguridad de los productos y servicios en el mercado europeo. Estas normas establecen requisitos técnicos, métodos de prueba y especificaciones.

La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC, por sus siglas en inglés) es una organización internacional de normalización que establece normas para una amplia variedad de tecnologías eléctricas, electrónicas y relacionadas en todo el mundo. Sus normativas son muy empleadas en Europa.



2.1.1. IEEE 1159-2019: Práctica recomendada para monitorear la calidad de la energía eléctrica

La IEEE 1159-2019 recomienda y describe las condiciones nominales y las desviaciones de estas condiciones que pueden originarse dentro de la fuente de suministro o del equipo de carga o aquellas que pueden originarse de las interacciones entre la fuente y la carga. Asimismo, esta norma recomienda y analiza los dispositivos de control de la calidad de la energía, las técnicas de aplicación y la interpretación de los resultados del control.

2.1.2. IEEE 519-2014: Prácticas recomendadas y requisitos para el control de armónicos en sistemas de energía eléctrica

La IEEE 1159-2014 recomienda y establece los objetivos para el diseño de sistemas eléctricos que incluyen cargas lineales y no lineales. Asimismo, describe las formas de onda de corriente que pueden existir en todo el sistema y se establecen los límites aceptables de distorsión para el diseño del sistema (Tabla 2.1). Además, el documento establece la calidad de la energía que debe proporcionarse en el punto de acoplamiento común (Tabla 2.2).

Máxima distorsión de corriente armónica en porcentaje de I_L						
Orden armónico individual (armónicos impares) ^(a, b)						
I_{sc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
< 20 ^(c)	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
$20 < 50$	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
$50 < 100$	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
$100 < 1000$	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
> 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Tabla 2.1. Límites de distorsión actuales para sistemas con clasificación de 120 V a 69 kV. Fuente: IEEE 519-2014.

- (a) Armónicos pares están limitados al 25% de los límites de armónicos impares anteriores.
- (b) Las distorsiones actuales que dan como resultado una compensación de DC, por ejemplo, convertidores de media onda, no están permitidas.
- (c) Todos los equipos de generación de energía están limitados a estos valores de distorsión actual, independientemente de I_{sc}/I_L real.

Voltaje de bus V en PCC	Armónico individual (%)	Distorsión Armónica Total THD (%)
$V \leq 1.0$ kV	5,0	8,0
1 kV $< V \leq 69$ kV	3,0	5,0
69 kV $\leq V < 161$ kV	1,5	2,5
161 kV $< V$	1,0	1,5

Tabla 2.2. Límites de distorsión de voltaje. Fuente: IEEE 519-2014.



Recordar que I_L es la demanda máxima de corriente, cuyo valor se establece en el PCC (Punto de Conexión Común) y debe calcularse como el promedio de la suma de las corrientes correspondientes a la máxima demanda durante doce meses. Además, el PCC se establece entre la instalación de un usuario y el sistema de distribución de la empresa prestataria del servicio eléctrico, y es un punto situado aguas arriba de la instalación considerada.

2.1.3. Norma EN 50160: Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución

La norma EN 50160 define las características principales que debe tener la tensión suministrada por una red general de distribución en baja y media tensión, en condiciones normales de explotación y en el punto de entrega al cliente.

El objetivo de esta norma no es determinar niveles de compatibilidad electromagnética (CEM) o limitar la emisión de perturbaciones conducidas por parte del cliente a las redes de distribución. La norma tiene por objetivo determinar los valores que caracterizan la tensión de alimentación, tales como la frecuencia, la amplitud, la forma de onda y la simetría de las tensiones trifásicas.

2.1.4. IEC 61000

La norma IEC 61000 cuenta con varias partes que abordan cuestiones referidas a la Compatibilidad Electromagnética (CEM):

Parte 2-2: Entorno. Niveles de compatibilidad para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia y la transmisión de señales en las redes de suministro público en baja tensión.

La Parte 2-2 de la norma IEC 61000, establece los límites máximos permitidos de interferencia electromagnética generada por equipos eléctricos y electrónicos que se conectan a la red eléctrica. La norma ayuda a garantizar que dichos equipos sean compatibles con el entorno electromagnético, reduciendo así la probabilidad de que produzcan interferencias que puedan afectar a otros equipos en la red.

Parte 2-4: Entorno. Niveles de compatibilidad para las perturbaciones conducidas de baja frecuencia en las instalaciones industriales.

La Parte 2-4 de la norma IEC 61000 es análoga a la parte 2-2 en cuanto a lo que define y establece, pero en este caso se hace referencia a las instalaciones industriales. Esta norma



establece los límites máximos permitidos para la interferencia electromagnética generada por equipos eléctricos y electrónicos en el entorno industrial, así como los niveles de inmunidad de estos equipos a las perturbaciones electromagnéticas. Esto con motivo de poder garantizar que los equipos sean compatibles con el entorno electromagnético y no produzcan interferencias que puedan afectar a otros en el entorno.

Parte 3-2: Límites. Límites para las emisiones de corriente armónica (equipos con corriente de entrada ≤ 16 A por fase)

La Parte 3-2 de la norma IEC 61000 establece los niveles máximos permitidos de corriente armónica que pueden inyectar los equipos eléctricos y electrónicos a la red eléctrica, es decir, determina los límites para la distorsión armónica total. El objetivo es reducir la probabilidad de afectar negativamente a otros equipos conectados a la misma red.

Los fabricantes de equipos eléctricos y electrónicos deben asegurarse de que sus dispositivos cumplan con la normativa antes de ser comercializados. Además, la Parte 3-2 clasifica a los equipos en clases de acuerdo con la Tabla 2.3:

Clase	Cargas	Límites admisibles de armónicos en corriente
A	Equipos trifásicos equilibrados. Equipos electrodomésticos, excepto aquellos aparatos identificados como pertenecientes a la Clase D. Herramientas, a excepción de las herramientas portátiles. Reguladores de luz para lámparas de incandescencia. Equipos de audio.	Ver Tabla 2.4
B	Herramientas portátiles. Equipos de soldadura por arco que no sean equipos profesionales.	No deben exceder los valores absolutos dados en la Tabla 2.4, multiplicados por un factor de 1,5.
C	Equipos de iluminación	Ver Tabla 2.5
D	Ordenadores personales y pantallas de ordenadores personales. Receptores de televisión. *Los anteriores equipos deben tener una potencia especificada, inferior o igual a 600 W	Ver Tabla 2.6

Tabla 2.3. Límites de distorsión actuales para sistemas con clasificación de 120 V a 69 kV.



Orden del armónico n	Corriente armónica máxima admisible A
Armónicos impares	
3	2,3
5	1,14
7	0,77
9	0,40
11	0,33
13	0,21
$15 \leq n \leq 39$	$0,15 * 15/n$
Armónicos pares	
2	1,08
4	0,43
6	0,30
$8 \leq n \leq 40$	$0,23 * 8/n$

Tabla 2.4. Límites para equipos de Clase A. Fuente: IEC 61000-3-2.

Orden del armónico n	Corriente armónica máxima admisible expresada en porcentaje de la corriente de entrada a la frecuencia fundamental [%]
2	2
3	$30 * \lambda$
5	10
7	7
9	5
$11 \leq n \leq 39$ (solo armónicos impares)	3

* λ es el factor de potencia del circuito

Tabla 2.5. Límites para equipos de Clase C. Fuente: IEC 61000-3-2.

Orden del armónico n	Corriente armónica máxima admisible por vatio mA/W	Corriente armónica máxima admisible A
3	3,4	2,3
5	1,9	1,14
7	1,0	0,77
9	0,5	0,40
11	0,35	0,33
$13 \leq n \leq 39$ (solo armónicos impares)	$3,85/n$	Ver Tabla 2.4

Tabla 2.6. Límites para equipos de Clase D. Fuente: IEC 61000-3-2.

Además, la norma IEC 61000 detalla los periodos de observación necesarios para examinar un equipo teniendo en cuenta su tipo de comportamiento (Tabla 2.7).



Tipo de comportamiento de un equipo	Periodo de observación
Cuasi-estacionario	T_{obs} de duración suficiente para cumplir con los requisitos de repetibilidad.
Cíclico corto ($T_{ciclo} \leq 2,5 \text{ min}$)	$T_{obs} \geq 10$ Ciclos (método de referencia) o T_{obs} de duración o sincronización suficiente para cumplir los requisitos de repetibilidad.
Aleatorio	T_{obs} de duración suficiente para cumplir los requisitos de repetibilidad.
Cíclico largo ($T_{ciclo} > 2,5 \text{ min}$)	Ciclo completo del programa del equipo (método de referencia) o un periodo representativo de 2,5 min considerado por el fabricante como un periodo de funcionamiento con el mayor CAT.
*Por sincronización se entiende que el periodo de observación total es lo suficientemente ajustado para incluir un número entero exacto de ciclos del equipo, de manera que se cumplan los requisitos de repetibilidad.	

Tabla 2.7. Periodo de observación para los ensayos. Fuente: IEC 61000-3-2.

Los requisitos de repetibilidad de las medidas deberán ser mejor que $\pm 5\%$, cuando se cumplen las siguientes condiciones:

- El mismo equipo sometido a ensayo.
- Condiciones de ensayo idénticas.
- Mismo sistema de ensayo.
- Condiciones climáticas idénticas, si es relevante.

Parte 3-4: Límites. Limitación de las emisiones de corrientes armónicas en las redes de baja tensión para equipos con corriente asignada superior a 16 A.

La Parte 3-4 de la norma IEC 61000 es análoga en cuanto a lo que define y establece a la Parte 3-2, pero en este caso se hace referencia a equipos con corriente asignada superior a 16 A.

Esta Parte es parcialmente anulada y sustituida por la Norma IEC 61000-3-12 para equipos con corriente de entrada $\leq 75 \text{ A}$ por fase, aunque sigue siendo válida para los casos de equipos con corriente de entradas $> 75 \text{ A}$ por fase.

Parte 3-12: Límites para las corrientes armónicas producidas por los equipos conectados a las redes públicas de baja tensión con corriente de entrada $> 16 \text{ A}$ y $\leq 75 \text{ A}$ por fase.

La Parte 3-12 de la norma IEC 61000 anula y sustituye parcialmente a la Parte 3-4. Es análoga en cuanto a lo que define y establece la Parte 3-2, pero en referencia a equipos con corriente asignada superior a 16 A y $\leq 75 \text{ A}$ por fase.



Parte 4-7: Técnicas de ensayo y de medida. Guía general relativa a las medidas de armónicos e interarmónicos, así como a los aparatos de medida, aplicable a las redes de suministro y a los aparatos conectados a éstas.

El objetivo de la Parte 4-7 de la norma IEC 61000 es asegurar que las mediciones se realicen de manera estandarizada y que los resultados sean coherentes y comparables. Se centra en las medidas de armónicos e interarmónicos y los aparatos de medida utilizados para llevar a cabo dichas mediciones. La norma establece directrices sobre los procedimientos de ensayo, los equipos de medida necesarios y los requisitos para la presentación de resultados de las mediciones.

Parte 4-30: Técnicas de ensayo y de medida. Métodos de medida de la calidad de suministro.

La Parte 4-30 de la norma IEC 61000 describe los métodos de medida y los requisitos de instrumentación para evaluar la calidad del suministro eléctrico en términos de parámetros como tensión, corriente y frecuencia. Sirve de guía para que los proveedores de energía eléctrica identifiquen problemas en la red y puedan, en consecuencia, tomar medidas para mejorar la calidad del suministro.

2.2. Normativas vigentes a nivel nacional

Se cuenta con disposiciones, resoluciones y/o reglamentaciones de diferentes organizaciones a nivel nacional:

La Asociación Electrotécnica Argentina (AEA) establece normas y estándares técnicos para garantizar la seguridad, eficiencia y calidad en la producción, distribución y uso de la energía eléctrica en Argentina.

El Ente Nacional Regulador de Energía (ENRE) es el encargado de regular la actividad eléctrica y controlar que las empresas del sector (generadoras, transportistas, distribuidoras y consumidores) cumplan con las obligaciones establecidas en el Marco Regulatorio y en los Contratos de Concesión.

2.2.1. Disposición ENRE 0012/2009

La disposición ENRE 0012/2009 aprueba múltiples procedimientos, entre ellos, el de la resolución ENRE 0184/2000, en cuyo Anexo I se halla la Base Metodológica para el Control de la Calidad del Producto Técnico (tensión), es decir, determina los niveles de tensión y perturbaciones (fluctuaciones y armónicos).



2.2.2. Resolución ENRE 0390/2001

La resolución ENRE 0390/2001 establece los máximos errores aceptables en la medición de energía por parte de los equipos utilizados en el control de la calidad del producto juntamente con los respectivos transductores. Complementa a la Resolución ENRE 0184/2000.

2.2.3. Resolución ENRE 0184/2000

La resolución ENRE 0184/2000 aprueba la Base Metodológica para el Control de la Calidad del Producto Técnico que se presenta como Anexo I de la misma.

Para asegurar la calidad del producto técnico se realizan mediciones sobre el nivel de perturbación (flicker o armónicos) de tensión en un punto dado de suministro, determinando niveles de referencia. Esto garantiza que, si el nivel de perturbación no sobrepasa el nivel de referencia en un tiempo mayor al 5% del período de medición, entonces se considera aceptable la calidad del producto técnico y existe una adecuada compatibilidad electromagnética entre las instalaciones y equipos del usuario con la red (Tabla 2.8).

Impares no múltiplos de 3		Impares múltiplos de 3		Pares	
Orden de la armónica (n)	Nivel de Referencia de la armónica (en % con respecto a la fundamental)	Orden de la armónica (n)	Nivel de Referencia de la armónica (en % con respecto a la fundamental)	Orden de la armónica (n)	Nivel de Referencia de la armónica (en % con respecto a la fundamental)
5	6,0	3	5,0	2	2,0
7	5,0	9	1,5	4	1,0
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3,0	21	0,2	8	0,5
17	2,0	>21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			>12	0,2
25	1,5				
>25	$0,2+0,5*25/n$				

Tasa de Distorsión Total: TDT 8%

Tabla 2.8. Niveles de referencia para las armónicas de tensión en BT ($U \leq 1kV$), que no deben ser superados durante más del 5% del período de medición. Fuente: Resolución ENRE 0184/2000.

2.2.4. Resolución ENRE 0099/1997

La resolución ENRE 0099/1997 aprueba la reglamentación Base Metodológica para el Control de la Emisión de Perturbaciones - Producto Técnico - Etapa 2, integrada como Anexo de la misma.

Dicho anexo define el límite de emisión individual de un usuario como el nivel de perturbación que puede inyectar en la red en su punto de suministro y que no podrá durar más



del 5% del período de medición. Los límites admisibles de emisión individuales por parte de los usuarios se definen para fluctuaciones de tensión (flicker) y corrientes armónicas, de acuerdo con las distintas tarifas y tensiones de suministro (Tabla 2.9).

Esta resolución es de importancia para la empresa prestataria del servicio de distribución dado que indica la metodología y las sanciones pertinentes para usuarios que emitan corrientes armónicas.

ORDEN DE LA ARMÓNICA	USUARIOS T1	USUARIOS T2 Y T3 EN BT Y MT	USUARIOS T3 EN AT
(n)	Intensidad armónica máxima, en (A)	Intensidad armónica máxima, como % de la corriente de carga contratada.	Intensidad armónica máxima, como % de la corriente de carga contratada.
IMPARES NO MÚLTIPLOS DE 3			
5	2,28	12,0	6,0
7	1,54	8,5	5,1
11	0,66	4,3	2,9
13	0,42	3,0	2,2
17	0,26	2,7	1,8
19	0,24	1,9	1,7
23	0,20	1,6	1,1
25	0,18	1,6	1,1
> 25	4,5/n	$0,2 + 0,8 * 25/n$	0,4
IMPARES MÚLTIPLOS DE 3			
3	4,60	16,6	7,5
9	0,80	2,2	2,2
15	0,30	0,6	0,8
21	0,21	0,4	0,4
> 21	4,5/n	0,3	0,4
PARES			
2	2,16	10,0	10,0
4	0,86	2,5	3,8
6	0,60	1,0	1,5
8	0,46	0,8	0,5
10	0,37	0,8	0,5
12	0,31	0,4	0,5
> 12	3,68/n	0,3	0,5
TDTI (en %)	-	20,0	12,0

Tabla 2.9. Límites de emisión individuales de intensidades armónicas para usuarios con tarifa T1, T2 y T3.

Fuente: Resolución ENRE 0099/1997.

2.2.5. Reglamento AEA

Desde 2006 está vigente la Sección 771 de la Reglamentación para la Ejecución de Instalaciones Eléctricas en Inmuebles AEA 90364. Esta establece los requisitos fundamentales

para abordar el diseño, la implementación y la evaluación de una instalación eléctrica de baja tensión en una vivienda, oficina o local unitario.

Con el objetivo de mejorar, simplificar y otorgar herramientas específicas para el caso particular de viviendas, se estableció en 2017, la sección 770. La misma está vigente para viviendas unifamiliares hasta 63 A, con una corriente máxima de cortocircuito de 10 kA y para una clasificación de personas BA2 (niños en viviendas) y condición de evacuación BD1 (baja densidad ocupacional y condiciones fáciles de evacuación).

En este contexto, es relevante señalar que la norma AEA 90364-7-770 Edición 2017, en su sección de "Determinación de la sección", no incluye ninguna indicación acerca de la presencia de armónicos en la corriente eléctrica y sus posibles implicancias. De igual modo, a lo largo del texto no se aclara la manera de abordar problemas relacionados con la presencia de armónicos en una instalación eléctrica. En contraposición, en la AEA 90364-7-771 Edición 2006, en el mismo apartado de "Determinación de Sección", existe un punto específico donde se detalla el factor de corrección por contenido armónico en las corrientes. Además, se menciona en varias notas la importancia de los armónicos en la instalación y, en especial, la consideración del conductor neutro debido a estos.

2.3. Normativa vigente a nivel empresa prestataria del servicio eléctrico

La Empresa Provincial de Energía de la Provincia de Santa Fe (EPESF) no cuenta con una regulación específica en cuanto a emisión de armónicos en corriente y/o en tensión para usuarios residenciales.

Como ejemplo cercano, el Ente Provincial Regulador de la Energía de Entre Ríos (EPRE) en su resolución N.º 206/08: Especificaciones Técnicas para Acometidas Eléctricas, detalla en el Anexo I los límites admisibles de emisión individuales por parte de los usuarios para fluctuaciones de tensión (flicker) y corrientes armónicas, de acuerdo con la tarifa contratada.



CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE CONTENIDO DE ARMÓNICOS EN CARGAS PARTICULARES

En este capítulo, se detallan las consideraciones y la metodología empleada para detectar y cuantificar en las viviendas la presencia de cargas no lineales, y seguidamente, se muestran los resultados de las diferentes mediciones efectuadas que darán lugar a las conclusiones de este trabajo.

1. Consideraciones

A lo largo de este capítulo, se llamará carga a todo electrodoméstico, aparato o equipo eléctrico que es factible de encontrarse en una vivienda residencial y cuyo consumo de energía puede llegar a tener impacto en la instalación y/o facturación final de energía eléctrica.

Durante las mediciones, la frecuencia se asume constante e igual a 50 Hz por tratarse de la frecuencia adoptada por el sistema eléctrico argentino y cuyas variaciones no influyen de manera apreciable en las mediciones pertinentes.

1.1. Selección de cargas

Para la selección de cargas, se procuró que las mismas fueran representativas de la mayoría de las viviendas unifamiliares, es decir, que sean viables de hallarse en ellas. Además, se intentó medir la mayor variedad posible de modelos y/o marcas de equipos similares para que la muestra sea significativa.

Para facilitar el análisis estadístico y, a su vez, agrupar cargas de idéntica naturaleza, se categorizó el total de mediciones de acuerdo a la Tabla 3.1.



Categoría	Cantidad de cargas medidas	Clasificación de acuerdo con IEC 61000-3-2
Aires acondicionados	14	Clase A
Equipos de audio	7	Clase A
Estabilizadores de tensión	3	Clase D
Freezer	3	Clase A
Heladeras	14	Clase A
Herramientas portátiles	5	Clase B
Hornos	2	Clase A
Lavarropas	5	Clase A
Luminarias +25W	3	Clase C
Luminarias -25W	9	Clase C
Microondas	4	Clase A
Ordenadores personales	7	Clase D
Otros aparatos	3	Clase A
Reguladores de velocidad	6	Clase D
Televisores	10	Clase D
Ventiladores	7	Clase A
Total de mediciones	102	-

Tabla 3.1. Categorización y cantidad de cargas ensayadas. Fuente: elaboración propia.

1.2. Metodología de medición

Para realizar las mediciones se consideró lo que establece la IEC 61000-3-2 en su Anexo C (Normativo). Sin embargo, se priorizó el funcionamiento habitual del equipo en la vivienda para considerar situaciones realistas de uso y no mínimas y/o máximas como se puede necesitar en un ensayo de tipo.

1.2.1. Analizador de redes

El instrumento de medición empleado es un analizador de redes Power Quality Analyser MI 2192 diseñado para la medición trifásica, ya sea mediante una configuración de 3 o 4 hilos, o bien, mediante el método de los 2 vatímetros. Para computar los armónicos en las señales muestreadas se utilizó un conversor A/D que cuenta con un intervalo de registro de 160 ms (8 ciclos a 50 Hz).

Complementando el equipo se encuentran los siguientes elementos:

- Tres pinzas amperométricas 1000/1.
- Tres pinzas amperométricas 5/1.
- Seis pinzas voltimétricas.

1.2.2. Esquema de conexión

Para realizar mediciones monofásicas con el instrumento de medición trifásico se empleó el método de los 4 hilos. En esta configuración, se conecta únicamente un transformador

de corriente (TI) al conductor vivo, mientras que la referencia de tensión se establece entre la fase viva y el neutro. Las terminales restantes de tensión del instrumento se conectan al conductor neutro para evitar corrientes parasitas y/o ruido (Figura 3.1).

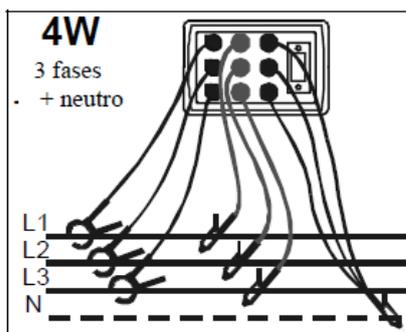


Figura 3.1. Esquema del método de medición adoptado, donde solo se considera L1. Fuente: Manual de funcionamiento de Power Quality Analyser MI2292.

Las mediciones con el instrumento fueron previamente contrastadas con mediciones llevadas a cabo con una pinza amperométrica Fluke Power Quality Clamp Meter 345. Los datos de THD recopilados eran correctos y no se excedían de los márgenes de error detallados en la Tabla 3.2.

Escala	Límites de error		Resolución
	THD	HD	
I_r, U_r			I_r, U_r
2...100%	$0,2 \% * U_r / U (I_r / I)$	$0,2 \% * U_r / U (I_r / I)$	2...100%

Tabla 3.2. Errores del analizador de redes en la medición de THD. Fuente: Manual de funcionamiento de Power Quality Analyser MI2292

Donde THD es la distorsión armónica total, HD es la distorsión armónica e I_r y U_r son rangos de señal.

Para facilitar las mediciones se ideó un dispositivo de construcción propia, el cual consistió en una prolongación con un enchufe macho de 10 A en un extremo, un enchufe hembra de 20 A en el otro, dos pequeños interruptores automáticos unipolares de 25 A clase C (que cumplieron funciones de corte y protección) y terminales de tensión (donde se conectaron las puntas de prueba del equipo). En los casos donde el equipo se encontraba directamente conectado a la red, se procuraba tomar la referencia de tensión desde el tomacorriente más cercano al aparato.

1.2.3. Ajuste

El ajuste de los parámetros del instrumento se realizó desde el instrumento y luego se corroboró que la configuración fuera correcta desde el software (Figura 3.2, 3.3 y 3.4).

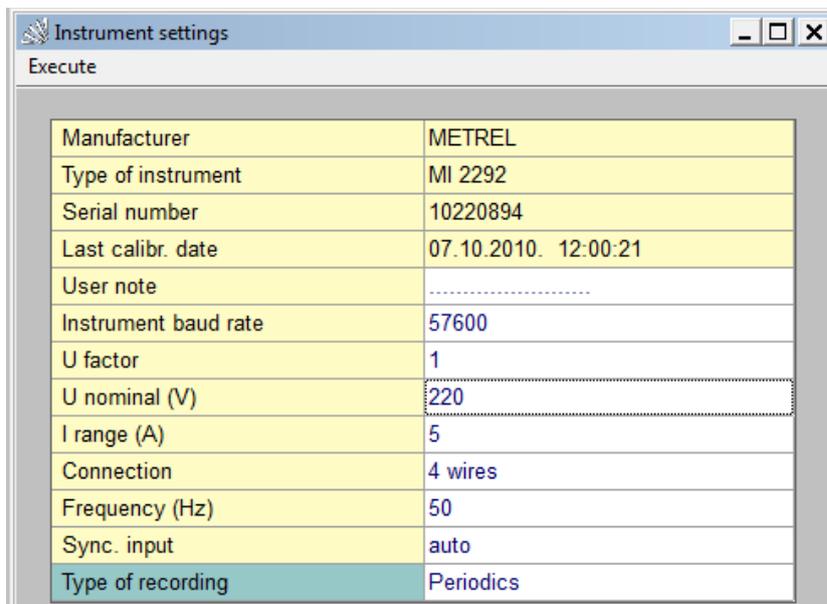


Figura 3.2. Visualización de la configuración básica adoptada del analizador de redes. Fuente: software PowerLink.

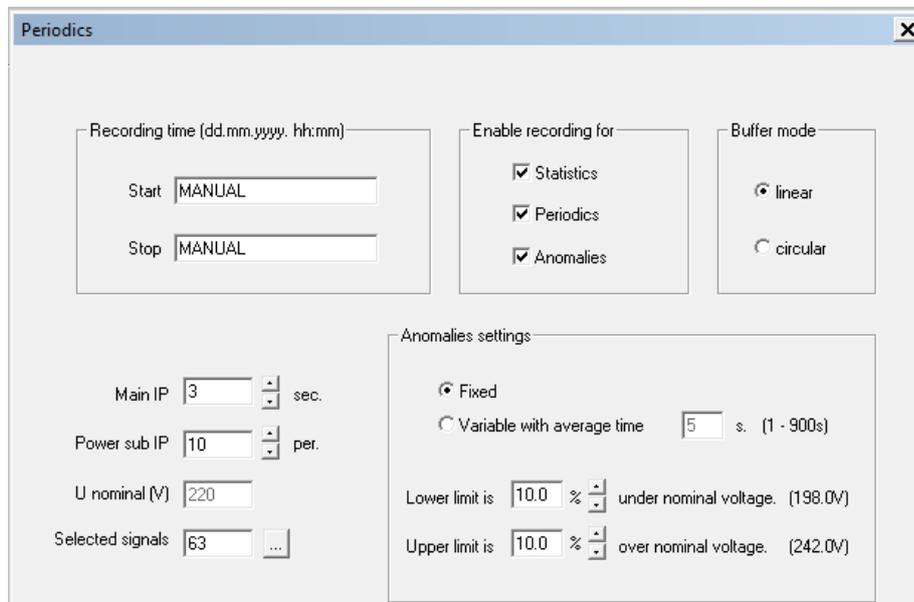


Figura 3.3. Visualización de la configuración de medición adoptada del analizador de redes. Fuente: software PowerLink.



Figura 3.4. Visualización de las señales registradas por el analizador de redes. Fuente: software PowerLink.

1.3. Software y tratamiento de datos

El software que se empleó es PowerLink (propio del instrumento), el cual se ejecutó en una máquina virtual (VirtualBox) debido a que su compatibilidad está limitada a equipos cuyo sistema operativo es Windows 7 32bits. La comunicación entre el analizador y el ordenador es por medio de un puerto serie RS-232 con adaptador USB 2.0.

Si bien el software del instrumento cuenta con un módulo de análisis, este está limitado en cuanto a capacidades y obliga a trabajar siempre desde el entorno de la máquina virtual. Por estos motivos, para procesar los datos se utilizó el programa Excel de la suite ofimática Office 365 y, mediante comandos propios generados en VBA (acrónimo de *Visual Basic for Applications*), se depuraron, condensaron y visualizaron los resultados.

1.3.1. Implementación de macros en VBA

VBA es un lenguaje de programación desarrollado por Microsoft que se utiliza para automatizar tareas en aplicaciones de Microsoft Office, como lo es Excel. De esta manera, una macro es una acción o un conjunto de acciones que se puede ejecutar todas las veces que se requiera. Las macros se pueden grabar para automatizar tareas comunes, o bien, ser escritas mediante el uso del lenguaje de programación VBA. De esta manera, para analizar los resultados se programaron diferentes macros (ver Anexo V) para automatizar ciertas tareas:

1. Convertir archivos “.txt” en “.xlsx”.
2. Aplicar múltiples funciones sobre los distintos archivos generados para cada equipo medido dentro de una misma categoría:
 - a. Remover columnas de datos.
 - b. Calcular parámetros.
 - c. Promediar parámetros.



- d. Generar tabla resumen individual.
- e. Dar formato a tablas.
3. Generar un resumen por categoría.
4. Ponderar los armónicos por categoría.

1.3.2. Descarga de datos

Los datos de cada medición se descargaron de manera individual en formato “.pmd” para asegurar la integridad de los mismos. Seguidamente, para cada archivo se generó un único archivo con extensión “.txt” separado por tabuladores. Finalmente, mediante una macro, los archivos de texto se convirtieron y guardaron como hojas de Excel.

1.4. Metodología de medición y análisis

La IEEE 519-2014 establece que el ancho de la ventana de medición utilizada por los instrumentos digitales (que utilizan la Transformada Discreta de Fourier) debe ser de 10 ciclos para sistemas de potencia de 50 Hz (aproximadamente 200 ms). De esta manera, las componentes espectrales están disponibles cada 5 Hz.

1.4.1. Medición de armónicos de muy corto tiempo

Los valores armónicos a muy corto tiempo se evalúan en un intervalo de 3 segundos basados en una agregación de 15 ventanas consecutivas de 10 ciclos para sistemas de potencia de 50 Hz. Resultando en un total de 150 valores registrados.

$$F_{n,vs} = \sqrt{\frac{1}{15} \sum_{i=1}^{15} F_{n,i}^2}$$

1.4.2. Medición de armónicos de corto tiempo

Los valores armónicos a corto tiempo se evalúan en un intervalo de 10 minutos basados en una agregación de 200 valores de muy cortos tiempos consecutivos para un componente de frecuencia específica. Resultando así en un total de 600 valores registrados.

$$F_{n,sh} = \sqrt{\frac{1}{200} \sum_{i=1}^{200} F_{(n,vs),i}^2}$$

1.4.3. Elección

De manera general, se intentó en todos los casos optar por realizar la medición de armónicos de corto tiempo. En aquellas mediciones que, por cuestiones propias del lugar y/o del momento, no alcanzaron a cumplir el lapso preestablecido de medición, este se acortó siempre a un múltiplo entero de los armónicos de muy corto tiempo (60, 100 o 140).

Finalmente, para comenzar con el registro de los valores, se esperó a que la carga alcance las condiciones de funcionamiento asignada.

2. Registros y análisis de contenido de armónicos en cargas individuales

Para el registro de las mediciones efectuadas, se empleó la numeración consecutiva de las distintas cargas ensayadas, razón por la cual la numeración en las distintas categorías no sigue un orden. A partir del número de medición, en el Anexo VI, se pueden ver detalles completos acerca de la carga medida (tipo, modelo, marca, características, condiciones de ensayo y resultados).

En las tablas de cada medición, se destaca con tonalidad roja los valores a considerar por ser elevados (potencia aparente y THD) o bajos (factor de potencia). Además, se realiza un promedio ponderado de acuerdo con la potencia aparente total.

Como el objetivo de estas mediciones es identificar cuáles son las cargas no lineales que tienen una mayor contribución a la distorsión armónica en una vivienda unifamiliar, se analizó en mayores detalles aquellas en donde al menos una medición supere el 10% de THD en corriente. Esta cota inferior se basa en que, si se calcula el factor de distorsión y el incremento de la corriente eficaz, estos parámetros resultan muy cercanos a 1:

$$FD = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,1^2}} = 0,9950$$

$$I_{RMS} = I_1 * \sqrt{1 + 0,1^2} = 1,0050 * I_1$$

Finalmente, solo en aquellos casos donde el THD en corriente es elevado y/o el consumo de la carga sea significativo, se muestra el análisis detallado según la normativa IEC 61000-3-2. El resto de las evaluaciones que cumple en su totalidad con la norma se encuentra en el Anexo VII.



2.1. Aires acondicionados

Se recogieron datos de catorce aires acondicionados de diferentes marcas y modelos. Este tipo de cargas representa un consumo considerable y persistente en las viviendas durante el verano fundamentalmente. Se agruparon en un solo conjunto independientemente del tipo (ventana o tipo *split*) y de la tecnología de funcionamiento (tradicional o tipo *Inverter*). Para las mediciones, se simularon condiciones de funcionamiento habituales, es decir, las recomendadas en verano por ser lo más usual en la zona de estudio: la temperatura seteada fue de 25°C y con ventilador a velocidad media. Los resultados indican que el factor de potencia suele ser elevado, especialmente en los equipos de mayor potencia.

Medición	Peso	Aparente [VA]	Factor de Potencia	THDi [%]
MED019	0,08	1037,29	0,98	21,51
MED020	0,04	556,19	0,99	16,69
MED034	0,06	747,08	0,99	14,42
MED036	0,04	544,08	0,84	16,43
MED037	0,06	726,95	0,99	14,46
MED042	0,06	696,31	0,92	31,57
MED043	0,07	911,51	0,98	18,59
MED062	0,09	1110,50	0,96	16,57
MED067	0,06	800,63	0,98	16,33
MED073	0,04	498,19	0,92	20,18
MED094	0,07	902,75	0,98	20,42
MED116	0,07	884,60	0,97	21,93
MED117	0,10	1222,97	0,98	20,18
MED135	0,08	1044,76	0,93	16,70
MED137	0,07	901,27	0,79	18,91
Promedio	1,00	890,18 ± 201,01	0,95 ± 0,05	19,01 ± 3,82

Tabla 3.3. Promedio de mediciones en aires acondicionados. Fuente: elaboración propia.

Las mediciones de THD en corriente se encuentran en el intervalo de 14-32%. No se observa que exista una relación entre los valores registrados y el tipo y/o tecnología de funcionamiento del aire acondicionado.

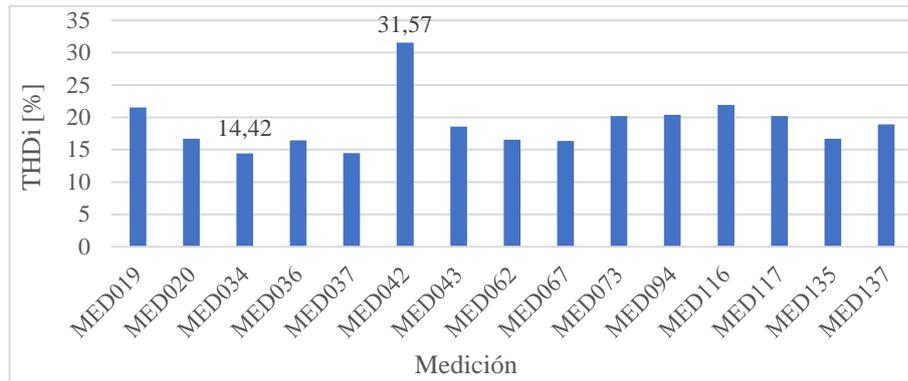


Figura 3.5. THD en corriente promedio en aires acondicionados. Fuente: elaboración propia.

El elevado factor de potencia no se traduce necesariamente en una corriente de distorsión baja. Esta adopta un valor promedio a considerar dado a que se trata de potencias importantes para lo que significa una vivienda.

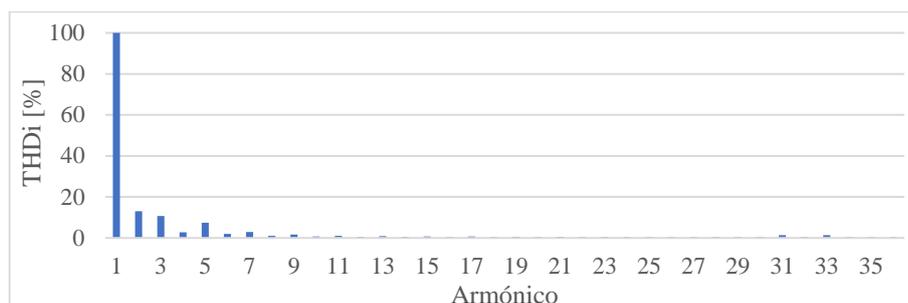
$$I_{RMS} = \frac{S}{V} = \frac{890 \text{ VA}}{226 \text{ V}} = 3,94 \text{ A}$$

$$I_1 = \frac{I_{RMS}}{\sqrt{1 + THD_1^2}} = \frac{3,94 \text{ A}}{\sqrt{1 + 0,190^2}} = 3,87 \text{ A}$$

$$I_{Distorsión} = \sqrt{I_{RMS}^2 - I_1^2} = \sqrt{3,94^2 - 3,87^2} = 0,74 \text{ A}$$

El valor de tensión empleado en la anterior expresión es el promedio ponderado de las mediciones correspondientes a la carga analizada.

En el espectro de armónicos, se tiene una predominancia de la segunda armónica por sobre el resto de las impares lo que provoca que la onda se deforme ligeramente de manera asimétrica. Este resultado es contradictorio con la teoría donde en principio al tratarse de cargas monofásicas los armónicos de orden par debieran cancelarse.



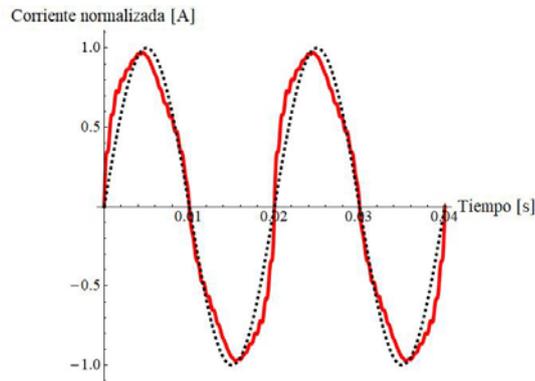


Figura 3.6. Espectro y reconstrucción de la forma de onda en aires acondicionados. Fuente: elaboración propia.

En este caso, se analiza el contenido de armónicas de acuerdo con la IEC 61000-3-2. Este tipo de cargas se clasifica como Clase A, por lo que la emisión de corriente armónica admisible se expresa en términos absolutos de corriente. Se observa que todos los valores de armónicos ponderados están por debajo de la emisión máxima admitida por la norma.

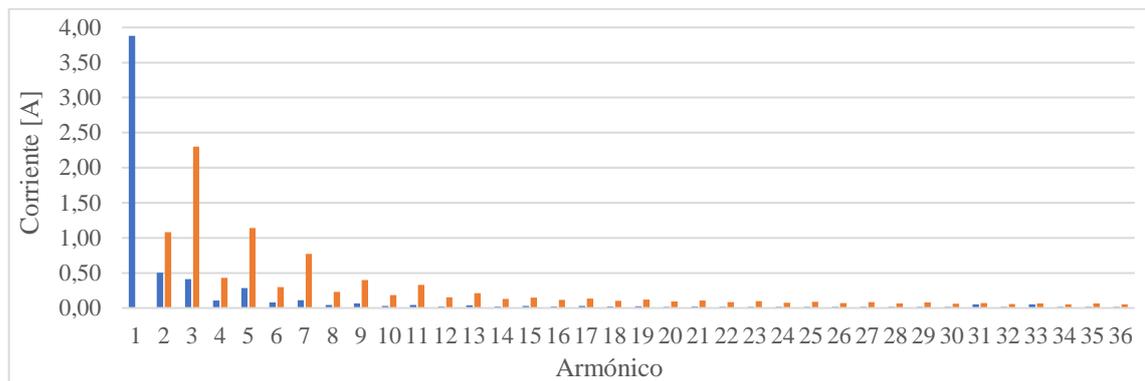


Figura 3.7. Análisis de acuerdo con la IEC 61000-3-2 en los valores promedios de aires acondicionados. En azul, valores promedios obtenidos; en naranja, valores máximos permitidos. Fuente: elaboración propia.

2.2. Equipos de audio

Se recogieron datos de siete equipos de audio de diferentes marcas y modelos en condiciones habituales de funcionamiento. En esta categoría se agruparon todos los equipos de audio en sus diferentes variantes y versiones (equipo de música, *Home Theater*, minicomponente y/o parlante único), ya que se considera que la finalidad de todos los aparatos mencionados previamente es idéntica. Los resultados evidencian que los peores factores de potencia se encuentran asociados a los mayores contenidos de armónicos.



Medición	Peso	Aparente [VA]	Factor de Potencia	THDi [%]
MED012	0,12	30,31	0,77	58,18
MED016	0,12	28,90	0,44	181,23
MED039	0,09	22,83	0,74	48,69
MED065	0,26	66,12	0,80	52,76
MED090	0,17	42,44	0,70	94,31
MED110	0,12	29,28	0,78	52,55
MED111	0,12	30,61	0,40	163,18
Promedio	1,00	40,89 ± 16,03	0,68 ± 0,15	88,38 ± 49,22

Tabla 3.4. Promedio de mediciones en equipos de audio. Fuente: elaboración propia.

Las mediciones de THD en corriente se encuentran en el intervalo de 48-182%. La mayor presencia de armónicos se observa en los dos equipos *Home Theater* ensayados que superan el 150%.

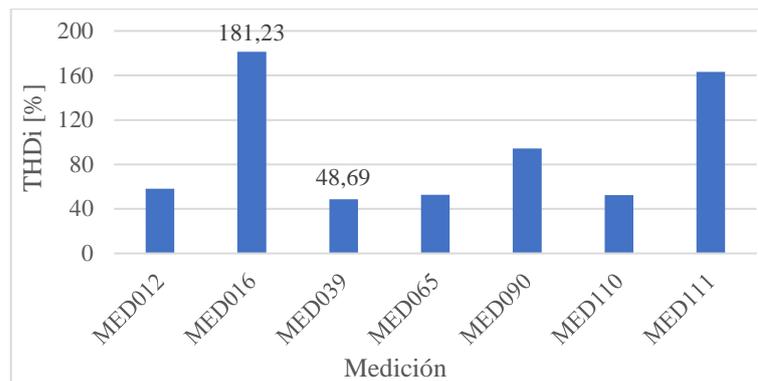
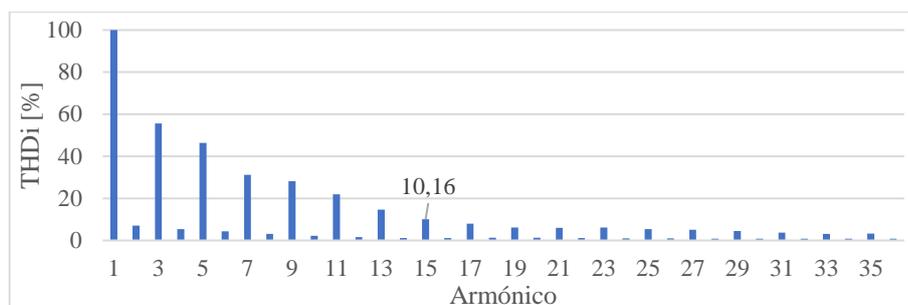


Figura 3.8. THD en corriente promedio en equipos de audio. Fuente: elaboración propia.

En el espectro de armónicos se observa una fuerte presencia de todos los armónicos impares, donde el armónico de orden 15 adopta un valor superior al 10%. Esto provoca que la onda se deforme significativamente y la corriente alcance valores picos 1,8 veces mayor a la señal senoidal pura.



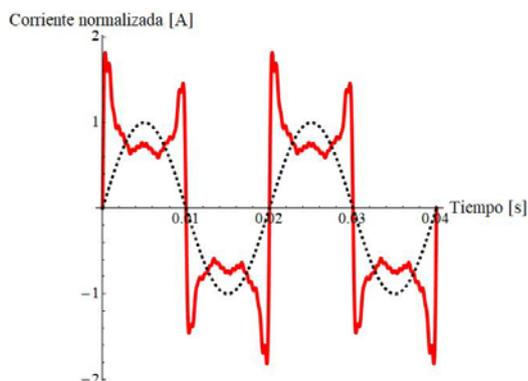


Figura 3.9. Espectro y reconstrucción de la forma de onda en equipos de audio. Fuente: elaboración propia.

2.3. Estabilizadores de tensión

Se recogieron datos de tres equipos estabilizadores de tensión de diferentes marcas y modelos con las cargas habituales conectadas. Este tipo de cargas es habitual en viviendas en donde se busca, por medio de estos dispositivos, proteger elementos sensibles, como ser computadoras, televisores y/u otros aparatos electrónicos y, por lo tanto, la potencia consumida está condicionada a los equipos conectados. Se realizó una medición sobre uno de ellos en vacío, es decir, con la carga desconectada, con el objetivo de simular otro escenario de uso en donde el dispositivo se encuentra en *stand-by* hasta que se encienda la carga conectada.

Medición	Peso	Aparente [VA]	Factor de Potencia	THDi [%]
MED023	0,43	274,45	0,63	121,18
MED025	0,05	32,12	0,19	54,73
MED038	0,27	175,34	0,60	116,80
MED044	0,25	161,51	0,94	17,31
Promedio	1,00	206,99 ± 65,27	0,68 ± 0,18	90,6 ± 44,7

Tabla 3.5. Promedio de mediciones en estabilizadores de tensión. Fuente: elaboración propia.

Las mediciones de THD en corriente se encuentran muy dispersas, en el intervalo de 17-122%. Se destaca que, en la segunda medición, donde el equipo se encontraba en *stand-by*, el contenido de armónicos es sumamente inferior a la primera medición efectuada con carga.

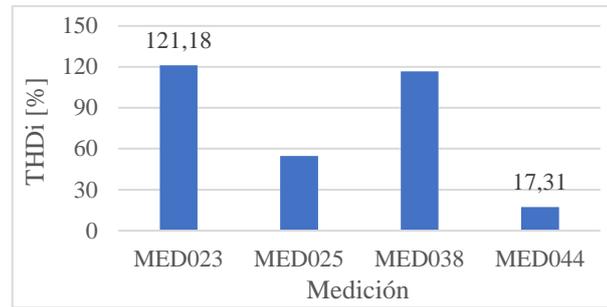


Figura 3.10. THD en corriente promedio en estabilizadores de tensión. Fuente: elaboración propia.

En el espectro de armónicos se observa una fuerte presencia de todos los armónicos impares, donde el armónico de orden 13 adopta un valor superior al 10%. Esto provoca que la onda se deforme de manera significativa y la corriente alcance valores picos 1,7 veces mayor a la señal senoidal pura.

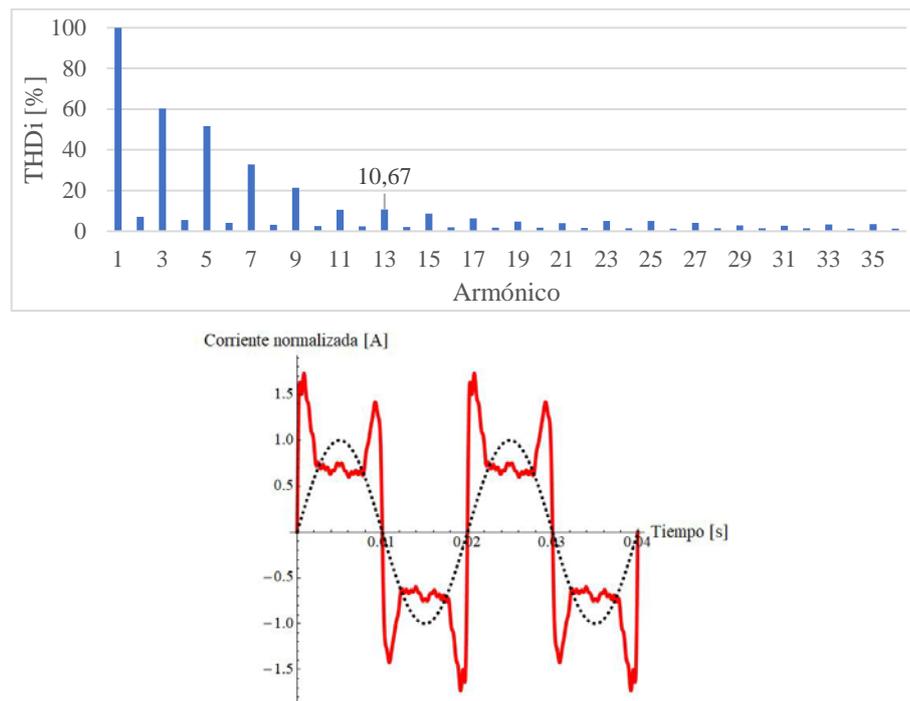


Figura 3.11. Espectro y reconstrucción de la forma de onda en estabilizadores de tensión. Fuente: elaboración propia.

En este caso vale la pena analizar el contenido de armónicas de acuerdo con la IEC 61000-3-2. Por la naturaleza de la carga conectada, se asumirá su clasificación como Clase D, por lo que la emisión de corriente armónica admisible se expresa en mA/W. Se observa que, a excepción del tercer armónico, todos los valores de armónicos impares ponderados están por encima de la emisión máxima admitida por la norma.

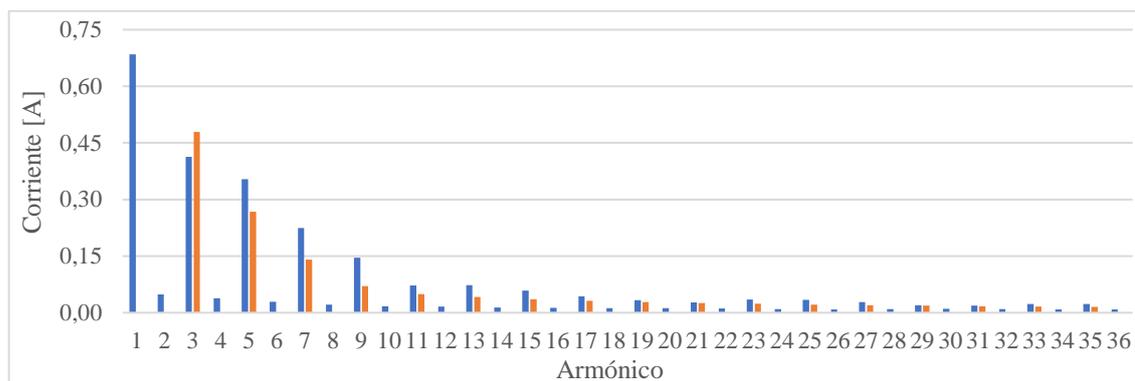


Figura 3.12. Análisis de acuerdo con la IEC 61000-3-2 en los valores promedios de estabilizadores de tensión. En azul, valores promedios obtenidos; en naranja, valores máximos permitidos. Fuente: elaboración propia.

2.4. Freezer

Se recogieron datos de tres freezers de diferentes marcas y modelos en condiciones normales de funcionamiento. Si bien el freezer no es un electrodoméstico que se encuentra en todas las viviendas, en aquellas que cuentan con uno, este representa un consumo constante en el tiempo.

Medición	Peso	Aparente [VA]	Factor de Potencia	THDi [%]
MED058	0,48	318,17	0,67	8,53
MED071	0,38	253,47	0,53	4,60
MED106	0,13	88,66	0,44	4,09
Promedio	1,00	262,52 ± 74,72	0,58 ± 0,09	6,43 ± 2,04

Tabla 3.6. Promedio de mediciones en freezer. Fuente: elaboración propia.

Todas las mediciones de THD en corriente arrojan resultados por debajo del 10%, por tanto, la contribución permanente de contaminación a la red es despreciable.

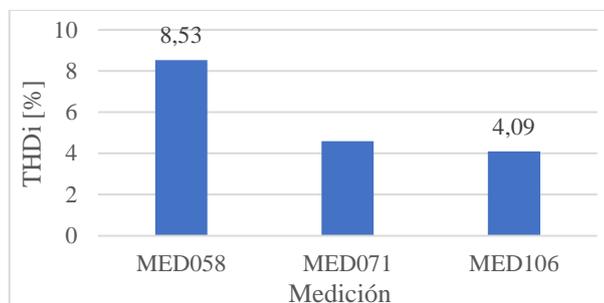


Figura 3.13. THD en corriente promedio en freezer. Fuente: elaboración propia.

2.5. Heladeras

Se recogieron datos de catorce heladeras de diferentes marcas, modelos y tecnologías de funcionamiento (tradicional o tipo *inverter*) en condiciones normales de funcionamiento. La



heladera es un electrodoméstico muy común de encontrar en todas las viviendas y representa un consumo constante en el tiempo.

Medición	Peso	Aparente [VA]	Factor de Potencia	THDi [%]
MED010	0,08	197,53	0,95	11,79
MED011	0,08	200,63	0,66	4,87
MED021	0,06	134,46	1,00	3,00
MED047	0,07	164,16	0,65	7,66
MED055	0,01	31,41	0,09	49,39
MED056	0,06	153,78	0,62	4,93
MED063	0,05	132,18	0,94	15,72
MED068	0,02	43,80	0,51	1,92
MED070	0,10	244,44	0,64	6,50
MED072	0,08	202,16	0,66	7,91
MED092	0,09	207,87	0,66	8,59
MED096	0,05	121,19	0,50	165,83
MED107	0,15	359,57	0,51	4,42
MED112	0,09	211,88	0,53	5,77
Promedio	1,00	208,32 ± 76,18	0,66 ± 0,17	15,52 ± 35,09

Tabla 3.7. Promedio de mediciones en heladeras. Fuente: elaboración propia.

Los porcentajes de THD en corriente se encuentran en el intervalo de 1-16%, a excepción de dos mediciones que se encuentran muy por encima de esta media y corresponden a las realizadas sobre las heladeras tipo *inverter*.

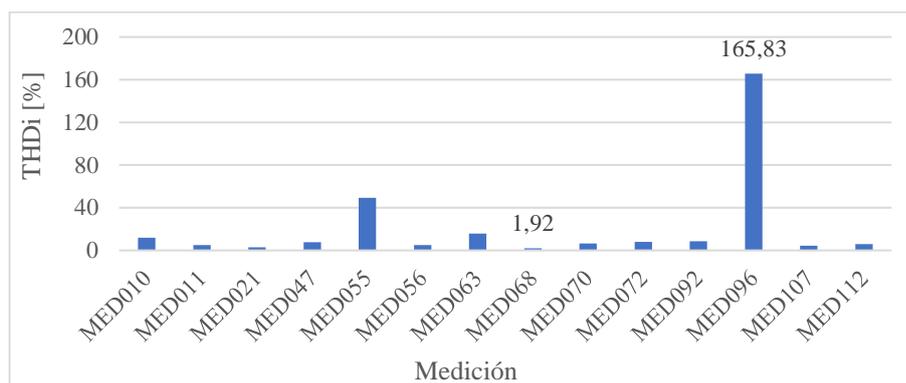


Figura 3.14. THD en corriente promedio en heladeras. Fuente: elaboración propia.

En el espectro de armónicos se observa una débil presencia del primer armónico par y del resto de armónicos impares, donde solo el tercero supera el 10%. Esto provoca que la onda se deforme levemente de manera asimétrica y permanezca muy similar a la señal senoidal pura.

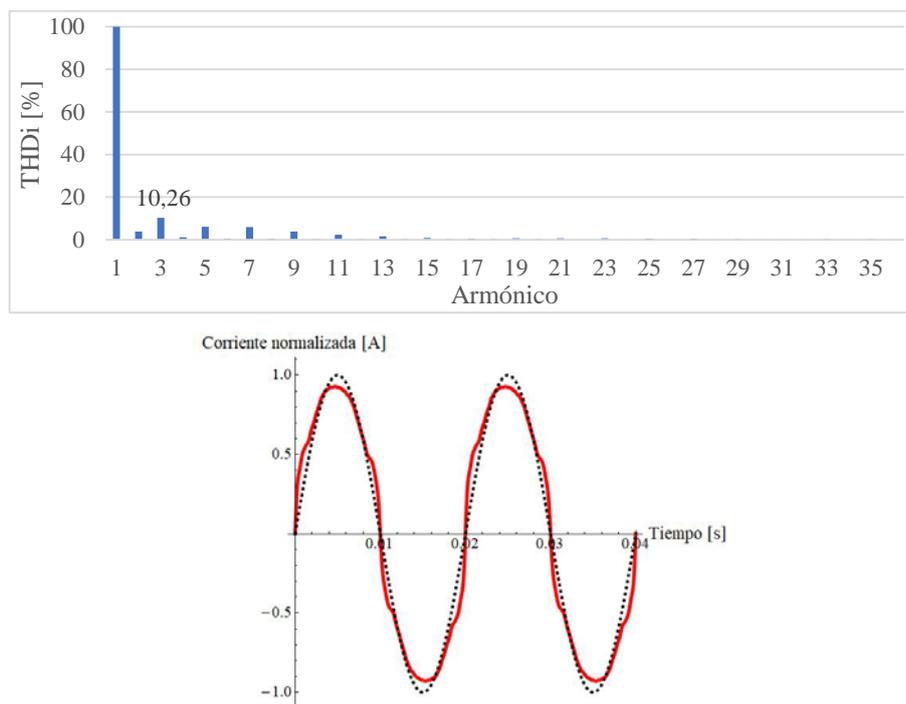


Figura 3.15. Espectro y reconstrucción de la forma de onda en heladeras. Fuente: elaboración propia.

2.6. Herramientas Portátiles

Se recogieron datos de cinco cargas de diferente naturaleza en condiciones de funcionamiento habituales. En esta categoría se incluyen algunas herramientas de uso doméstico como ser cortadoras de césped, aspiradoras y soldadoras monofásicas compactas tipo *inverter*.

Se observa que el consumo de cada carga es significativo, pero se debe considerar que el uso de estas suele estar muy acotado en el tiempo. Por la naturaleza tan dispar de las cargas, no se calcula una desviación estándar, pero si, a fines de resumir y poder agrupar las mediciones, se ponderan sus valores medios.

Medición	Peso	Aparente [VA]	Factor de Potencia	THDi [%]
MED013	0,19	792,67	0,54	6,54
MED031	0,29	1218,54	0,99	11,33
MED102	0,30	1293,71	0,57	40,94
MED125	0,16	695,67	0,97	16,10
MED131	0,06	263,50	0,99	12,49
Promedio	1,00	1017,86	0,78	20,27

Tabla 3.8. Promedio de mediciones en herramientas portátiles. Fuente: elaboración propia.

Se destaca la medición de la soldadora monofásica, que arroja el mayor THD en corriente y uno de los peores factores de potencia.

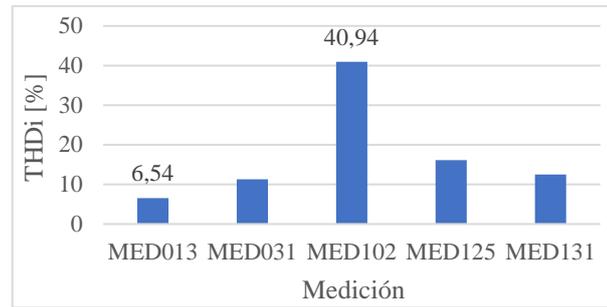


Figura 3.16. THD en corriente promedio en herramientas portátiles. Fuente: elaboración propia.

En el espectro de armónicos se observa una fuerte presencia del tercer armónico. La onda se deforma levemente de manera asimétrica y la señal de corriente alcance picos 0,88 veces menores a la señal senoidal pura.

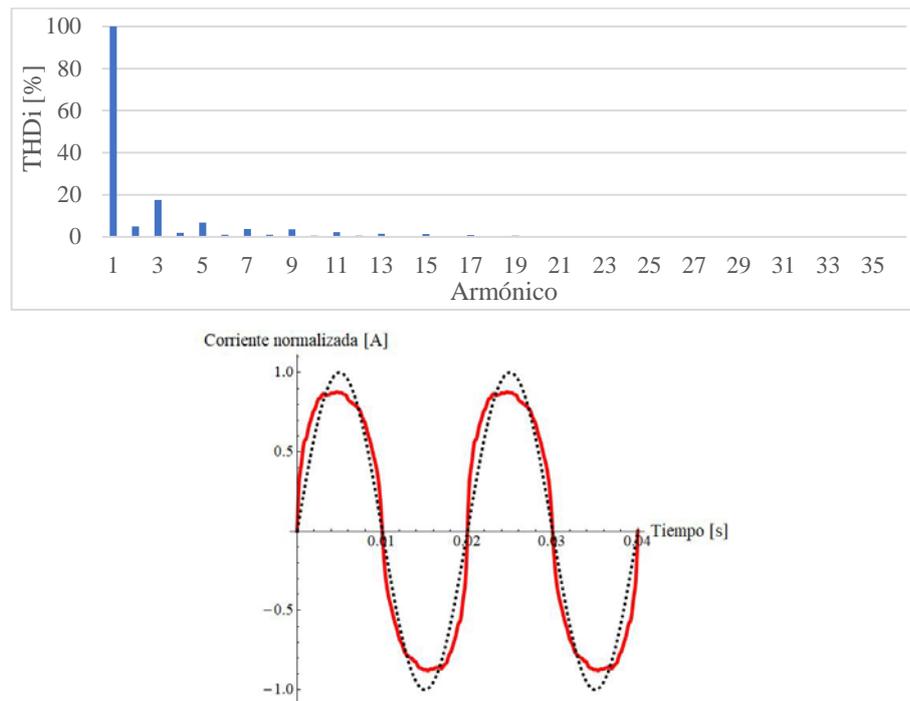


Figura 3.17. Espectro y reconstrucción de la forma de onda en herramientas portátiles. Fuente: elaboración propia.

2.7. Hornos

En 2020 el Ente Nacional Regulador del Gas elaboró un informe comparativo de la conveniencia de la cocción a gas o electricidad, en el cual se concluye que a largo plazo la cocción a gas es más económica (Ente Nacional Regulador del Gas [ENRE], 2020). Por esto, y por tradición, normalmente se cuenta con hornos a gas en las viviendas. Sin embargo, en la actualidad se comercializan hornos eléctricos que en algunos casos se presenta como una

alternativa viable para algunas viviendas. Los hornos eléctricos se caracterizan por un elevado consumo de energía y representan una importante carga domiciliaria, aunque esta sea puntual en el tiempo. Se recogieron dos mediciones, una sobre un horno eléctrico convencional y otra sobre un horno de pan.

Medición	Peso	Aparente [VA]	Factor de Potencia	THDi [%]
MED046	0,04	44,69	0,64	2,86
MED048	0,96	1104,64	0,84	1,23
Promedio	1,00	1063,43 ± 204,9	0,83 ± 0,04	1,29 ± 0,32

Tabla 3.9. Promedio de mediciones en hornos. Fuente: elaboración propia.

Por el principio de funcionamiento de estas cargas, se asume una gran linealidad, hecho que se ve reflejado en que la presencia de armónicos es muy baja (inferior al 3%).

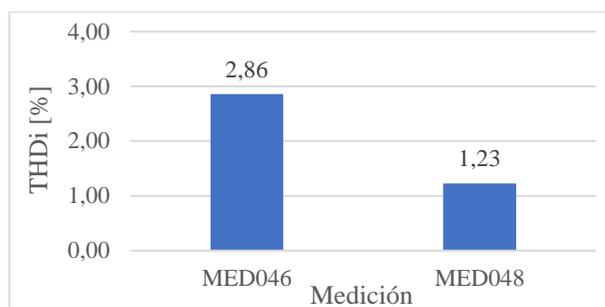


Figura 3.18. THD en corriente promedio en hornos. Fuente: elaboración propia.

2.8. Lavarropas

Se recogieron datos de cinco lavarropas de distintas marcas y modelos, bajo cargas de ropa normales y los programas habituales de uso de la vivienda. El lavarropas es un electrodoméstico común de encontrar en las viviendas y se caracteriza por ciclos de funcionamiento por lo general irregulares y de potencia variable según el programa seleccionado. Se incluyó una medición de una centrifugadora por tratarse de una función adicional que suelen realizar los lavarropas.

Se observa una gran disparidad entre los valores promedios de todas las potencias registradas. Particularmente, la segunda medición presenta una potencia aparente muy superior al resto, pero a su vez, es la que cuenta con mejor factor de potencia.



Medición	Peso	Aparente [VA]	Factor de Potencia	THDi [%]
MED049	0,05	151,47	0,78	2,88
MED059	0,50	1599,44	0,97	7,30
MED101	0,06	197,21	0,82	12,48
MED129	0,05	148,23	0,82	2,62
MED133	0,34	1075,73	0,50	13,93
Promedio	1,00	1197,7 ± 502,39	0,78 ± 0,21	9,44 ± 3,74

Tabla 3.10. Promedio de mediciones en lavarropas. Fuente: elaboración propia.

Las mediciones de THD en corriente arrojan resultados que se encuentran todos por debajo del 15%. Se ha de notar que la tecnología de funcionamiento de todos los lavarropas es convencional.

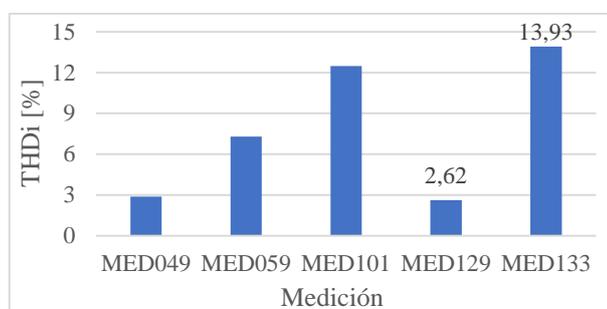
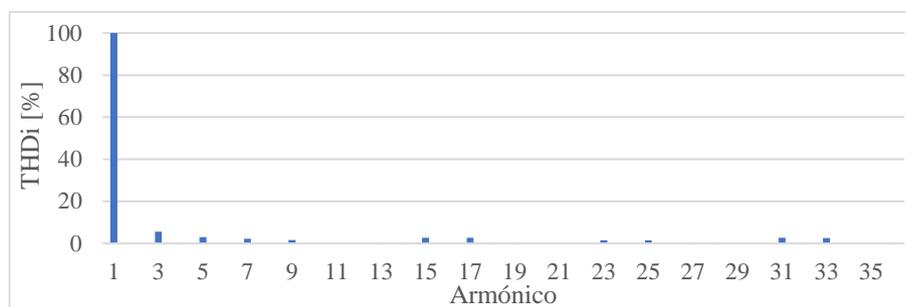


Figura 3.19. THD en corriente promedio en lavarropas. Fuente: elaboración propia.

En el espectro de armónicos se observa una débil presencia de armónicos de orden impar (con ausencia de los de orden 11, 13, 19, 21, 27 y 29), siendo estos similares en magnitud a partir del 5to. Esto provoca que la onda se deforme de manera simétrica y presente varios máximos relativos, pero siga permaneciendo similar en forma a la señal senoidal pura.



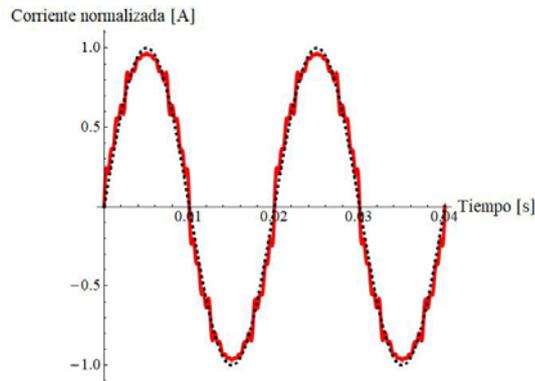


Figura 3.20. Espectro y reconstrucción de la forma de onda en lavarropas. Fuente: elaboración propia.

En este caso vale la pena analizar el contenido de armónicas de acuerdo con la IEC 61000-3-2. Conforme a esta, la carga se clasifica como Clase A, por lo que la emisión de corriente armónica admisible se expresa en términos absolutos de corriente. Se alcanza a observar que los armónicos ponderados de orden 17, 31 y 33 están levemente por encima de la emisión máxima admitida por la norma.

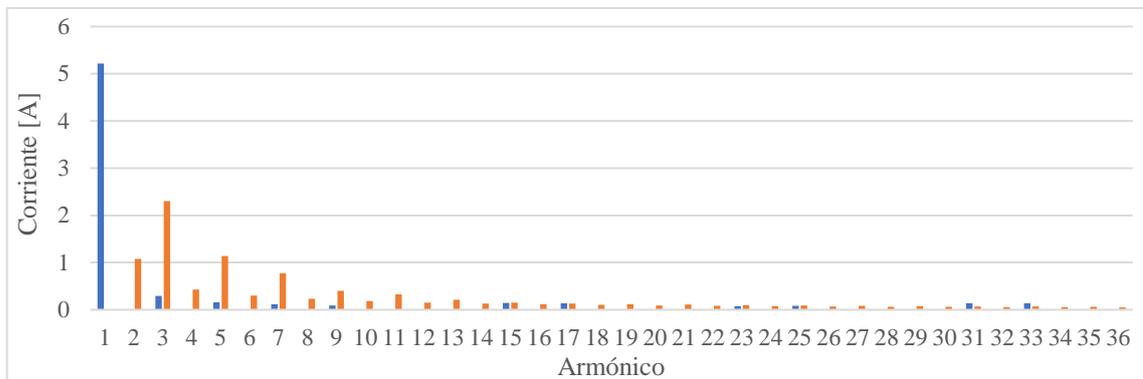


Figura 3.21. Análisis de acuerdo con la IEC 61000-3-2 en los valores promedios de lavarropas. En azul, valores promedios obtenidos; en naranja, valores máximos permitidos. Fuente: elaboración propia.

2.9. Luminarias

En la actualidad, es el apartado de luminarias donde uno se puede encontrar con la mayor variedad de tecnologías, formatos y potencias para un mismo fin en una vivienda. Por mencionar algunas, hay lámparas halogenadas, de bajo consumo, fluorescentes, y en gran auge las LED. De esta manera, para facilitar el posterior análisis de acuerdo con la IEC 61000-3-2, se subclasifico las luminarias según su potencia de entrada.



2.9.1. Luminarias con potencia de entrada superior a 25W

Se recolectaron datos de tres luminarias con potencia superior a 25W. Para efectuar las mediciones, se esperó el tiempo necesario para que las lámparas alcancen el régimen estable. Entre las cargas ensayadas se encuentra un reflector LED, una lampara LED y un conjunto de seis lámparas de bajo consumo en paralelo.

Medición	Peso	Aparente [VA]	Factor de Potencia	THDi [%]
MED029	0,15	31,54	0,95	33,40
MED081	0,57	124,14	0,99	3,93
MED120	0,28	61,23	0,90	35,15
Promedio	1,00	92,92 ± 37,27	0,96 ± 0,04	17,03 ± 15,16

Tabla 3.11. Promedio de mediciones en luminarias superiores a 25W. Fuente: elaboración propia.

Al analizar individualmente las mediciones, uno puede notar, por la gran diferencia de distorsión armónica, las distintas tecnologías, siendo las mediciones sobre lámparas LED las que arrojan mayor THD en corriente (mediciones 029 y 120).

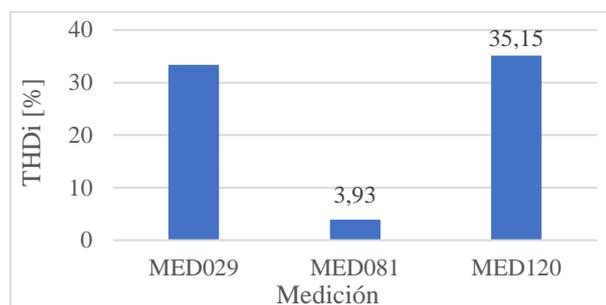
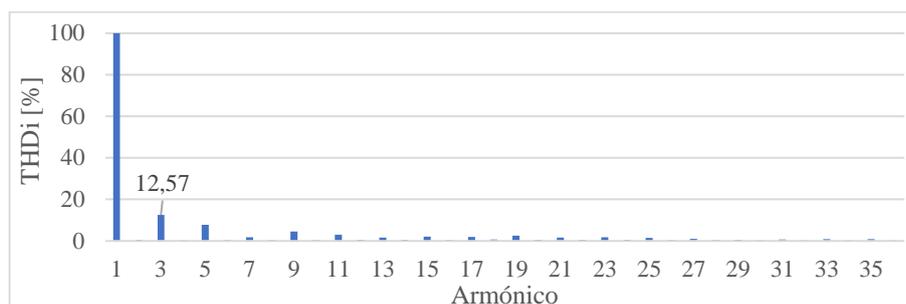


Figura 3.22. THD en corriente promedio en luminarias superiores a 25W. Fuente: elaboración propia.

En el espectro de armónicos se observa una presencia de casi todos los armónicos de orden impar, superando la barrera del 10% solamente el de tercer orden, esto ocasiona que la onda presente varios máximos relativos, pero siga permaneciendo similar en forma a la señal senoidal pura.



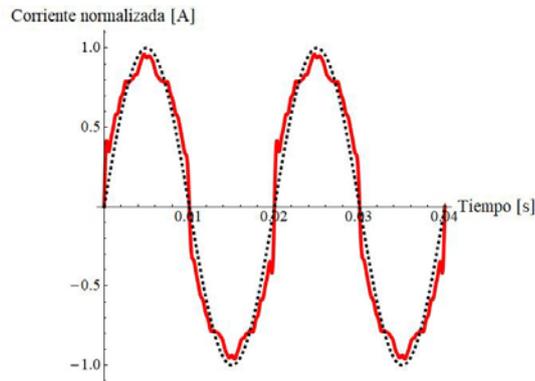


Figura 3.23. Espectro y reconstrucción de la forma de onda en luminarias superiores a 25W. Fuente: elaboración propia.

En este caso, vale la pena analizar el contenido de armónicas de acuerdo con la norma IEC 61000-3-2. Conforme a esta, la carga se clasifica como Clase C y superior a 25W, por lo que la emisión de corriente armónica admisible se expresa en porcentaje de la corriente fundamental. Se observa que todos los armónicos se encuentran por debajo de la emisión máxima admitida por la norma.

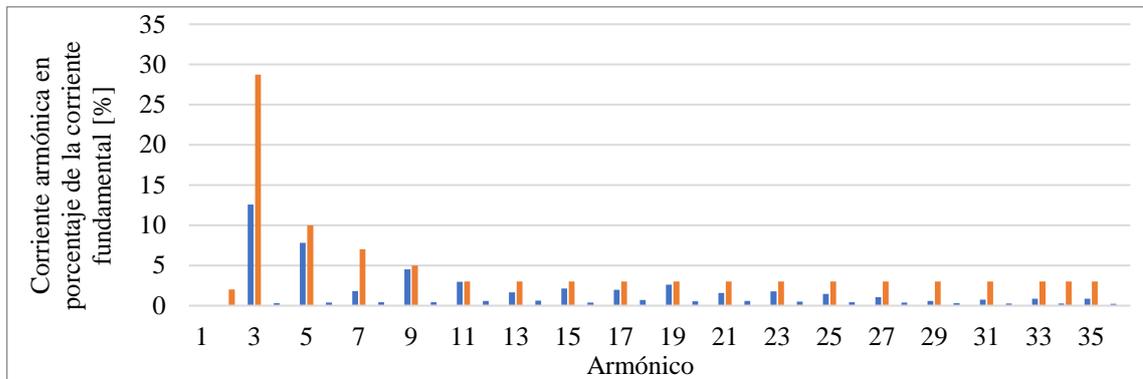


Figura 3.24. Análisis de acuerdo con la IEC 61000-3-2 en los valores promedios en luminarias superiores a 25W. En azul, valores promedios obtenidos; en naranja, valores máximos permitidos. Fuente: elaboración propia.

2.9.2. Luminarias con potencia de entrada inferior o igual a 25W

Se recolectaron datos de nueve luminarias con potencia inferior o igual a 25W. Nuevamente, para efectuar las mediciones se esperó el tiempo necesario para que las lámparas alcancen un régimen estable. Entre las cargas medidas se encuentran lámparas LED y de bajo consumo. Se observa que el mejor factor de potencia alcanzado es de apenas 0,58 y el THD en corriente muestra una dispersión notoria, pero en todos los casos es elevado.



Medición	Peso	Aparente [VA]	Factor de Potencia	THDi [%]
MED028	0,07	27,89	0,58	124,70
MED077	0,06	21,81	0,53	61,80
MED078	0,08	30,30	0,55	136,83
MED083	0,09	33,68	0,54	137,35
MED085	0,26	98,31	0,06	21,74
MED087	0,08	31,05	0,04	21,43
MED088	0,17	65,15	0,02	24,36
MED121	0,09	34,59	0,58	107,45
MED124	0,08	30,70	0,52	149,76
Promedio	1,00	54,4 ± 29,26	0,29 ± 0,26	70,42 ± 53,14

Tabla 3.12. Promedio de mediciones en luminarias iguales o inferiores a 25W. Fuente: elaboración propia.

Las mediciones de THD en corriente arrojan resultados que se encuentran todos por encima del 21%. Se debe destacar que las mediciones con menor THD son aquellas donde existen varias lámparas LED configuradas en paralelo. Esto se debe a que existen fenómenos de atenuación que produce que el THD sea menor al que se podría suponer en un primer momento (Suárez et al., 2005).

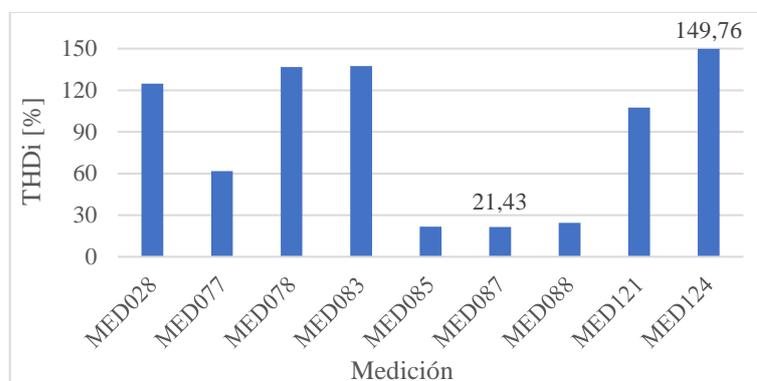


Figura 3.25. THD en corriente promedio en luminarias iguales o inferiores a 25W. Fuente: elaboración propia.

Al analizar el contenido de armónicas de acuerdo con la IEC 61000-3-2, se clasifica la carga como Clase C. Por ende, debe cumplir al menos uno de los siguientes criterios:

- Las corrientes armónicas no deben sobrepasar los límites proporcionales a la potencia de la Tabla 2.5, columna 2.
- La amplitud de la corriente armónica de orden 3, se expresa en porcentaje de la corriente fundamental, no debe sobrepasar el 86% y la amplitud de la corriente armónica de orden 5 no debe sobrepasar el 61%. Además, la forma de onda de la corriente de entrada debe ser tal que empiece 60° o antes, que tenga su última cresta (si hay varias crestas por semiperiodo) a 65° o antes, y que no se termine antes de

90°. Asumiendo siempre que el paso por cero de la fundamental de la tensión de alimentación sea en 0°.

Según el primer criterio, la emisión de corriente armónica admisible se expresa en términos de la corriente armónica máxima en porcentaje de la corriente fundamental. Se observa que todos los armónicos de orden impar se encuentran por encima de la emisión máxima admitida por la norma.

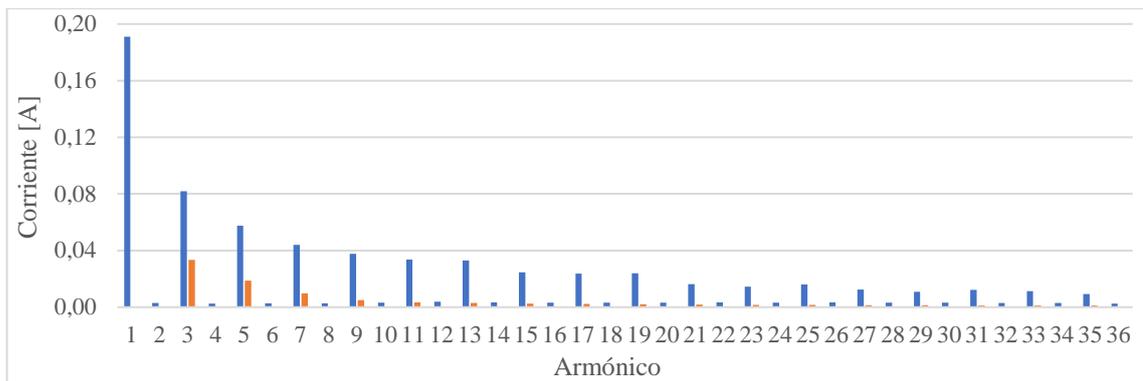


Figura 3.26. Análisis de acuerdo con la IEC 61000-3-2 en los valores promedios de luminarias iguales o inferiores a 25W. En azul, valores promedios obtenidos; en naranja, valores máximos permitidos. Fuente: elaboración propia.

En lo que respecta al segundo criterio, se cumple los requisitos de porcentaje, pero no así los de ángulo de fase, donde estos son superiores a los establecidos.

$$FD = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_1^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,7042^2}} = 0,82$$

$$\cos(\varphi) = \frac{FP}{FD} = \frac{0,29}{0,82} = 0,35$$

$$\text{Ángulo entre V y I} = \arccos(0,35) \cong 70^\circ > 60^\circ$$

Finalmente, en el espectro de armónicos se observa una presencia de todos los armónicos de orden impar, superando la barrera del 10% hasta el de orden 19. Esto ocasiona que la onda deformada presente picos de hasta 1,8 mayor a la señal senoidal pura.

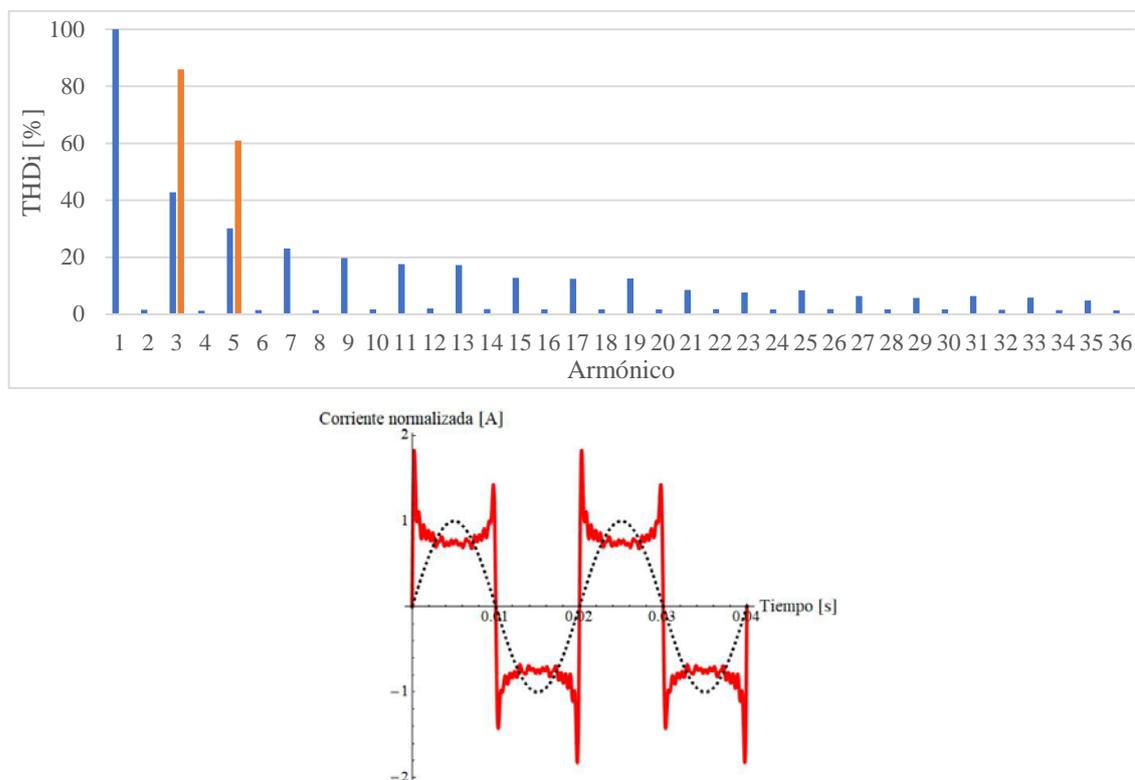


Figura 3.27. Espectro y reconstrucción de la forma de onda en luminarias iguales o inferiores a 25W. En conjunto con el espectro, análisis de acuerdo con la IEC 61000-3-2 en los valores promedios obtenidos. En azul, valores promedios obtenidos; en naranja, valores máximos permitidos. Fuente: elaboración propia.

2.10. Microondas

Se recogieron cuatro mediciones en equipos microondas de diferentes marcas y modelos en condiciones de funcionamiento habituales en una vivienda, donde es frecuente su uso. Esta carga se caracteriza por ciclos de funcionamiento irregulares y de potencia variable según la función asignada.

Se observa que este tipo de carga demanda una potencia considerable, aunque hay que considerar que su uso en una vivienda es más bien puntual. En casi todos los casos, el factor de potencia es correcto y el THD en corriente resulta elevado.

Medición	Peso	Aparente [VA]	Factor de Potencia	THDi [%]
MED093	0,38	814,50	0,83	34,91
MED098	0,21	450,72	0,92	38,90
MED108	0,24	524,37	0,78	23,09
MED126	0,17	378,41	0,86	30,86
Promedio	1,00	592,58 ± 178,37	0,84 ± 0,05	32,17 ± 5,7

Tabla 3.13. Promedio de mediciones en microondas. Fuente: elaboración propia.

Las mediciones de THD en corriente arrojan resultados que se encuentran todos por encima del 23,09%, alcanzando un máximo de 38,90%. Estos valores son importantes al tratarse de potencias elevadas para una vivienda, por lo que la presencia de armónicos en corriente tendrá mayor impacto sobre el resto de la instalación.

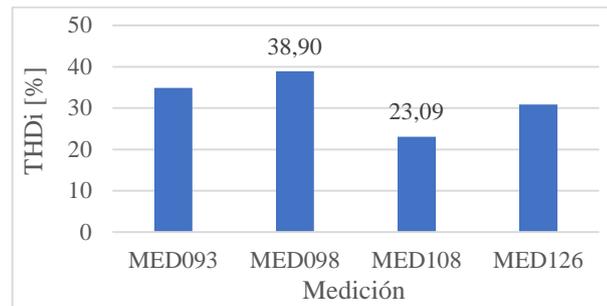


Figura 3.28. THD en corriente promedio en microondas. Fuente: elaboración propia.

En el espectro de armónicos se observa una importante presencia solamente por parte del tercer armónico, siendo superior a 30%. Se aprecian sutilmente armónicos pares (2 y 4) e impares (hasta de orden 11), lo cual provoca que la onda se deforme levemente de manera asimétrica y muestre dos máximos relativos distintos por cada semiciclo.

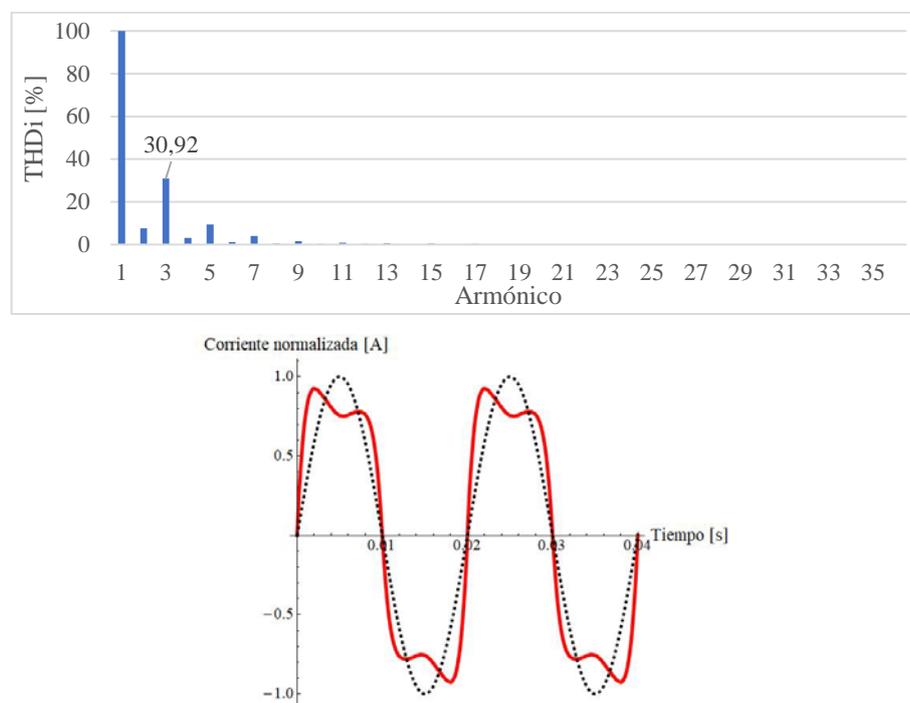


Figura 3.29. Espectro y reconstrucción de la forma de onda en microondas. Fuente: elaboración propia.



2.11. Ordenadores Personales

Se recogieron datos de siete ordenadores personales de diferentes marcas y modelos, simulando condiciones de funcionamiento mixtas, es decir, aumentando la exigencia al equipo en intervalos de tiempo iguales. En este apartado se agruparon los equipos de informática, como ser computadoras de escritorio, portátiles y cargadores de celulares, ya que se considera que la finalidad y la tecnología de carga de todos los aparatos previamente mencionados es similar. Adicionalmente, se midió en un mismo portátil tres posibles situaciones de uso diarias:

- Batería 100% cargada con el dispositivo en uso.
- Cargando batería con el dispositivo en uso.
- Cargando batería con el dispositivo apagado.

El consumo medio no resulta elevado, pero hay que destacar que en los últimos años se ha incrementado el tiempo de uso de los ordenadores personales (por ejemplo, debido a la pandemia de COVID-19), como así también la cantidad de usuarios que poseen uno.

Medición	Peso	Aparente [VA]	Factor de Potencia	THDi [%]
MED027	0,08	46,46	0,47	185,27
MED050	0,13	78,73	0,84	50,01
MED052	0,07	39,36	0,48	152,05
MED053	0,08	49,85	0,51	160,02
MED054	0,11	63,17	0,74	84,60
MED060	0,11	65,34	0,51	154,99
MED064	0,12	73,37	0,56	144,83
MED075	0,23	139,63	0,88	37,45
MED141	0,06	38,32	0,56	140,57
Promedio	1,00	79,09 ± 35,77	0,67 ± 0,17	106,39 ± 54,51

Tabla 3.13. Promedio de mediciones en ordenadores personales. Fuente: elaboración propia.

La presencia de armónicos es notoria en todas las cargas medidas, esto se ve reflejado en que la mayoría supera ampliamente el 100%, por lo que estamos en presencia de cargas de carácter no lineal. El menor THD en corriente se registró en una computadora de escritorio.

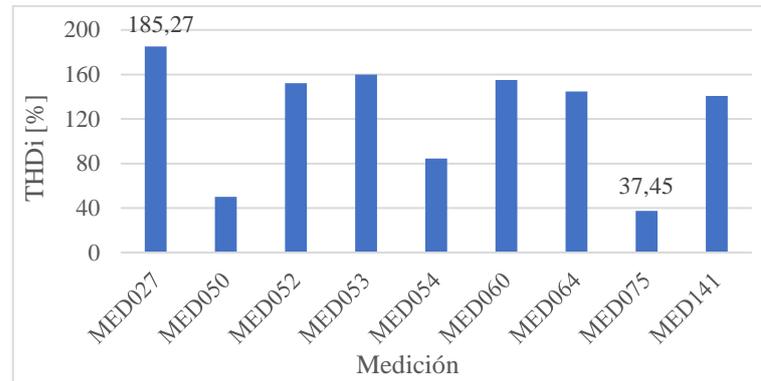


Figura 3.30. THD en corriente promedio en ordenadores personales. Fuente: elaboración propia.

En el espectro de armónicos se observa una presencia muy importante de los armónicos impares, siendo superior al 10% hasta el de orden 23. También se visualizan armónicos pares, donde el de orden 2 sobrepasa el 10%. Esta importante presencia de armónicos provoca que la onda se deforme de manera asimétrica y muestre dos máximos relativos muy notorios por cada semiciclo, siendo el pico máximo 2,8 veces superior a la de una señal senoidal pura.

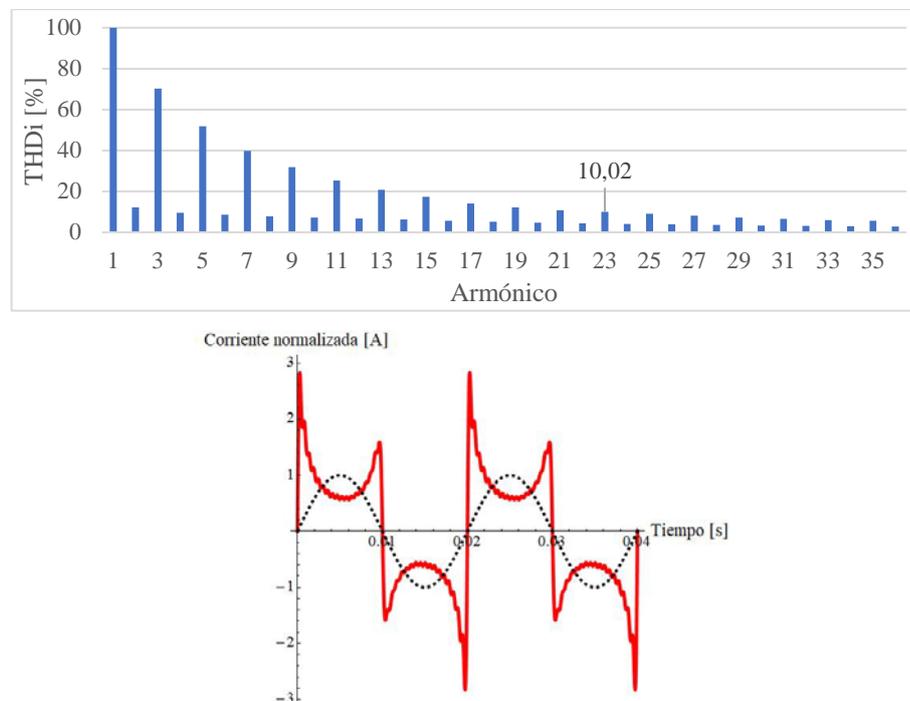


Figura 3.31. Espectro y reconstrucción de la forma de onda en ordenadores personales. Fuente: elaboración propia.

Al analizar el contenido de armónicas de acuerdo con la IEC 61000-3-2, se clasifica este tipo de cargas como Clase D, por lo que la emisión de corriente armónica admisible se

expresa por mA/W. Se observa que solo el tercer armónico cumple con los límites de la normativa, luego, todos los valores de armónicos impares están por encima de la emisión máxima admitida por la misma.

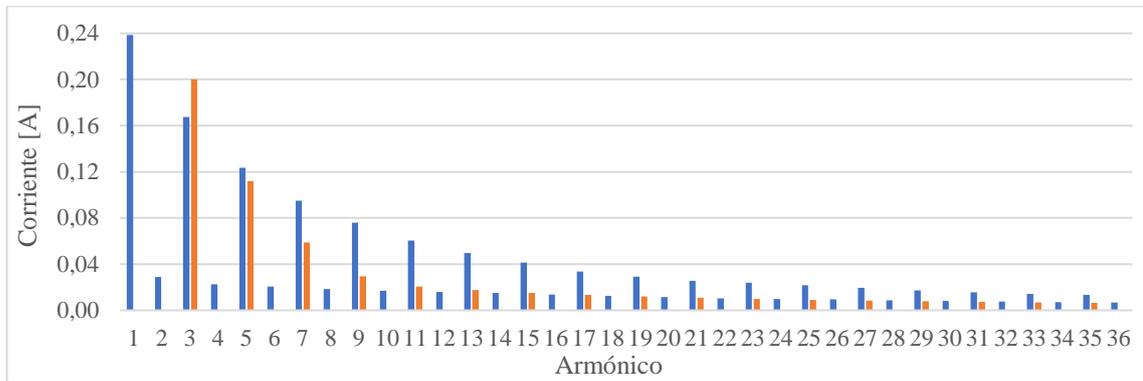


Figura 3.32. En conjunto con el espectro, análisis de acuerdo con la IEC 61000-3-2 en los valores promedios de ordenadores personales. En azul, valores promedios obtenidos; en naranja, valores máximos permitidos. Fuente: elaboración propia.

2.12. Otros Aparatos

En este apartado, se agruparon cargas restantes difíciles de categorizar: dos campanas extractoras de cocina y una bomba de agua de pequeña potencia. Así, se recogieron datos de tres cargas, simulando condiciones de funcionamiento habituales.

Medición	Peso	Aparente [VA]	Factor de Potencia	THDi [%]
MED099	0,55	228,12	0,77	15,58
MED127	0,21	86,92	0,99	7,46
MED134	0,24	100,97	0,99	5,86
Promedio	1,00	167,75 ± 66,68	0,87 ± 0,11	11,52 ± 4,5

Tabla 3.14. Promedio de mediciones en otros aparatos. Fuente: elaboración propia.

La presencia de armónicos es mínima en todas las cargas medidas, esto se ve reflejado en que la mayoría se encuentra por debajo del 16%. Cabe destacar que el mayor THD en corriente se registró en la campana extractora que contaba con iluminación tipo LED.

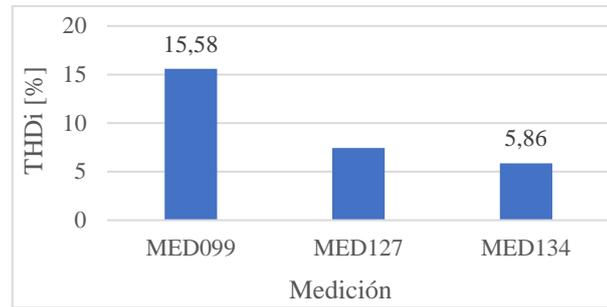


Figura 3.33. THD en corriente promedio en otros aparatos.

En el espectro de armónicos se observa tan solo una presencia notoria del tercer armónico, superando este el 10%, lo que provoca que la onda se deforme mínimamente con respecto a la de una señal senoidal pura.

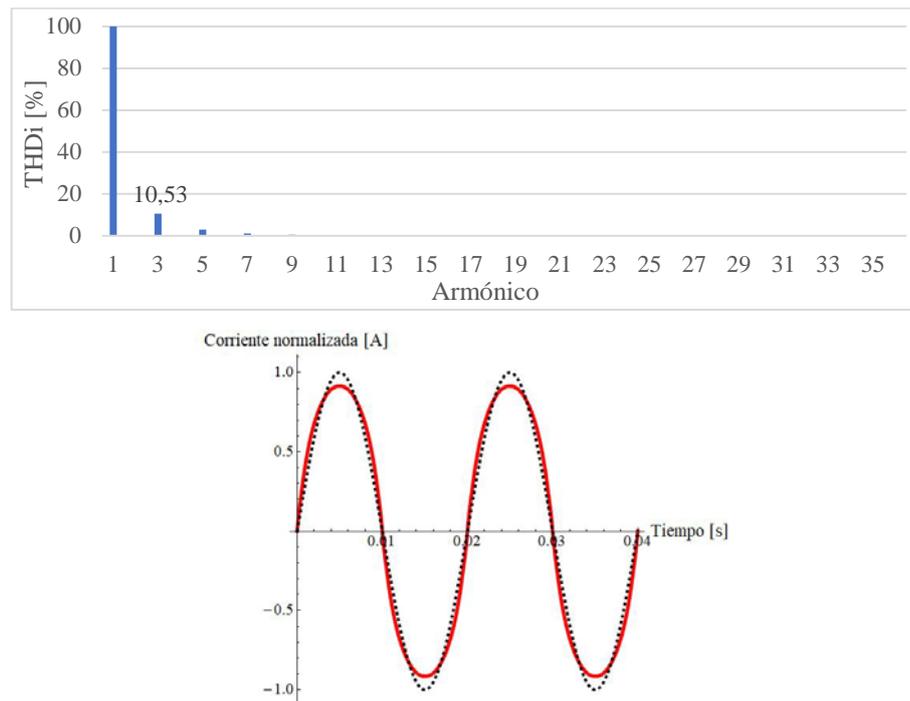


Figura 3.34. Espectro y reconstrucción de la forma de onda en otros aparatos. Fuente: elaboración propia.

2.13. Reguladores de Velocidad

Se recogieron datos de seis reguladores de velocidad, procurando incluir las dos tecnologías que coexisten actualmente para regulación: autotransformador y electrónico. En esta categoría se agruparon los dispositivos para controlar comúnmente la velocidad de giro de ventiladores “de techo”. En todos los casos, se simularon condiciones de funcionamiento mixtas, es decir, tiempos iguales para las diferentes velocidades disponibles. En el caso de la

regulación continua o tipo *dimmer*, se discretizaron los pasos de manera análoga a un autotransformador.

Los reguladores de velocidad tampoco representan una carga domiciliaria de gran peso, aunque pueden representar una carga constante de acuerdo con el uso que se le otorgue en la vivienda.

Medición	Peso	Aparente [VA]	Factor de Potencia	THDi [%]
MED076	0,21	78,60	0,72	43,68
MED079	0,09	33,88	0,77	80,25
MED082	0,16	59,95	0,60	58,70
MED084	0,18	66,60	0,57	49,03
MED118	0,18	67,53	0,83	16,37
MED119	0,17	64,74	0,75	21,59
Promedio	1,00	64,92 ± 11,54	0,7 ± 0,09	41,58 ± 19,49

Tabla 3.15. Promedio de mediciones en reguladores de velocidad. Fuente: elaboración propia.

Es importante destacar que las primeras cuatro mediciones, que cuentan con mayor presencia de armónicos en corriente, se realizaron sobre reguladores de velocidad electrónicos (tipo *dimmer*). Esto se justifica por el principio de funcionamiento de dichos reguladores, donde hay presencia de componentes no lineales.

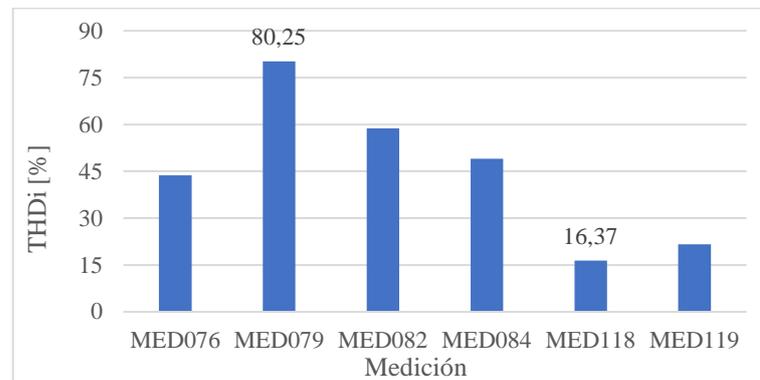


Figura 3.35. THD en corriente promedio en reguladores de velocidad. Fuente: elaboración propia.

En el espectro de armónicos se puede observar la presencia de armónicos impares, siendo el 3ro ampliamente predominante al resto. En la forma de onda se nota una marcada distorsión, en donde se visualizan dos picos por cada máximo de la señal seno original.

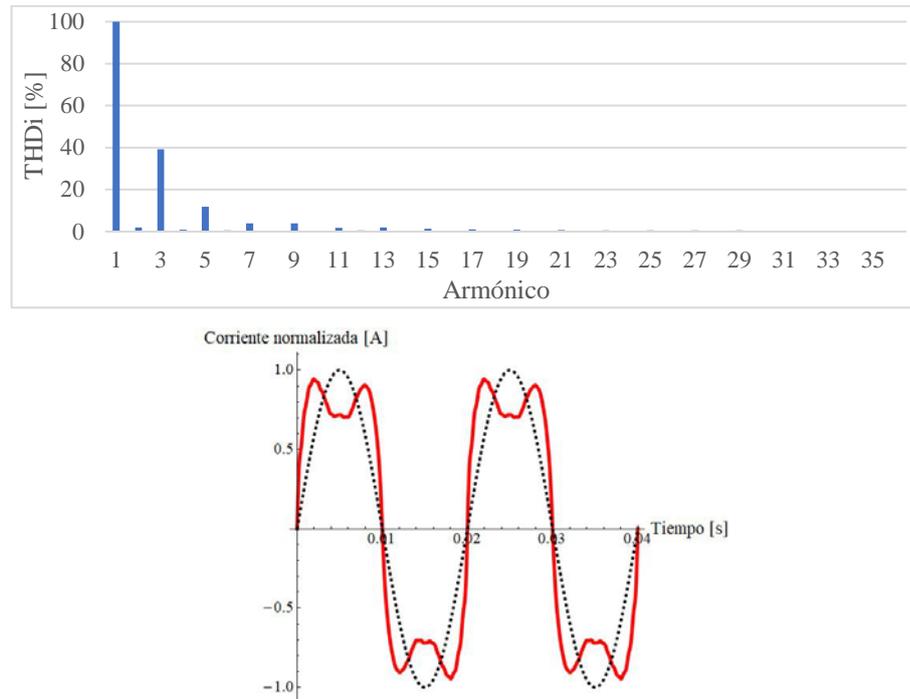


Figura 3.36. Espectro y reconstrucción de la forma de onda en reguladores de velocidad. Fuente: elaboración propia.

Al analizar el contenido de armónicos según la norma IEC 61000-3-2, se consideró a los reguladores de velocidad, según lo establecido en la Nota 1, de Clase D, en la cual, la emisión admisible de corriente armónica se expresa en mA/W. Es importante destacar que todos los valores de armónicos impares ponderados se encuentran por debajo del límite máximo admisible.

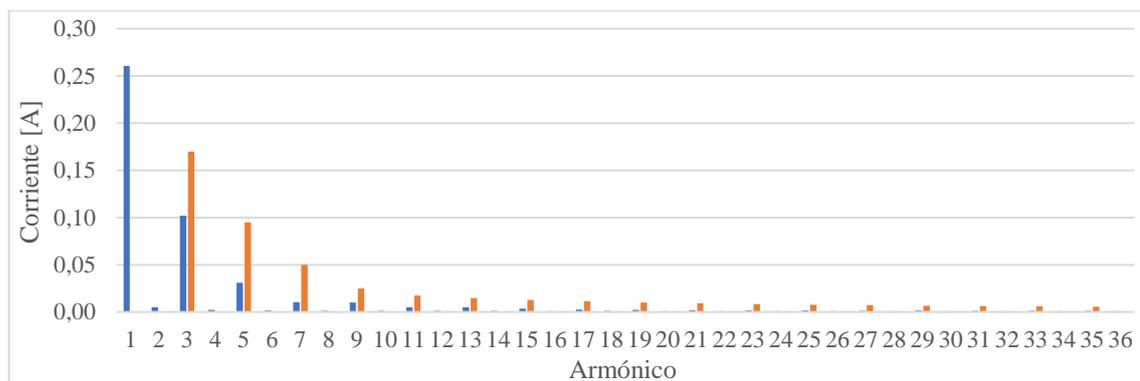


Figura 3.37. En conjunto con el espectro, análisis de acuerdo con la IEC 61000-3-2 en los valores promedios de reguladores de velocidad. En azul, valores promedios obtenidos; en naranja, valores máximos permitidos.

Fuente: elaboración propia.

2.14. Televisores

Se realizó un total de diez mediciones sobre televisores de diferentes marcas y modelos. En todos los casos, las condiciones de funcionamiento (brillo y volumen) fueron las habituales de acuerdo al uso dado en la vivienda.

Los televisores, poco a poco, han ido evolucionando en tamaño y tecnología de pantalla, siendo hoy en día más comunes los televisores tipo LED. Este tipo de carga de manera individual no representa un consumo domiciliario de importancia, aunque actualmente es cada vez más frecuente encontrar más de un televisor en una vivienda.

Medición	Peso	Aparente [VA]	Factor de Potencia	THDi [%]
MED006	0,10	97,48	0,92	18,41
MED017	0,06	60,07	0,88	27,15
MED057	0,07	65,96	0,40	220,90
MED066	0,07	62,81	0,80	40,91
MED069	0,09	89,36	0,91	26,91
MED074	0,10	96,26	0,55	147,44
MED089	0,17	165,07	0,95	12,53
MED100	0,12	115,90	0,54	154,82
MED109	0,12	116,94	0,96	10,45
MED113	0,09	90,39	0,54	145,60
Promedio	1,00	105,37 ± 32,49	0,76 ± 0,2	74,52 ± 71,86

Tabla 3.16. Promedio de mediciones en televisores. Fuente: elaboración propia.

Este tipo de cargas presentan fuentes de alimentación basadas en circuitos electrónicos con fuerte presencia de componentes no lineales, lo cual se ve reflejado en que el THD en corriente en ningún caso es inferior al 10% y el valor promedio es de 74,52%.

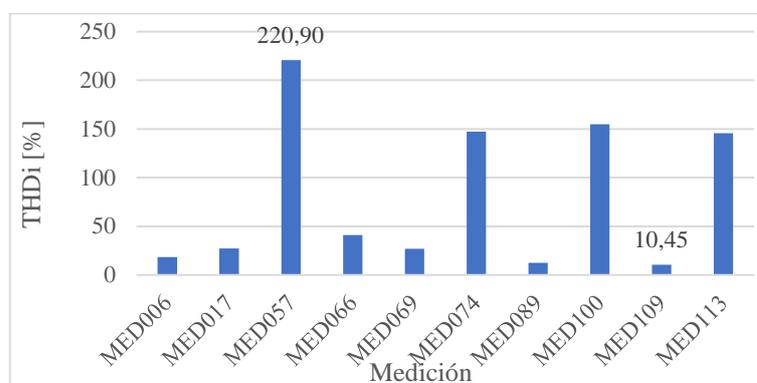


Figura 3.38. THD en corriente promedio en televisores. Fuente: elaboración propia.

En el espectro de armónicos ponderados se alcanza a visualizar una importante presencia de componentes armónicos impares. Esto se ve reflejado en la reconstrucción de la

forma de onda, en donde la misma se encuentra distorsionada respecto a la original y alcanza valores picos 1,5 veces mayores que la señal seno.

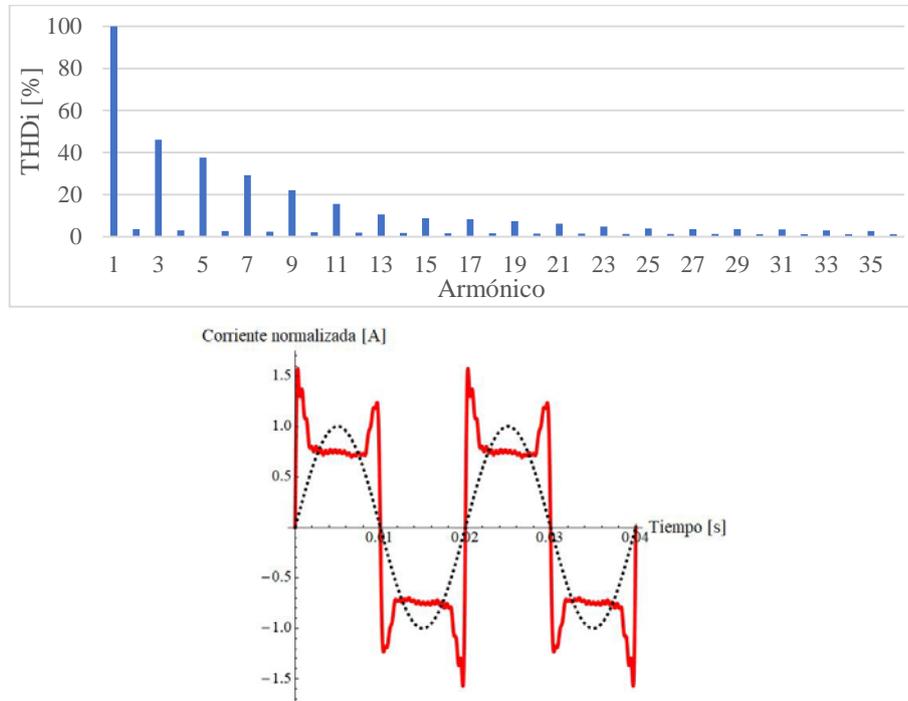


Figura 3.39. Espectro y reconstrucción de la forma de onda en televisores. Fuente: elaboración propia.

Al analizar el contenido de armónicos de acuerdo con la IEC 61000-3-2 (donde esta carga se clasifica como Clase D, por lo que la emisión de corriente armónica admisible se expresa por mA/W), se observa que después de la 5ta armónica, todos los valores de armónicos impares ponderados están por encima de la emisión máxima admitida por la norma.

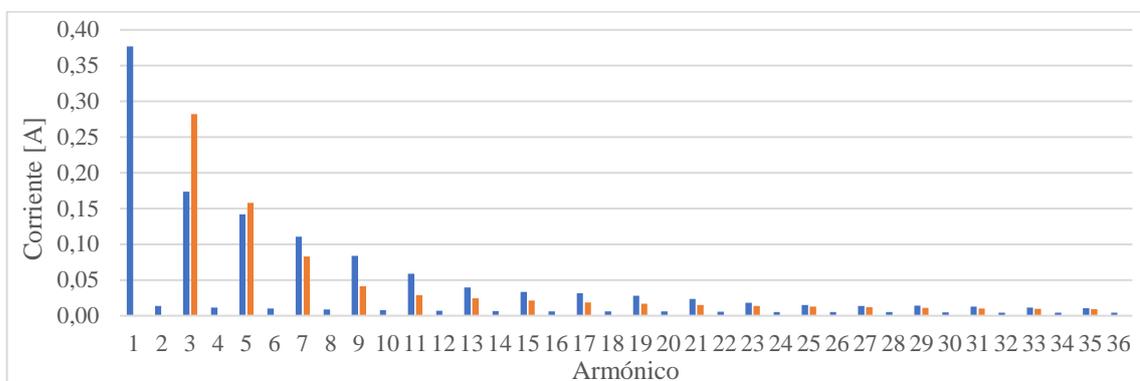


Figura 3.40. En conjunto con el espectro, análisis de acuerdo con la IEC 61000-3-2 en los valores promedios en televisores. En azul, valores promedios obtenidos; en naranja, valores máximos permitidos. Fuente: elaboración propia.



2.15. Ventiladores

Los ventiladores constituyen una carga habitual y común en la mayoría de las viviendas. Se realizó un total de siete mediciones en ventiladores de diferentes marcas, modelos y tamaños. Se simuló en todos los casos condiciones de funcionamiento mixtas, es decir, tiempos iguales para las diferentes velocidades (si poseía regulación de velocidad). Es importante destacar que en la categoría ventilador solo se analizó lo que comúnmente se denominan turboventiladores, ventiladores de pie o similar, excluyendo así a los ventiladores “de techo” cuya regulación de velocidad se realiza en la caja de conexión eléctrica mediante autotransformador o regulador electrónico de velocidad (previamente analizados).

A priori, los ventiladores no representan una carga domiciliar de gran peso, aunque pueden representar una carga relativamente constante en ciertas estaciones del año, como ser primavera/verano. Tanto el factor de potencia como el THD en corriente son correctos y no existe una gran amplitud entre los valores máximos y mínimos de los mismos.

Medición	Peso	Aparente [VA]	Factor de Potencia	THDi [%]
MED003	0,16	107,25	0,87	4,18
MED009	0,14	95,55	0,83	5,33
MED045	0,22	147,98	0,75	6,44
MED091	0,14	94,87	1,00	5,28
MED095	0,18	123,83	0,92	4,94
MED122	0,10	71,63	1,00	4,45
MED123	0,07	46,93	0,94	3,41
Promedio	1,00	107,84 ± 28,75	0,89 ± 0,09	5,09 ± 0,88

Tabla 3.17. Promedio de mediciones en ventiladores. Fuente: elaboración propia.

Las mediciones muestran que el THD en corriente en este tipo de cargas es bajo, siendo su promedio de 5,09%. Este resultado es esperable dado que estas cargas funcionan a partir de un motor de inducción, por lo general del tipo jaula de ardilla, y el mismo se puede representar, de manera simplificada, mediante componentes lineales (resistores e inductores).

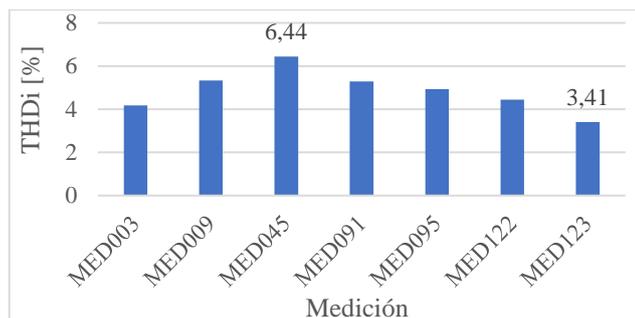


Figura 3.41. THD en corriente promedio en ventiladores. Fuente: elaboración propia.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE CONTENIDO DE ARMÓNICOS EN VIVIENDAS UNIFAMILIARES

En este capítulo se detallan las consideraciones y la metodología empleada para medir y hallar la distorsión armónica total en corriente en viviendas. Además, se analizan distintas variables eléctricas y su interrelación, como la intensidad de corriente, el factor de potencia y la potencia aparente, esto con motivo de mejorar el criterio en la toma de decisiones posteriores. Finalmente, se muestran los resultados de las mediciones, tanto de tensión como del THD en tensión, para verificar que son parámetros que no influyen de manera apreciable en el resto de las mediciones.

1. Consideraciones

Al objeto del presente capítulo, se entiende por viviendas unifamiliares aquellas en la que la totalidad del edificio es ocupada por un solo grupo familiar y cuya tarifa de energía se enmarca en el cuadro tarifario de la E.P.E.S.F DNU N°332/22 como “Tarifa Residencial Urbana” (o el equivalente más próximo y ajustado si se tratara de una vivienda en otra zona de concesión).

Para determinar el THD en corriente en los domicilios se consideró la resolución ENRE 0099-1997. En la misma, se considera que el tiempo de medición, para que un control tenga las adecuadas características de fiabilidad y representatividad, debe ser de una semana de registros válidos, es decir, deberá contener como mínimo 1.008 registros de períodos de diez minutos. Sin embargo, por tratarse de un registro con fines académicos y por cuestiones de espacio y tiempo disponible en cada vivienda (determinado por los propietarios de cada una), las mediciones se efectuaron en periodos que variaron de cinco a dos días bajo condiciones cotidianas de uso de los equipos en las viviendas, entre los meses de mayo y abril de 2022.

2. Metodología

2.1. Cloud Energy Meter

Las mediciones se realizaron mediante el analizador de red eléctrica trifásica inteligente Cloud Energy Meter provisto por D&T Soluciones (Figura 4.1). El mismo se configuró siempre para mediciones monofásicas, utilizando un solo sensor de corriente SCT-013-100 y empleando la misma referencia de tensión V1-VN para su alimentación FN.

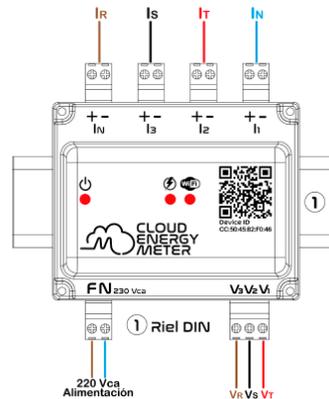


Figura 4.1. Ilustración Cloud Energy Meter. Fuente: Cloud Energy Meter - Manual de Instalación. Fuente: elaboración propia.

2.2. Viviendas analizadas

Se relevaron y recogieron registros de doce viviendas unifamiliares con distinta cantidad de miembros y diversidad de cargas eléctricas. Dichas viviendas se encuentran tanto en la localidad de Reconquista como de Avellaneda. En la Tabla 4.1 se detalla la ubicación, el tiempo de medición y la cantidad de personas que conviven en cada vivienda (para más detalles y visualizar los resultados en detalle de cada medición, Anexo VIII).

Designación	Ciudad	Barrio	Días aproximados	Personas que viven
1	Reconquista	San Martín	5	4
2	Reconquista	Club de Campo La Rural	3	2
3	Reconquista	Lanceros del Sauce	3	5
4	Avellaneda	Constitución	3	3
5	Reconquista	San Jerónimo del Rey	3	3
6	Reconquista	San Martín	2	4
7	Reconquista	Las Américas	3	2
8	Reconquista	Sarmiento	2	1
9	Reconquista	General Obligado	2	4
10	Avellaneda	Port Arthur	2	4
11	Reconquista	Nueva Fe	3	3
12	Reconquista	Chapero	2	4

Tabla 4.1. Ubicación y tiempo de medición de las viviendas analizadas. Fuente: elaboración propia.

Es importante resaltar que las mediciones 2 y 10 se llevaron a cabo en viviendas con conexión trifásica, donde, para facilitar el análisis posterior, se registró únicamente la fase de mayor carga de la vivienda.

En el siguiente mapa (ver Figura 4.2) se observa con mayor claridad la ubicación aproximada de las viviendas.



Figura 4.2. Mapa con la ubicación aproximada de las mediciones efectuadas. Fuente: <https://www.google.com/maps> y elaboración propia.

2.3. Registros recolectados

Se descargaron y procesaron los siguientes registros de cada medición:

- Corriente eficaz y fundamental (valor promedio en un intervalo de cinco minutos).
- Factor de potencia medio (valor promedio en un intervalo de diez minutos).
- Potencia aparente media (valor promedio en un intervalo de diez minutos).
- Tensión eficaz y fundamental (valor promedio en un intervalo de cinco minutos).

2.3.1. Análisis de registros

Para el análisis de los registros, se recurrió al programa Excel de la suite de ofimática Office 365 y a la generación de macros (ver Anexo IX) en VBA para las siguientes tareas:

1. Modificar el formato de los archivos, es decir, convertir los archivos descargados “.xls” al formato más actual y funcional “.xlsx”.
2. Unificar los registros de los distintos parámetros registrados a una sola hoja de cálculo.



Se realizó el cálculo de la distorsión armónica tanto en tensión como en corriente para verificar posibles errores y/o inconsistencias en los registros (detallado más adelante en el punto 3.1). Además, de los valores registrados se descartó el 1%, repartido en partes iguales entre los valores atípicos máximos y mínimos, ya que se verificó mediante observación que los mismos correspondían a valores extremos erróneos (ver Anexo X).

2.3.2. Estadística aplicada

Para apreciar si existen diferencias significativas entre los parámetros eléctricos de las distintas viviendas, se elaboraron tablas, histogramas, diagramas de cajas y funciones a partir del software Wolfram Mathematica 12.0.

Las tablas sirven como una primera aproximación a los resultados siendo que en cada columna se destaca en tonalidades rojas los valores más importantes, es decir, en la mayoría de los casos, los máximos alcanzados. Además, en la última fila se presenta un promedio ponderado de acuerdo a la cantidad de registros de la medición, este criterio se adopta para otorgar menor importancia a mediciones cuya duración, al ser más breve, pueden ser más sensible a valores atípicos.

El histograma se utiliza para representar la distribución de frecuencias de la variable eléctrica bajo estudio: el ancho de cada barra representa un intervalo de valores, y la altura indica la frecuencia de la misma. De esta manera, se puede visualizar la forma y la distribución del conjunto de datos y, a su vez, corroborar la distribución de los diferentes registros de cada vivienda a partir de la intensidad de color de las barras (mientras más oscuras, mayor cantidad de registros).

Para calcular el ancho del intervalo se sigue la regla de Freedman–Diaconis por tratarse de una gran cantidad de registros (mayor a 200) y por no poder suponer el tipo de distribución ni la importancia de los valores atípicos².

$$\text{Ancho} = \frac{2 \text{ IQR}}{\sqrt[3]{n}}$$

Donde IQR es el rango intercuartílico y n es la cantidad de datos.

² Ver el problema de emplear la muy utilizada regla de Sturges (Hyndman, 1995) y los estimadores que propone Freedman–Diaconis (Freedman & Diaconis, 1981).



El diagrama de caja, también conocido como gráfico de caja y bigote, es útil para comparar la distribución de las distintas mediciones efectuadas e identificar posibles patrones o diferencias entre ellas. Este diagrama muestra la distribución de un conjunto de datos numéricos a través de cinco valores estadísticos: el valor mínimo, el primer cuartil, la mediana, el tercer cuartil y el valor máximo. Además, indica la media y los valores atípicos, los cuales se determinan por ser inferior o superior a la siguiente expresión:

$$\text{Valor atípico: } Q_{1/3} \mp 1,5 * \text{IQR}$$

Donde $Q_{1/3}$ es el primer o tercer cuartil respectivamente.

Finalmente, en algunos casos, para establecer ciertas relaciones entre las distintas variables eléctricas, se ajustaron los registros con una aproximación lineal por mínimos cuadrados.

3. Resultados y discusiones

3.1. THD en corriente

El registro de los valores de THD en corriente se halló de forma implícita dado que, de esta manera, se obtenía una correlación directa entre la corriente demandada en un instante y el correspondiente porcentaje de distorsión armónica. Para ello, se partió de los registros de corriente eficaz y fundamental registrados por el medidor, de tal modo que la corriente de distorsión se puede expresar como:

$$I_D = \sqrt{I_{\text{RMS}}^2 - I_1^2}$$

Y, por definición, el THD en corriente es:

$$\text{THD} = \frac{I_D}{I_1} * 100\%$$

A continuación, se presenta la Tabla 4.2 con los valores calculados de THD en corriente de las doce viviendas unifamiliares. En la misma, se observa que la desviación estándar en las distintas mediciones, en promedio, es elevada, es decir, el THD en corriente fluctúa en el tiempo. También se visualiza que los valores máximos alcanzados por este superan fácilmente el 100%. La última fila presenta los valores promedios ponderados donde se observa que la distorsión armónica total en corriente en los domicilios analizados es de $46,91 \pm 30,43\%$.



Medición	Cantidad de datos	Media [%]	Desviación estándar [%]	Mediana [%]	Rango IC [%]	Máximo [%]	Mínimo [%]
1	1.457	39,50	25,10	29,81	34,25	118,12	0,00
2	967	32,44	34,89	14,11	68,22	88,19	0,00
3	1.085	29,73	30,75	17,94	41,45	111,80	0,00
4	1.178	37,82	26,66	34,57	42,88	103,27	0,00
5	1.076	33,19	23,25	28,00	39,52	111,80	0,00
6	670	45,15	15,76	42,33	25,38	80,06	9,36
7	765	42,85	23,18	41,31	39,55	117,19	0,00
8	665	65,87	32,85	73,87	64,72	121,22	3,87
9	832	73,26	37,17	79,87	68,27	156,96	0,00
10	585	48,22	45,91	25,82	86,20	147,95	0,00
11	951	88,90	41,04	110,20	77,39	157,90	12,17
12	664	43,78	36,94	29,84	54,91	135,52	0,00
Promedio ponderado	10.895	46,91	30,43	42,46	51,53	119,49	1,87

Tabla 4.2. Resumen registros de THD en corriente. Fuente: elaboración propia.

En el histograma (Figura 4.3), se observa cómo la mayoría de los datos de las distintas mediciones se concentran en el intervalo de 0-50% de THD en corriente; superado este intervalo, los valores se terminan de dispersar en el rango de 50-150%. Esto se condice con lo hallado anteriormente, en donde la media supera a la mediana e indica un sesgo positivo, es decir, los valores de THD en corriente están concentrados en la parte inferior de la distribución.

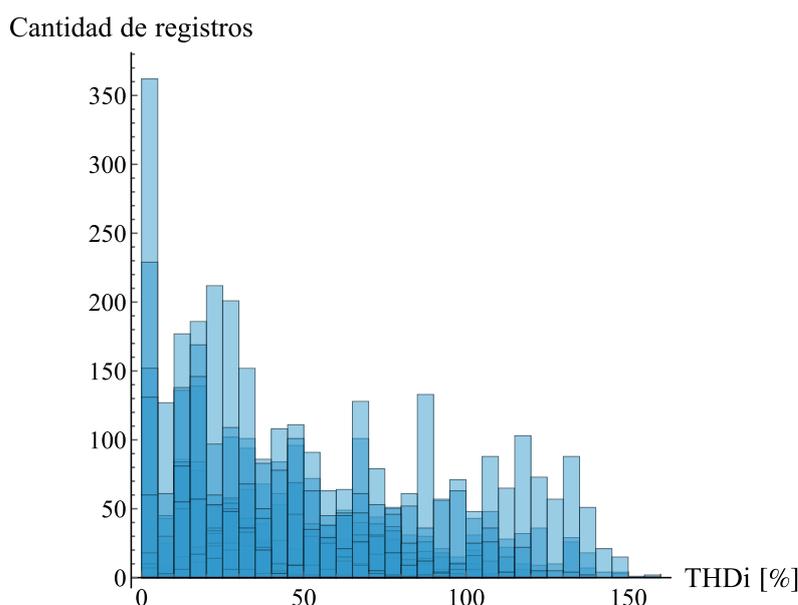


Figura 4.3. Histograma THD en corriente en las viviendas. Fuente: elaboración propia.



En el diagrama de caja y bigote (Figura 4.4), se aprecia que el rango intercuartílico provoca que la caja sea ancha en la mayoría de los casos, es decir, que el THD en corriente varía en un amplio margen de valores. Además, si bien la media y la mediana son similares en las mediciones, en la mayoría de los casos, la media es mayor a la mediana, lo que indica una mayor presencia de valores a la derecha, sin conllevar esto una presencia importante de valores atípicos superiores.

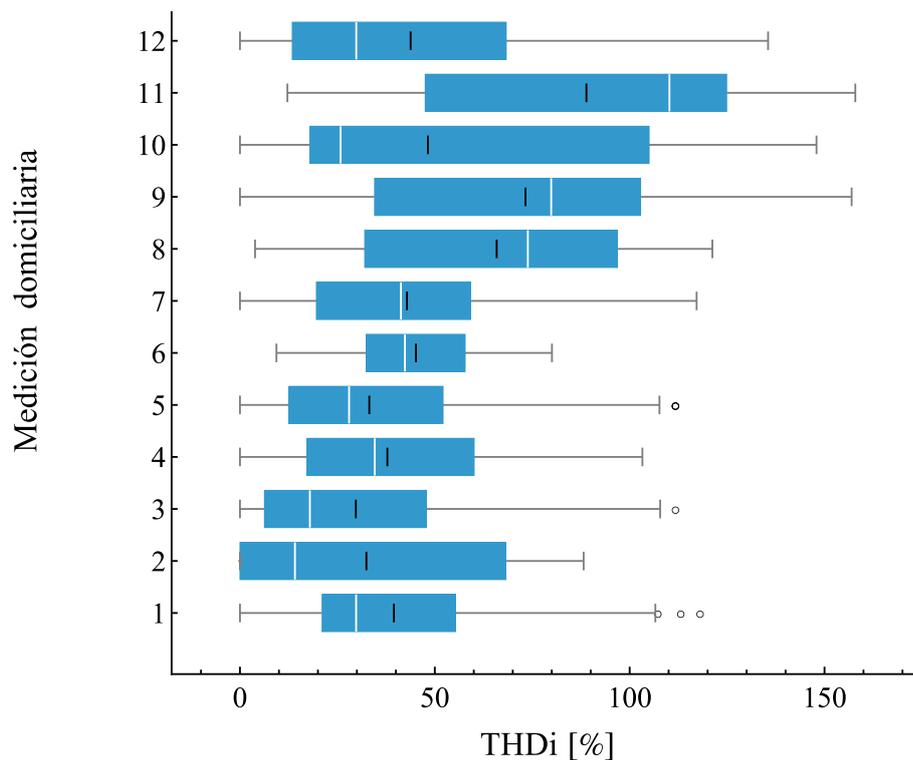


Figura 4.4. Diagrama caja y bigote del THD en corriente en las viviendas. Fuente: elaboración propia.

3.2. Intensidad de corriente

Los registros de corriente eficaz en las viviendas se presentan en la Tabla 4.3. En la misma, se observa que existe una gran dispersión entre los valores de media y desviación estándar entre las mediciones, indicando que existen situaciones de carga muy distintas y dispares en el tiempo. Esto haría que al momento de calcular un filtro se deba contemplar cuidadosamente las condiciones de funcionamiento del mismo. Además, se observa que los valores máximos alcanzados son muy superiores a la media. La última fila presenta los valores promedios ponderados donde puede verse que la intensidad de corriente eficaz en los domicilios analizados es de $1,88 \pm 2,26$ A.



Medición	Cantidad de datos	Media [%]	Desviación estándar [%]	Mediana [%]	Rango IC [%]	Máximo [%]	Mínimo [%]
1	1.454	1,00	0,58	0,89	0,73	5,17	0,07
2	969	0,63	0,75	0,19	0,89	3,25	0,07
3	1.085	4,29	4,89	1,89	5,54	19,28	0,07
4	1.175	1,98	3,49	0,59	1,01	19,28	0,07
5	1.075	1,71	2,91	0,80	1,41	20,45	0,19
6	672	1,67	0,82	1,55	0,99	9,03	0,69
7	765	2,19	2,53	1,06	0,95	14,74	0,33
8	666	0,68	1,19	0,49	0,34	26,69	0,30
9	831	1,51	1,64	0,97	0,68	10,39	0,30
10	584	0,83	1,24	0,61	0,61	12,06	0,21
11	955	1,84	1,03	1,79	0,98	6,80	0,70
12	661	4,32	6,31	1,62	4,83	31,99	0,32
Promedio ponderado	10.892	1,88	2,26	1,03	1,59	14,20	0,25

Tabla 4.3. Resumen registros de intensidad de corriente. Fuente: elaboración propia.

En el histograma (Figura 4.5), se observa cómo se concentran los datos de las distintas mediciones en el intervalo de 0-4 A, superado este intervalo, se encuentra valores muy dispersos en la franja de 5-15 A. Finalmente, se hallan valores aislados por encima de 15 A.

Cantidad de registros

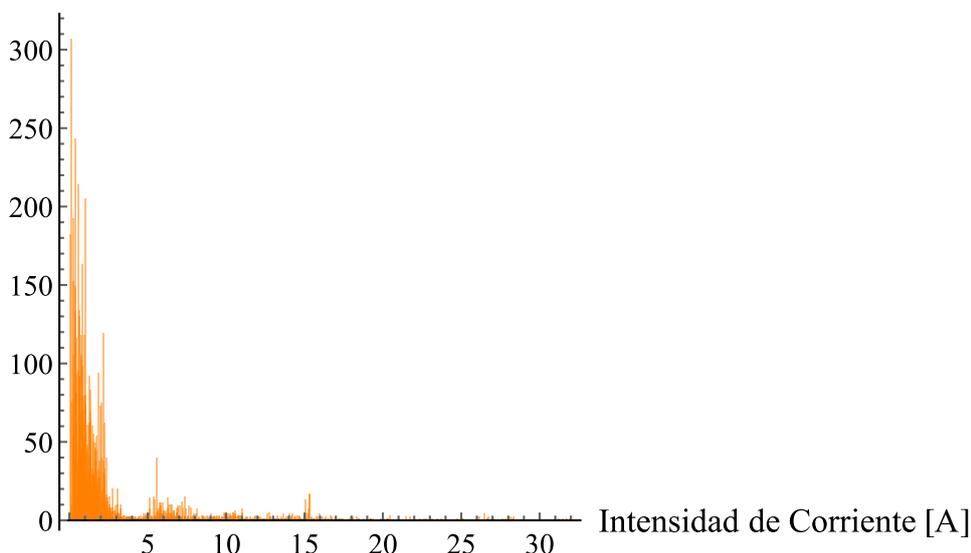


Figura 4.5. Histograma de intensidad de corriente en las viviendas. Fuente: elaboración propia.

En el diagrama de caja y bigote (Figura 4.6), se observa que el rango intercuartílico provoca que la caja sea estrecha en la mayoría de los casos. Además, en todos los casos la media es superior a la mediana, lo que señala la existencia de valores atípicos en el extremo derecho de la distribución que ejercen una influencia significativa en la corriente eficaz media. Este

hecho dificultaría la colocación de filtros en serie debido a la robustez necesaria con la que deberían contar (ver Capítulo 5).

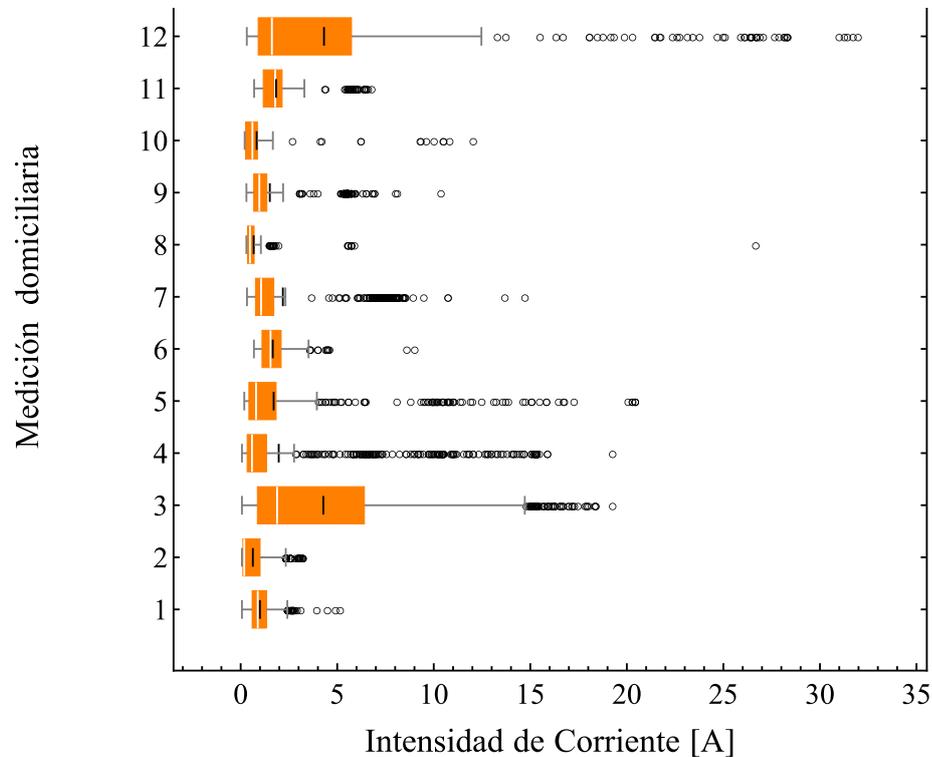


Figura 4.6. Diagrama caja y bigote intensidad de corriente en las viviendas. Fuente: elaboración propia.

3.2.1. Análisis intensidad de corriente vs THDi

Como se vio anteriormente, la distorsión armónica en corriente presenta máximos superiores al 100% y, a su vez, se registró que la corriente cuenta con valores atípicos superiores de importancia, por lo que es necesario evaluar si dichos extremos se encuentran relacionados. Para este análisis se relacionó cada valor de intensidad de corriente con el correspondiente en el tiempo de distorsión armónica. De esta manera, se confeccionó un gráfico (ver Figura 4.7) en donde en el eje de abscisas se encuentra la corriente eficaz y en el eje de ordenadas el correspondiente THD en corriente registrado; los puntos azules pertenecen al rango intercuartílico, es decir, el 50% de los datos, y en rojo el restante 50% repartido a los extremos en partes iguales.

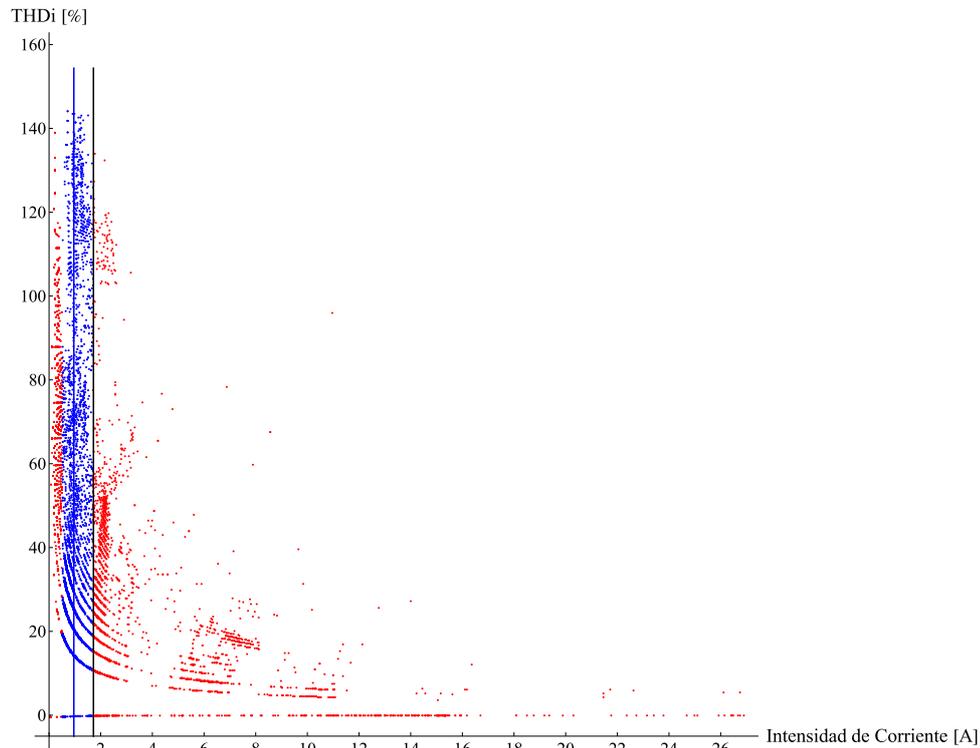


Figura 4.7. Relación entre intensidad de corriente y THD en corriente. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 4.7 se puede observar como a intensidad de corriente elevada se corresponde distorsiones armónicas bajas, en tanto que, a valores más bajos de intensidad de corriente se corresponde una alta distorsión. Además, esta última situación es la más común, ya que dichos registros se encuentran en el centro de la mediana (recta azul) y a la izquierda del promedio (recta negra). Este dato es de utilidad para seleccionar la posible zona de trabajo útil de un filtro de distorsión armónica.

De acuerdo con lo visto en el histograma de intensidad de corriente, para los valores superiores a 5A, los que se encuentran con menor frecuencia, corresponden distorsiones armónicas menores al 40%.

Se puede pensar, con fines solamente de facilitar la comprensión del gráfico, que la intensidad de corriente y la distorsión armónica se relacionan de manera inversamente proporcional en las viviendas.



3.2.2. Análisis de corrientes armónicas inyectadas

Para evaluar las corrientes armónicas inyectadas a la red eléctrica se consideraron los límites establecidos en la Resolución ENRE 0099/1997 (ya vista en el Capítulo 2). Si bien el instrumento empleado en la medición no almacena el espectro de la intensidad de corriente, se realizó un análisis siguiendo estos pasos:

- En base al cálculo de la corriente de distorsión en las viviendas (como se detalla en el punto 3.1 del presente capítulo), se ordenan estos valores de menor a mayor.
- Se halla el percentil 95 de la corriente de distorsión, ya que la normativa establece que la inyección de corrientes armónicas por encima del límite no debe superar el 5% del período de medición.
- Se compara el valor hallado con las intensidades armónicas máximas, según el orden de las armónicas de la Resolución ENRE 0099/1997. Si el valor hallado es menor, indica que no se superarán los límites de la normativa, ya que estamos evaluando la corriente de distorsión total en relación con una componente armónica individual. Por otro lado, si el valor es mayor, no se puede determinar si se cumplen los límites de la normativa, ya que no tenemos información sobre las componentes individuales de la corriente de distorsión.

Los resultados de dichas comparaciones se observan en la Tabla 4.4, en donde solo se colocan los seis peores casos. La tabla completa se puede ver en el Anexo XI.



		MED03	MED06	MED07	MED09	MED11	MED12
		Corriente de distorsión percentil 95 (A)					
Orden de la armónica	Intensidad armónica máxima (A)	0,68	1,00	1,32	1,11	1,63	1,59
IMPARES NO MÚLTIPLOS DE 3							
5	2,28	C	C	C	C	C	C
7	1,54	C	C	C	C	NC	NC
11	0,66	NC	NC	NC	NC	NC	NC
13	0,42	NC	NC	NC	NC	NC	NC
17	0,26	NC	NC	NC	NC	NC	NC
19	0,24	NC	NC	NC	NC	NC	NC
23	0,20	NC	NC	NC	NC	NC	NC
25	0,18	NC	NC	NC	NC	NC	NC
> 25	0,16	NC	NC	NC	NC	NC	NC
IMPARES MÚLTIPLOS DE 3							
3	4,60	C	C	C	C	C	C
9	0,80	C	NC	NC	NC	NC	NC
15	0,30	NC	NC	NC	NC	NC	NC
21	0,21	NC	NC	NC	NC	NC	NC
> 21	0,17	NC	NC	NC	NC	NC	NC
PARES							
2	2,16	C	C	C	C	C	C
4	0,86	C	NC	NC	NC	NC	NC
6	0,60	NC	NC	NC	NC	NC	NC
8	0,46	NC	NC	NC	NC	NC	NC
10	0,37	NC	NC	NC	NC	NC	NC
12	0,31	NC	NC	NC	NC	NC	NC
> 12	0,26	NC	NC	NC	NC	NC	NC
C: Cumple con lo establecido en la Resolución ENRE 0099/1997							
NC: No es Concluyente el valor para determinar si cumple la Resolución ENRE 0099/1997							
*Para calcular dichos valores se consideró el armónico siguiente (Tabla 2.8)							

Tabla 4.4. Límites y comparación según la Resolución ENRE 0099/1997. Fuente: elaboración propia.

Como se muestra en la tabla, las viviendas cumplen con los límites admisibles establecidos por la Resolución ENRE 0099/1997 en lo concerniente a los armónicos de orden 2, 3 y 5. A pesar de que solo son tres, es importante destacar que son los más comunes en la mayoría de las cargas individuales (como se expuso en el Capítulo 3). Para los armónicos de orden superior, si bien se requiere un análisis más detallado con el espectro completo de componentes para evaluar el cumplimiento con la normativa, es plausible considerar que las viviendas cumplen con dichos límites.



3.2.3. Análisis de la Distorsión de Demanda Total (TDD)

Si se analiza el denominador de la definición de THD en corriente, la componente fundamental puede variar en un amplio rango: desde un estado sin carga a plena carga. Esto se aprecia en los diferentes registros de corriente, donde la amplitud de los datos es elevada. Por esta razón, la IEEE 519-2014 define la Distorsión de Demanda Total (TDD), para evidenciar de manera más precisa la contribución real a la distorsión del sistema en determinados puntos, ya que la empresa prestataria del servicio de energía debe asegurar que no se deforme la forma de onda de tensión que suministra. Con este concepto (TDD), se aprecia cuánta corriente armónica se está consumiendo en comparación con la rigidez e impedancia del sistema eléctrico de distribución. De esta manera, es importante recalcar que cuanto más potencia de cortocircuito ofrezca el sistema de distribución, más robusto será frente a la presencia de armónicos en corriente.

Recordar la definición de TDD:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L} * 100\%$$

Donde I_L es la corriente de demanda máxima en el punto de acoplamiento común (PCC). La recomendación es que I_L se calcule como la corriente promedio de la demanda máxima de los 12 meses anteriores. Para este caso, se consideró igual a la corriente máxima registrada en cada domicilio. En tanto, la corriente de distorsión se promedió de acuerdo con lo expresado en el punto 3.1.

De acuerdo con la Tabla 2.1, la I_{SC} es la máxima corriente de cortocircuito en el PCC. Debido a cuestiones técnicas, estimar el valor de I_{SC} para cada vivienda es sumamente complejo puesto que implica conocer las características particulares del transformador que la alimenta, así como la impedancia de la línea de alimentación. Por esta razón, se consideran dos situaciones límites:

- Vivienda alimentada por el transformador de menor potencia, despreciando la impedancia de la línea de alimentación.
- Vivienda alimentada por el transformador de mayor potencia, despreciando la impedancia de la línea de alimentación.



La selección de la potencia de los transformadores se realizó conforme a la ETN 028a: Transformadores Trifásicos de Distribución de Energía Eléctrica, en la misma, se listan las potencias disponibles, siendo la mínima de 63 kVA y la máxima de 1000 kVA.

Para el cálculo de la corriente de cortocircuito, se adoptó un valor de tensión porcentual de cortocircuito típico para transformadores de distribución de 4%, de esta manera:

$$I_{SC} = \frac{S}{\sqrt{3} * V * \mu_{CC}}$$

Con las consideraciones previamente mencionadas, se confeccionó la Tabla 4.5, en la cual se puede apreciar que, de todas las mediciones efectuadas, tan solo una en principio (valores en rojo) no se ajustaría a los límites definidos por la normativa IEEE 519-2014.

Medición	TDD calculado	$I_{SC \text{ Min}}/I_L$	TDD por norma	Cumple normativa	$I_{SC \text{ Max}}/I_L$	TDD por norma	Cumple normativa
1	7,11	473	15	SI	6003	20	SI
2	6,03	735	15	SI	9338	20	SI
3	6,33	123	15	SI	1562	20	SI
4	3,62	126	15	SI	1601	20	SI
5	2,64	117	15	SI	1487	20	SI
6	7,59	276	15	SI	3508	20	SI
7	5,85	168	15	SI	2131	20	SI
8	1,39	102	15	SI	1295	20	SI
9	8,60	271	15	SI	3444	20	SI
10	2,99	209	15	SI	2657	20	SI
11	17,94	447	15	NO	5680	15	NO
12	5,41	78	12	SI	985	20	SI
Promedio	6,29	260	15	SI	3308	20	SI

Tabla 4.5. Límites y valores obtenidos de TDD. Fuente: elaboración propia.

3.3. Factor de potencia

Resulta útil analizar el factor de potencia ya que, actualmente, en viviendas no se registra, controla ni penaliza por un bajo factor de potencia. A continuación, se presenta la Tabla 4.6 con los valores hallados del factor de potencia en las viviendas en donde se trabajó. En la misma, se observa que existe una desviación estándar reducida, pero, aun así, se alcanzan valores tanto máximos como mínimos muy dispares. La última fila presenta los valores promedios ponderados donde puede verse que el factor de potencia en los domicilios analizados es de $0,764 \pm 0,104$.



Medición	Cantidad de datos	Media [-]	Desviación estándar [-]	Mediana [-]	Rango IC [-]	Máximo [-]	Mínimo [-]
1	1.454	0,855	0,093	0,865	0,139	0,990	0,245
2	965	0,782	0,074	0,760	0,079	0,981	0,567
3	933	0,763	0,137	0,793	0,240	0,989	0,152
4	1.113	0,748	0,154	0,756	0,243	0,991	0,152
5	1.037	0,756	0,113	0,805	0,170	0,984	0,390
6	671	0,824	0,079	0,839	0,124	0,952	0,650
7	758	0,838	0,072	0,826	0,090	0,977	0,472
8	664	0,788	0,142	0,753	0,304	0,973	0,320
9	833	0,764	0,139	0,724	0,235	0,993	0,320
10	580	0,848	0,129	0,904	0,199	0,993	0,276
11	954	0,675	0,066	0,666	0,078	0,972	0,380
12	620	0,830	0,093	0,815	0,108	0,996	0,419
Promedio ponderado	10.892	0,764	0,104	0,768	0,161	0,955	0,337

Tabla 4.6. Resumen registros de factor de potencia. Fuente: elaboración propia.

En el histograma (Figura 4.8), se observa cómo se agrupan los datos de las distintas mediciones en el intervalo de 0,6-1 del factor de potencia, encontrándose pocos valores por debajo de este intervalo. Esto se condice con lo hallado anteriormente, en donde la mediana del conjunto es de 0,768 y el rango intercuartílico es de 0,161.

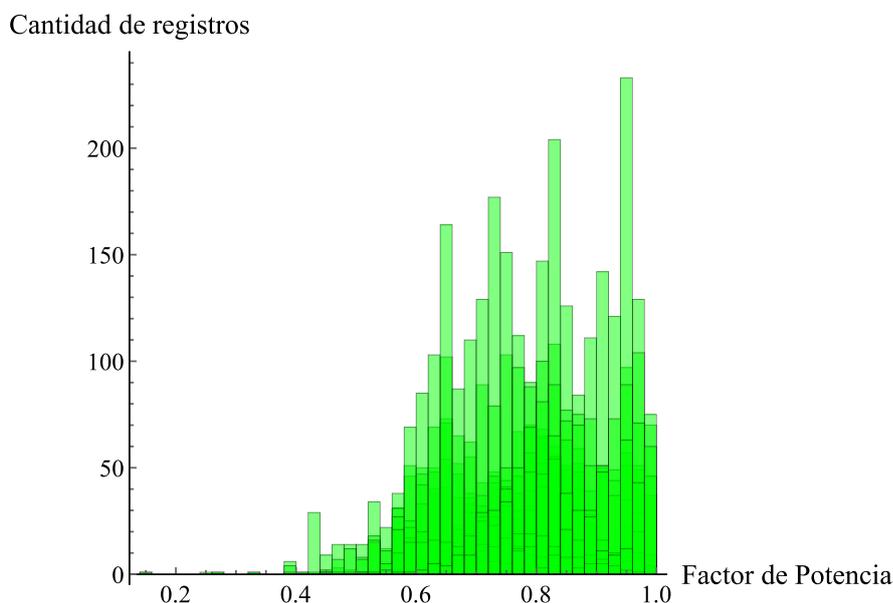


Figura 4.8. Histograma de factor de potencia en las viviendas. Fuente: elaboración propia.

En el diagrama de caja y bigote (Figura 4.9) se observa que la media y la mediana se encuentran muy próximas en la mayoría de las mediciones. Además, la caja se encuentra más cercana a los valores extremos de la derecha, lo que indica, en este caso, una situación favorable

en las viviendas por ser mejor el factor de potencia. En este caso, si solamente se tratase de compensar potencia reactiva se deberá tener presente la situación de compensación más usual y necesaria para evitar inyectar potencia reactiva a la red de distribución.

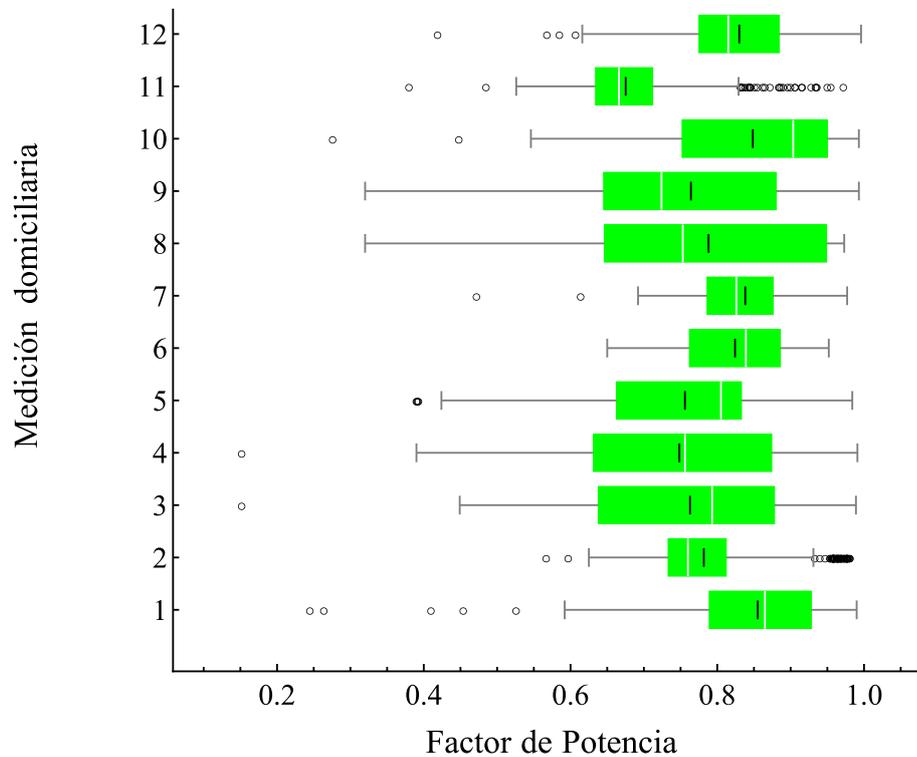


Figura 4.9. Diagrama de caja y bigote de factor de potencia en las viviendas. Fuente: elaboración propia.

3.3.1. Análisis THDi vs Factor de Potencia

En este apartado se analiza si existe alguna relación entre los valores registrados de factor de potencia y de distorsión armónica en corriente. Esto con motivo de evidenciar o no, si la relación matemática existente entre ambos se refleja de alguna manera en las mediciones. Se recuerda la definición de factor de potencia con relación al factor de distorsión y al factor de desplazamiento:

$$FP = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_1^2}} * \text{Cos}(\varphi)$$

De esta manera, se relacionó cada valor de distorsión armónica con el correspondiente en el tiempo, de factor de potencia. Seguidamente, se generó el siguiente gráfico (Figura 4.10):

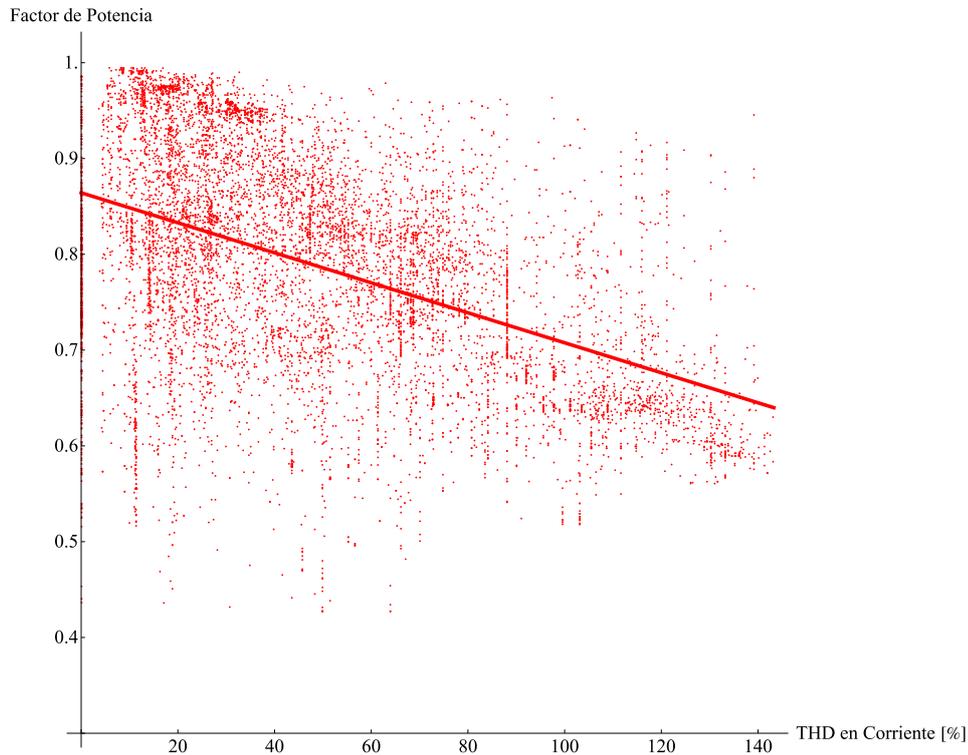


Figura 4.10. Relación entre THD en corriente y factor de potencia. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 4.10 se observa que existe una tendencia: a mayor distorsión armónica en corriente es menor el factor de potencia. Gráficamente, se visualiza mejor en la recta realizada a partir de la regresión lineal de los registros, cuya ecuación es:

$$FP \rightarrow 0,864 - 0,0016 THD_1$$

Donde se puede inferir que, si el THD en corriente es igual a cero, el factor de potencia de la instalación sería igual a 0,864. En contraste, si se calcula el factor de distorsión a partir de los registros de distorsión armónica en corriente empleando la siguiente fórmula:

$$FD_{promedio} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{THD_{I_promedio}}{100}\right)^2}}$$

El factor de distorsión promedio resulta igual a 0,905. Esto plantea un caso hipotético en el cual, si se eleva este factor a 1 mediante la utilización de filtros (posibilidad que se analiza en el Capítulo 5), se tiene entonces:

$$\text{Caso 1: } THD_{I_promedio} \rightarrow FP_1 = FD * \text{Cos}(\varphi)$$

$$\text{Caso 2: THD}_1 = 0 \rightarrow \text{FP}_2 = 1 * \text{Cos}(\varphi)$$

Por lo tanto, el factor de potencia real de la instalación aumentara de acuerdo con:

$$\text{FP}_2 = \frac{\text{FP}_1}{\text{FD}} = \frac{0,764}{0,905} = 0,844$$

Este valor es muy próximo al obtenido luego de realizar la regresión lineal y representa un incremento del factor de potencia de aproximadamente el 10%.

3.4. Potencia aparente

En el apartado de potencia, si bien el analizador de redes empleado registra y almacena la potencia activa, reactiva y aparente, resulta útil, en este caso, analizar esta última, dado que es la potencia real demandada a la red de distribución eléctrica.

A continuación, se presenta la Tabla 4.7 con los registros de la potencia aparente en las doce viviendas en que se midió. En la misma, se observa que existe una elevada desviación estándar respecto a la media, la cual también presenta diferencias significativas entre las diferentes mediciones. La última fila presenta los valores promedios ponderados donde puede verse que la potencia aparente en los domicilios analizados es de 350 ± 361 VA.

Medición	Cantidad de datos	Media [VA]	Desviación estándar [VA]	Mediana [VA]	Rango IC [VA]	Máximo [VA]	Mínimo [VA]
1	1.454	230	132	210	170	1140	20
2	968	148	173	50	200	760	20
3	934	620	669	390	450	3390	20
4	1.114	308	487	140	150	2530	20
5	1.039	306	399	180	330	2660	50
6	672	389	192	360	230	2060	160
7	757	488	550	250	220	1960	80
8	664	151	140	120	80	1370	70
9	830	362	392	235	170	2460	70
10	579	171	187	140	140	2150	50
11	956	429	240	420	230	1600	160
12	618	722	939	350	990	7040	70
Promedio ponderado	10.585	350	361	233	264	2276	60

Tabla 4.7. Resumen registros de potencia aparente.

En el histograma (Figura 4.11), se observa cómo se agrupan los datos de las distintas mediciones principalmente en dos intervalos: el primero y más importante de 0-0,4 kVA y, el

segundo de 1,2-2,4 kVA. El resto de los valores se encuentran muy dispersos llegando a valores de hasta 7 kVA.

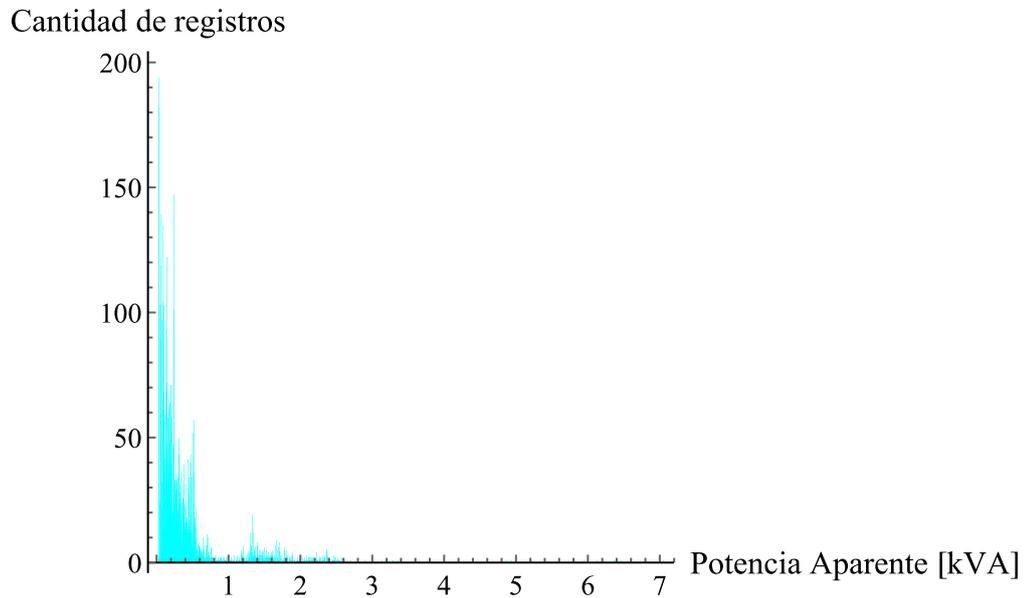


Figura 4.11. Histograma de potencia aparente en las viviendas. Fuente: elaboración propia.

Además, la Figura 4.11 es similar al histograma de corriente presentado en el punto 3.2, dado a que existe una relación directa entre las variables bajo estudio por medio de la siguiente ecuación:

$$S = V I$$

En el diagrama de caja y bigote (Figura 4.12), se observa que la media es siempre superior a la mediana, lo que indica que la media se ve influenciada por valores extremos ubicados en el lado derecho. Asimismo, la caja se encuentra más cercana a los valores extremos de la izquierda, lo que indica, en este caso, que las situaciones de mayor consumo son las de menor frecuencia.

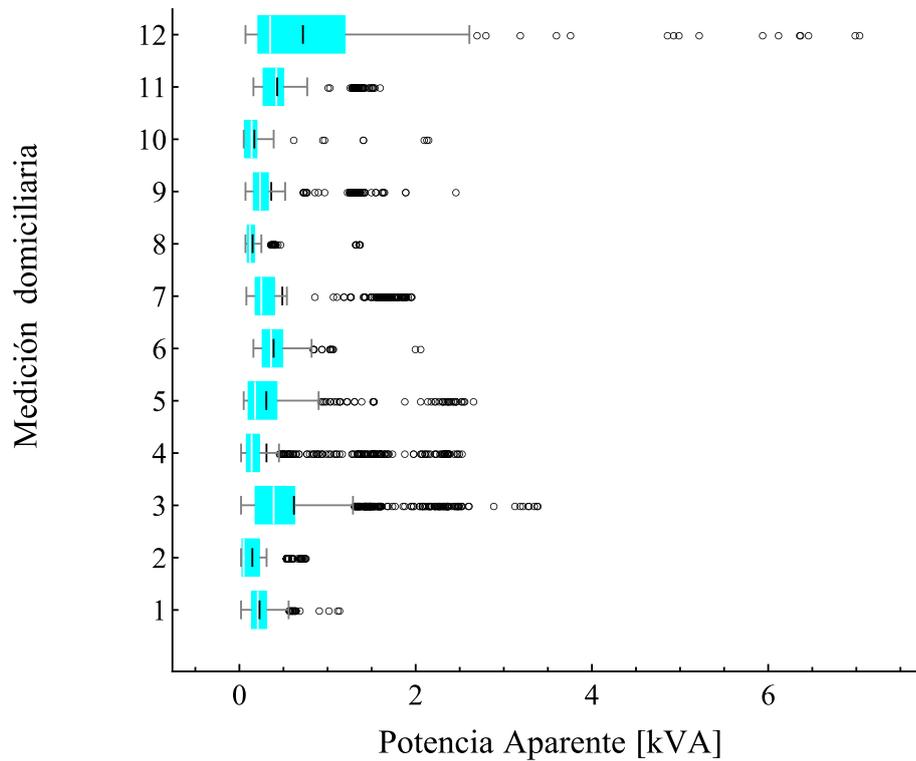


Figura 4.12. Diagrama de caja y bigote de potencia aparente en las viviendas. Fuente: elaboración propia.

En este caso, cada diagrama de caja y bigote de la Figura 4.12 es similar al correspondiente de corriente de la sección 3.2. Esto se debe nuevamente a que las variables de potencia aparente y corriente están relacionadas por medio de la tensión.

3.4.1. Análisis potencia aparente vs factor de potencia

En este punto, se analiza la relación entre los valores registrados de potencia aparente y de factor de potencia con el fin de evaluar en qué condiciones de potencia se presentan los mejores factores de potencia, o, en otras palabras, cómo es la relación entre la demanda de energía y el aprovechamiento de la misma.

Para esto, se relaciona cada valor de potencia aparente con el correspondiente en el tiempo, de factor de potencia. De esta manera, se realizó un gráfico (Figura 4.13) en donde en abscisas se ubica la potencia aparente y en ordenadas el factor de potencia correspondiente.

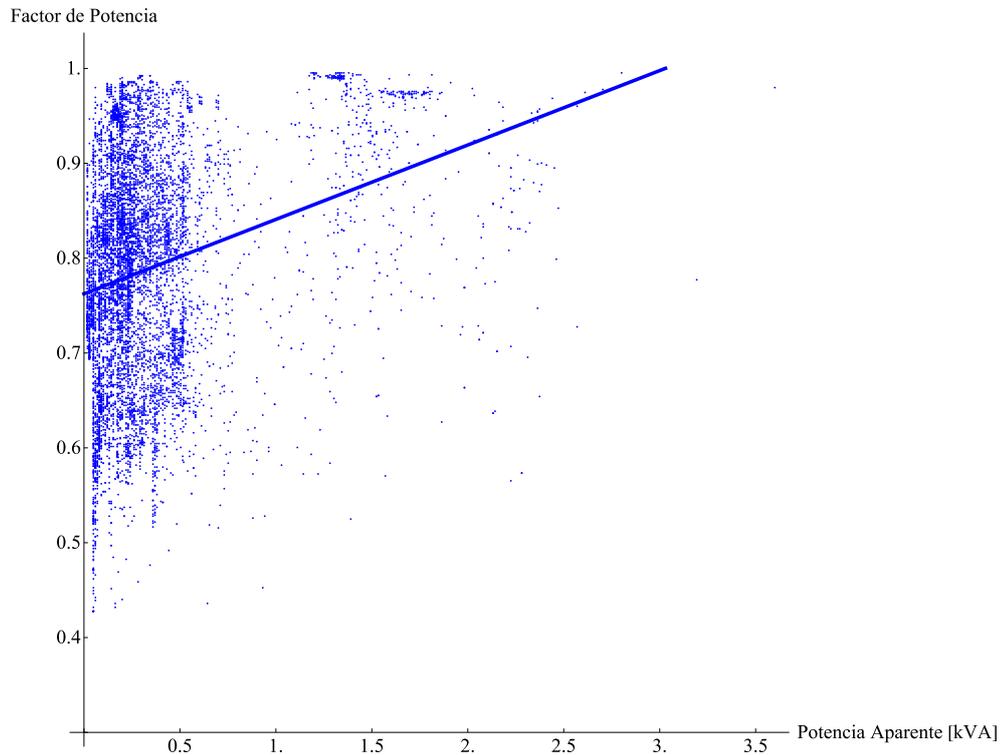


Figura 4.13. Relación entre potencia aparente y factor de potencia. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 4.13 se observa que existe una tendencia donde a mayor potencia aparente es mejor el factor de potencia. Gráficamente, se visualiza mejor en la recta realizada a partir de la regresión lineal de los registros, cuya ecuación es:

$$FP \rightarrow 0,762 + 0,078 S$$

A partir de esta ecuación, se puede inferir que a potencias mayores a 3 kVA, será más probable que el factor de potencia de la instalación sea cercano a 1. Sin embargo, por lo visto en el punto 3.4, es poco frecuente que se supere dicho valor de potencia aparente.

3.5. Tensión y THDv

Con el fin de demostrar que tanto los niveles de tensión como de distorsión armónica en tensión no afectan de manera apreciable los resultados anteriormente presentados, se realiza un análisis simplificado y resumido de los mismos.

Para controlar la calidad del producto técnico, es decir, la tensión, se controlan fundamentalmente tres parámetros: la frecuencia (en este trabajo se consideró constante), el nivel de tensión (en un margen de 5%) y la cantidad de interrupciones del servicio (sin interrupciones durante todas las mediciones).



Que la tensión en los domicilios se mantenga dentro de los márgenes de tolerancia es importante, dado que al analizar luego el THD en tensión, este puede provocar que existan sobretensiones o subtensiones pico o efectivas elevadas que pueden resultar peligrosas.

De acuerdo a los datos relevados, los niveles de tensión se mantienen, en la mayoría de los casos, dentro los límites establecidos; en los casos donde estos se sobrepasan, es por una diferencia poco significativa (Tabla 4.8, valores en rojo).

Medición	Máximo [V]	Cota superior [V]	En margen	Mínimo [V]	Cota Inferior [V]	En margen
1	237,16	242,49	SI	219,57	219,39	SI
2	241,13	242,49	SI	225,37	219,39	SI
3	237,97	242,49	SI	219,97	219,39	SI
4	239,41	242,49	SI	218,83	219,39	NO
5	239,41	242,49	SI	227,64	219,39	SI
6	236,73	242,49	SI	211,44	219,39	NO
7	237,23	242,49	SI	228,43	219,39	SI
8	243,68	242,49	NO	234,16	219,39	SI
9	243,24	242,49	NO	234,76	219,39	SI
10	233,9	242,49	SI	222,56	219,39	SI
11	237,77	242,49	SI	228,73	219,39	SI
12	237,59	242,49	SI	223,66	219,39	SI

Tabla 4.8. Límites y valores obtenidos de tensión. Fuente: elaboración propia.

En el histograma (Figura 4.14) se aprecia que la mayoría de valores registrados de tensión se agrupan en el intervalo de 225-245 V.

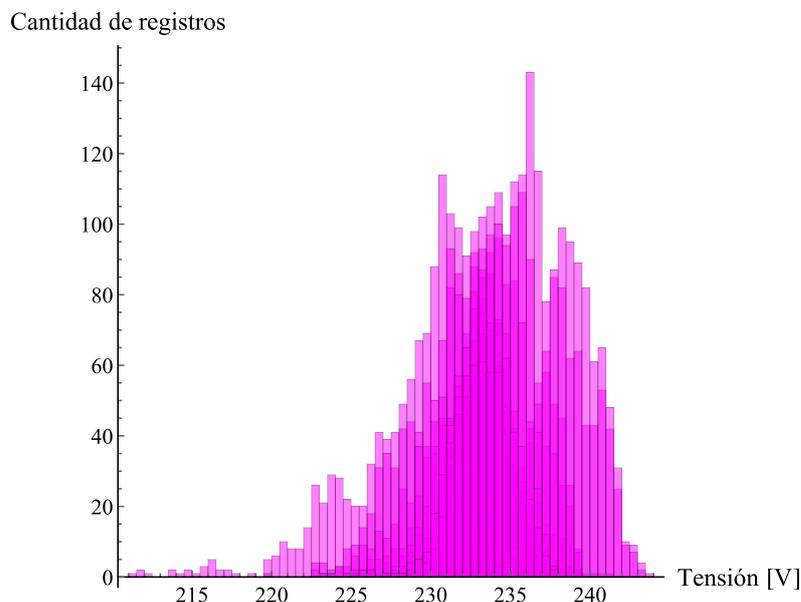


Figura 4.14. Histograma de tensión en las viviendas. Fuente: elaboración propia.

Al momento de analizar los resultados sobre la distorsión armónica total en tensión, es importante observar los registros máximos para verificar si en algún momento superan el máximo permitido por las diferentes normativas, las cuales son: el Anexo a la Resolución ENRE N.º 184-2000 y la IEEE 519-2014. Estas establecen que la tasa de distorsión armónica total en sistemas de baja tensión no debe ser superior al 8% durante al menos el 95% del período de medición.

En el diagrama de caja y bigote (Figura 4.15) se observa que la mayoría de las mediciones se encuentran por debajo del límite establecido por la norma correspondiente. En aquellas donde el valor es superior a este límite, este no excede del percentil 95 (Tabla 4.9), por lo que sigue estando dentro de la normativa.

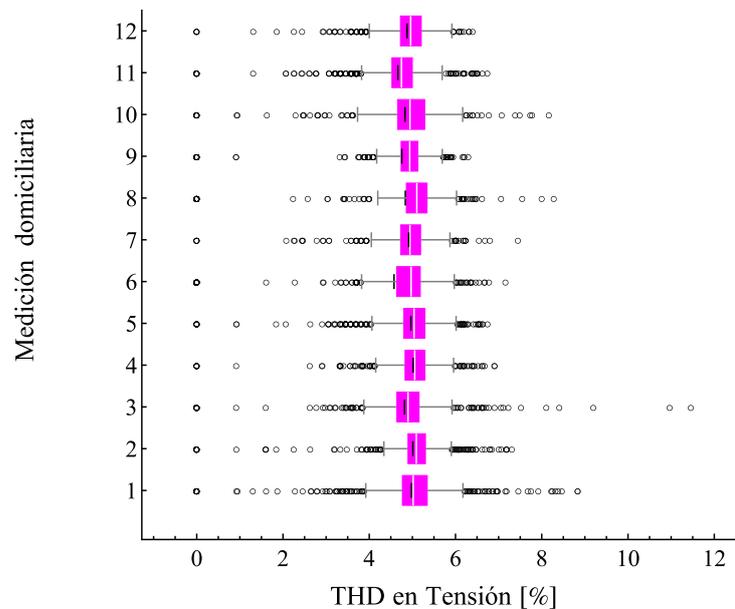


Figura 4.15. Diagrama de caja y bigote de THD en tensión en las viviendas. Fuente: elaboración propia.



Medición	Valor medio [%]	THD en tensión del percentil 95% [%]	Máximo registrado [%]
1	4,98	5,97	8,84
2	5,01	5,88	7,31
3	4,82	5,73	11,46
4	5,02	5,71	6,91
5	4,97	5,76	6,74
6	4,58	5,79	7,16
7	4,91	5,65	7,45
8	4,84	5,82	8,28
9	4,76	5,51	6,30
10	4,83	5,83	8,17
11	4,67	5,55	6,74
12	4,88	5,71	6,40

Tabla 4.9. Resumen registros de THD en tensión. Fuente: elaboración propia.

Para poder concluir que el término correspondiente al factor de distorsión armónica en tensión es despreciable, este se calcula empleando la máxima distorsión armónica hallada (11,46%), de manera tal, que, en el caso más extremo y con menor probabilidad (>5%), se tiene:

$$FD_V = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_V^2}}$$

$$FD_V = 0,993 \cong 1$$

CAPÍTULO 5: ANÁLISIS Y FACTIBILIDAD DE MITIGAR LOS EFECTOS DE LA PERTURBACIÓN ARMÓNICA SOBRE APARATOS E INSTALACIONES

En este capítulo se analiza en profundidad los efectos que produce la distorsión armónica sobre los distintos aparatos e instalaciones eléctricas típicas de una vivienda. Posteriormente, se estudia la factibilidad de mitigar los efectos que produce la presencia de cargas no lineales en las viviendas unifamiliares y se exponen las posibles soluciones, entre ellas, el uso de filtros con sus aplicaciones típicas y limitantes.

1. Análisis de los efectos de la distorsión armónica

1.1. Sobre la eficiencia energética

Como se mostró en el Capítulo 1, la distorsión armónica total está relacionada con el factor de potencia de una instalación eléctrica, esto es, a mayor THD, menor será el factor de potencia. Como consecuencia de esto, el trabajo útil generado a partir de la energía demandada a la red de distribución es menor.

Se recuerda que el factor de distorsión por definición es:

$$FD = \frac{I_1}{I_{RMS}} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_i^2}}$$

El cual, en conjunto con el factor de desplazamiento, permite hallar el factor de potencia (razón entre la potencia activa y la aparente en un circuito):

$$FP = FD * \text{Cos}(\varphi)$$

Ambas ecuaciones se pueden reescribir como:

$$FP = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_i^2}} * \text{Cos}(\varphi)$$

Queda en evidencia que a mayor THD en corriente, menor será el factor de distorsión, y, por ende, más se aleja el factor de potencia del factor de desplazamiento. Solamente en el caso límite donde la carga es lineal, se cumple que ambos son iguales.

$$\text{Si } THD_i = 0 \rightarrow FP = \text{Cos}(\varphi)$$

Con los datos recopilados de las viviendas, se calculó un factor de distorsión promedio de 0,91, lo que se visualiza en la Figura 5.1.

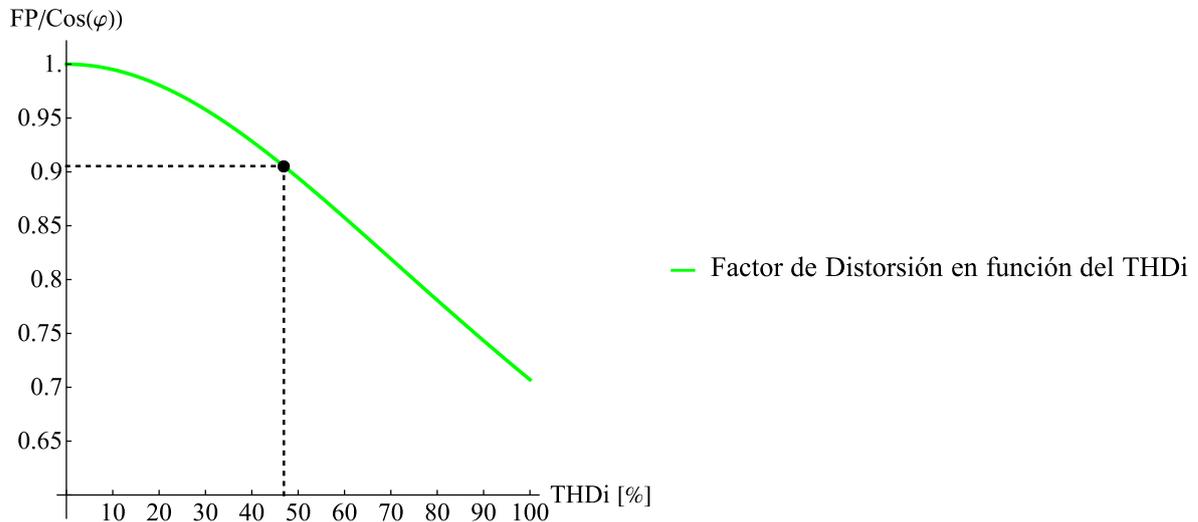


Figura 5.1. Relación Factor de Distorsión y THD en corriente. Fuente: elaboración propia.

Esto implica que, de poder eliminarse las cargas no lineales y/o filtrarse las componentes armónicas de corriente de tal manera que el factor de distorsión sea igual a la unidad, la potencia aparente demandada a la red se reduciría en promedio un 10% aproximadamente.

1.2. Sobre conductores

El incremento de corriente demandada, producto de los armónicos en corriente, conlleva una mayor pérdida en los conductores. Este incremento viene dado según:

$$I_{RMS} = I_1 * \sqrt{1 + THD_I^2}$$

$$\frac{I_{RMS}}{I_1} = \sqrt{1 + THD_I^2}$$

Ahora bien, se debe considerar que las pérdidas en conductores, resultado de su propia resistencia, responden al cuadrado de la corriente, es decir:

$$\text{Pérdidas} = I_{RMS}^2 * R = I_1^2 * (1 + THD_I^2) * R$$

$$\text{Pérdidas} = \left(\frac{I_{RMS}}{I_1}\right)^2 = 1 + THD_I^2$$

Para el caso del THD en corriente hallado, esto implica un incremento del 10% de la corriente eficaz y un aumento del 20% de las pérdidas en los conductores. Esto se visualiza gráficamente en la Figura 5.2, donde puede verse que un aumento de 10°C de temperatura por encima de la temperatura nominal puede reducir la vida de la instalación en hasta el 50% (Danfoss, 2020).

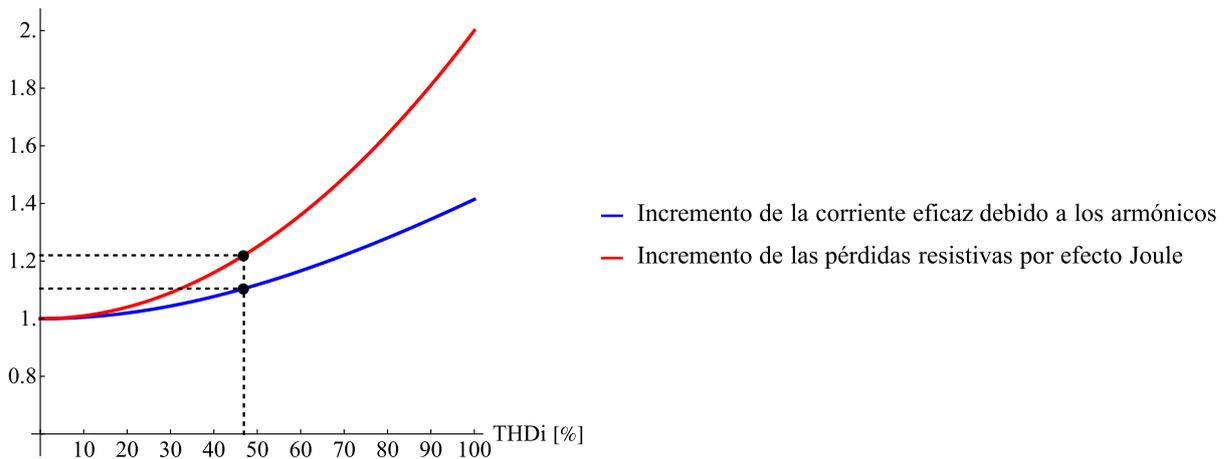


Figura 5.2. Incremento de la corriente eficaz y de las pérdidas en conductores debido a los armónicos. Fuente: elaboración propia.

No se realiza un análisis en detalle de las pérdidas por efecto pelicular dado que este efecto es apreciable en sistemas de alta tensión y/o en donde los armónicos de orden elevado tienen un mayor impacto. De esta manera, al ser un sistema de baja tensión en el cual los resultados de las mediciones individuales de cargas muestran que no existen corrientes armónicas de orden elevado importantes, no es meritorio un análisis en profundidad de dicho efecto.

1.3. Sobre dispositivos de protección

1.3.1. Dispositivos Diferenciales de corriente Residual (DDR)

Los dispositivos diferenciales pueden sufrir perturbaciones debido a la presencia de armónicos. Esto se explica porque la presencia de componentes de frecuencias elevadas aumenta el riesgo de corrientes de fuga que circulan a través de las capacidades de aislamiento de los cables y equipos de la red y puede provocar disparos intempestivos.

La AEA 90364-7-770 Edición 2017 exige la obligatoriedad de la utilización de una protección diferencial como aparato de cabecera en el tablero principal o los tableros

seccionales. El tablero con la protección diferencial debe contar con al menos las siguientes características:

- Poseer una sensibilidad de: $I_{\Delta n} \leq 30 \text{ mA}$ (alta sensibilidad).
- Ser de actuación no retardada (“instantánea”).

Acorde a lo evidenciado en las mediciones llevadas a cabo en este trabajo, sería apropiado que la reglamentación vigente establezca la clase de dispositivo diferencial que debe usarse, sin embargo, no hay norma vigente que establezca esto para el caso de viviendas.

La norma IEC 60755 define cuatro tipos de diferenciales para aplicaciones en corriente alterna según las corrientes residuales previstas (Figura 5.3). Estos diferenciales son:

- Clase o Tipo AC: es el más común y solo detecta y actúa con corrientes alternas residuales sinusoidales, es decir, con la misma forma de onda y frecuencia que la tensión de alimentación. Esta suele producirse por un defecto de aislamiento en los cables o en las cargas resistivas y/o lineales. Se suele utilizar en instalaciones eléctricas de propósito general, aunque su uso está prohibido en algunos países como Alemania, Suiza y Bélgica.
- Clase o Tipo A: además de detectar y actuar como el de diferencial de tipo AC, detectan y reaccionan frente a corrientes residuales pulsantes (de la misma frecuencia que la tensión de alimentación) superpuestas a un valor constante de corriente continua. Este tipo de defecto surge de fallas de aislamiento de equipos monofásicos que incorporan circuitos rectificadores.
- Clase o Tipo F: además de detectar y actuar como el de diferencial de tipo A, son capaces de detectar y reaccionar frente a corrientes residuales compuestas (de hasta 1kHz) y corrientes alternas superpuestas sobre una corriente continua alisada.
- Clase o Tipo B: además de detectar y actuar como el de diferencial de tipo F, detectan y protegen contra corrientes continuas residuales suaves. Actualmente, es el diferencial con la protección más completa. Este tipo de protección es el más adecuados para su uso en sistemas de CA trifásicos de 50/60 Hz.

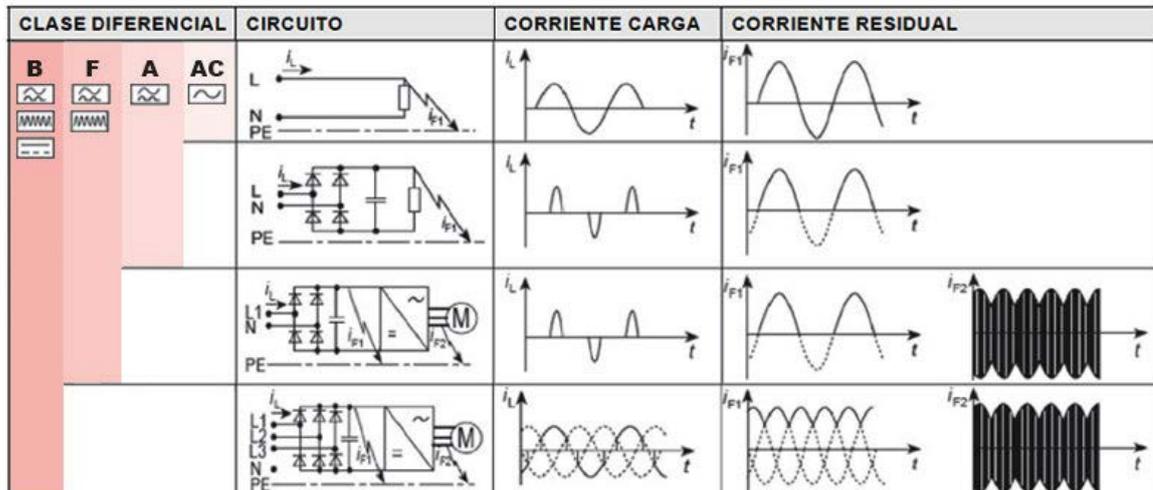


Figura 5.3. Clase de diferenciales. Fuente: <https://artist.blogspot.com/2019/12/que-es-y-para-que-sirve-un-interruptor.html>

La elección del tipo diferencial es un factor clave para asegurar la correcta protección de la instalación y, fundamentalmente, de las personas. Esto se debe a que, en líneas donde la corriente residual tiene componentes importantes de alta frecuencia y/o de corriente continua, un diferencial de clase AC y/o A puede comportarse de dos maneras:

- Se vuelve sensible ante la mínima corriente CC y causa disparos intempestivos.
- Se queda bloqueado y no dispara ante una fuga superior al valor de disparo.

Por ende, es recomendable que en nuevos proyectos de instalaciones eléctricas se evalué utilizar como mínimo diferenciales clase A o preferiblemente superior, dado que, acorde a lo visto en el Capítulo 4, la presencia de armónicos en domicilios es apreciable, y, además, existen corrientes de fuga permanentes en diferentes aparatos eléctricos según Figura 5.4.

Tipo de aparato	Valor
Fax	0,5 a 1 mA
Impresora	< 1 mA
Estación de trabajo informática	1 a 2 mA
Terminal informático	0,3 a 1,5 mA
Fotocopiadora	0,5 a 1 mA
Aparato electrodoméstico clase 1	< 0,75 mA
Aparato de iluminación clase 1 < 1 kVA	< 1 mA

Figura 5.4. Valor de la corriente de fuga permanente aproximada para cada tipo de aparato. Fuente: Merlin Gerin: Guía de protección diferencial baja tensión.



En instalaciones existentes, donde el interruptor diferencial se acciona de forma indeseada, se debe verificar que la corriente de fuga permanente no rebase el 30% de $I_{\Delta n}$ en esquema TT (obligatorio en viviendas). Esta corriente no es peligrosa ya que no se debe a defectos de aislamiento, sino a características propias de los aislantes, frecuencias de las corrientes empleadas y condensadores de los filtros capacitivos. En caso de superar dicho límite, se recomienda dividir el circuito (distribuyendo las corrientes de fuga) y/o comprobar la clase del interruptor diferencial.

Finalmente, se ha de mencionar que comercialmente las distintas marcas han optado por utilizar denominaciones como “Inmunizado”, “Superinmunizado” o “SI” para hacer referencia a DDR de clase superior a la AC. Se recomienda, en estos casos, revisar la documentación técnica para corroborar la corriente residual que el dispositivo es capaz de detectar.

1.3.2. Pequeños Interruptores Automáticos (PIAs)

Los pequeños interruptores automáticos, comúnmente conocidos como interruptores termomagnéticos, que responden a la norma IEC 60898 operan de acuerdo con el valor eficaz de la corriente.

Los interruptores termomagnéticos más populares utilizan una lámina bimetálica que se deforma con la temperatura y, por lo tanto, actúan según el calentamiento ocasionado por el paso de la corriente. La presencia de armónicos puede perturbar este mecanismo debido al aumento en la corriente eficaz en los conductores y a que el efecto piel adquiere importancia, provocando pérdidas adicionales y calentamientos excesivos. Por este motivo, los PIAs deben considerar el verdadero valor eficaz de la corriente para cumplir correctamente su tarea de protección.

En tanto, si se trata de un interruptor electrónico sensible al valor pico de corriente, es importante que la frecuencia de muestreo sea suficientemente elevada para que el dispositivo sea capaz de detectar adecuadamente a las corrientes armónicas. De otra manera, si el valor pico de corriente es superior al nominal, este tipo de interruptores puede dispararse prematuramente con corrientes bajas, o bien, si el valor pico es menor que el nominal, el interruptor puede no disparar cuando debiera.



2. Métodos para mitigar la presencia de componentes armónicos

En la actualidad, existen diferentes técnicas o métodos para reducir la presencia de armónicos en una instalación. Si bien el objetivo del trabajo planteado es analizar la factibilidad de la utilización de filtros, existen también otros métodos como, por ejemplo:

- Conexión especial de transformadores.
- Reubicación de cargas y/o cancelación de pasos de compensación reactiva.

A continuación, se realizará una breve revisión de cada una de estas propuestas con el objetivo de comprender por qué no son favorables o viables para una vivienda. Luego, se analizará el principio de funcionamiento de los filtros y su posible implementación.

2.1. Conexión especial de transformadores

El método de la conexión especial de transformadores se basa en aprovechar la configuración de conexión de estos: cuando uno de los lados del transformador está conectado en triángulo, por estos devanados circulan corrientes armónicas que son múltiplos de tres. Aunque inicialmente esto puede plantear desafíos en el diseño de los devanados debido a la posible sobrecarga, resulta beneficioso en términos de mitigación de las corrientes armónicas, ya que actúa como una trampa para estas. Un efecto similar se puede lograr mediante el uso de transformadores zig-zag.

Si bien este tipo de conexión suele emplearse en las redes de distribución urbana, no se verá reflejada ninguna disminución del contenido de armónicos en usuarios residenciales, ya que estos se encuentran aguas abajo de la trampa creada por el transformador que las filtraría.

2.2. Reubicación de cargas y/o cancelación de pasos de compensación reactiva

La reubicación de cargas plantea mover las principales cargas armónicas lo más cercano al PCC, es decir, aguas arriba. A su vez, se puede estudiar si existen pasos en la compensación de potencia reactiva que puedan amplificar armónicos debido al fenómeno de resonancia y de esta manera evitarlos.

Nuevamente, en usuarios residenciales esta propuesta resulta inviable debido a las características propias de la instalación, donde en principio no se cuenta con ningún tipo de compensación, y a la naturaleza inamovible de la distribución de los espacios (con sus respectivas cargas).

2.3. Filtros pasivos

Para prevenir la circulación de armónicos en corriente, se puede emplear la conexión de filtros pasivos a la red. Estos pueden conectarse de la siguiente manera:

- Filtro serie: presentan una alta impedancia para bloquear los armónicos. Deben ser capaces de soportar toda la corriente de la carga, por lo que son costosos y no proveen compensación de potencia reactiva, razones por las cuales no son muy empleados.
- Filtro paralelo: se emplean para establecer un camino de baja impedancia para las corrientes armónicas de forma que circulen por el filtro y se deriven a tierra (Figura 5.5). Por ellos solo circula una parte de toda la corriente de la carga y proveen compensación de potencia reactiva, por lo que son los más empleados.

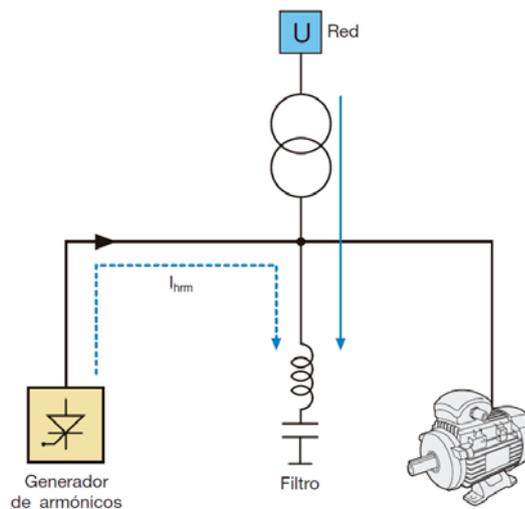


Figura 5.5. Esquema básico de conexión de un filtro pasivo. Fuente: Cuaderno ABB: Corrección del factor de potencia y filtrado de armónicos en las instalaciones eléctricas.

Los filtros paralelos se clasifican a su vez de acuerdo con la UNE-EN 61642 en:

- Sintonizado.
- Desintonizado.

2.3.1. Filtro sintonizado

Un filtro sintonizado ideal está compuesto por un capacitor conectado en serie a un inductor (ver Figura 5.6) de tal manera que exhiben una impedancia mínima frente a la frecuencia armónica de diseño. Así, las corrientes armónicas serán derivadas a tierra, en tanto que, a la frecuencia fundamental, el filtro actúa como un capacitor, corrigiendo el factor de

potencia. El filtro sintonizado, por lo general, se diseña para un orden de armónico determinado y se pueden acoplar en paralelo varios de ellos, según la necesidad.

Aunque este filtro sea aparentemente simple, económico y fácil de poner en funcionamiento, exige un cuidadoso estudio de la instalación. Esto se debe a que, si el filtro se comporta perfectamente como un cortocircuito para la frecuencia deseada, existe el riesgo de resonancia con otras inductancias de la red a otras frecuencias y los niveles de armónicos que antes no eran perjudiciales pueden aumentar. Así, para diseñar este tipo de filtros es necesario conocer muy bien los valores de la impedancia de red, el espectro de frecuencia de la fuente de armónicos (tanto en tensión como en corriente) y el límite de distorsión máximo permitido. Además, la sintonización de este filtro es sensible a variaciones de frecuencia, inductancia y capacitancia (ya sea por envejecimiento, temperatura y/o tolerancias de fabricación).

2.3.2. Filtros desintonizados

Un filtro desintonizado es en realidad un filtro sintonizado por debajo de un armónico característico, de esta manera, se evitan los problemas de resonancia de armónicos. Esta disposición se suele emplear para proteger los capacitores destinados a mejorar el factor de potencia y, además, absorbe parcialmente las intensidades armónicas de rango superior a la frecuencia del conjunto inductor-capacitor.

Se debe escoger con cuidado los componentes del filtro, ya que el inductor elevará la tensión del capacitor por sobre la tensión de la red. El valor de la sobretensión en el capacitor dependerá del grado de desintonía de diseño. Este tipo de filtro se recomienda para los casos donde las fuentes de armónicos se encuentren en un rango entre 20 y 50% de la carga total a compensar (Leyden, 2003).

2.3.3. Otros tipos de filtros

Existen otros tipos de filtros (Figura 5.6) en donde el cálculo y el diseño son más complejos, como los filtros amortiguadores o paso alto. Siendo los más empleados el filtro tipo C y los de segundo y tercer orden.

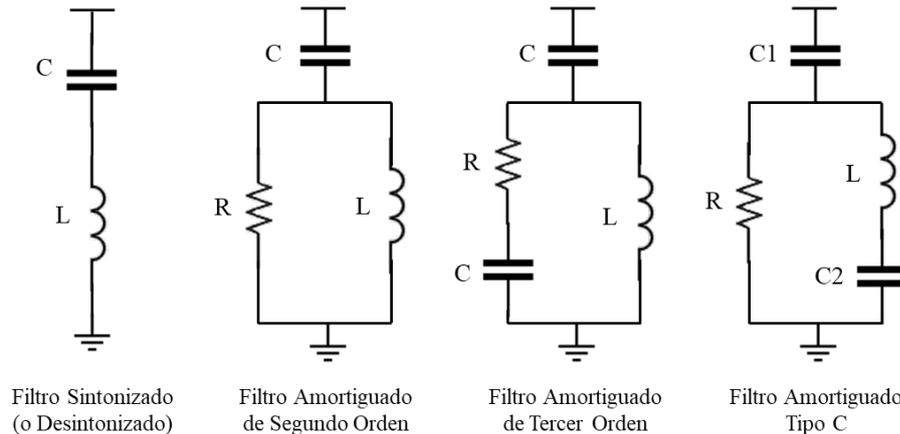


Figura 5.6. Resumen de esquemas de filtros pasivos. Fuente: elaboración propia.

2.4. Filtros activos

Un filtro activo es un dispositivo que utiliza, al menos, un convertidor estático para eliminar el contenido armónico de una instalación, adaptándose, en cada momento, a las características de la línea. Son más eficaces y flexibles que los filtros pasivos, evitando sus inconvenientes y ofreciendo la posibilidad de eliminar totalmente los armónicos. Como desventaja, son más caros y consumen potencia de manera significativa.

2.4.1. Convertidores limpios

Actualmente, los convertidores estáticos que emplean los IGBT (Transistor Bipolar de Puerta Aislada, por sus siglas en inglés) son capaces de garantizar una mínima distorsión armónica en el punto de conexión. Esto ha dado lugar a la disponibilidad de convertidores limpios, los cuales son capaces mediante la técnica de PWM (Modulación por Ancho de Pulsos, por sus siglas en inglés) de entregar una señal de tensión senoidal y forzar a que la corriente absorbida por este sea lo más próximo a una senoide. Estos dispositivos se pueden emplear para la construcción de UPS (Sistemas de Alimentación Ininterrumpido, por sus siglas en inglés), cuya eficiencia dependerá del esquema eléctrico adoptado. Los UPS pueden ser:

- UPS VFS – Offline: suministran energía a la carga desde la red eléctrica bajo condiciones normales de funcionamiento. Cuando falla el suministro, el UPS cambia automáticamente la carga a la batería interna para seguir funcionando.
- UPS VI – Línea interactiva: suministran energía a la carga desde la red eléctrica a través de un regulador automático de voltaje. Cuando falla el suministro o la tensión esta fuera de los límites de tolerancia del UPS, este cambia automáticamente la carga a la batería interna para seguir funcionando.



- UPS VFI – Online: suministran energía a la carga a partir de una doble conversión de AC/DC - DC/AC, de esta manera garantizan una protección total de la carga contra los problemas eléctricos que se puedan presentar. En caso de fallo en el suministro, la energía de la batería fluye instantáneamente para mantener la alimentación. Estos equipos con tecnología de transistores IGBT presentan una eficiencia cercana a la unidad y pueden ser una alternativa de estudio válida para alimentar cargas no lineales y/o de bajo factor de potencia.

2.4.2. Compensadores activos

Los compensadores activos están diseñados específicamente para mitigar o compensar las distorsiones armónicas, la conexión de estos puede ser:

- Conexión en serie: bloquea las tensiones armónicas que proceden de las fuentes aguas arriba. Es poco empleado porque actúa sobre las consecuencias (tensiones armónicas) y no sobre las causas (corrientes armónicas). Además, debe ser capaz de soportar las corrientes de cortocircuito.
- Conexión en paralelo: inyecta a la red una réplica exacta, pero de signo opuesto de las corrientes armónicas que consume la carga. De esta manera, como la corriente armónica es compensada por el filtro, solo se demanda a la red la corriente fundamental.

2.5. Filtros híbridos

El principio de los filtros híbridos consiste en conectar en paralelo uno o varios filtros pasivos y un filtro activo, de tal manera que las acciones de uno y del otro se complementan (Figura 5.7). Si bien esta solución es completa en cuanto a la mitigación de armónicos, es costosa y compleja de implementar ya que se utilizan ambos tipos de filtros.

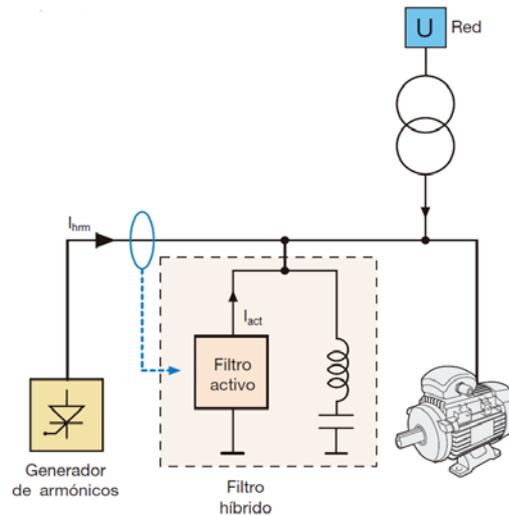


Figura 5.7. Esquema básico de conexión de un filtro híbrido. Fuente: Cuaderno ABB: Corrección del factor de potencia y filtrado de armónicos en las instalaciones eléctricas.

3. Factibilidad de incorporar filtros

Uno de los objetivos de este trabajo es analizar la factibilidad de incorporar filtros (pasivos y/o activos) para mitigar las perturbaciones armónicas. Se considera que un proyecto es factible cuando además de poder hacerse, es sostenible y rentable económicamente. Por estas razones, se evalúan a continuación criterios técnicos, económicos y de la situación actual en materia de seguridad eléctrica en las viviendas para poder concluir si existe factibilidad en el uso de filtros como solución a los problemas ocasionados por las perturbaciones armónicas.

3.1. Factibilidad técnica

Desde una perspectiva técnica, los efectos que pueden llegar a ocasionar los armónicos en una instalación domiciliaria son variables de acuerdo con el orden del armónico, su presencia en el tiempo y su intensidad. A su vez, hay que considerar con qué elementos de la instalación termina interactuando y afectando.

Como se pudo constatar en el Capítulo 3, en las mediciones de cargas individuales se identificó que existen cargas significativas en términos de potencia y tiempo y que, al mismo tiempo, presentan una presencia notable de armónicos. Sin embargo, diseñar y evaluar un filtro específico para cada carga domiciliaria no sería justificado, dado lo particular de las necesidades y condiciones.

Como se pudo verificar en el Capítulo 4, aunque la inyección promedio de armónicos en corriente en los hogares es significativa, esta se encuentra dentro de lo establecido en la Resolución ENRE 0099/1997 en lo que respecta a los armónicos de orden 2, 3 y 5. Además, la

Tasa de Distorsión de Demanda Total (TDD), en la mayoría de los casos, permanece dentro de los límites establecidos por la norma IEEE 519-2014. Cabe destacar que el principal impacto de los armónicos en la red de distribución es la deformación de la forma de onda de tensión, lo cual se refleja en la presencia de un THD en tensión; sin embargo, este también se encuentra dentro de los límites establecidos por el ENRE.

Por estas razones, técnicamente no es necesario en el corto plazo una implementación de filtros por parte de la mayoría de las viviendas analizadas. Aun así, existe el caso (Medición 11 del Capítulo 4) donde el TDD es superior a lo que admite la norma correspondiente y se puede evaluar, con mayor detalle, la implementación de un filtro, teniendo en cuenta las componentes armónicas de la corriente de distorsión. Para esto, se detallan primeros los filtros comerciales existentes y luego las consideraciones a valorar para el diseño de filtros.

3.1.1. Filtros comerciales

En la actualidad, existen comercialmente filtros que se podrían adaptar al contexto ya estudiado en el Capítulo 3 y 4. Esta solución cuenta con la ventaja de que se trata de dispositivos ya probados para mitigar la presencia de armónicos en instalaciones. A continuación, se detallan solo aquellos filtros comerciales (ver Figura 5.8) que podrían adaptarse a una vivienda unifamiliar, cuya bajada se supone en principio monofásica (el resto de las especificaciones se encuentran en el Anexo XII):

- Filtros FB3 de CIRCUTOR: “son filtros de bloqueo de armónicos, preparados para enchufar directamente los receptores. Su función principal es reducir el 3er armónico, pero proporcionan también una reducción significativa de los armónicos 5°, 7° y otros presentes en las instalaciones domésticas y de oficinas.” (CIRCUTOR, 2022)
- Filtro de armónicos monofásico de SIKES: “puede reducir de forma efectiva la corriente de armónicos, suprimiendo la distorsión armónica al 15% para frenar su impacto en los dispositivos circundantes y las redes eléctricas de nivel superior. Se utiliza en el tratamiento de los armónicos generados bajo contextos industriales y comerciales, tales como edificios de oficinas, escuela, y casas residenciales donde están instaladas muchas computadoras.” (SIKES, 2023)



Figura 5.8. Filtros comerciales. A la izquierda, filtro CIRCUTOR; a la derecha, filtro SIKES. Fuente: Manual de instrucciones: FB3, Filtro del tercer armónico y Data sheet Harmonic filter SKS-HFI-0010-CLB/2

Ambos filtros serían viables de colocarse en situaciones en donde las cargas no lineales se encuentren próximas entre sí, ubicándolo cercano a estas. En tanto, debido a la corriente nominal que manejan los filtros y/o la forma constructiva de estos, no podrían instalarse en la entrada del tablero general de baja tensión de la vivienda.

Por otra parte, el uso de UPS con esquema Online, es decir, de doble conversión y funcionamiento continuo, no resulta viable debido a que exige una gran inversión, puesto que están destinados principalmente a suplir de energía a equipos críticos, como ser servidores, equipos médicos, etc.

Finalmente, la instalación y/o adaptación de filtros activos comerciales al contexto de una vivienda no resulta factible, ya que los mismos están destinados a aplicaciones de mayor potencia, comúnmente grandes comercios y/o industrias. Por ende, también es descartada la opción de filtros híbridos comerciales.

3.1.2. Consideraciones acerca del diseño de filtros pasivos

El diseño y cálculo de un filtro pasivo para una vivienda representa la opción más adecuada para abordar la mitigación de armónicos en corriente. Sin embargo, este proceso demanda mediciones y estudios minuciosos para corroborar la necesidad de adopción de un filtro y la adecuada adaptación de este a las exigencias eléctricas.

Las mediciones, según la normativa del ENRE, deben abarcar al menos un lapso de una semana y proporcionar el espectro de la distorsión armónica en corriente. Este espectro se utiliza posteriormente para evaluar si el mismo se encuentra dentro de los límites permisibles de emisión y, por ende, la necesidad de un filtro. Otra manera de evaluar dicha necesidad sería a partir de lo que dicta la IEEE con el cálculo del TDD.

Al diseñar un posible filtro, se recomienda considerar la estación del año en la que se realizó la medición para tener en cuenta la posibilidad de cargas atípicas según la temporada. La zona de estudio se caracteriza por veranos con altas temperaturas y la presencia de equipos de aire acondicionado, en tanto que en los inviernos se añaden calefactores resistivos.

Se debe tener presente que la AEA solo permite un único esquema de conexión a tierra (ECT) en los inmuebles alimentados desde la red pública de baja tensión, este es el esquema TT (Ver Figura 5.9).

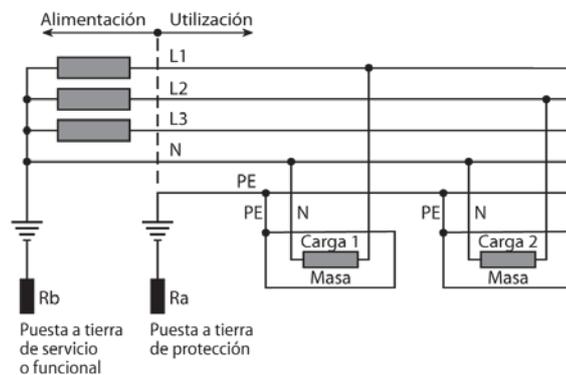


Figura 5.9. Filtros comerciales. Fuente: Artículo Técnico: Conexión a tierra de las instalaciones eléctricas.

El mismo debe cumplir con las siguientes condiciones:

- Un punto del sistema de alimentación, generalmente el conductor neutro, debe ser conectado directamente a una tierra de servicio por parte del proveedor de la energía eléctrica.
- Las masas eléctricas de la instalación se conectan por medio del conductor de protección a otra toma de tierra eléctricamente independiente de la tierra de servicio, denominada tierra de protección.

Las consideraciones acerca del ECT son importantes ya que, en principio, hace imposible que un filtro pasivo derive directamente a tierra las corrientes armónicas dentro del ámbito de una vivienda. Por lo tanto, la instalación de un filtro monofásico en una vivienda funcionaría como una trampa que encierra a las corrientes armónicas dentro del circuito, donde solamente no se perdería el beneficio de compensación de la potencia reactiva.

Finalmente, es importante señalar que no se aborda el diseño y cálculo detallado de un filtro pasivo específico debido a que excede al alcance de este trabajo; sin embargo, en el Anexo XIII, se proporciona una breve idea acerca del cálculo que se debe tener presente en el diseño de un filtro.



3.2. Factibilidad económica

Las tarifas eléctricas pueden desempeñar un papel fundamental en la gestión de la distorsión armónica, ya que influyen de manera directa en el comportamiento de los consumidores y en la adopción de posibles tecnologías de mitigación. De esta manera, para estudiar la posible instalación de cualquier tipo de filtro, es necesario analizar el costo de la energía y de las instalaciones asociadas para saber si dicho esfuerzo en mitigar la presencia de armónicos en la red resulta factible.

El actual cuadro tarifario residencial en la provincia de Santa Fe lo dicta la EPESF y esta adecuado al Decreto 332/2022 de segmentación de tarifas. El mismo es de carácter mensual, pero la facturación es bimestral y hace una distinción según los niveles de ingresos económicos:

- Nivel 1: Mayores Ingresos.
- Nivel 2: Menores Ingresos.
- Nivel 3: Ingresos Medios.

A su vez, en cada uno de estos niveles, se encuentran categorías según el usuario, la potencia contratada y la demanda máxima de energía. Además, también existe una tarifa social, para electrodependientes y una tarifa residencial rural. Sin embargo, lo que destaca en todas es que el cuadro tarifario es escalonado, es decir, se compone de un costo fijo más el costo variable de acuerdo con el consumo de energía (ver Figura 5.10). Finalmente, a este importe básico se le suman los impuestos de carácter nacional, provincial y municipal.

Tarifa: 1 01 (1AA2 N1)		Alta: [REDACTED]		Detalle de Facturación		Importe
CODIGO ELECTRONICO DE PAGO				Cuota de servicio : 343,35944 \$/Mes		\$*****686,72
LINK PAGOS - PAGOMISCUENTAS				Primeros 150 KWh (34,69784 \$/kWh)		\$****5.204,68
[REDACTED]				Segundos 150 kWh (36,79500 \$/kWh)		\$****5.519,25
[REDACTED]				Ultimos 7 kWh (46,98270 \$/kWh)		\$*****328,88
[REDACTED]				Importe Básico : \$****11.739,53		
Información de Medición y Lectura				Ley N°6604-FER (1,50% del Básico)		\$*****176,09
Medidor N°	F	Anterior	Actual	Consumo	Ley N.° 7797 (6,00% del Básico)	\$*****704,37
[REDACTED]	1	79.320	79.627	307	Cuota de Alumbrado Público (C.A.P.)	\$****1.860,12
					CONSUMIDOR FINAL	
					(21,00% sobre básico más C.A.P)	\$****2.855,93
Factor de Potencia:		Consumo Total:	307 kWh		Ley N°12692 Energías Renovables	\$*****37,50
Evolución de Consumos kWh				Subtotal : \$****5.634,01		
BIM 4/22	BIM 5/22	BIM 6/22	BIM 1/23	BIM 2/23	TOTAL	\$****17.373,54
366	246	550	580	587		
Período de Consumo						
Desde: 05/06/2023		Hasta: 04/08/2023		Días: 60		
Costo Diario Promedio de su consumo :						\$****289,56

Figura 5.10. Ejemplo de una factura de una vivienda. Fuente: Facturación de la Empresa Provincial de Energía de Santa Fe.



Como se deja en evidencia, actualmente no existe incentivo financiero para que el consumidor realice una inversión, ya sea para la corrección del factor de potencia o para mitigar la inyección de armónicos en la red. Esto se ve reflejado en la tarifa, que solo contempla la energía activa consumida y no así el uso eficiente de dicha energía. Si en un futuro esta situación cambia, se requeriría una evaluación exhaustiva de los costos y beneficios económicos de las nuevas tarifas.

Es importante tener en cuenta que la implementación de un cambio en la política tarifaria requeriría considerar la adopción de medidores inteligentes. Estos dispositivos desempeñarían un papel fundamental, dado que permitirían una supervisión detallada del consumo eléctrico.

Por último, la implementación de filtros en una vivienda proyectada o en construcción es compleja debido a que se debe saber con exactitud las cargas eléctricas que se conectarán, y luego modelar el circuito eléctrico para evaluar si es beneficioso emplear técnicas de mitigación a fin de reducir secciones de conductores y/o el calibre de dispositivos de protección.

3.3. Evaluación de la seguridad eléctrica en viviendas en la actualidad

Durante el proceso de medición en viviendas unifamiliares, se identificaron diversas cuestiones vinculadas a la seguridad y al cumplimiento normativo de las instalaciones eléctricas residenciales. En la mayoría de los casos, se evidenciaron deficiencias graves en dichas instalaciones, incluyendo:

- Falta de dispositivos de protección (DDRs y/o PIAs).
- Falta de una adecuada instalación de puesta a tierra.
- Incumplimiento en el código de colores de conductores.

Por este motivo, se sugiere no solo fomentar la conciencia sobre el uso responsable de la energía eléctrica, sino también la importancia de cumplir con las regulaciones vigentes.

3.4. Consideraciones finales

Lo primero que hay que considerar es el fin que se pretende alcanzar con la incorporación de un equipo de corrección de factor de potencia y/o filtrado de armónicas (compensar potencia reactiva, filtrar armónicos, etc.).

De acuerdo a lo expresado en el Capítulo 4, en donde se evidenció un valor promedio considerable de distorsión armónica en corriente, la tasa de demanda de distorsión se encuentra dentro de los valores permitidos (a excepción de una medición domiciliaria en concreto) por lo



que la instalación de un filtro no es de carácter urgente. Además, esta distorsión en corriente no se ve reflejada luego en una distorsión armónica en tensión que exceda los límites establecidos.

En el futuro inmediato, como solución para aumentar la eficiencia energética en las viviendas, se recomienda instalar medidores digitales que registren el factor de potencia, para, a partir de ese dato, poder no solo penalizar y/o bonificar a los usuarios, sino también realizar mejores acciones correctivas.

En tanto, para mitigar la presencia de armónicos, se debe estudiar cuidadosamente cada caso en periodos de tiempo de al menos una semana, de ser posible, contemplando las situaciones atípicas de nuestra zona, donde, tanto en verano como en invierno, el uso de ciertas cargas es muy distinta (aires acondicionados frente a calefactores resistivos). Habiendo considerado esto, se recomienda optar, en primer lugar, por el diseño y cálculo de un filtro pasivo, dado que es más económico y factible en el contexto de una vivienda unifamiliar.

Finalmente, a pesar de que la viabilidad económica de abordar estas cuestiones puede ser limitada en la actualidad, es crucial reconocer que en el futuro podrían surgir motivos imperativos, tanto para las empresas proveedoras de servicios eléctricos como para los usuarios, que modifiquen esta realidad. Por lo que, en lugar de imponer soluciones que no resulten inmediatamente beneficiosas para los usuarios, se apunta a incentivar el uso responsable de la energía eléctrica y a hacer énfasis en el cumplimiento de las regulaciones vigentes.



RESULTADOS

En este apartado se muestra, de manera resumida, los resultados más relevantes del trabajo que responden a los siguientes objetivos específicos (ya presentados en la Introducción):

1. Identificar cuáles son las cargas no lineales que producen distorsión armónica en una vivienda unifamiliar.
2. Determinar la Distorsión Armónica Total (THD) en corriente en viviendas.
3. Analizar los efectos de la perturbación armónica sobre aparatos e instalaciones.
4. Analizar la factibilidad de las dos técnicas que se usan actualmente para mitigar las perturbaciones armónicas: pasiva y activa.

En la Tabla R.1 se resumen los resultados de las mediciones de cargas individuales y la evaluación del contenido de armónicos según la IEC 61000-3-2 (detallado en el Capítulo 3), que responden al primer objetivo.

Medición	Potencia aparente	Factor de potencia	THD en corriente	Cumple la IEC 61000-3-2
Ordenadores personales	79,09 ± 35,77	0,67 ± 0,17	106,39 ± 54,51	No
Estabilizadores de tensión	206,99 ± 65,27	0,68 ± 0,18	90,6 ± 44,7	No
Equipos de audio	40,89 ± 16,03	0,68 ± 0,15	88,38 ± 49,22	Si
Televisores	105,37 ± 32,49	0,76 ± 0,2	74,52 ± 71,86	No
Luminarias ≥25W	54,4 ± 29,26	0,29 ± 0,26	70,42 ± 53,14	No
Reguladores de velocidad	64,92 ± 11,54	0,7 ± 0,09	41,58 ± 19,49	Si
Microondas	592,58 ± 178,37	0,84 ± 0,05	32,17 ± 5,7	Si
Herramientas portátiles	1017,86	0,78	20,27	Si
Aires acondicionados	890,18 ± 201,01	0,95 ± 0,05	19,01 ± 3,82	Si
Luminarias <25W	92,92 ± 37,27	0,96 ± 0,04	17,03 ± 15,16	Si
Heladeras	208,32 ± 76,18	0,66 ± 0,17	15,52 ± 35,09	Si
Otros aparatos	167,75 ± 66,68	0,87 ± 0,11	11,52 ± 4,5	Si
Lavarropas	1197,7 ± 502,39	0,78 ± 0,21	9,44 ± 3,74	No
Freezer	262,52 ± 74,72	0,58 ± 0,09	6,43 ± 2,04	Si
Ventiladores	107,84 ± 28,75	0,89 ± 0,09	5,09 ± 0,88	Si
Hornos	1063,43 ± 204,9	0,83 ± 0,04	1,29 ± 0,32	Si

Tabla R.1. Resultados del Capítulo 3: Medición de cargas individuales. Fuente: elaboración propia.

En la Tabla R.1 se identifica que cinco categorías no cumplen los límites establecidos por la IEC 61000-3-2, estos son: los ordenadores personales, estabilizadores de tensión, televisores, luminarias de potencia inferior a 25W y lavarropas. Sin embargo, existen categorías



cuya distorsión armónica se debe considerar por ser elevada, como los equipos de audio y reguladores de velocidad. También, es importante destacar que las cargas de mayor potencia, como ser los lavarropas, microondas y los aires acondicionados, presentan un THD en corriente que origina corrientes de distorsión elevadas. Finalmente, la distorsión armónica en corriente puede llegar a presentar, en algunas cargas, picos de corriente de hasta 2,8 veces superior a una señal senoidal pura (caso de los ordenadores personales).

En la Tabla R.2 se sintetizan los resultados de las mediciones de distorsión armónica presente en viviendas unifamiliares y otros parámetros eléctricos (detallado en el Capítulo 4), que responden al segundo objetivo.

Parámetro eléctrico	Cantidad de datos	Media	Desviación estándar	Mediana	Rango IC	Máximo	Mínimo
THDi [%]	10895	46,91	30,43	42,46	51,53	119,49	1,87
Intensidad de corriente [A]	10892	1,88	2,26	1,03	1,59	14,20	0,25
Factor de potencia [-]	10892	0,76	0,10	0,77	0,16	0,96	0,34
Potencia aparente [VA]	10585	349,99	361,17	232,95	264,44	2275,52	60,39

Tabla R.2. Resultados del Capítulo 4: Medición de viviendas unifamiliares. Fuente: elaboración propia.

Además, se obtuvo de manera empírica las siguientes relaciones:

- La mayoría de los registros elevados de THD en corriente se presentan en casos de baja intensidad de corriente.
- Los mejores valores de factor de potencia se registran cuando se alcanzan los valores más bajos de THD en corriente o bien, cuando los valores de potencia aparente son mayores.

De esta manera, se puede inferir que la presencia de distorsión armónica en las viviendas está asociada a cargas de pequeña a mediana potencia de uso frecuente, como lo son las luminarias (especialmente aquellas de tecnología LED), ordenadores personales y televisores. Por otra parte, cuando la instalación demanda más potencia aparente, se debe a que las cargas habituales de mayor potencia que se acoplan tienen un comportamiento predominantemente lineal. Como resultado de esto, la contribución de las nuevas cargas es mayor a las de las cargas no lineales, lo que resulta en un incremento del factor de potencia.

En la Tabla R.3 se expresa la evaluación de la presencia de armónicos en las instalaciones eléctricas llevada a cabo conforme a las diversas normativas pertinentes (detallado en el Capítulo 4).



Norma	Parámetro evaluado	Cumple	Observación
ENRE 0099/1997	Corrientes armónicas inyectadas	Parcial	Cumple para los armónicos de orden 2, 3 y 5. Para los de orden superior no se pudo determinar.
IEEE 519/2014	Distorsión de Demanda Total	Parcial	Solo una vivienda hipotéticamente no cumple.
ENRE 184/2000	Distorsión armónica en tensión	Cumple	-
IEEE 519/2014	Distorsión armónica en tensión	Cumple	-

Tabla R.3. Resultados del Capítulo 4: Evaluación de la presencia de armónicos. Fuente: elaboración propia.

En la Tabla R.4 se resumen los efectos de la perturbación armónica sobre aparatos e instalaciones (detallado en el Capítulo 5), que responden al tercer objetivo.

Efectos de la perturbación armónica sobre:	Conclusión
Eficiencia energética	Aumento promedio del 10% en la demanda de potencia aparente.
Conductores	Aumento promedio del 10% en la corriente eficaz y 20% de las pérdidas.
DDRs	Recomendación de emplear DDRs clase A o superior.
PIAs	Verificar que los PIAs empleados trabajen con el verdadero valor eficaz de la corriente.

Tabla R.4. Resultados del Capítulo 5: Efectos de la perturbación armónica sobre aparatos e instalaciones. Fuente: elaboración propia.

Finalmente, en la Tabla R.5 se observa la conclusión del análisis sobre la factibilidad de implementar diferentes técnicas de mitigación de distorsión armónica en viviendas unifamiliares (detallado en el Capítulo 5), que responde finalmente al cuarto objetivo.

Técnica de mitigación:	Implementar un dispositivo:	Factibilidad	
		Técnica	Económica
Pasiva	Comercial	Es posible	Condicionado a cambio en tarifa o incentivo económico
	De diseño y cálculo específico	Es posible	Condicionado a cambio en tarifa o incentivo económico
Activa	Comercial	No se adecuan a las necesidades	Demasiado costoso
	De diseño y cálculo específico	Demasiada complejo	Demasiado costoso

Tabla R.5. Resultados del Capítulo 5. Fuente: elaboración propia.



CONCLUSIONES

Como se ha visto a lo largo de este trabajo, el objetivo general de diagnosticar y proponer medidas para mitigar los efectos perjudiciales de las cargas no lineales en las instalaciones eléctricas domiciliarias ha sido abordado de manera íntegra: se ha logrado obtener información relevante acerca de esta problemática a través de la identificación de las cargas no lineales, la evaluación de la distorsión armónica presente en viviendas y el análisis de su impacto en las instalaciones eléctricas.

Asimismo, al examinar la factibilidad de las técnicas de mitigación pasiva y activa, se determinó que es posible, técnicamente, morigerar estos problemas mediante la incorporación de filtros, aunque económicamente, hoy en día, no resulta factible.

Los resultados de este trabajo evidencian la problemática actual de la distorsión armónica en las viviendas y espera contribuir a futuros proyectos e investigaciones destinadas a mejorar la calidad de la energía eléctrica en el sector residencial.



PERSPECTIVAS DE FUTUROS TRABAJOS

Los resultados obtenidos en este trabajo no solo proporcionan una base para la continuación de estudios destinados a la implementación de medidas que reduzcan los posibles efectos adversos de las cargas no lineales en las instalaciones eléctricas domiciliarias, sino que también abren varias líneas para futuros trabajos que pueden ampliar y profundizar en los temas aquí abordados. En este marco, podemos mencionar:

- Generar una base de datos que registre el comportamiento de cargas no lineales en diferentes entornos y situaciones, a la que se pueda recurrir con la intención de realizar modelos y simulaciones eléctricas para una variedad de proyectos.
- Diseñar, modelar, simular y desarrollar un filtro pasivo personalizado para su implementación en viviendas, con el propósito de mejorar la corrección del factor de potencia y reducir los efectos negativos de la distorsión armónica en las instalaciones eléctricas residenciales y en la red de distribución.
- Estudiar el impacto de la distorsión armónica en las viviendas como consecuencia de la implementación de tecnologías emergentes, tales como la carga de vehículos eléctricos, las fuentes de energía renovables (solar y/o eólica), el Internet de las Cosas (IoT) y la masificación de las tecnologías “Inverter” y LED.
- Analizar posibles cambios en las políticas tarifarias de la empresa prestataria del servicio eléctrico, como, por ejemplo, tarifas que contemplen la eficiencia energética y/o incentivos económicos para la implementación de equipos de compensación de factor de potencia.
- Verificar que la presencia de armónicos en redes de distribución de baja tensión se encuentre en niveles permitidos por la normativa y no represente un costo adicional desmedido para la empresa prestataria del servicio eléctrico.

Finalmente, este trabajo puede aportar a futuras investigaciones en la región, que busquen abordar de manera específica los desafíos relacionados con la distorsión armónica, contribuyendo así a la eficiencia energética y a la mejora de la calidad de energía. En última instancia, siempre será importante realizar un estudio interdisciplinario que combine aspectos técnicos, económicos y regulatorios al abordar la gestión de la distorsión armónica.



BIBLIOGRAFÍA

- ABB. (n.d.). *Corrección del factor de potencia y filtrado de armónicos en las instalaciones eléctricas*. (Cuaderno de aplicaciones técnicas n°8). Retrieved 2023, from https://library.e.abb.com/public/897462d590876b5fc125791a003bd1e0/1TXA007107G0701_CT8.pdf
- AESoluciones. (n.d.). *Los efectos de los armónicos y sus soluciones*. (Boletín Técnico). Retrieved 2023, from <https://agngroup.net/papers/boletin%20aes%20soluciones%20armonicos.pdf>
- Alexander, C. K., & Sadiku, M. N. (2006). *Fundamentos de circuitos eléctricos - 3ra Edición*. (M.-H. Editores, Ed.) McGraw Hill.
- Alvarado Perusquía, H. d., & Ramírez Sánchez, J. M. (2010). *Metodología para el análisis de propagación y filtrado de armónicas en sistemas eléctricos*. [Trabajo para optar por el título de ingeniero electricista, Instituto Politécnico Nacional], Ciudad de México, México. Retrieved from <http://tesis.ipn.mx:8080/xmlui/handle/123456789/6514>
- Asociación Electrotécnica Argentina. (2006). *Reglamentación para la ejecución de instalaciones eléctricas en inmuebles*. (AEA 90364-7-771 Edición 2006).
- Asociación Electrotécnica Argentina. (2017). *Reglamentación para la ejecución de instalaciones eléctricas en inmuebles*. (AEA 90364-7-770 Edición 2017).
- Astudillo-Mora, L., Vásquez-Vega, A., & Rojas-Serrano, J. (2016, enero-junio). Implementación de un filtro pasivo para compensación armónica y corrección del factor de potencia. *Científica*, 20(1). doi:<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61447568001>
- Automatización, Productividad y Calidad S.A. de C.V. (n.d.). *Distorsión Armónica*. Retrieved 2023, from <https://agngroup.net/papers/Distorsion%20Armonica.pdf>
- Carelli, J. B. (2015). *Estudio de la calidad de la energía eléctrica en el complejo universitario (UNMdP) diagnóstico y soluciones*. [Trabajo fin de grado, Universidad Nacional de Mar del Plata], Mar del Plata. Retrieved from <http://rinfi.fi.mdp.edu.ar/xmlui/handle/123456789/110>
- Cerviño, J. R., & Santillán, E. C. (2007). *Predicción de niveles de la distorsión armónica en sistemas de potencia*. [Trabajo para optar por el título de ingeniero eléctrico, Universidad Nacional de Mar del Plata], Mar del Plata. Retrieved from <http://rinfi.fi.mdp.edu.ar/xmlui/handle/123456789/194>

- Comité Europeo de Normalización Electrotécnica. (2011). *Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución*. (UNE-EN 50160).
- Danfoss. (2014). *Supresión segura de armónicos para su instalación*. (Boletín Técnico). Retrieved 2023, from https://files.danfoss.com/download/Drives/DKDDPB650A205_AAF006_LR.pdf
- Deschères, L. (2021, Junio). Impacto de la iluminación led en la calidad de la energía. *Revista Luminotecnia*(151), 32-50. Retrieved 2023, from https://www.editores.com.ar/autor/luis_descheres/20210610_impacto_de_la_iluminacion_led_en_la_calidad_de_la_energia
- Edminister, J. A. (1965). *Teoría y problemas de circuitos eléctricos*. Serie de compendios Schaum.
- Empresa Provincial de Energía de Santa Fe. (2020). *Transformadores de distribución de energía eléctrica*. (ETN 28a).
- Ente Nacional Regulador de la Electricidad. (1997). *Base metodológica para el control de la emisión de perturbaciones producto técnico - Etapa 2*. (Anexo a la Resolución ENRE 0099/1997).
- Ente Nacional Regulador de la Electricidad. (2001). *Resolución ENRE 0390/2001*. (Anexo a la Resolución ENRE 0390/2001).
- Ente Nacional Regulador de la Electricidad. (2009). *Disposición ENRE 0012-2009*.
- Ente Nacional Regulador de la Electricidad. (2020). *Base metodológica para el control de la calidad del producto técnico - Etapa 2*. (Anexo a la Resolución ENRE 0184/2000).
- Ente Nacional Regulador del Gas. (2020). *Cocción en Argentina. ¿Qué conviene: gas o electricidad?* Retrieved 2023, from <https://www.enargas.gob.ar/secciones/publicaciones/divulgacion-tecnica/pdf/coccion-argentina-gas-electricidad.pdf>
- Ente Provincial Regulador de la Energía Entre Ríos. (2008). *Especificación técnica para acometidas eléctricas - Tarifa 2*. (Anexo I de la Resolución 206/08).
- Esparza González, M. S., Mata Guerrero, J. A., & Castañeda Ramos, L. A. (2006, Julio-Diciembre). Las cargas no lineales, su repercusión en las instalaciones eléctricas y sus soluciones. *Conciencia Tecnológica*, 32, 0. Retrieved from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94403211>



- Farina, A. (2021). Conexión a tierra de las instalaciones eléctricas. *Revista Ingeniería Eléctrica*. Retrieved 2023, from https://www.editores-srl.com.ar/autor/alberto_farina/20210223_conexion_a_tierra_de_las_instalaciones_electricas
- Ferreira, D. M., & Gudiño, A. D. (2012). Calidad de energía: Medición de armónicas de tensión en una instalación urbana. *Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional – edUTecNe*.
- Franco, A. F., Vega, L. A., & Ramírez, W. M. (2017, Julio - Diciembre). Análisis de distorsión armónica en iluminación LED. *Revista Vínculos*, 14(2), 95-107. doi:<https://doi.org/10.14483/2322939X.12520>
- Freedman, D., & Diaconis, P. (1981). On the Histogram as a Density Estimator: L2 Theory. *Zeitschrift für Wahrscheinlichkeitstheorie und Verwandte Gebiete*, 57, 453–476. doi:<https://doi.org/10.1007/BF01025868>
- Grajales, J., Ramírez, J., & Cadavid, D. (2004, Junio). Efectos de los armónicos en los motores de inducción: una revisión. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*(31), 116-123. Retrieved 2023, from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=43003110>
- Grupo Elektra. (2020). *Elección de interruptores diferenciales*. (Artículo Técnico). Retrieved 2023, from <https://www.grupoelektra.es/blog/wp-content/uploads/2020/09/Articulo-Tecnico-Proteccion-Diferencial-v3.pdf>
- Hyndman, R. J. (1995, July 5). The problem with Sturges' rule for constructing. Retrieved 2023, from <https://robjhyndman.com/papers/sturges.pdf>
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2014). *Recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems*. (IEEE 519-2014).
- Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2019). *Recommended practice for monitoring electric power quality*. (IEEE 1159-2019).
- International Electrotechnical Commission. (1998). *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-4: Limits - Limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A*. (IEC TS 61000-3-4:1998).



- International Electrotechnical Commission. (2002). *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-2: Environment - Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems*. (IEC 61000-2-2:2002).
- International Electrotechnical Commission. (2002). *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-4: Environment - Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances*. (IEC 61000-2-4:2002).
- International Electrotechnical Commission. (2002). *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-7: Testing and measurement techniques - General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto*. (IEC 61000-4-7:2002).
- International Electrotechnical Commission. (2011). *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-12: Limits - Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current $>16 A$ and $\leq 75 A$ per phase*. (IEC 61000-3-12:2011).
- International Electrotechnical Commission. (2015). *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods*. (IEC 61000-4-30:2015).
- International Electrotechnical Commission. (2018). *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions (equipment input current $\leq 16 A$ per phase)*. (IEC 61000-3-2:2018).
- Jaakkola, J. (2001). Filtros del tercer armónico: puesta a punto para una mejor calidad de la energía. *Revista ABB*, 46-51. Retrieved 2023, from <https://library.e.abb.com/public/3b83445e16745e6ec1256ddd0034711a/46-51%20M644%20-%20SPA.pdf>
- Leyden. (2003). *Filtros de armónicas para baja tensión*. (Boletín Técnico). Retrieved 2023, from https://www.leyden.com.ar/esp/pdf/filtros_de_armonicas.pdf
- Merlin Gerin. (2000). *Guía de protección diferencial baja tensión*. (Guía - Novedad).
- Mora Barajas, M., & Bañuelos Sánchez, P. (2010). Contaminación armónica producida por cargas no lineales de baja potencia: modelo matemático y casos prácticos. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XI(2), 189-198. Retrieved 2023, from https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432010000200006&lng=es&nrm=iso



- Pérez Abril, I. (2012, Agosto). Cálculo de parámetros de filtros pasivos de armónicos. *Ingeniería Energética*, 33(2), 134 - 143. Retrieved from http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012012000200006&lng=es&nrm=iso
- Pinyol, R. (2016). *Armónicos: causas, efectos y minimización*. (Artículo Técnico). SALICRU WHITE PAPERS. Retrieved 2023, from https://www.salicru.com/files/pagina/72/278/jn004a00_whitepaper-armonics_.pdf
- Rojas, G. V. (2022). *Estudio de las perturbaciones armónicas en la calidad de energía eléctrica en la Universidad de Piura - Campus Lima*. [Trabajo para optar por el título de ingeniero mecánico-eléctrico, Universidad de Piura], Piura, Perú. Retrieved 2023, from <https://hdl.handle.net/11042/5608>
- Ruggero Ríos B, S. Q. (2014, Diciembre). Incidencias de Cargas No Lineales en Transformadores de Distribución. *Revista Científica de la UCSA*, 1(1), 33-51. Retrieved from http://scielo.iics.una.py/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2409-87522014000100005&lng=en&nrm=iso
- Schneider Electric. (2000). *Los armónicos en las redes perturbadas y su tratamiento*. (Cuaderno Técnico n°152).
- Schneider Electric. (2000). *Corrección del factor de potencia*. (Publicación Técnica Schneider PT-075).
- Schneider Electric. (2001). *Los interruptores automáticos BT frente a las corrientes armónicas, transitorias y cíclicas*. (Cuaderno Técnico n°182).
- Suárez, J. A., Di Mauro, G. F., Anaut, D., & Agüero, C. (2005, December). Cancelación parcial de corrientes armónicas provocadas por cargas residenciales no lineales. *Información Tecnológica*, 16, 63-70. doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642005000300009>
- Vincitorio, F. M., Balducci, D. N., Frund, J. L., Rispoli, L. D., & Mache, C. D. (2012, Agosto 30 y 31). Incidencia del uso de LFC como cargas no lineales en los sistemas de distribución eléctrico. *Seminario Nacional Universidad Tecnológica Nacional - Eficiencia Energética*, 0.

ANEXO I: Notación fasorial

En el presente Anexo, se desarrolla el concepto de notación fasorial aplicado a circuitos eléctricos tomando como referencia el libro “Fundamentos de Circuitos Eléctricos” de Charles K. Alexander y Matthew N. O. Sadiku, 3ra edición.

La idea de la representación fasorial se basa en la identidad de Euler, que relaciona las funciones trigonométricas con la función exponencial compleja. Es importante considerar que es común en ingeniería reemplazar la unidad imaginaria “i” por “j”, de esta manera:

$$e^{\pm j\theta} = \cos \theta \pm j \sin \theta$$

Lo que indica que se puede expresar el seno y el coseno como la parte real e imaginaria de la función exponencial:

$$\cos \theta = \operatorname{Re}(e^{j\theta})$$

$$\sin \theta = \operatorname{Im}(e^{j\theta})$$

Dada la forma de la tensión como una senoide, se puede reescribir la misma utilizando la identidad de Euler. En este caso, el desarrollo se hará a partir de la función coseno por convención, aunque cabe señalar que, si se considera la función seno, se llega a resultados idénticos.

$$v(t) = V_m \cos(\omega t + \theta) = \operatorname{Re}(V_m e^{j(\omega t + \theta)})$$

$$v(t) = \operatorname{Re}(V_m e^{j\theta} e^{j\omega t}) \rightarrow \mathbf{V} = V_m e^{j\theta}$$

$$v(t) = \operatorname{Re}(\mathbf{V} e^{j\omega t})$$

En donde \mathbf{V} es la representación fasorial de la senoide $v(t)$, es decir, es una representación compleja de la magnitud y fase de la misma y se suele representar en negritas:

$$v(t) = V_m \cos(\omega t + \theta) \leftrightarrow \mathbf{V} = V_m \angle \theta$$

Al ser un fasor una cantidad compleja, puede expresarse en forma rectangular, polar o exponencial. Además, dado que un fasor posee magnitud y fase se comporta como un vector.

Las principales diferencias entre $v(t)$ y \mathbf{V} son:



- $v(t)$ es la representación instantánea o en el dominio temporal, mientras que \mathbf{V} es la representación de frecuencia o en el dominio fasorial.
- $v(t)$ depende del tiempo y siempre es real, mientras que \mathbf{V} no depende del tiempo y generalmente es compleja.

Es relevante destacar que, cuando se expresa una señal senoidal como un fasor, el término relacionado con la frecuencia está implícitamente incluido. La omisión de esta dependencia solo es válida cuando ω es constante, por esta razón, el término dominio fasorial también se conoce como dominio frecuencial. En consecuencia, se debe considerar la frecuencia del fasor al trabajar con múltiples señales senoidales, asegurándose de que todas compartan la misma frecuencia.

Finalmente, es importante señalar que, aunque los fasores se pueden expresar en términos de los valores máximos de la senoide, es más común y habitual, por convención, utilizar los valores eficaces de la señal.

ANEXO II: Desarrollo matemático de potencia eléctrica

En el presente Anexo, se desarrolla matemáticamente el concepto de potencia eléctrica en elementos pasivos bajo excitación senoidal tomando como referencia el libro “Fundamentos de Circuitos Eléctricos” de Charles K. Alexander y Matthew N. O. Sadiku, 3ra edición.

Como se menciona en el Capítulo 1, la potencia instantánea es la tasa en la cual un elemento absorbe energía y es el producto de la tensión instantánea en sus terminales y la corriente instantánea a través de él:

$$p(t) = v(t) * i(t)$$

Para el caso general de la potencia instantánea absorbida por una combinación arbitraria de elementos pasivos bajo excitación senoidal, es decir, de la siguiente forma:

$$v(t) = V_m \cos(\omega t + \theta_v)$$

$$i(t) = I_m \cos(\omega t + \theta_i)$$

La potencia instantánea puede reescribirse como:

$$p(t) = V_m I_m \cos(\omega t + \theta_v) \cos(\omega t + \theta_i)$$

Aplicando identidades trigonométricas:

$$p(t) = \frac{1}{2} V_m I_m \cos(\theta_v - \theta_i) + \frac{1}{2} V_m I_m \cos(2\omega t + \theta_v + \theta_i)$$

El primer término es constante e independiente del tiempo y su valor solo depende de la diferencia de fase entre la tensión y la corriente. El segundo término es una senoide cuya frecuencia es el doble de la frecuencia angular de la tensión o la corriente por lo que depende del tiempo.

Como se dejó en evidencia, la potencia instantánea varía con el tiempo por lo que es difícil de medir. De esta manera, se recurre al concepto de potencia promedio, que es la potencia instantánea a lo largo de un periodo:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt$$



Sustituyendo y resolviendo la integral:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} V_m I_m \cos(\theta_v - \theta_i) dt + \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} V_m I_m \cos(2 \omega t + \theta_v + \theta_i) dt$$

$$P = \frac{1}{2T} V_m I_m \cos(\theta_v - \theta_i) \int_0^T dt + \frac{1}{2T} V_m I_m \int_0^T \cos(2 \omega t + \theta_v + \theta_i) dt$$

El resultado de la primera integral es la constante T. En tanto, en el segundo integrando, el resultado será una senoide, cuyo promedio a lo largo de un periodo es igual a cero. De esta manera, la potencia promedio queda expresada como:

$$P = \frac{1}{2} V_m I_m \cos(\theta_v - \theta_i)$$

Si se transforman los valores máximos o picos en eficaces, se tiene:

$$P = V_{RMS} I_{RMS} \cos(\theta_v - \theta_i)$$

Finalmente, es común considerar que el ángulo del fasor de tensión inicia en 0° , por lo que se llega a:

$$P = V_{RMS} I_{RMS} \cos(\varphi)$$

Se recuerda que el coseno es una función par, por lo cual:

$$\cos(\theta_i) = \cos(-\theta_i) = \cos(\varphi)$$

Considerando cargas lineales, la diferencia entre los ángulos de fase de tensión y corriente se denomina ángulo del factor de potencia. Este ángulo es igual al ángulo de la impedancia de carga, dado que, por ley de Ohm:

$$Z = \frac{V}{I} = \frac{V_{RMS}}{I_{RMS}} \angle(\theta_v - \theta_i = \varphi)$$

De esta manera, se distinguen dos casos:

- Carga puramente resistiva: la diferencia entre los ángulos de tensión y corriente es cero por lo que el factor de potencia es igual 1 y la carga absorbe potencia todo el tiempo.



- Carga puramente reactiva: la diferencia entre los ángulos de tensión y corriente es $\pm 90^\circ$ por lo que el factor de potencia es 0. En este caso, la potencia promedio absorbida por la carga es igual a cero y la corriente puede estar adelantada o atrasada respecto de la tensión (carga capacitiva o inductiva respectivamente).



ANEXO III: Desarrollo de los valores característicos de una señal eléctrica senoidal

En el presente Anexo, se desarrollan los valores que caracterizan una señal eléctrica senoidal, en especial, el concepto de valor eficaz y su relación con los valores máximos y promedio. Para esto, se tiene como referencia el libro “Fundamentos de Circuitos Eléctricos” de Charles K. Alexander y Matthew N. O. Sadiku, 3ra edición y la serie de compendios Schaum “Teoría y Problemas de Circuitos Eléctricos” de Joseph A. Edminister.

Como se menciona en el Capítulo 2, existen instrumentos de medición que registran el valor máximo o el promedio de una señal, y posteriormente, a través de cálculos basados en definiciones eléctricas y matemáticas, determinan el valor eficaz de dicha señal. De esta manera, se define el valor eficaz de una corriente periódica como la corriente continua que suministra la misma potencia promedio a una resistencia que la corriente periódica. Es decir, si se tiene un circuito puramente resistivo en corriente continua y otro igual en corriente alterna, se tiene que ambas potencias deben ser iguales:

$$P_{C.C.} = I_{RMS}^2 R = P_{C.A.} = \frac{R}{T} \int_0^T i(t)^2 dt$$

Si se despeja de la anterior ecuación el valor eficaz de la intensidad de corriente:

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(t)^2 dt}$$

Al considerar a la corriente como una función periódica seno de la forma:

$$i(t) = I_m \text{sen}(\omega t)$$

La corriente eficaz entonces se puede expresar como:

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \text{sen}^2(\omega t) dt}$$

La determinación del valor eficaz de una señal implica entonces expresar su magnitud en términos de su valor medio cuadrático, de ahí provienen sus siglas en inglés, *root mean square* (RMS). Este proceso implica la resolución de una integral, para la cual se utiliza una



identidad trigonométrica. Posteriormente, se aplica la raíz cuadrada para obtener el valor eficaz de la señal.

$$I_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{I_m^2}{T} \int_0^T \frac{1}{2} (1 - \cos(2 \omega t)) dt}$$

$$I_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{I_m^2}{2T} \left(\int_0^T 1 dt - \int_0^T \cos(2 \omega t) dt \right)}$$

$$I_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{I_m^2}{2T} (T - 0)}$$

$$I_{\text{RMS}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

Razonamiento análogo al realizado con la corriente se puede realizar con la señal de tensión, donde también se llega a:

$$V_{\text{RMS}} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

En tanto, si se considera el valor promedio de una señal como la magnitud promedio de la misma en un período, por definición matemática, es igual a:

$$X_{\text{med}} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$$

Considerando nuevamente la forma senoidal de corriente se observa que el valor medio a lo largo de un periodo es igual a cero, por lo que, para salvar este inconveniente, se suele tomar el valor medio del semiperiodo positivo ($T' = T/2$):

$$I_{\text{med}} = \frac{1}{T'} \int_0^{T'} I_m \text{sen}(\omega t) dt$$

$$I_{\text{med}} = \frac{2 I_m}{\pi} \rightarrow I_m = \frac{\pi I_{\text{med}}}{2}$$

Además, se puede a su vez relacionar el valor eficaz con el valor medio mediante:

$$I_{RMS} = \frac{\pi I_{med}}{2 \sqrt{2}}$$

Finalmente, a modo de resumen se presenta la Figura A.1 y la Tabla A.1 donde se muestran las relaciones entre los valores máximo, eficaz y promedio de una señal senoidal.

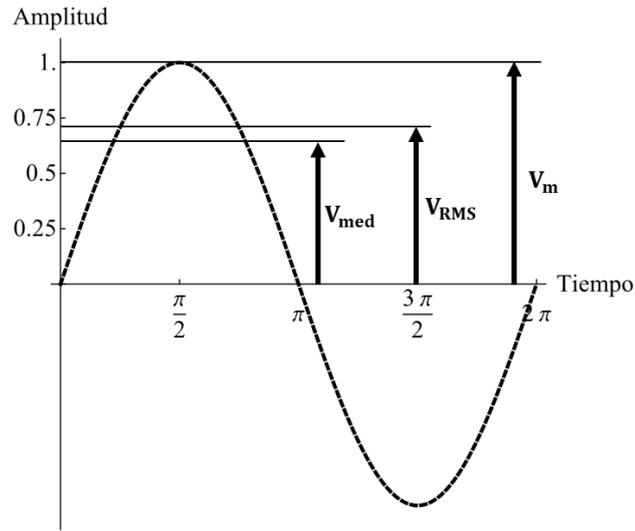


Figura A.1. Valores máximo, eficaz y promedio de una señal senoidal. Fuente: elaboración propia.

Valor dado	Valor que obtengo		
-	Valor Máximo o pico	Valor eficaz o RMS	Valor promedio
Valor Máximo o pico	-	$\frac{I_m}{\sqrt{2}} \cong 0,71 I_m$	$\frac{2 I_m}{\pi} \cong 0,64 I_m$
Valor eficaz o RMS	$\sqrt{2} I_{RMS} \cong 1,41 I_{RMS}$	-	$\frac{2 \sqrt{2} I_{RMS}}{\pi} \cong 0,90 I_{RMS}$
Valor promedio	$\frac{\pi I_{med}}{2} \cong 1,57 I_{med}$	$\frac{\pi I_{med}}{2 \sqrt{2}} \cong 1,11 I_{med}$	-

Tabla A.1. Relación entre los valores máximo, eficaz y promedio de una señal senoidal. Fuente: elaboración propia.

ANEXO IV: Fenómeno y consecuencias de la resonancia en capacitores

En el presente Anexo, se desarrolla brevemente el fenómeno de resonancia eléctrica, tanto en circuitos paralelos como serie, y se aborda su repercusión en bancos de capacitores. Para esto, se tiene como referencia el cuaderno de aplicaciones técnicas N.º 8: “Corrección del factor de potencia y filtrado de armónicos en las instalaciones eléctricas” de ABB, el cuaderno técnico N.º 152: “Los armónicos en las redes perturbadas y su tratamiento” y la publicación técnica PT-075: “Corrección del factor de potencia”, ambos de Schneider Electric.

Como se indica en el Capítulo 2, la problemática de la resonancia entre la red eléctrica, caracterizada por su naturaleza inductiva, y el banco de capacitores a una frecuencia muy próxima a alguna frecuencia armónica presente, puede dar lugar a complicaciones significativas. Se hace necesario entonces establecer que la resonancia ocurre cuando la reactancia inductiva y capacitiva se igualan. En este contexto, se pueden identificar dos casos:

- Circuito resonante serie.
- Circuito resonante paralelo.

En una red determinada, es posible que ocurran simultáneamente tanto una resonancia en serie como una resonancia en paralelo. Este fenómeno se manifiesta a una frecuencia específica, conocida como frecuencia de resonancia:

$$X_L = X_C \rightarrow f_r = \frac{1}{2 \pi \sqrt{L C}}$$

Circuito resonante serie

El circuito resonante serie ocurre cuando la inductancia y la capacitancia están conectadas en serie y la impedancia total hipotéticamente se anula (solo queda la componente resistiva en el circuito). El circuito adopta la estructura representada en la Figura A.2, junto con el comportamiento eléctrico del módulo de la impedancia asociado.

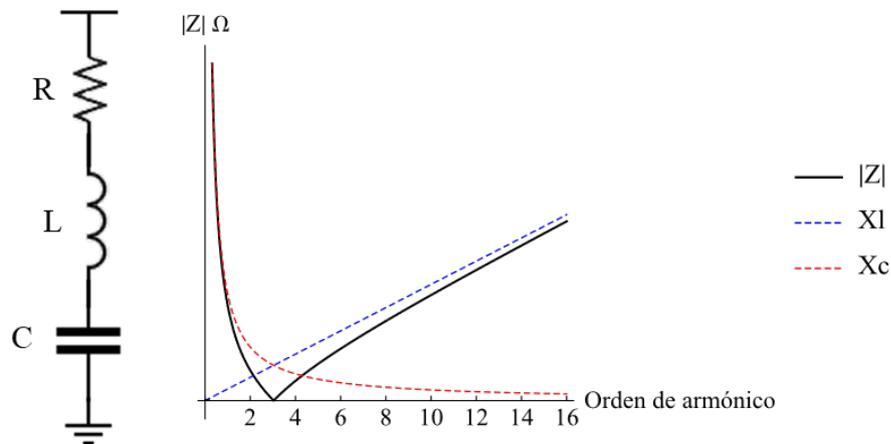


Figura A.2. Representación eléctrica de un circuito resonante serie y el comportamiento del módulo de la impedancia que presenta resonancia en el tercer armónico. El valor mínimo de la impedancia depende de la resistencia presente en el circuito. Fuente: elaboración propia.

En el caso de un circuito resonante en serie, si es alimentado con tensión alterna a una frecuencia cercana a su frecuencia de resonancia, existe la posibilidad de que la corriente absorbida sea amplificada, lo que desencadenaría sobrecorrientes.

Circuito resonante paralelo

El circuito resonante paralelo se origina cuando la inductancia y la capacitancia están conectadas en paralelo y la impedancia total teóricamente tiende a infinito. El circuito, en este caso, adopta la estructura representada en la Figura A.3, junto con el comportamiento eléctrico del módulo de la impedancia asociado.

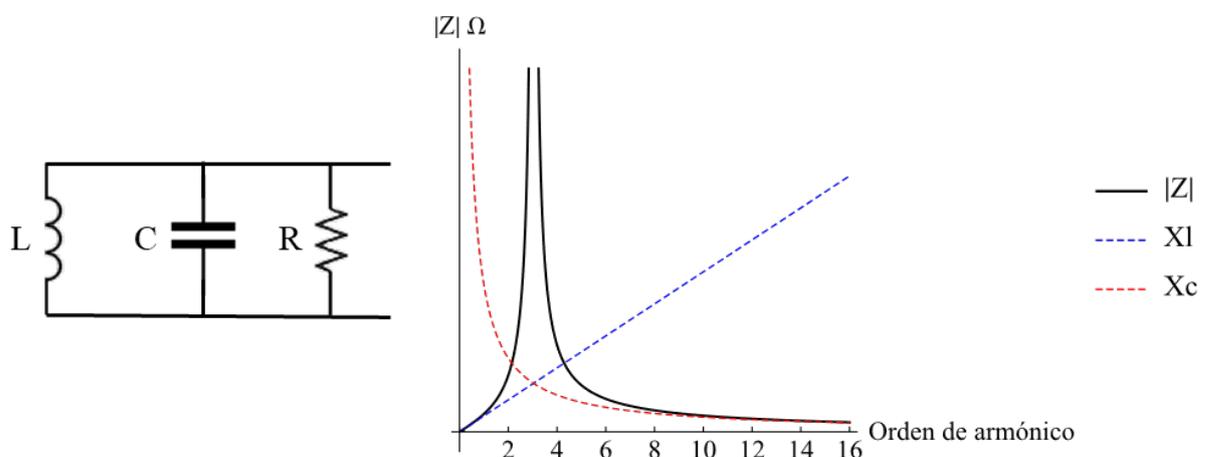


Figura A.3. Representación eléctrica de un circuito resonante paralelo y el comportamiento del módulo de la impedancia que presenta resonancia en el tercer armónico. El valor máximo de la impedancia solo está limitado por la resistencia presente en el circuito. Fuente: elaboración propia.



En el caso de un circuito resonante en paralelo, si circulan armónicos en corriente generados por cargas distorsionadas que se corresponden al orden de la resonancia paralela, existe el riesgo de sobretensiones armónicas.

Medidas para evitar fenómenos de resonancia

Es importante tener presente que los capacitores no son en sí mismos generadores de armónicos. Sin embargo, en una red donde circulan armónicos, la presencia de los mismos puede amplificar algunos de dichos armónicos por el fenómeno de resonancia ya visto. La frecuencia de resonancia, en este caso, se puede calcular como:

$$f_r = f_1 \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q}}$$

Donde S_{cc} es la potencia de cortocircuito de la red, Q es la potencia del banco de capacitores y f_1 es la frecuencia fundamental. La importancia de esta resonancia se incrementará conforme la frecuencia (f_r) se acerque más a la frecuencia de los armónicos presentes. De esta manera, la sobrecarga de intensidad podrá provocar el calentamiento y el envejecimiento prematuro del banco de capacitores.

Para atenuar estos efectos, se optan por las siguientes soluciones:

- Emplear capacitores sobredimensionados en tensión, por lo general, un 10%.
- Utilizar inductancias anti-armónicos asociadas en serie a los capacitores, esta combinación permite disminuir las tensiones armónicas en las terminales de los capacitores y reduce las corrientes de sobrecarga que atraviesan los mismos.

Adicionalmente, todos los elementos en serie (equipo y conexiones) se deben calibrar entre 1,3 y 1,5 veces la intensidad asignada por el posible aumento en la intensidad de corriente en el capacitor (el cual, en su diseño, ya contempla dicho factor de seguridad).



ANEXO V: Macros implementadas en VBA para las mediciones particulares

La generación de macros en Excel se vuelve esencial cuando se enfrenta a la tarea de analizar decenas de mediciones de distintos aparatos eléctricos, cada una generando una matriz de datos extensa, en promedio, de 150 columnas por 200 filas. Esta automatización no solo permitió ahorrar tiempo valioso, sino que también redujo la posibilidad de errores humanos, mejorando así la precisión y la confiabilidad de los resultados de análisis.

Conversión del formato de archivos

Para la conversión de los formatos de archivos “.txt” en “.xlsx” se implementó la siguiente macro que carga archivos de texto seleccionados en un nuevo libro, copia sus contenidos a hojas individuales en el mismo y verifica que los nombres de las hojas tengan la longitud correcta.

```
Sub A1_Load_txt()  
    Dim wb As Workbook, ws As Worksheet  
    Set wb = Workbooks.Add  
    Files = Application.GetOpenFilename("Text Files (*.txt), *.txt", , "Seleccionar archivos de texto", ,  
True)  
    For Each file In Files  
        Workbooks.OpenText file, origin:=xlWindows, startrow:=1, DataType:=xlDelimited  
        other = ActiveWorkbook.name  
        ActiveSheet.Copy Before:=wb.Sheets(1)  
        Workbooks(other).Close False  
    Next  
    Sheets(Worksheets.Count).Delete  
    For Each ws In ActiveWorkbook.Worksheets  
        If Len(ws.name) <> 6 Then  
            MsgBox ("Revisar nombres de los archivos cargados")  
        End If  
    Next  
End Sub
```

Aplicación de múltiples acciones sobre las diferentes hojas de cálculo

A continuación, se guarda el archivo previamente generado y con la siguiente macro se recorre todas las hojas de cálculo del libro y se ejecuta una serie de operaciones en cada hoja, llamando para ello a diferentes subrutinas.



```
Sub A2_Apily_Functions()  
  Dim ws As Worksheet  
  For Each ws In Worksheets  
    ws.Select  
    Call Z1_Remove_Columns  
    Call Z2_Calculate_Parameters  
    Call Z3_Average_Parameters  
    Call Z4_Generate_Table  
    Call Z5_Style_Table_Individual  
    Call Z6_Import_Features  
    ActiveWindow.ScrollRow = 1  
    ActiveWindow.ScrollColumn = 1  
  Next  
End Sub
```

Subrutina: remoción de columnas

Esta subrutina se encarga de eliminar columnas específicas de la hoja de cálculo, esto debido a que el instrumento descarga los valores máximos, mínimos y promedios registrados en cada intervalo de tiempo. De esta manera, para una medición estándar de diez minutos se tiene una matriz de 200x150, donde solo son útiles 55 columnas con los parámetros a analizar.

```
Sub Z1_Remove_Columns() 'Remover columnas de datos innecesarios  
  Dim n_columns As Integer, array_parameters() As Variant  
  n_columns = ActiveSheet.UsedRange.Columns.Count  
  array_parameters = Array("B", "C", ... , "ER", "ET")  
  For i = n_columns To 0 Step -1  
    last_element = UBound(array_parameters)  
    n_columns = Cells(1, array_parameters(last_element)).Column  
    If i = n_columns Then  
      ActiveSheet.Columns(i).EntireColumn.Delete Shift:=xlShiftToLeft  
      If last_element > 0 Then  
        ReDim Preserve array_parameters(last_element - 1)  
      End If  
    End If  
  Next i  
End Sub
```



Subrutina: cálculo de parámetros

Esta subrutina calcula las potencias promedio, ya que el analizador de redes proporciona la potencia en los cuatro cuadrantes. Se insertan nuevas columnas en la hoja de cálculo para mostrar los valores promedio de potencia aparente, activa y reactiva. Además, se calcula el factor de potencia según su definición. Luego, elimina las columnas utilizadas para los cálculos.

```
Sub Z2_Calculate_Parameters() 'Calculo Potencia Activa, Reactiva, Aparente y el FP
    Dim last_row As Integer
    last_row = ActiveSheet.UsedRange.Rows.Count
    With ActiveSheet 'Columnas en donde se insertan los datos calculados (un total de 4, solo se coloca
una a modo de ejemplo)
        .Columns("H").EntireColumn.Insert
        .Range("H1") = "S(VA) Avg"
        .
        .
        .
    End With
    For i = 2 To last_row
        Range("K" & i) = Abs(Range("I" & i) - Range("J" & i)) * 1000 'Potencia activa, diferencia entre
la (+) y la (-)
        Range("U" & i) = Abs((Range("Q" & i) + Range("R" & i)) - (Range("S" & i) + Range("T" & i)))
* 1000 'Potencia reactiva, sumatoria entre la (+) y la (-)
        Range("H" & i) = Range("B" & i) * Range("C" & i) 'Potencia aparente: V*I
        If Range("K" & i).Value <> 0 And Range("H" & i).Value <> 0 Then 'Si hay P. aparente y P. activa
entonces el FP=P/S
            Range("P" & i).Value = Range("K" & i) / Range("H" & i)
        Else: Range("H" & i).Value = 0 'Si no se midió P. aparente, se coloca "-" para no afectar el
promedio
            Range("P" & i).Value = "-"
        End If
    Next i
    msg = MsgBox("Cálculo correctos", vbOKOnly, "Revisión de datos")
    ActiveSheet.Range("F:G,I:J,L:O,Q:T").EntireColumn.Delete
End Sub
```



Subrutina: promedio de todos los parámetros

La siguiente subrutina calcula el promedio de todas las columnas y los coloca en la última fila.

```
Sub Z3_Average_Parameters()  
    Dim last_row As Integer, last_column As Integer, avg As Double  
    last_row = ActiveSheet.UsedRange.Rows.Count  
    last_column = ActiveSheet.UsedRange.Columns.Count  
    For i = 2 To last_column 'La primera columna no se promedia por ser los datos del tiempo  
        avg = WorksheetFunction.Average(Range(Cells(2, i), Cells(last_row, i)))  
        Cells(last_row + 1, i) = avg  
    Next i  
    Cells(last_row + 1, 1).Value = "Promedio"  
    Rows(last_row + 1).Font.Bold = True  
End Sub
```

Subrutinas: generación, completado y estilo de tabla resumen

Las siguientes subrutinas: *Call Z4_Generate_Table*, *Call Z5_Style_Table_Individual* y *Call Z6_Import_Features*, simplemente se encargan de organizar y presentar de manera efectiva los datos clave de las mediciones en cargas particulares. Por esta razón, los detalles del código no se proporcionan, ya que las mismas solo están programadas para generar un resumen estructurado, legible y consistente en la hoja de cálculo activa.

Generación de resúmenes por categoría y ponderación de armónicos.

Para generar los resúmenes por categoría y ponderar los armónicos también se emplearon macros. Estas operan en todas las hojas de cálculo individuales, una por cada medición de carga, extrayendo y ponderando los promedios en función de la potencia aparente. A continuación, trasladan tanto los parámetros eléctricos como los armónicos ponderados a una nueva tabla resumen consolidada. En busca de claridad, se omite dar detalles del código debido a la simplicidad del mismo.

ANEXO VI - Registro detallado de Aires Acondicionados

MED	Marca	Modelo	Potencia	Características distintivas	Funcionamiento	Otras especificaciones	Cantidad de datos
19	LG	TS-CO96YTA1	980 W	Split	Funcionando a 24°C en modo frío con ventilador a velocidad media.	5 A / 220-240V / 50Hz	202
20	Hyundai	HY8-5000FC	5180 W	Split	Funcionando a 24°C en modo frío con ventilador a velocidad media.	-	203
34	Philco	U.E.: PHS25HA3ANE U.I.: PHS25HA3ANI	2600 W	Split	Funcionando a 24°C en modo frío con ventilador a velocidad media.	-	202
36	TCL	TAC-12CHS/BHA	1230 W	Split	Funcionando a 24°C en modo frío con ventilador a velocidad media.	-	202
37	Philco	PHS25H115XI	810 W	Split	Funcionando a 24°C en modo frío con ventilador a velocidad media.	-	203
42	BGH	BS-E/C-35WCCR	3450 Frigorías	Split	Funcionando a 24°C en modo frío con ventilador a velocidad media.	-	202
43	Westinghouse	WHE32-ECO	3220 Frigorías	Split	Funcionando a 24°C en modo frío con ventilador a velocidad media.	1500W / 220-240V / 50Hz	200
62	Surrey	553TGH1217	3500 Frigorías	Split	Funcionando a 24°C en modo frío con ventilador a velocidad media.	1650W / 220-240V / 50Hz / 9A	201
67	PHILCO	PHW2515FX	2500 Frigorías	Ventana	Funcionando en modo frío con ventilador a velocidad media.	220V / 50Hz	200
73	GoodAir	NA-S3000FS	1700 W	Split	Funcionando a 24°C en modo frío con ventilador a velocidad media.	220V / 50Hz / 8A	202
94	Surrey	U.E.: 619EPQ12U.I.: 538EPQ12	3500 Frigorías	Split	Funcionando a 24°C en modo frío con ventilador a velocidad media.	1087W / 220V / 50Hz / 5A	242
116	Marshall	-	-	Ventana	Funcionando en modo frío con ventilador a velocidad media.	-	201
117	Surrey	-	-	Ventana	Funcionando en modo frío con ventilador a velocidad media.	-	200
135	Tadiran	TADI35TC/I-O	3500 Frigorías	Inverter	Funcionando a 24°C en modo frío con ventilador a velocidad media.	-	104
136	Tadiran	TADI35TC/I-O	3500 Frigorías	Inverter	Funcionando a 24°C en modo frío con ventilador a velocidad media.	Medición complementaria a: 135	101
137	Tadiran	TADI35TC/I-O	3500 Frigorías	Inverter	Funcionando a 20°C en modo frío con ventilador a velocidad media.	-	75
138	Tadiran	TADI35TC/I-O	3500 Frigorías	Inverter	Funcionando a 20°C en modo frío con ventilador a velocidad media.	Medición complementaria a: 137	66
139	Tadiran	TADI35TC/I-O	3500 Frigorías	Inverter	Funcionando a 20°C en modo frío con ventilador a velocidad media.	Medición complementaria a: 137	35



Medición	Peso	Tensión [V]	THDv [%]	Corriente [A]	THDi [%]	Reactiva [VAr]	Activa [W]	Aparente [VA]	Factor de Potencia
MED019	0,08	217,64	3,10	4,77	21,51	227,43	1012,34	1037,29	0,98
MED020	0,04	221,56	1,73	2,51	16,69	57,69	548,22	556,19	0,99
MED034	0,06	222,61	1,66	3,36	14,42	120,46	736,90	747,08	0,99
MED036	0,04	232,04	1,18	2,34	16,43	292,29	458,72	544,08	0,84
MED037	0,06	236,17	1,19	3,08	14,46	32,74	719,51	726,95	0,99
MED042	0,06	234,30	1,14	2,98	31,57	54,72	682,01	696,31	0,92
MED043	0,07	222,59	1,37	4,10	18,59	31,90	896,14	911,51	0,98
MED062	0,09	225,33	1,79	4,93	16,57	168,31	1069,13	1110,50	0,96
MED067	0,06	226,70	1,66	3,53	16,33	154,03	786,58	800,63	0,98
MED073	0,04	227,20	1,90	2,19	20,18	195,31	458,87	498,19	0,92
MED094	0,07	226,94	2,62	3,98	20,42	63,13	882,31	902,75	0,98
MED116	0,07	225,52	2,23	3,92	21,93	31,51	858,49	884,60	0,97
MED117	0,10	230,13	1,52	5,31	20,18	249,16	1197,39	1222,97	0,98
MED135	0,08	221,65	1,91	4,72	16,70	196,29	1023,15	1044,76	0,93
MED137	0,07	222,50	1,87	4,07	18,91	173,60	876,35	901,27	0,79
Promedio	1,00	225,83	1,84	3,95	19,01	140,38	865,68	890,18	0,95
Desviación	-	4,88	0,54	0,91	3,82	82,62	202,30	201,01	0,05

ANEXO VI - Registro detallado de Equipos de Audio

MED	Marca	Modelo	Potencia	Características distintivas	Funcionamiento	Otras especificaciones	Cantidad de datos
12	Aiwa	NSX-V50	-	-	Funcionando como radio con volumen medio.	-	202
16	Samsung	HT-C330	40 W	Home Theater	Funcionando como radio con volumen medio.	-	202
39	Laney	Rb3	65 W	Amplificador de bajo	Amplificando bajo en volumen medio.	1x12"	235
65	Sony	Muteki 5.2ch	1835 Wrms	Home Theater 5.2ch	Reproduciendo música.	7 parlantes	198
90	Moon AudioPro	M5508USB	2x100 W	Consola de sonido	Funcionando a 50% de volumen.	-	420
110	Pionner	A380	-	Equipo de música	Reproduciendo música.	2 parlantes	145
111	Samsung	HT-C550	1000 Wrms	Home Theater 5.1	Reproduciendo música.	7 parlantes	147

Medición	Peso	Tensión [V]	THDv [%]	Corriente [A]	THDi [%]	Reactiva [VAr]	Activa [W]	Aparente [VA]	Factor de Potencia
MED012	0,12	227,33	2,66	0,13	58,18	19,40	23,48	30,31	0,77
MED016	0,12	215,22	2,40	0,13	181,23	26,21	12,84	28,90	0,44
MED039	0,09	236,82	1,17	0,10	48,69	15,75	16,84	22,83	0,74
MED065	0,26	227,13	1,65	0,29	52,76	40,00	52,88	66,12	0,80
MED090	0,17	215,19	2,73	0,20	94,31	30,57	29,63	42,44	0,70
MED110	0,12	226,42	1,50	0,13	52,55	18,75	22,85	29,28	0,78
MED111	0,12	229,89	1,45	0,13	163,18	28,36	12,39	30,61	0,40
Promedio	1,00	224,89	1,96	0,18	88,38	28,20	29,02	40,89	0,68
Desviación	-	6,71	0,57	0,07	49,22	8,49	15,36	16,03	0,15



ANEXO VI - Registro detallado de Reguladores de Velocidad

MED	Marca	Modelo	Potencia	Características distintivas	Funcionamiento	Otras especificaciones	Cantidad de datos
76	Spot Alternativa	54XX	-	Módulo regulador electrónico	Funcionando en tiempos iguales a mínima, media y máxima potencia	220 V - 50 Hz	208
79	Generica 1	-	300 W Máx.	Módulo regulador electrónico	Funcionando en tiempos iguales a mínima, media y máxima potencia	1,5 A	237
82	Generica 2	-	-	Módulo regulador electrónico	Funcionando en tiempos iguales a mínima, media y máxima potencia	-	200
84	Generica 3	-	-	Módulo regulador electrónico	Funcionando en tiempos iguales a mínima, media y máxima potencia	-	206
118	Electromecánica Llanos	-	-	Autotransformador. Selector de cinco velocidades.	Funcionando en tiempos iguales a mínima, media y máxima potencia	-	204
119	ABON - GARDEN	-	-	Autotransformador. Selector de cinco velocidades.	Funcionando en tiempos iguales a mínima, media y máxima potencia	-	206

Medición	Peso	Tensión [V]	THDv [%]	Corriente [A]	THDi [%]	Reactiva [VAr]	Activa [W]	Aparente [VA]	Factor de Potencia
MED076	0,21	229,60	3,02	0,34	43,68	34,26	63,08	78,60	0,72
MED079	0,09	233,03	3,07	0,15	80,25	21,13	26,44	33,88	0,77
MED082	0,16	230,76	2,18	0,26	58,70	35,57	42,07	59,95	0,60
MED084	0,18	230,09	2,07	0,29	49,03	47,50	43,48	66,60	0,57
MED118	0,18	230,02	3,13	0,29	16,37	32,69	57,87	67,53	0,83
MED119	0,17	230,25	3,30	0,28	21,59	33,42	52,20	64,74	0,75
Promedio	1,00	230,38	2,79	0,28	41,58	35,21	49,98	64,92	0,70
Desviación	-	0,91	0,49	0,05	19,49	6,86	10,81	11,54	0,09

ANEXO VI - Registro detallado de Estabilizadores de Tensión

MED	Marca	Modelo	Potencia	Características distintivas	Funcionamiento	Otras especificaciones	Cantidad de datos
23	Blaze	Blaze 500	500 VA	Computadora de escritorio	Funcionando en las condiciones cotidianas 7 min y 3 min estresando CPU.	FX 8320 - Sin GPU - 8GB - Monitor LCD	202
25	Blaze	Blaze 500	500 VA	Computadora de escritorio	Funcionando en vacío, sin carga conectada.	-	201
38	Lynn	TCA 1200NV	1200 VA	Computadora de escritorio	Funcionando en condiciones cotidianas los 10 min.	I7 4790 - Sin GPU - 8 GB	212
44	TRV	Micromack Concept	2000 VA	Play Station 3 - Televisor Tonomac 43	Empleando la consola de juegos y el televisor.	-	260

Medición	Peso	Tensión [V]	THDv [%]	Corriente [A]	THDi [%]	Reactiva [VAr]	Activa [W]	Aparente [VA]	Factor de Potencia
MED023	0,43	218,79	2,05	1,25	121,18	216,01	172,29	274,45	0,63
MED025	0,05	221,44	1,71	0,14	54,73	31,64	6,15	32,12	0,19
MED038	0,27	237,25	1,19	0,74	116,80	141,04	106,17	175,34	0,60
MED044	0,25	225,95	1,40	0,71	17,31	57,77	152,03	161,51	0,94
Promedio	1,00	225,75	1,64	0,92	90,60	146,66	140,89	206,99	0,68
Desviación	-	7,59	0,38	0,31	44,70	68,59	41,07	65,27	0,18



ANEXO VI - Registro detallado de Freezer

MED	Marca	Modelo	Potencia	Características distintivas	Funcionamiento	Otras especificaciones	Cantidad de datos
58	Gafa	-	-	Tecnología de compresor convencional	Funcionando en condiciones habituales.	-	201
71	Consul	CFC Free 220	-	Tecnología de compresor convencional	Funcionando en condiciones habituales.	305 litros	213
106	Gafa	Eternity XL410AB	-	Tecnología de compresor convencional	Funcionando en condiciones habituales.	400 litros	130

Medición	Peso	Tensión [V]	THDv [%]	Corriente [A]	THDi [%]	Reactiva [VAr]	Activa [W]	Aparente [VA]	Factor de Potencia
MED058	0,48	237,12	1,54	1,34	8,53	238,80	213,53	318,17	0,67
MED071	0,38	233,49	1,98	1,09	4,60	215,89	133,10	253,47	0,53
MED106	0,13	225,28	1,48	0,39	4,09	59,33	65,93	88,66	0,44
Promedio	1,00	234,14	1,70	1,12	6,43	205,91	162,84	262,52	0,58
Desviación	-	3,87	0,22	0,31	2,04	58,69	53,28	74,72	0,09

ANEXO VI - Registro detallado de Heladeras

MED	Marca	Modelo	Potencia	Características distintivas	Funcionamiento	Otras especificaciones	Cantidad de datos
10	Patrick Fagor	-	-	Tecnología de compresor convencional	Funcionando con el selector al máximo.	No frost	202
11	Briket	BK1F 1010	-	Mini Heladera	Funcionando con el selector al máximo.	Eficiencia B	203
21	Whirlpool	WRM54AB	-	Tecnología de compresor convencional	Funcionando con el selector al máximo.	Eficiencia A	207
47	Briket	BK2F 1610 BL A0	-	Tecnología de compresor convencional	Funcionando en condiciones habituales de la vivienda.	Eficiencia A+ - 220V / 50HZ / 0,6A	201
55	Samsung	RT32K5070WW	-	Inverter	Funcionando en condiciones habituales de la vivienda.	Eficiencia A+	217
56	Eslabón de Lujó	ERA 30	-	Tecnología de compresor convencional	Funcionando en condiciones habituales de la vivienda.	Eficiencia B - No frost	203
63	Electrolux	DF3000P	132 W	Tecnología de compresor convencional	Funcionando en condiciones habituales de la vivienda.	Eficiencia A - No frost	202
68	Windows Collection	WC-34	50 W	Cava	Funcionando en condiciones habituales de la vivienda.	220-240V / 50Hz / 0,5A	180
70	Whirlpool	-	-	Tecnología de compresor convencional	Funcionando en condiciones habituales de la vivienda.	-	202
72	Briket	BKF 1400	-	Tecnología de compresor convencional	Funcionando en condiciones habituales de la vivienda.	220V / 50Hz / 1,1A	212
92	Patrick	-	-	Tecnología de compresor convencional	Funcionando en condiciones habituales de la vivienda.	-	107
96	Samsung	RT38FEAKDSL	-	Inverter	Funcionando en condiciones habituales de la vivienda.	-	101
97	Samsung	RT38FEAKDSL	-	Inverter	Funcionando en condiciones habituales de la vivienda.	Medición complementaria a: 96	116
107	Electrolux	Celebrate DFW48	141 W	Tecnología de compresor convencional	Funcionando en condiciones habituales de la vivienda.	Frost Free	129
112	Briket	-	-	Tecnología de compresor convencional	Funcionando en condiciones habituales de la vivienda.	-	202

Medición	Peso	Tensión [V]	THDv [%]	Corriente [A]	THDi [%]	Reactiva [VAr]	Activa [W]	Aparente [VA]	Factor de Potencia
MED010	0,08	227,61	2,53	0,87	11,79	62,90	187,38	197,53	0,95
MED011	0,08	224,78	2,61	0,89	4,87	150,23	132,92	200,63	0,66
MED021	0,06	223,50	1,70	0,60	3,00	9,26	134,01	134,46	1,00
MED047	0,07	229,19	1,41	0,72	7,66	124,23	107,56	164,16	0,65
MED055	0,01	237,07	1,44	0,13	49,39	30,95	4,83	31,41	0,09
MED056	0,06	236,38	1,44	0,65	4,93	121,39	94,66	153,78	0,62
MED063	0,05	229,22	1,76	0,58	15,72	45,15	124,67	132,18	0,94
MED068	0,02	232,47	1,91	0,19	1,92	33,18	28,50	43,80	0,51
MED070	0,10	233,49	1,88	1,05	6,50	188,06	156,39	244,44	0,64
MED072	0,08	231,31	1,87	0,87	7,91	151,52	134,05	202,16	0,66
MED092	0,09	212,47	2,77	0,98	8,59	156,30	137,24	207,87	0,66
MED096	0,05	230,31	2,65	0,53	165,83	105,21	61,14	121,19	0,50
MED107	0,15	226,13	1,44	1,59	4,42	309,07	184,89	359,57	0,51
MED112	0,09	230,12	1,44	0,92	5,77	179,17	113,35	211,88	0,53
Promedio	1,00	227,85	1,92	0,92	15,52	150,60	134,53	208,32	0,66
Desviación	-	5,84	0,50	0,34	35,09	83,52	39,37	76,18	0,17



ANEXO VI - Registro detallado de Herramientas Portátiles

MED	Marca	Modelo	Potencia	Características distintivas	Funcionamiento	Otras especificaciones	Cantidad de datos
13	Severbon	-	-	Cortadora de césped	Realizando el trabajo habitual de cortar pasto.	Motor rebobinado	205
31	Ultracomb	AS 4224	1800 W	Aspiradora	Funcionamiento normal - Sin selector de potencia.	-	201
102	GAMMA	ARC 200	7800 W	Soldadora Inverter	Soldando a media potencia. Con intervalos de descanso habituales. Sin medición de armónicos.	220V / 32A / FP: 0,85	-
104	GAMMA	ARC 200	7800 W	Soldadora Inverter	Soldando a media potencia. Con intervalos de descanso habituales. Con medición de armónicos.	Medición que complementa a: 102	-
125	Philips	ThermoProtect HP8230	2100 W	Secador de pelo	Igual cantidad de datos en las seis posibilidades. Dos velocidades disponibles y tres posibilidades de aire caliente.	-	151
131	-	-	-	Bordeadora	Realizando el trabajo habitual de cortar pasto.	-	64

Medición	Peso	Tensión [V]	THDv [%]	Corriente [A]	THDi [%]	Reactiva [VAr]	Activa [W]	Aparente [VA]	Factor de Potencia
MED013	0,19	223,71	2,72	3,54	6,54	643,14	431,19	792,67	0,54
MED031	0,29	226,58	4,23	5,38	11,33	163,36	1208,17	1218,54	0,99
MED102	0,30	208,18	6,28	6,41	40,94	332,81	874,45	1293,71	0,57
MED125	0,16	223,88	1,99	3,13	16,10	51,59	681,92	695,67	0,97
MED131	0,06	228,47	1,86	1,15	12,49	44,18	261,41	263,50	0,99
Promedio	1,00	220,14	4,06	4,72	20,27	278,36	818,12	1017,86	0,78
Desviación	-	8,01	1,68	1,56	13,93	202,96	307,32	310,03	0,21



ANEXO VI - Registro detallado de Hornos

MED	Marca	Modelo	Potencia	Características distintivas	Funcionamiento	Otras especificaciones	Cantidad de datos
46	ATMA - Easy Cook	HP4031N	600 W	Horno de pan	Funcionando al inicio del proceso de hacer pan.	-	207
48	Bonn	B-42E	1600 W	Horno eléctrico	Funcionando a potencia media.	-	202

Medición	Peso	Tensión [V]	THDv [%]	Corriente [A]	THDi [%]	Reactiva [VAr]	Activa [W]	Aparente [VA]	Factor de Potencia
MED046	0,04	227,91	1,43	0,20	2,86	9,80	42,38	44,69	0,64
MED048	0,96	226,66	1,36	4,89	1,23	0,90	1097,65	1104,64	0,84
Promedio	1,00	226,71	1,36	4,71	1,29	1,24	1056,62	1063,43	0,83
Desviación	-	0,24	0,01	0,91	0,32	1,72	203,99	204,90	0,04

ANEXO VI - Registro detallado de Luminarias $\leq 25W$

MED	Marca	Modelo	Potencia	Características distintivas	Funcionamiento	Otras especificaciones	Cantidad de datos
28	Candil	PLre22218	18 W	Lámpara LED	Funcionamiento normal.	1300 lúmenes	204
77	-	-	12 W	Lámpara LED	Funcionamiento normal.	-	201
78	Candil	LGU-8004-65	4 x 4,5 W	Lámpara diroica LED en paralelo	Funcionamiento normal.	325 lúmenes - Luz fría	200
83	LEDVANCE	LED CLA75	2 x 9 W	Tres lámparas en paralelo	Funcionamiento normal.	325 lúmenes - FP=0,5 - 66 mA	203
85	Presencia de varias	-	20 x 1 W	Guirnalda de colores	Funcionamiento normal.	-	191
87	Ilumros	G45-1Y SHW19482	4 x 1 W	Lámpara LED en paralelo	Funcionamiento normal.	Yellow	67
88	Leuk	LK1WCR	4 x 1 W	Lámpara LED en paralelo	Funcionamiento normal.	-	60
121	OSRAM	-	23 W	Lámpara bajo consumo	Funcionamiento normal.	FP=0,55 - 190 mA	163
124	Werke - Total Luz	Luminaria de LED para embutir	18 W	Lámpara LED	Funcionamiento normal.	-	220

Medición	Peso	Tensión [V]	THDv [%]	Corriente [A]	THDi [%]	Reactiva [VAr]	Activa [W]	Aparente [VA]	Factor de Potencia
MED028	0,07	235,42	4,04	0,12	124,70	23,02	16,27	27,89	0,58
MED077	0,06	232,33	3,17	0,09	61,80	18,60	11,60	21,81	0,53
MED078	0,08	231,30	3,20	0,13	136,83	25,66	16,74	30,30	0,55
MED083	0,09	230,56	2,18	0,15	137,35	28,37	18,35	33,68	0,54
MED085	0,26	234,22	2,08	0,42	21,74	98,33	5,54	98,31	0,06
MED087	0,08	232,86	2,15	0,13	21,43	31,12	1,23	31,05	0,04
MED088	0,17	232,56	2,16	0,28	24,36	65,29	1,24	65,15	0,02
MED121	0,09	228,62	3,29	0,15	107,45	28,54	20,13	34,59	0,58
MED124	0,08	226,45	1,91	0,14	149,76	26,63	15,90	30,70	0,52
Promedio	1,00	232,07	2,51	0,23	70,42	52,14	9,85	54,40	0,29
Desviación	-	2,47	0,64	0,12	53,14	31,15	7,10	29,26	0,26



ANEXO VI - Registro detallado de Luminarias >25W

MED	Marca	Modelo	Potencia	Características distintivas	Funcionamiento	Otras especificaciones	Cantidad de datos
29	Capobianco	A30	30 W	Proyector LED	Funcionamiento normal.	-	202
81	Ne	-	3 x 42 W	Tres lamparas halógenas en paralelo	Funcionamiento normal.	Lámpara tipo gota	135
120	Kian	-	6 x 9 W	Seis lámparas LED en paralelo	Funcionamiento normal.	6500 K - 810 lm	131

Medición	Peso	Tensión [V]	THDv [%]	Corriente [A]	THDi [%]	Reactiva [VAr]	Activa [W]	Aparente [VA]	Factor de Potencia
MED029	0,15	237,85	4,18	0,13	33,40	10,54	29,84	31,54	0,95
MED081	0,57	225,24	4,60	0,55	3,93	20,10	122,61	124,14	0,99
MED120	0,28	230,15	3,45	0,27	35,15	27,49	55,28	61,23	0,90
Promedio	1,00	228,46	4,21	0,41	17,03	20,80	90,12	92,92	0,96
Desviación	-	4,42	0,50	0,17	15,16	5,31	38,41	37,27	0,04

ANEXO VI - Registro detallado de Lavarropas

MED	Marca	Modelo	Potencia	Características distintivas	Funcionamiento	Otras especificaciones	Cantidad de datos
49	Drean Family	086A	-	Lavarropa automático	Inicio del ciclo de lavado con carga de ropa.	5,5 kg de ropa seca	200
59	Patriot	414A	-	Lavarropa semiautomático	Inicio del ciclo de lavado con carga de ropa.	-	195
101	Samsung	WA80F5S4U TW	-	Lavarropa automático	Inicio del ciclo de lavado con carga de ropa.	8 kg de ropa seca	153
129	Philips - Whirlpool	AWG 052	-	Lavarropa automático	Ciclo de lavado con carga de ropa.	-	1369
130	Philips - Whirlpool	AWG 052	-	Lavarropa automático	Ciclo de lavado con carga de ropa.	Medición complementaria a:129	244
132	Philips - Whirlpool	AWG 052	-	Lavarropa automático	Funcionando como centrifugadora con carga de ropa.	Medición complementaria a:129	255
133	Practic-o	-	450 W	Centrifugadora	Funcionando con carga de ropa.	Carga máxima 4kg - 2800 rpm	63

Medición	Peso	Tensión [V]	THDv [%]	Corriente [A]	THDi [%]	Reactiva [VAr]	Activa [W]	Aparente [VA]	Factor de Potencia
MED049	0,05	227,37	1,51	0,67	2,88	78,64	127,98	151,47	0,78
MED059	0,50	231,17	1,54	6,98	7,30	1,31	1598,81	1599,44	0,97
MED101	0,06	230,69	2,52	0,86	12,48	38,76	188,31	197,21	0,82
MED129	0,05	225,91	1,85	0,66	2,62	44,53	136,73	148,23	0,82
MED133	0,34	226,87	1,85	4,74	13,93	931,54	539,47	1075,73	0,50
Promedio	1,00	229,26	1,72	5,24	9,44	324,82	1013,31	1197,70	0,78
Desviación	-	2,14	0,26	2,19	3,74	435,04	603,86	502,39	0,21



ANEXO VI - Registro detallado de Microondas

MED	Marca	Modelo	Potencia	Características distintivas	Funcionamiento	Otras especificaciones	Cantidad de datos
93	BGH	B120M16	700 W	Solo varía el tiempo funcionado con la variación de potencia.	Función calentar.	-	96
98	ATMA - Easy Cook	MD923GE Digital	1450 W	Solo varía el tiempo funcionado con la variación de potencia.	Función calentar.	220V / 50Hz	71
108	BGH	QuickChef - 226D11A	1450 W	Solo varía el tiempo funcionado con la variación de potencia.	Función calentar.	-	69
126	Marshall	MTI-17M	700 W	Solo varía el tiempo funcionado con la variación de potencia.	Función calentar.	-	100

Medición	Peso	Tensión [V]	THDv [%]	Corriente [A]	THDi [%]	Reactiva [VAr]	Activa [W]	Aparente [VA]	Factor de Potencia
MED093	0,38	210,89	3,04	3,89	34,91	324,58	739,68	814,50	0,83
MED098	0,21	216,81	3,16	2,08	38,90	172,69	416,51	450,72	0,92
MED108	0,24	225,95	1,69	2,34	23,09	290,13	403,31	524,37	0,78
MED126	0,17	222,99	2,39	1,70	30,86	146,08	340,96	378,41	0,86
Promedio	1,00	217,88	2,63	2,76	32,17	253,52	521,54	592,58	0,84
Desviación	-	6,24	0,59	0,90	5,70	74,80	171,01	178,37	0,05



ANEXO VI - Registro detallado de Ordenadores Personales

MED	Marca	Modelo	Potencia	Características distintivas	Funcionamiento	Otras especificaciones	Cantidad de datos
27	Dell	Inspiron 5577	130 W	Notebook	Cargando batería, sin emplear.	i5-7300HQ - GTX 1050 -16 GB	205
50	Dell	Inspiron 5577	130 W	Notebook	Cargando batería y simulando condiciones de uso habituales.	i5-7300HQ - GTX 1050 -16 GB	202
52	Dell	Inspiron 14	-	Notebook	Sin cargar batería y simulando condiciones de uso habituales.	Pantalla 14"	201
53	Samsung	NP300E4C	60 W	Notebook	Sin cargar batería y simulando condiciones de uso habituales.	5 3210M - 8 GB	201
54	Dell	Inspiron 5577	130 W	Notebook	Sin cargar batería y simulando condiciones de uso habituales.	-	220
60	Samsung	-	-	Notebook	Sin cargar batería y simulando condiciones de uso habituales.	-	211
64	Lenovo	-	-	Notebook	Simulando condiciones de uso mínimas, habituales y exigentes por tiempos iguales.	-	209
75	-	-	-	Computadora de Escritorio	Simulando condiciones de uso mínimas, habituales y exigentes por tiempos iguales.	Ryzen 5 3600 - 16 Ram - RTX 1660 Super	200
141	Samsung	2 x Samsung A20	2 x 15 W	Cargador de celular	Funcionamiento normal.	-	120

Medición	Peso	Tensión [V]	THDv [%]	Corriente [A]	THDi [%]	Reactiva [VAr]	Activa [W]	Aparente [VA]	Factor de Potencia
MED027	0,08	222,37	1,61	0,21	185,27	41,45	21,79	46,46	0,47
MED050	0,13	226,34	2,07	0,35	50,01	38,34	67,40	78,73	0,84
MED052	0,07	225,30	1,99	0,17	152,05	34,55	19,11	39,36	0,48
MED053	0,08	225,75	1,74	0,22	160,02	42,53	25,51	49,85	0,51
MED054	0,11	226,55	1,63	0,28	84,60	34,61	50,53	63,17	0,74
MED060	0,11	227,11	1,76	0,29	154,99	56,30	33,36	65,34	0,51
MED064	0,12	230,55	1,87	0,32	144,83	61,41	41,29	73,37	0,56
MED075	0,23	228,20	1,96	0,61	37,45	65,10	124,56	139,63	0,88
MED141	0,06	213,95	2,26	0,18	140,57	32,23	21,37	38,32	0,56
Promedio	1,00	226,18	1,88	0,35	106,39	49,00	58,83	79,09	0,67
Desviación	-	3,78	0,18	0,16	54,51	12,76	39,21	35,77	0,17



ANEXO VI - Registro detallado de Otros aparatos

MED	Marca	Modelo	Potencia	Características distintivas	Funcionamiento	Otras especificaciones	Cantidad de datos
99	Desconocida 1	-	-	Extractor de cocina	Velocidad media con luz propia encendida.	Luz tipo LED	229
127	Desconocida 2	-	-	Extractor de cocina	Dos velocidades. Empleada en tiempos iguales en cada una.	-	121
128	Desconocida 2	-	-	Extractor de cocina	-	Medición que complementa a: 127	131
134	Motorarg	TIP 1	100 W	Bomba de agua.	Funcionamiento normal.	2900 rpm - 1,8 m3/h	65

Medición	Peso	Tensión [V]	THDv [%]	Corriente [A]	THDi [%]	Reactiva [VAr]	Activa [W]	Aparente [VA]	Factor de Potencia
MED099	0,55	229,25	2,42	1,00	15,58	144,94	176,36	228,12	0,77
MED127	0,21	226,91	1,94	0,38	7,46	11,59	85,86	86,92	0,99
MED134	0,24	226,26	1,99	0,45	5,86	13,63	100,42	100,97	0,99
Promedio	1,00	228,04	2,22	0,73	11,52	85,21	139,02	167,75	0,87
Desviación	-	1,36	0,23	0,29	4,50	65,82	41,43	66,68	0,11

ANEXO VI - Registro detallado de Televisores

MED	Marca	Modelo	Potencia	Características distintivas	Funcionamiento	Otras especificaciones	Cantidad de datos
6	Samsung	-	-	LCD	Reproduciendo contenido multimedia.	-	202
17	Samsung	UN43MU6100	-	Retroiluminación LED	Reproduciendo contenido multimedia.	-	202
57	Ken Brown	-	-	LCD	Reproduciendo contenido multimedia.	-	207
66	Sony	Bravia KDL-40EX725	110 W	LCD	Reproduciendo contenido multimedia.	110-240V / 50-60Hz	244
69	LG	42LV5500-SD	140 W	Retroiluminación LED	Reproduciendo contenido multimedia.	100-240V / 50-60Hz / 1,4A	200
74	TCL	-	-	Retroiluminación LED	Reproduciendo contenido multimedia.	Pantalla de 50"	201
89	BGH	-	-	Sony Playstation 3 + Televisor	Funcionamiento habitual de consola.	-	239
100	Samsung	UN40J5000AGZB	88 W	Retroiluminación LED	Reproduciendo contenido multimedia.	220-240V / 50-60Hz	177
109	Sanyo	LCD-32XF7	-	LCD	Reproduciendo contenido multimedia.	Pantalla de 32"	146
113	TCL	-	-	LCD	Reproduciendo contenido multimedia.	Pantalla de 32"	222

Medición	Peso	Tensión [V]	THDv [%]	Corriente [A]	THDi [%]	Reactiva [VAr]	Activa [W]	Aparente [VA]	Factor de Potencia
MED006	0,10	226,74	2,76	0,43	18,41	39,71	89,78	97,48	0,92
MED017	0,06	213,52	2,41	0,28	27,15	29,13	52,65	60,07	0,88
MED057	0,07	239,97	1,63	0,27	220,90	61,05	26,41	65,96	0,40
MED066	0,07	228,71	1,74	0,27	40,91	38,21	50,15	62,81	0,80
MED069	0,09	232,88	1,89	0,38	26,91	37,04	81,47	89,36	0,91
MED074	0,10	228,40	1,99	0,42	147,44	80,66	52,62	96,26	0,55
MED089	0,17	214,44	2,77	0,77	12,53	54,21	156,22	165,07	0,95
MED100	0,12	228,60	2,38	0,51	154,82	97,96	62,27	115,90	0,54
MED109	0,12	224,79	1,45	0,52	10,45	33,94	112,03	116,94	0,96
MED113	0,09	228,91	1,75	0,39	145,60	76,38	49,51	90,39	0,54
Promedio	1,00	225,77	2,14	0,47	74,52	56,55	83,03	105,37	0,76
Desviación	-	7,31	0,48	0,16	71,86	22,36	40,34	32,49	0,20

ANEXO VI - Registro detallado de Ventiladores

MED	Marca	Modelo	Potencia	Características distintivas	Funcionamiento	Otras especificaciones	Cantidad de datos
3	Luxor	-	60 W	De pie	Sin selector de velocidad.	Cuatro paletas de acero de 16"	206
9	Ericson	-	-	Ventilador antiguo de hierro	Selectores de velocidad de tres posiciones: empleado en el 2.	-	202
45	Inzago	Fabricante: MA-VIB MILANO.	-	Ventilador antiguo de hierro	Sin selector de velocidad.	-	201
91	-	-	-	Ventilador de carácter industrial	Sin selector de velocidad.	Dos paletas de acero	119
95	Buenayre	P20 M20	110 W	De pie	Funcionando a máxima potencia.	Paletas de 500 mm	145
122	Indelplas	Turbo LV20	75 W	Turbo ventilador	Selector de velocidad de tres posiciones: empleado en el 1 - 2 - 3 en tiempos iguales.	Cinco paletas plásticas	216
123	Indelplas	Turbo LV16	60 W	Turbo ventilador	Selector de velocidad de tres posiciones: empleado en el 1 - 2 - 3 en tiempos iguales.	Cinco paletas plásticas	204

Medición	Peso	Tensión [V]	THDv [%]	Corriente [A]	THDi [%]	Reactiva [VAr]	Activa [W]	Aparente [VA]	Factor de Potencia
MED003	0,16	217,84	2,16	0,49	4,18	52,30	93,78	107,25	0,87
MED009	0,14	225,50	2,69	0,42	5,33	52,92	79,76	95,55	0,83
MED045	0,22	227,10	1,40	0,65	6,44	97,94	111,14	147,98	0,75
MED091	0,14	214,59	2,67	0,44	5,28	0,00	95,07	94,87	1,00
MED095	0,18	233,43	2,75	0,53	4,94	50,24	113,35	123,83	0,92
MED122	0,10	226,46	1,86	0,32	4,45	3,70	71,53	71,63	1,00
MED123	0,07	227,07	1,91	0,21	3,41	14,58	44,43	46,93	0,94
Promedio	1,00	224,78	2,20	0,48	5,09	46,99	93,58	107,84	0,89
Desviación	-	6,10	0,52	0,12	0,88	33,77	19,47	28,75	0,09

ANEXO VII: Evaluación de cargas individuales de acuerdo a la norma IEC

61000-3-2

En el presente Anexo, se muestra el resto de las evaluaciones realizadas sobre los promedios ponderados de las cargas individuales que cumplimentan la norma IEC 61000-3-2.

Equipos de audio – Clase A

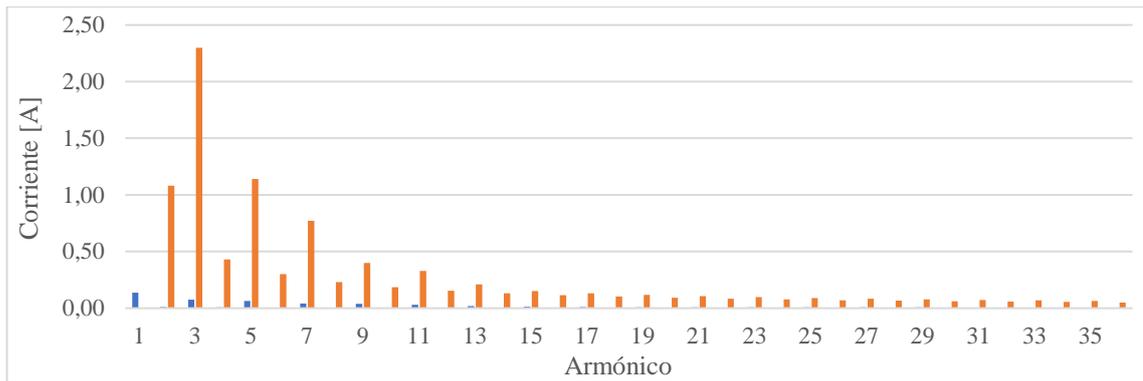


Figura A.4. Análisis de acuerdo con la IEC 61000-3-2 en los valores promedios de equipos de audio. En azul, valores promedios obtenidos; en naranja, valores máximos permitidos. Fuente: elaboración propia.

Freezer – Clase A

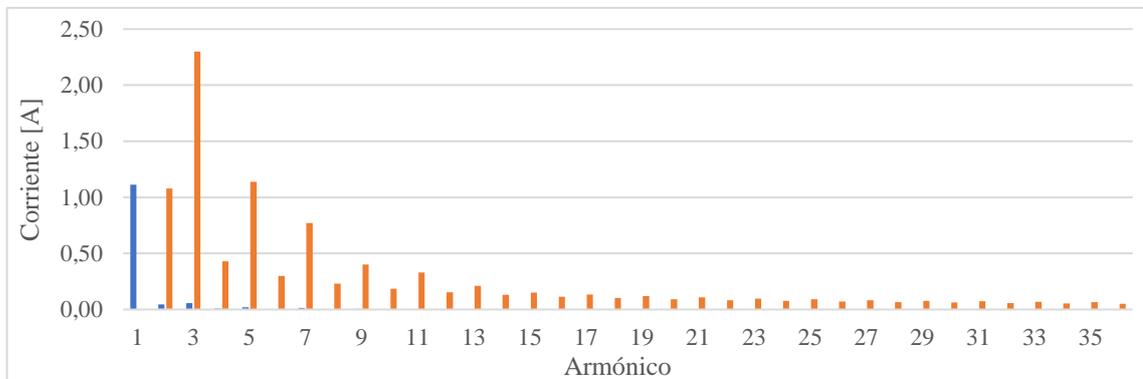


Figura A.5. Análisis de acuerdo con la IEC 61000-3-2 en los valores promedios en freezer. En azul, valores promedios obtenidos; en naranja, valores máximos permitidos. Fuente: elaboración propia.

Heladeras – Clase A

En la última actualización de la norma IEC (Año 2019) considera que las heladeras o freezer con velocidad variable para controlar el motor del compresor se deben considerar como Clase D.

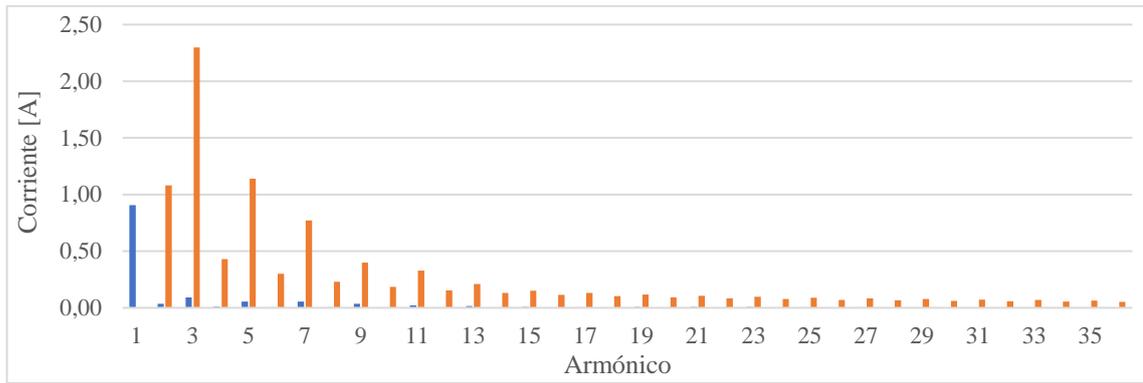


Figura A.6. Análisis de acuerdo con la IEC 61000-3-2 en los valores promedios en heladeras. En azul, valores promedios obtenidos; en naranja, valores máximos permitidos. Fuente: elaboración propia.

Hornos – Clase A

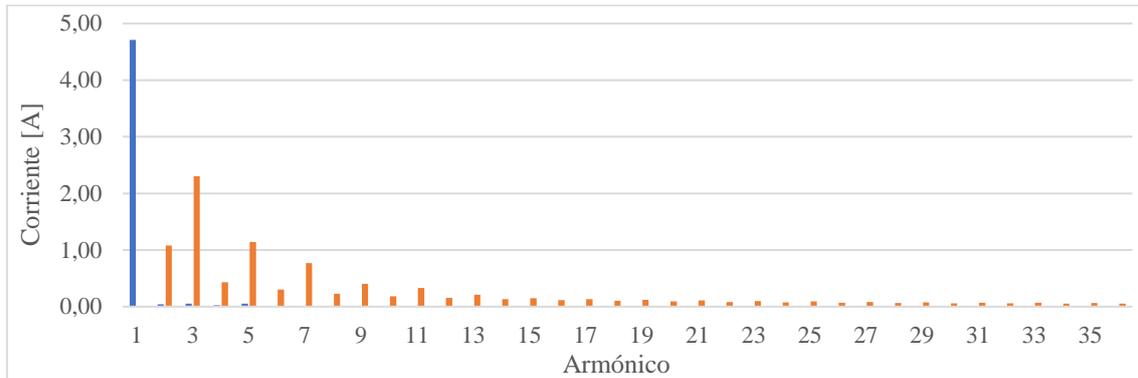


Figura A.7. Análisis de acuerdo con la IEC 61000-3-2 en los valores promedios en hornos. En azul, valores promedios obtenidos; en naranja, valores máximos permitidos. Fuente: elaboración propia.

Microondas – Clase A

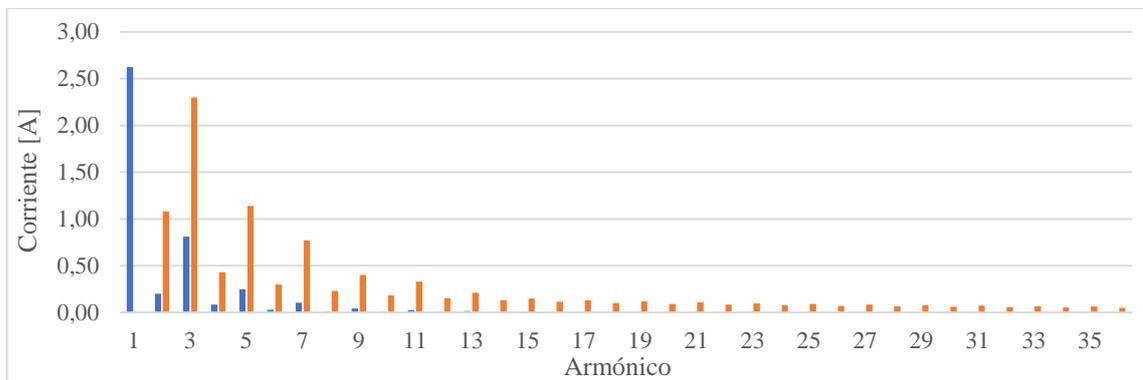


Figura A.8. Análisis de acuerdo con la IEC 61000-3-2 en los valores promedios en microondas. En azul, valores promedios obtenidos; en naranja, valores máximos permitidos. Fuente: elaboración propia.

Otros aparatos – Clase A

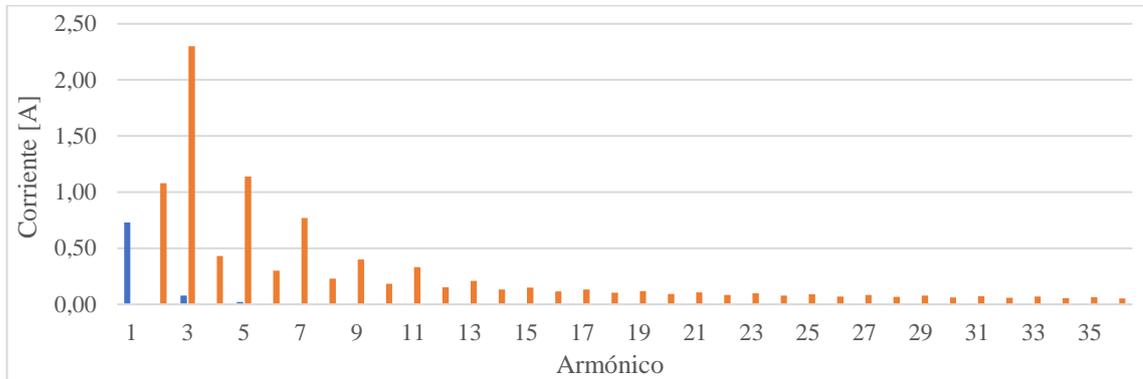


Figura A.9. Análisis de acuerdo con la IEC 61000-3-2 en los valores promedios en otros aparatos. En azul, valores promedios obtenidos; en naranja, valores máximos permitidos. Fuente: elaboración propia.

Ventiladores – Clase A

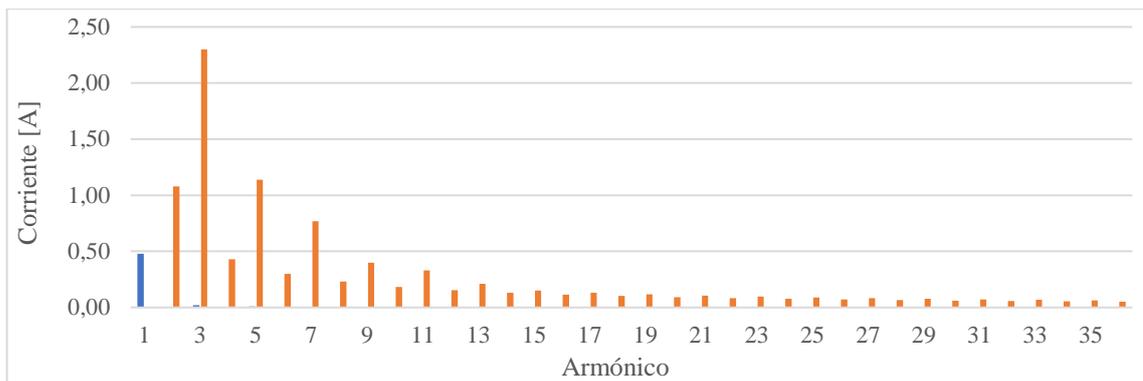


Figura A.10. Análisis de acuerdo con la IEC 61000-3-2 en los valores promedios en ventiladores. En azul, valores promedios obtenidos; en naranja, valores máximos permitidos. Fuente: elaboración propia.

Herramientas portátiles – Clase B

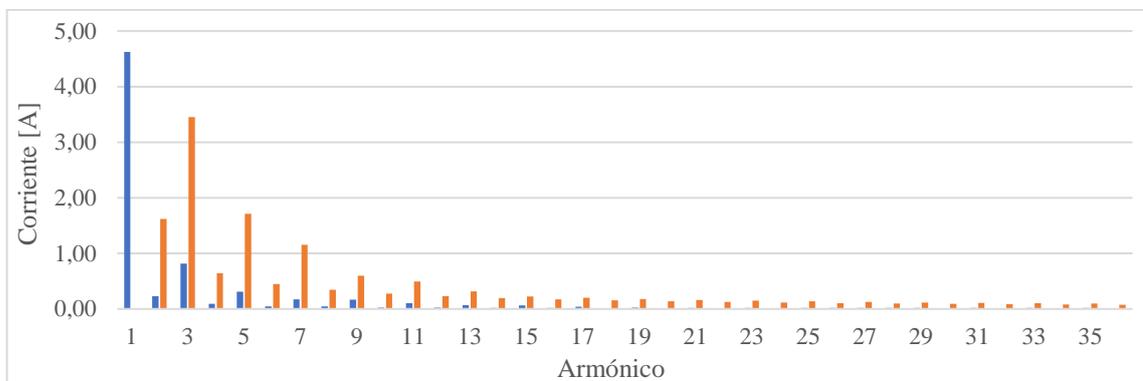


Figura A.11. Análisis de acuerdo con la IEC 61000-3-2 en los valores promedios en herramientas portátiles. En azul, valores promedios obtenidos; en naranja, valores máximos permitidos. Fuente: elaboración propia.

ANEXO VIII: Registro detallado de las viviendas unifamiliares

Designación	Lugar	Fecha inicio	Hora inicio	Fecha fin	Hora fin	Días aproximados	Horas de medición	Peso para ponderación	Cantidad de personas	Acometida
1	Reconquista	22/4/2022	16:25:00	27/4/2022	18:35:00	5	122,2	0,14	4	Monofásica
2	Reconquista	28/4/2022	12:05:00	1/5/2022	20:35:00	3	80,5	0,09	2	Trifásica
3	Reconquista	2/5/2022	17:25:00	5/5/2022	23:00:00	3	77,6	0,09	5	Monofásica
4	Avellaneda	6/5/2022	17:35:00	10/5/2022	14:10:00	4	92,6	0,11	3	Monofásica
5	Reconquista	10/5/2022	19:30:00	14/5/2022	09:50:00	4	86,3	0,10	3	Monofásica
6	Reconquista	15/5/2022	12:45:00	17/5/2022	20:25:00	2	55,7	0,06	4	Monofásica
7	Reconquista	17/5/2022	21:25:00	20/5/2022	12:10:00	3	62,8	0,07	2	Monofásica
8	Reconquista	20/5/2022	14:50:00	22/5/2022	21:30:00	2	54,7	0,06	1	Monofásica
9	Reconquista	22/5/2022	22:30:00	25/5/2022	19:25:00	3	68,9	0,08	4	Monofásica
10	Avellaneda	26/5/2022	16:00:00	28/5/2022	16:00:00	2	48,0	0,05	4	Trifásica
11	Reconquista	2/6/2022	11:00:00	5/6/2022	18:20:00	3	79,3	0,09	3	Monofásica
12	Reconquista	6/6/2022	16:30:00	8/6/2022	19:50:00	2	51,3	0,06	4	Monofásica
Total	-	-	-	-	-	37	879,8	1,0	-	-

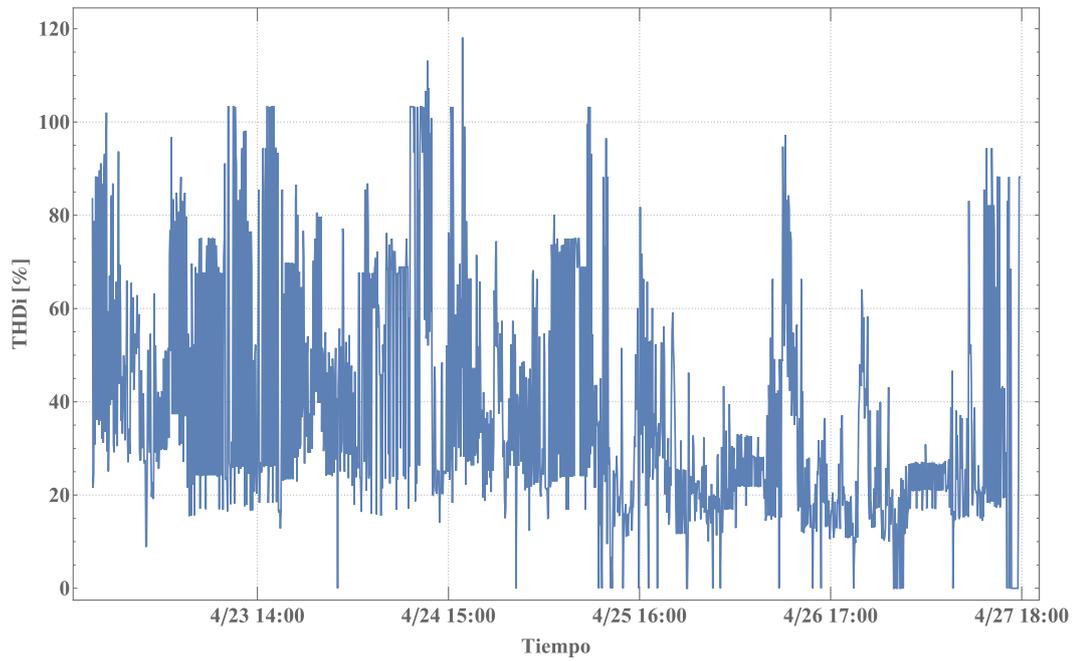
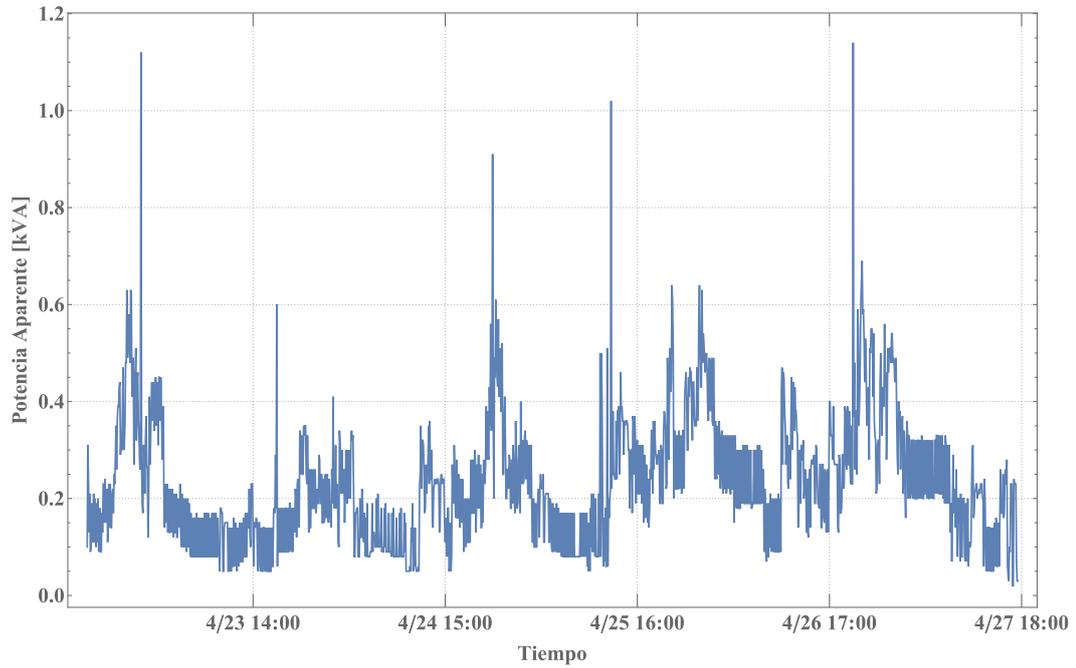


ANEXO VIII: Registro detallado de las viviendas unifamiliares – curva de demanda

En este apartado del Anexo VIII, se incluyen las curvas de carga de carga y los perfiles de distorsión armónica total (THD) en el tiempo correspondientes a las mediciones realizadas. Estas gráficas no fueron incorporadas y analizadas en el trabajo principal debido a que los periodos de medición eran relativamente cortos y no revelaron un patrón de consumo a lo largo del tiempo. Además, las distintas curvas de carga, siendo un total de 12, exhibieron variaciones considerablemente diferentes entre sí, lo que dificultaba la identificación de tendencias generales. No obstante, se considera importante presentar esta información adicional para una referencia completa y detallada del estudio.

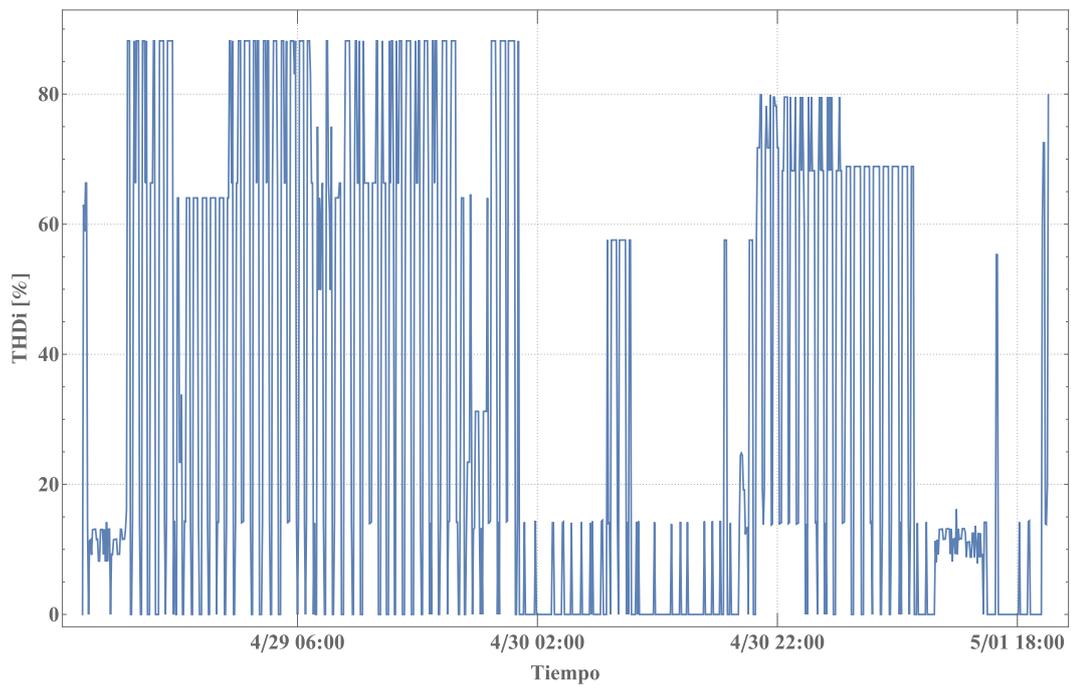
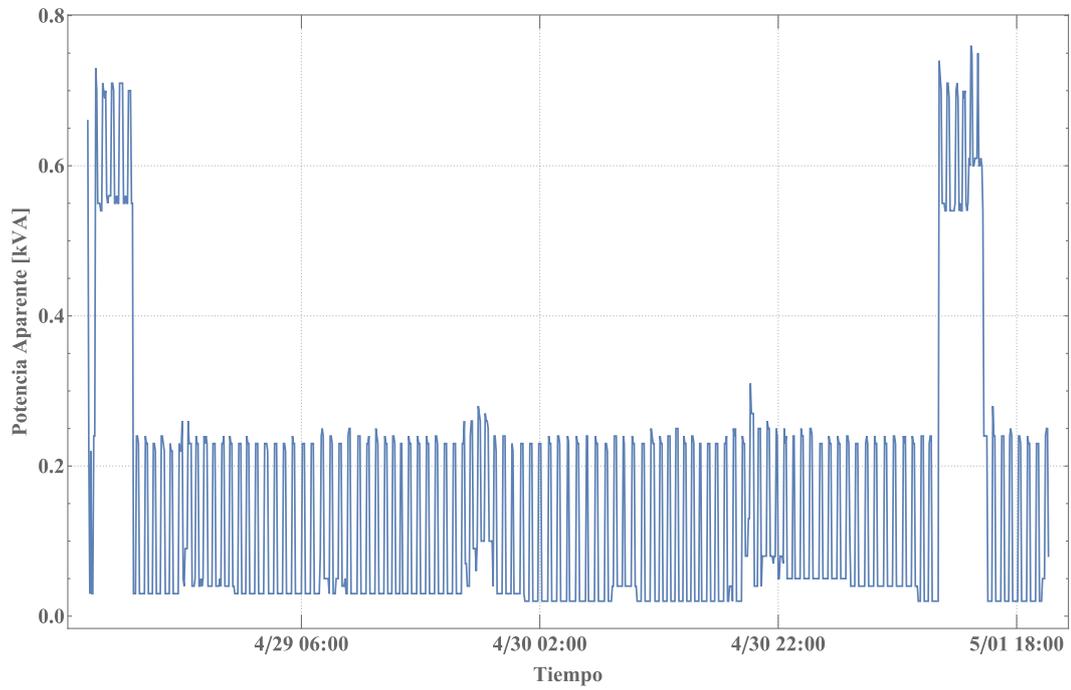


Vivienda 01



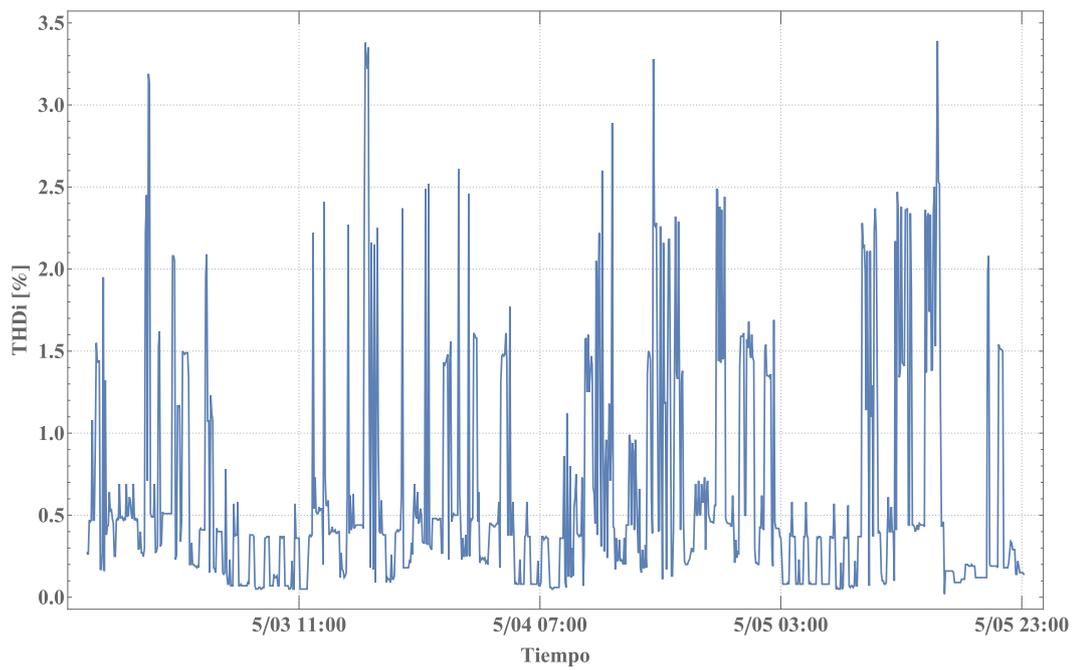
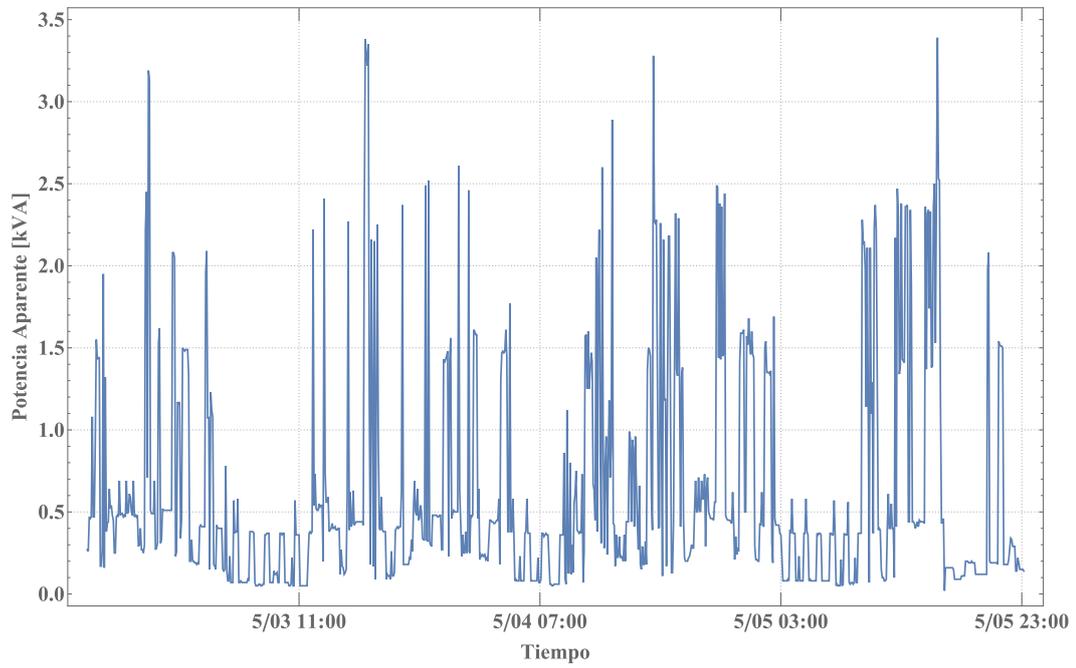


Vivienda 02



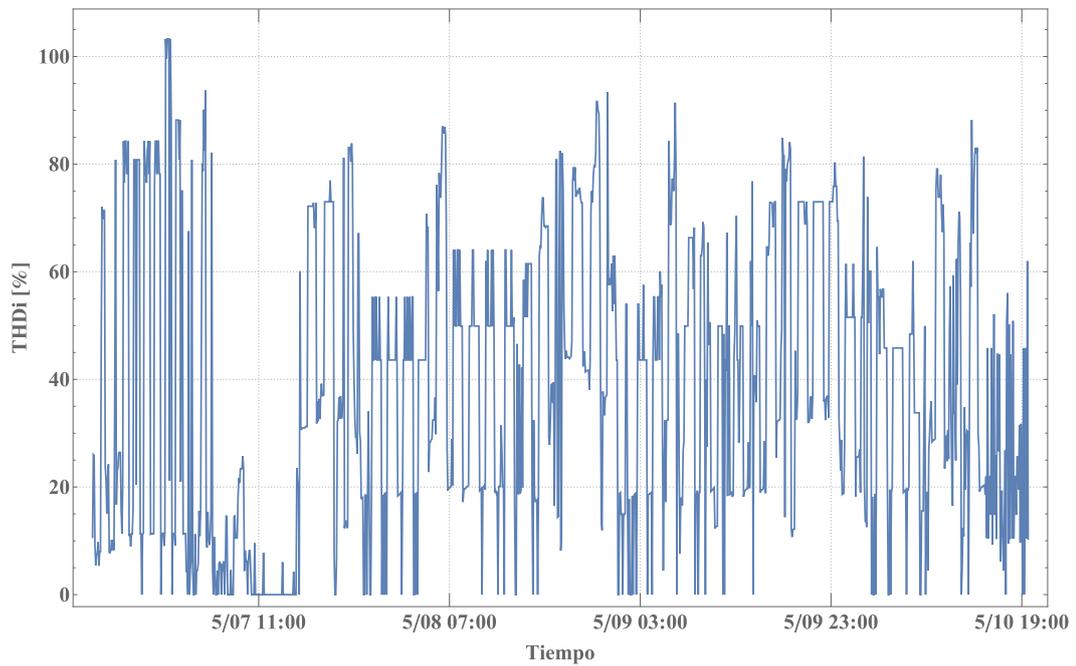
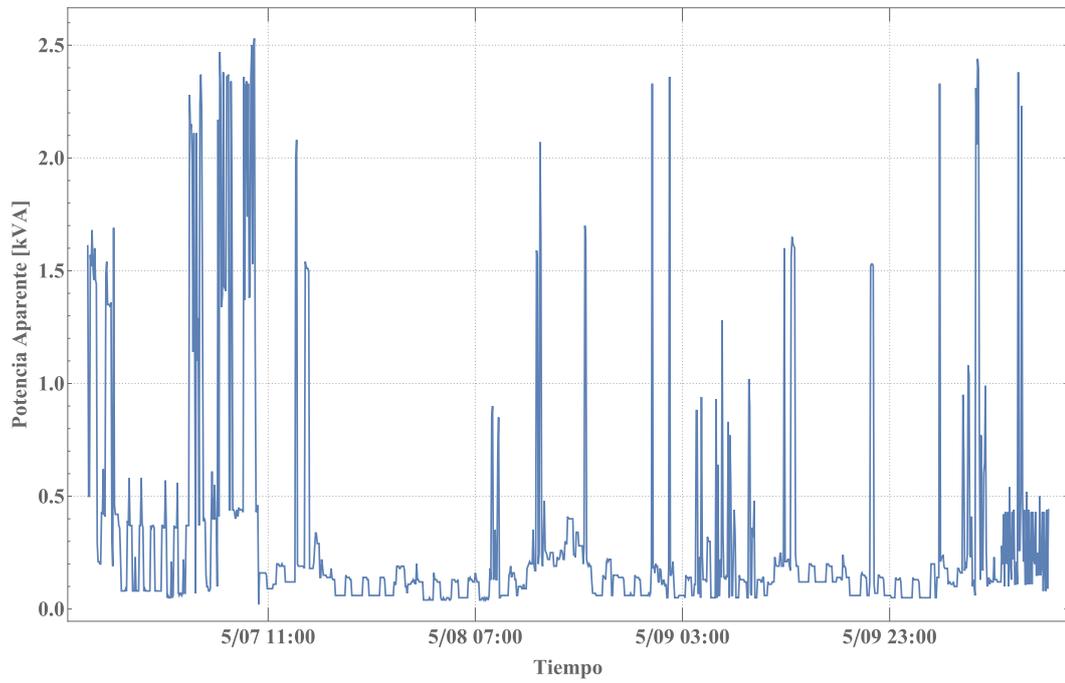


Vivienda 03



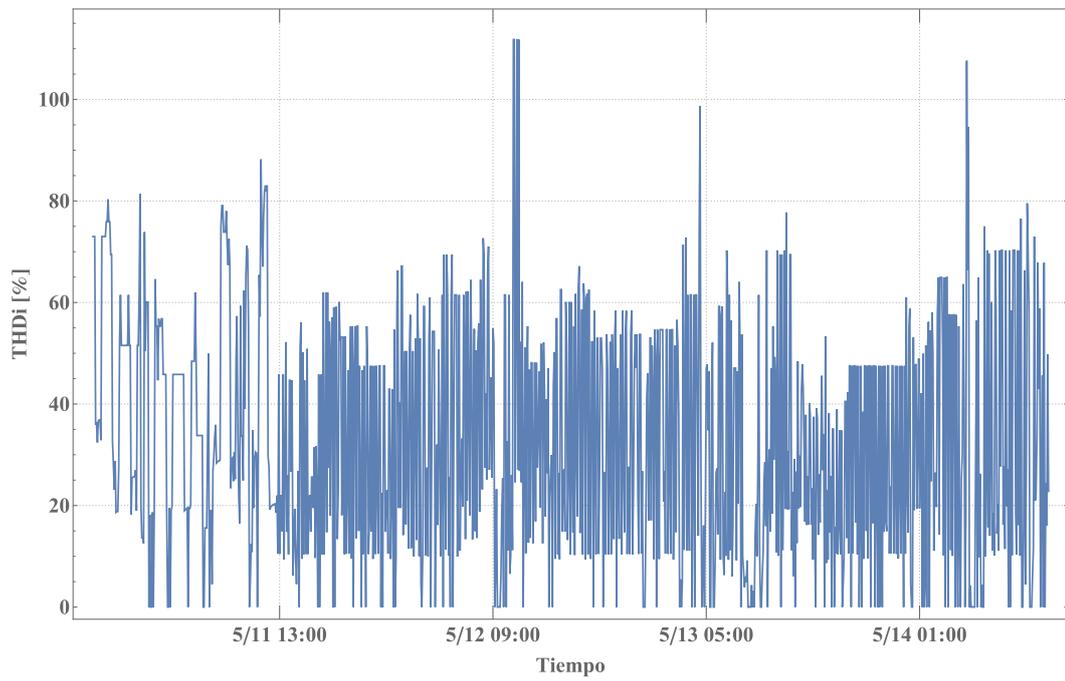
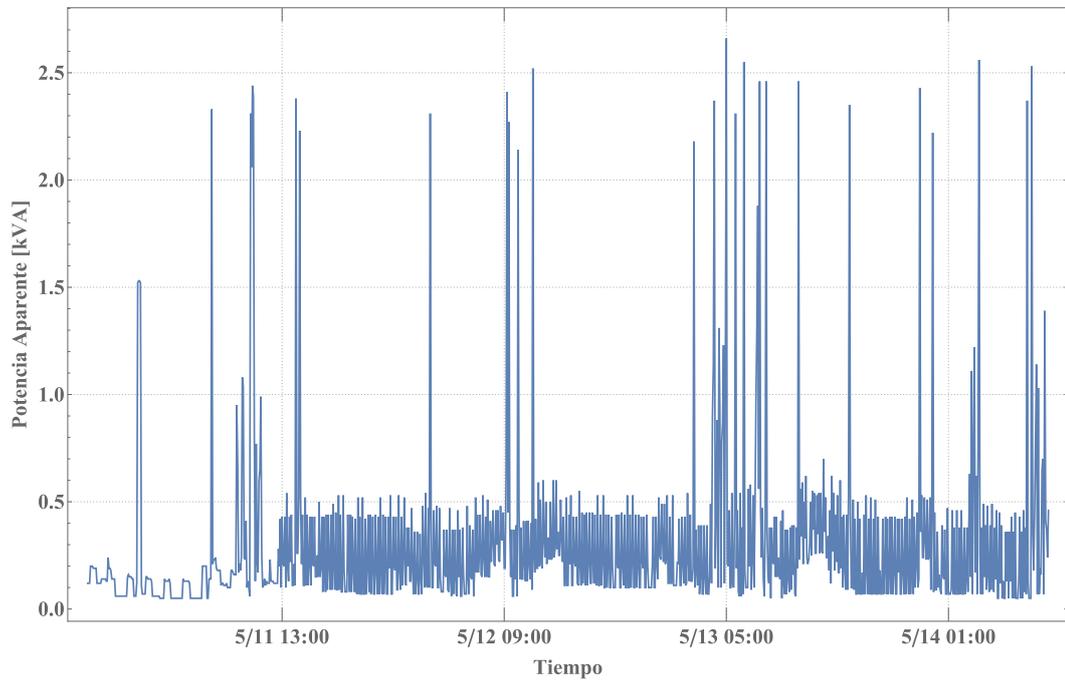


Vivienda 04



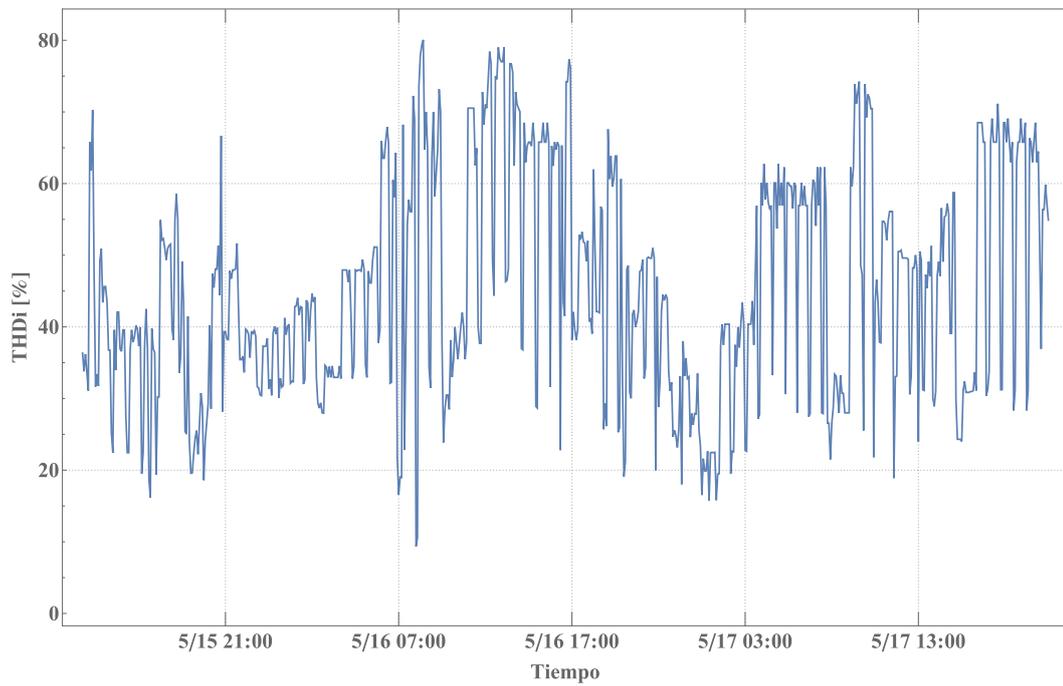
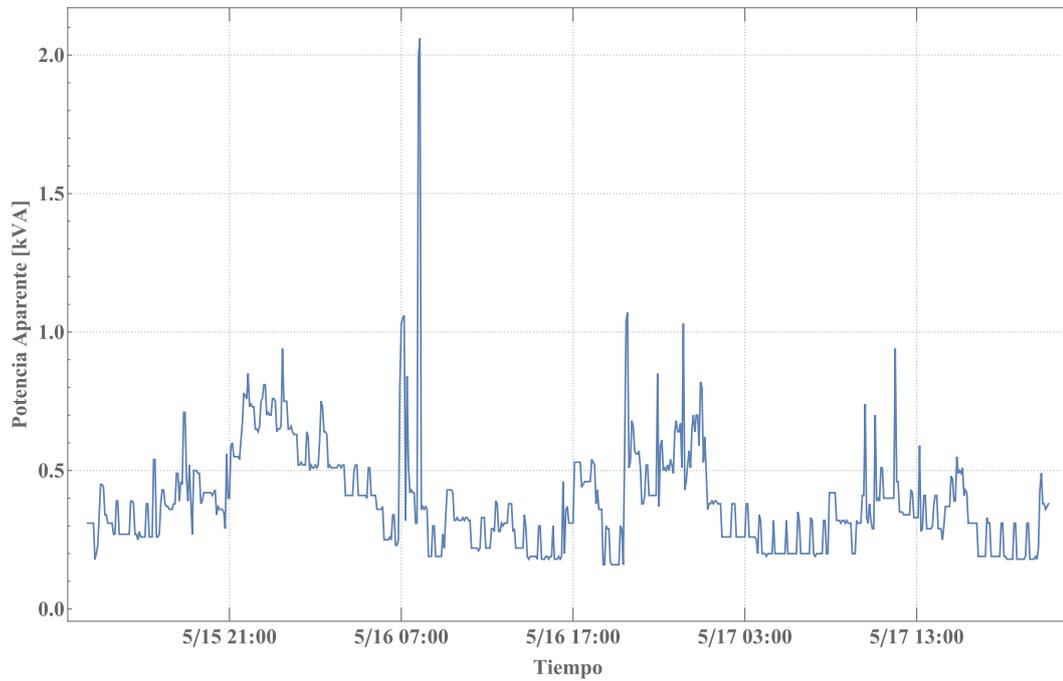


Vivienda 05



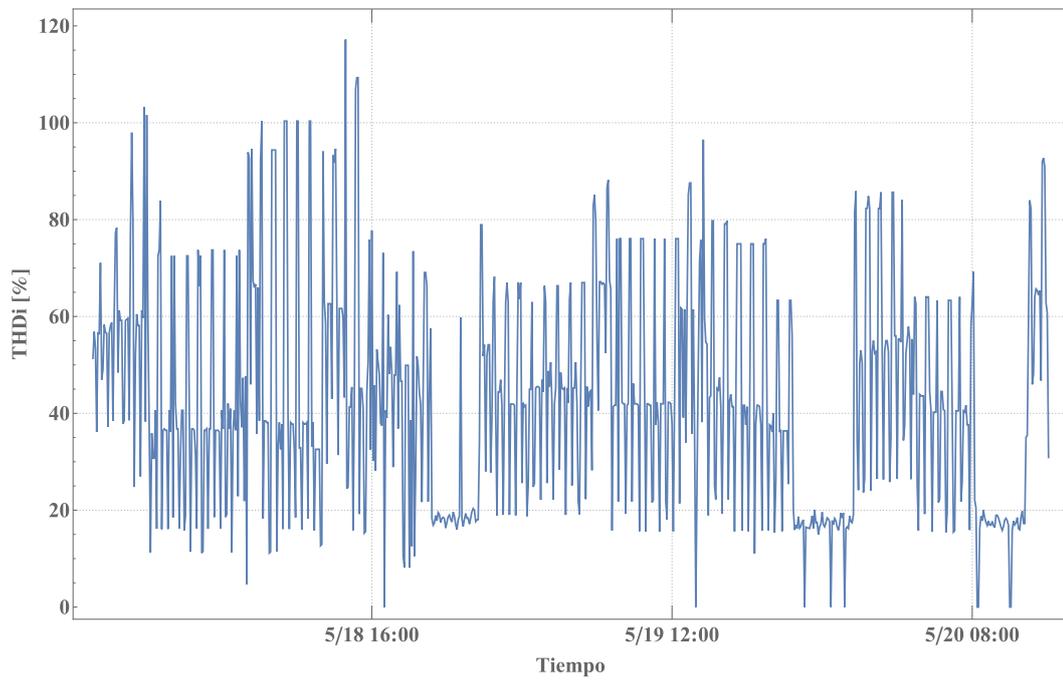
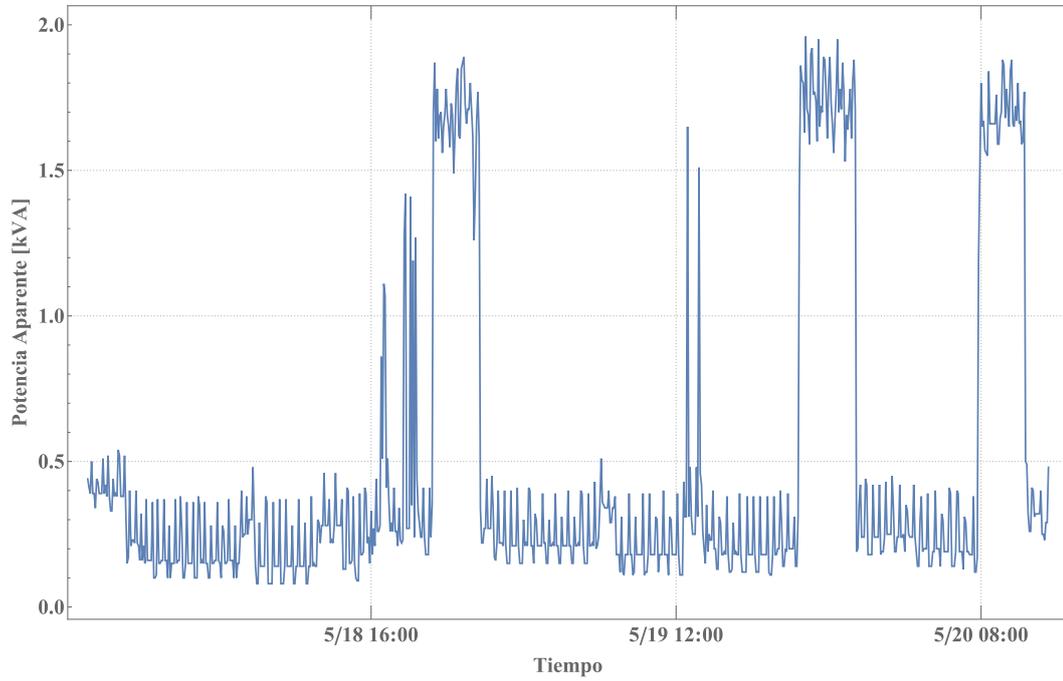


Vivienda 06



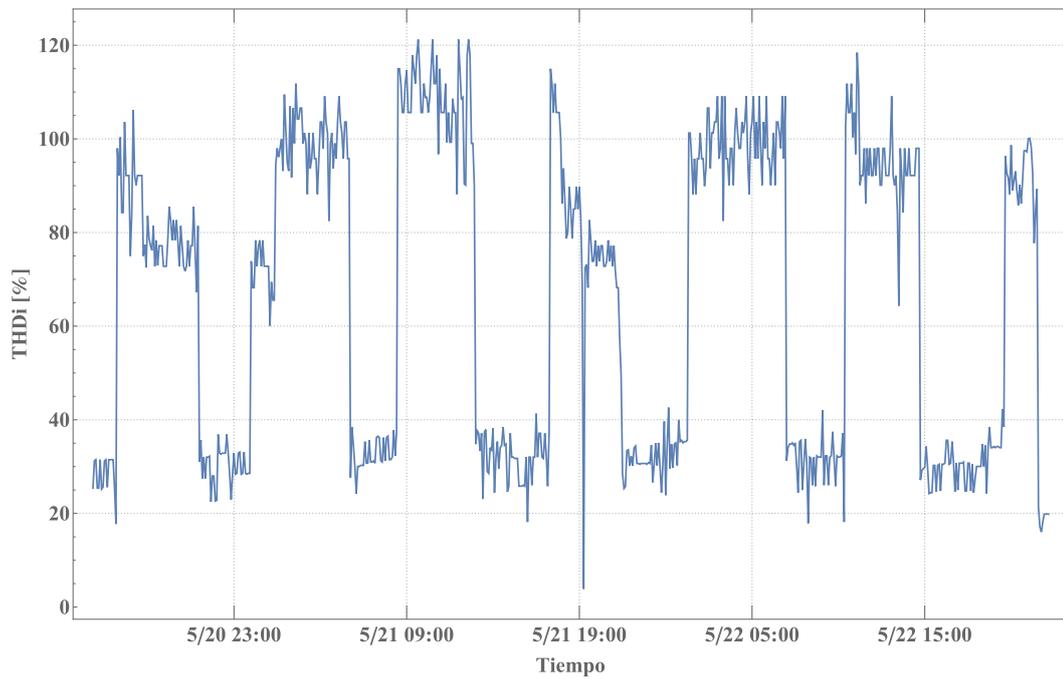


Vivienda 07



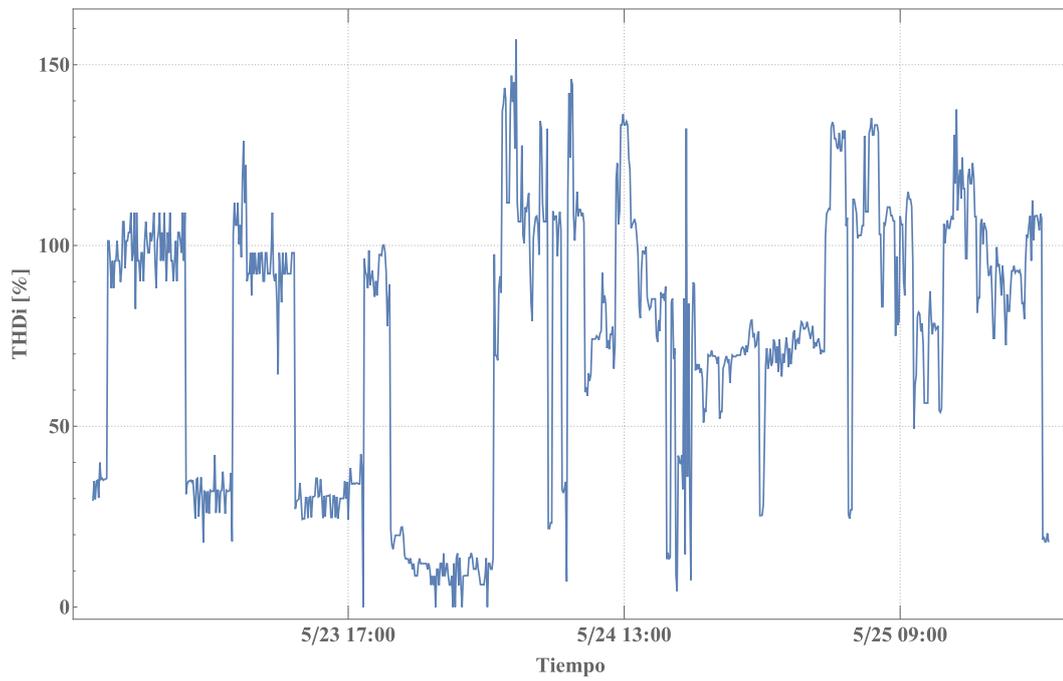
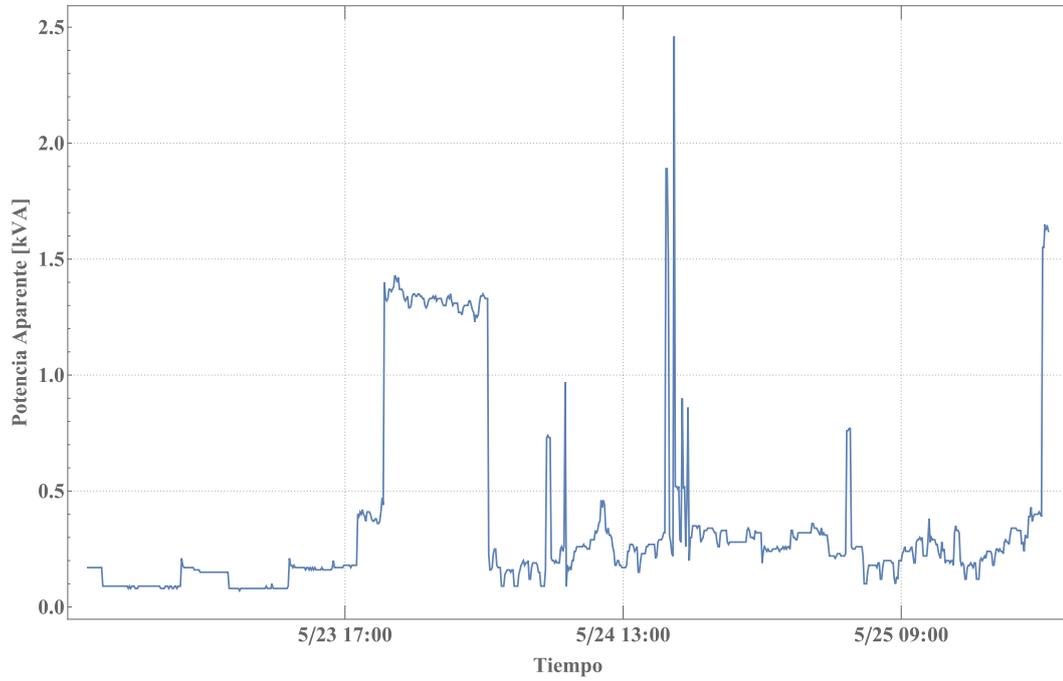


Vivienda 08



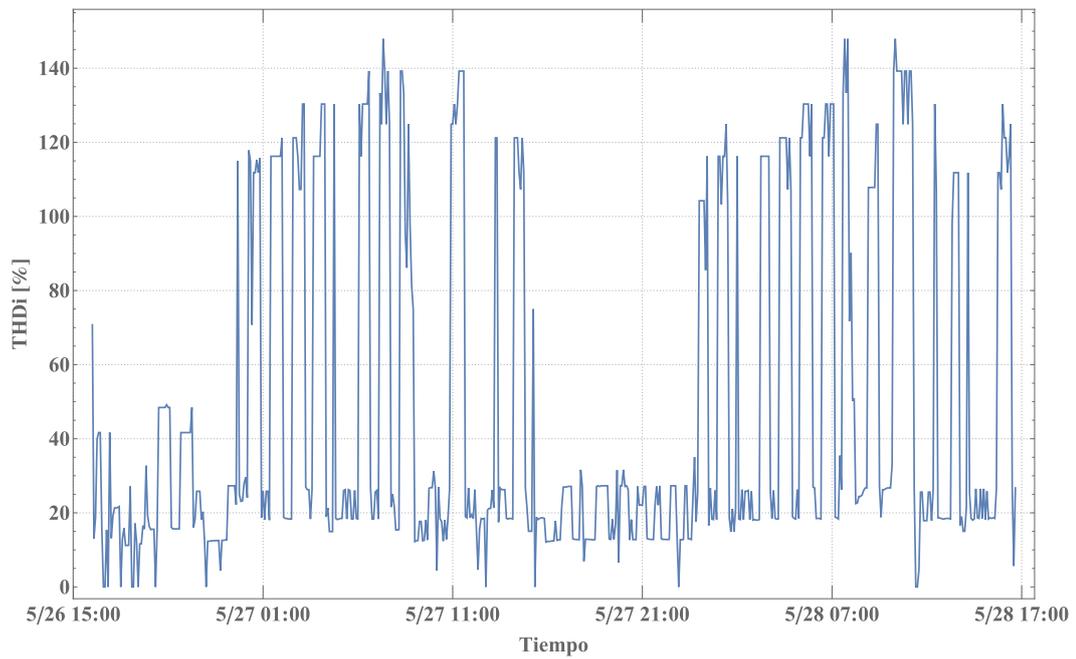
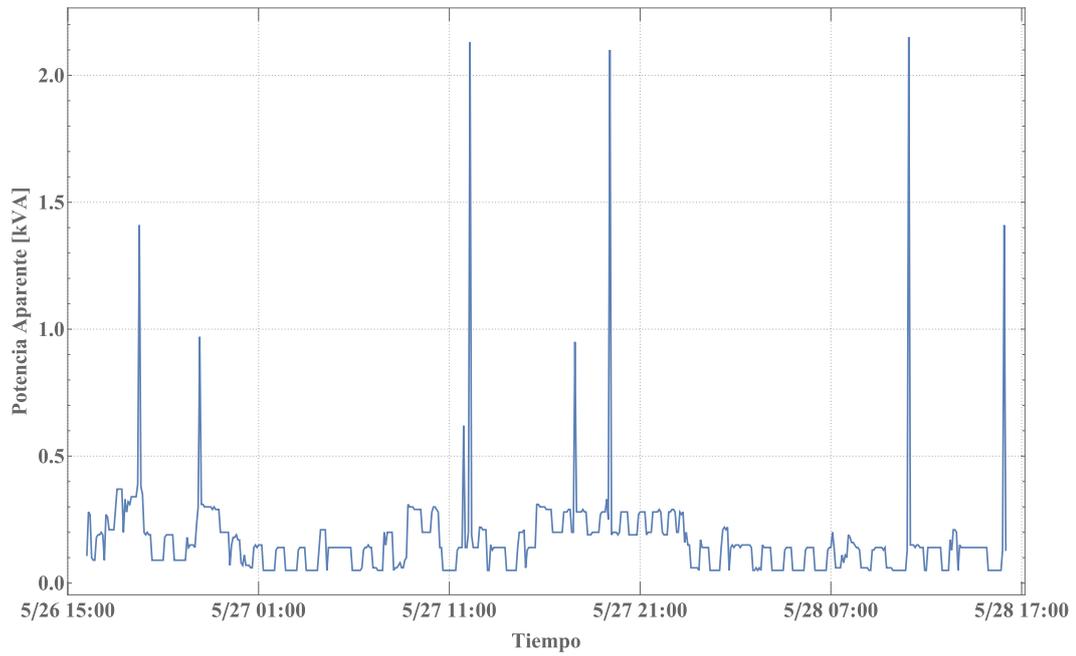


Vivienda 09



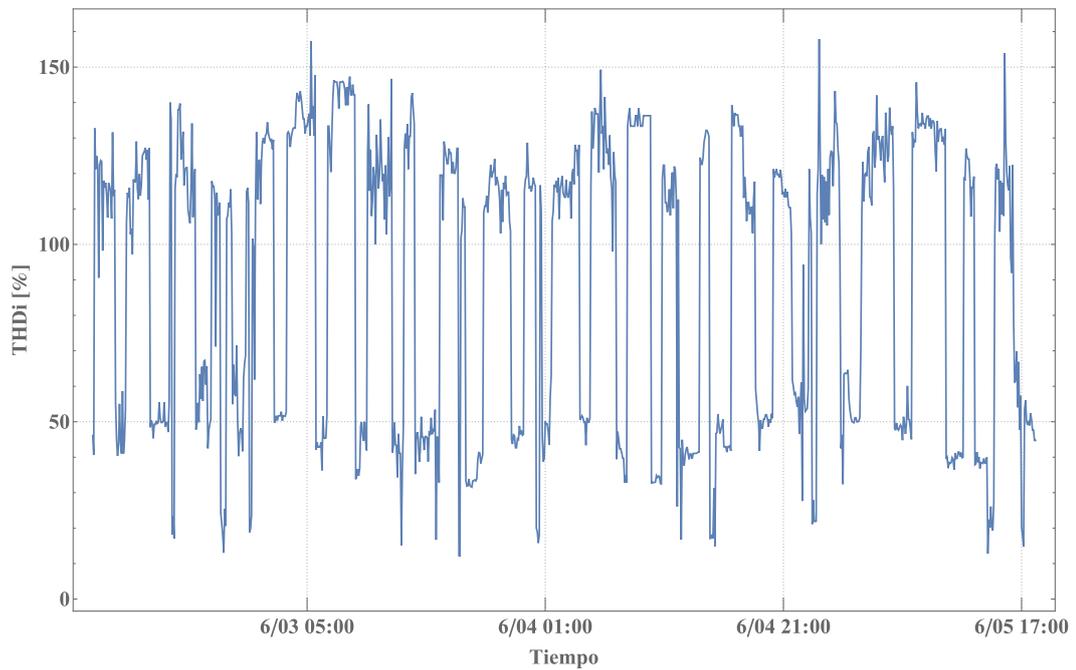
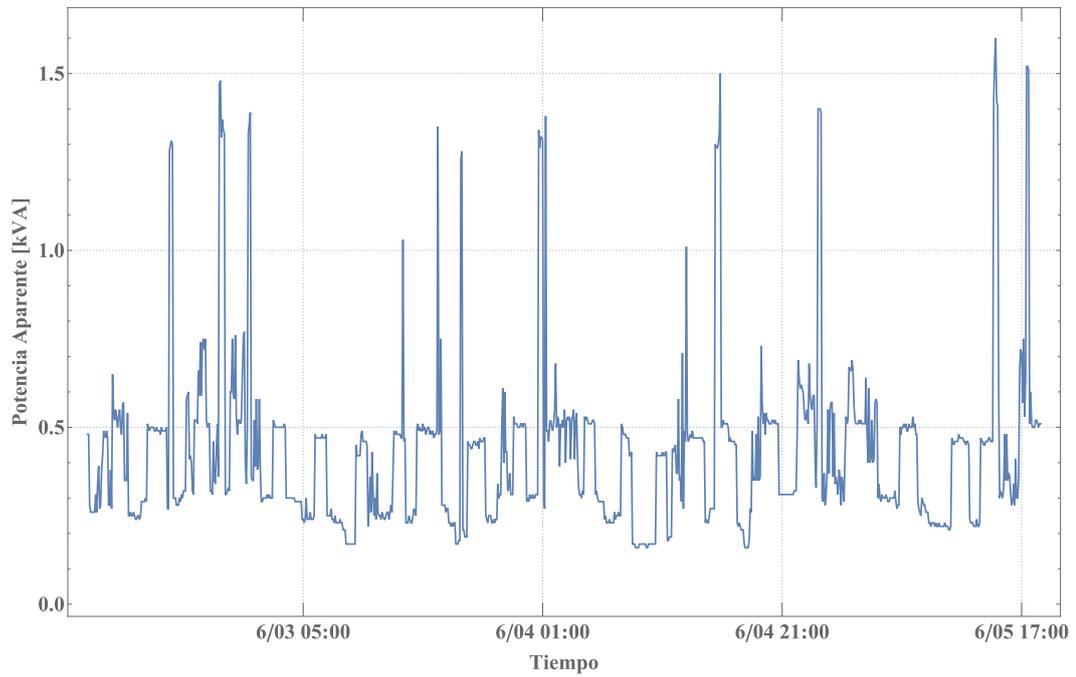


Vivienda 10



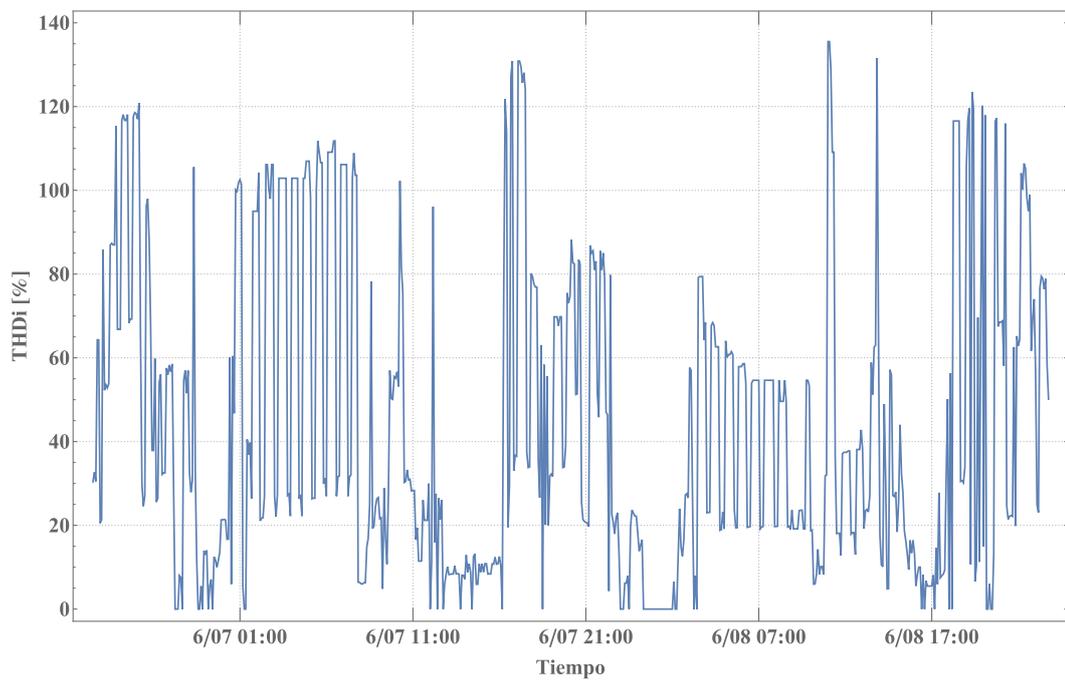
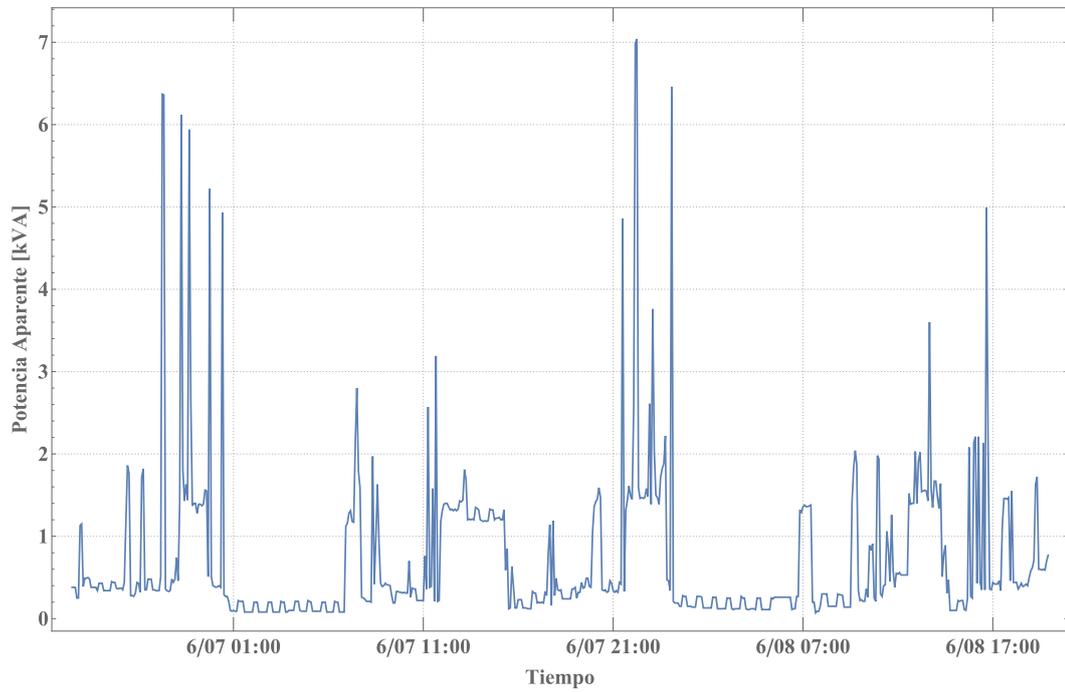


Vivienda 11





Vivienda 12





ANEXO IX: Macros implementadas en VBA para las mediciones domiciliarias

En este Anexo, se detalla la implementación de macros en VBA diseñadas específicamente para automatizar tareas relacionadas con las mediciones domiciliarias. Las mismas desempeñaron las tareas de conversión de formatos y combinación de datos. A continuación, se presenta el código VBA junto con explicaciones resumidas sobre su aplicación en el contexto de este estudio.

Conversión de formatos de archivos

Para la conversión de los formatos de archivos “.xls” en “.xlsx” se implementó la siguiente macro desde VBA que automatiza dicho proceso entre los formatos citados. Además, se encarga de almacenar los nuevos archivos (.xlsx) en la misma ubicación y organizar los archivos originales (.xls) en una nueva carpeta denominada "Archivos Originales" a modo de respaldo.

```
Sub A1_xls_to_xlsx()  
    Dim fName As String, fPath As String, wb As Workbook  
    Files = Application.GetOpenFilename("Excel Files (*.xls), *.xls", , "Seleccionar xls", , True)  
    For Each file In Files  
        Workbooks.OpenText file, origin:=xlWindows, startrow:=1, DataType:=xlDelimited  
        Set wb = ActiveWorkbook  
        fName = wb.Name  
        ActiveWorkbook.SaveAs Filename:=Left(fName, InStr(fName, ".") - 1) & ".xlsx",  
FileFormat:=xlOpenXMLWorkbook 'Retorna la posición del "." en el nombre del archivo  
        ActiveWorkbook.Close True  
    Next  
    fPath = ThisWorkbook.path 'Ruta del archivo  
    If Right(fPath, 1) <> "\" Then fPath = fPath & "\"  
    Set FSO = CreateObject("Scripting.FileSystemObject")  
    Mkdir fPath & "Archivos Originales"  
    FSO.MoveFile fPath & "*.xls", fPath & "Archivos Originales"  
End Sub
```

Combinación de archivos

Esta macro combina cada hoja de los diferentes archivos “.xlsx”, presentes en la misma carpeta, en un nuevo y único libro de cálculo llamado “Datos Recopilados”.

```
Sub A2_Join_Book()
```



```

Dim fName As String, fPath As String, wb As Workbook
Set wb_destino = Workbooks.add
fPath = ThisWorkbook.path
If Right(fPath, 1) <> "\" Then fPath = fPath & "\"
fName = Dir(fPath & "*.xlsx")
Do
  If Right(fName, 5) = ".xlsx" Then
    Set wb_origen = Workbooks.Open(fPath & fName)
    i = wb_destino.Sheets.count
    wb_origen.Sheets("Ark1").Copy After:=wb_destino.Sheets(i)
    Worksheets(i + 1).Name = Left(fName, Len(wb_origen.Name) - 5)
    wb_origen.Close Savechanges:=False
    Kill (fPath & fName)
  End If
  fName = Dir
Loop While fName <> ""
wb_destino.SaveAs Filename:=fPath & "Datos Recopilados.xlsx", FileFormat:=51 'Código para la
instrucción: xlOpenXMLWorkbook
End Sub

```

Resumen

A modo de visualizar lo anteriormente descrito, se presenta la Figura A.12 donde se muestran los archivos originales descargados del instrumento de medición y el archivo final en formato .xlsx. El mismo, luego se exporta a Mathematica para el filtrado y análisis de sus datos.



Figura A.12. Resultados luego de cada ejecución de macro.



ANEXO X: Algoritmos relevantes implementados desde Mathematica

En el presente Anexo, se detallan los algoritmos implementados desde el software Wolfram Mathematica 12.0 para el procesamiento y análisis de los datos obtenidos de las diferentes mediciones en las viviendas.

La utilización de Mathematica adquiere gran importancia debido a que es necesario analizar múltiples mediciones donde cada una cuenta con numerosos parámetros eléctricos a evaluar. Estas funciones permiten automatizar y sistematizar el procesamiento de datos, simplificando en gran medida la tarea de analizar la información y reduciendo el error humano.

Importar datos

La siguiente función se utiliza para importar datos desde un archivo Excel ubicado en una ruta específica. En la misma, se puede seleccionar la hoja de cálculo (a través de *parameter*) y la columna de la cual se desea extraer los datos (mediante *column*). Adicionalmente, elimina la primera fila (encabezados de columna) y devuelve la columna seleccionada como una lista o vector. Esta función sirve para importar la totalidad de los parámetros eléctricos analizados de las diferentes viviendas que se hallan almacenados en diferentes archivos “.xlsx”.

```
data[parameter_, column_] :=  
Transpose[Drop[Import["ruta del archivo "], {"Sheets", parameter}], 1][[column]];
```

Filtrado de datos

El siguiente algoritmo filtra el conjunto de datos obtenidos de las mediciones domiciliarias (*data*) para cada vivienda. De esta manera, elimina los valores atípicos basados en percentiles (se elimina en total solo el 1% de los valores extremos) y almacena los resultados en una nueva lista (*list*). Cada elemento de esta contendrá entonces la totalidad de los valores del parámetro eléctrico a analizar y graficar (THD en corriente, intensidad de corriente, factor de potencia, potencia aparente, tensión o THD en tensión).

```
list = {};  
{aux = Cases[data[parameter, column], _Real],  
σp = Quantile[aux, 0.995],  
σm = Quantile[aux, 0.005],  
For[j = 1, j <= Length[aux], j++,  
{If[aux[[j]] < σm || aux[[j]] > σp,  
aux = Delete[aux, j]}],  
AppendTo[list, aux]}
```



Análisis de datos

Para hallar los valores de tendencia central y las medidas de dispersión de los diferentes parámetros eléctricos se emplearon los siguientes comandos:

```
Length[]  
Mean[]  
StandardDeviation[]  
Median[]  
Quantile[]  
Max[]  
Min[]
```

Relación entre variables

El siguiente fragmento de código filtra y retiene los puntos pertenecientes a cada medición particular dentro de un rango específico (se consideran el 95% de los registros, descartando por igual los valores extremos tanto por la derecha como por la izquierda). Además, el mismo sirve para generar una sola lista con la totalidad de las doce mediciones efectuadas y combinar los valores correspondientes de dos parámetros eléctricos. Esto es, THDi vs corriente, factor de potencia vs THDi o potencia aparente vs factor de potencia.

```
pointsT={};  
Table[  
{list1= Cases[data[k, "Parameter1"], _Real];  
list2= Cases[data[k, "Parameter2"], _Real];  
points = Sort[Transpose[{list1, list2}]]];  
σp = Quantile[points, 0.975];  
σm = Quantile[points, 0.025];  
points = Select[points, And @@ Thread[σm ≤ # ≤ σp] &];  
AppendTo[pointsT, points]],  
{k, 1, 12, 1}]
```



Realización de gráficas

Los algoritmos para realizar la totalidad de las gráficas presentes en el trabajo (histograma, diagrama de caja y bigote, gráfico de puntos, funciones, etc.) se realizaron a partir de los siguientes comandos básicos:

Histogram[] → Considerando los siguientes parámetros importantes: {"Outliers", ""}, {"MeanMarker", 0.5}

BoxWhiskerChart[] → Considerando el siguiente parámetro importante: "FreedmanDiaconis"

ListPlot[]

Plot[]

En los mismos, se configuraba el estilo apropiado (tamaño, fuente, colores, etc.) y luego se exportaba el gráfico resultante mediante *Export* como un archivo “.svg” (por sus siglas en inglés, gráficos vectoriales escalables).

ANEXO XI: Análisis de corrientes armónicas inyectadas de acuerdo a la resolución ENRE 0099/1997

		MED01	MED02	MED03	MED04	MED05	MED06	MED07	MED08	MED09	MED10	MED11	MED12
-	Corriente de Distorsión [A]	0,66	0,31	0,68	0,66	0,51	1,00	1,32	0,34	1,11	0,23	1,63	1,59
Orden	Intensidad de Corriente [A]												
5	2,28	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
7	1,54	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	NC	NC
11	0,66	C	C	NC	C	C	NC	NC	C	NC	C	NC	NC
13	0,42	NC	C	NC	NC	NC	NC	NC	C	NC	C	NC	NC
17	0,26	NC	C	NC	NC								
19	0,24	NC	C	NC	NC								
23	0,20	NC											
25	0,18	NC											
> 25	0,16	NC											
3	4,60	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
9	0,80	C	C	C	C	C	NC	NC	C	NC	C	NC	NC
15	0,30	NC	C	NC	NC								
21	0,21	NC											
> 21	0,17	NC											
2	2,16	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
4	0,86	C	C	C	C	C	NC	NC	C	NC	C	NC	NC
6	0,60	NC	C	NC	NC	C	NC	NC	C	NC	C	NC	NC
8	0,46	NC	C	NC	NC	NC	NC	NC	C	NC	C	NC	NC
10	0,37	NC	C	NC	NC	NC	NC	NC	C	NC	C	NC	NC
12	0,31	NC	C	NC	C	NC	NC						
> 12	0,26	NC	C	NC	NC								

C: Cumple con lo establecido en la Resolución ENRE 0099/1997 || NC: No es Concluyente el valor para determinar si cumple la Resolución ENRE 0099/1997

Filtro de 3r armónico FB3

Los filtros FB3 son filtros de bloqueo del 3 armónico, diseñados para la reducción de corrientes de neutro en instalaciones con ordenadores, impresoras, luminarias, dimmers y otros tipos de cargas monofásicas conectadas entre fase y neutro.

En particular los tipos FB3_50PC6 y FB3_60PC6 están especialmente diseñados para la conexión de cargas informáticas como ordenadores, impresoras, escáners, etc.

Las ventajas de empleo del FB3_xxPC6 son:

- Reducción del tercer armónico hasta un 90%
- Reducción significativa de otros armónicos
- Reducción de la corriente del neutro absorbida
- Disminución de pérdidas en la instalación.
- Reducción de interferencias
- Mejora del factor de potencia

CONEXIÓN

Los filtros FB3_xxPC6 no requieren ningún tipo de conexión exterior. Simplemente enchufe la toma de corriente a red, entre fase y neutro, enchufe las cargas a las tomas de corriente del FB3 y accione el interruptor magnetotérmico del frontal

3rd harmonic filter FB3

FB3 filters are blocking filters tuned at 3rd harmonic. They are designed to reduce of neutral currents produced by single phase loads, like computers, printers, electronic ballasts, dimmers and other single phase loads connected between phase and neutral.

The particular design of types FB3_50PC6 and FB3_60PC6 is intended for the connection of computers and accessories like printers, scanners, etc.

The advantages of using FB3_xxPC6 are:

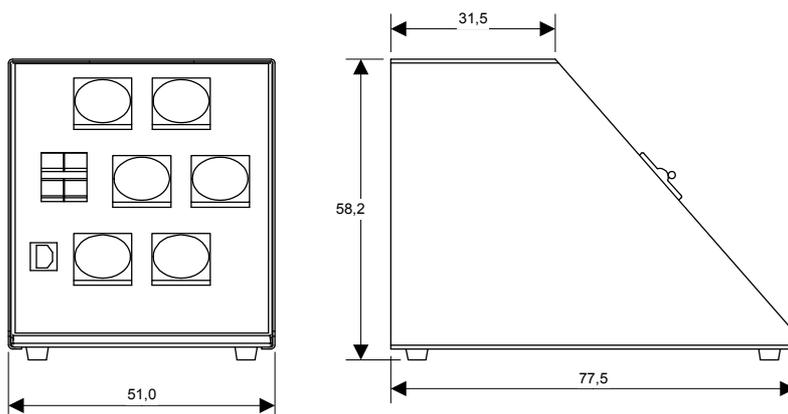
- Reduction of 3rd harmonic up to a 90%
- Significant reduction of other harmonics
- Neutral current reduction
- Decrease of losses in the distribution line.
- Interference reduction
- Power factor improvement

CONNECTION

FB3_xxPC6 filters do not require any external connection. Simply plug the device to mains (phase – neutral), using the pluggable cord and then plug the different loads to the FB3 sockets. Once the loads are plugged, switch ON the main switch at the front side

CARACTERISTICAS TECNICAS / TECHNICAL CHARACTERISTICS

Tensión de alimentación : Fase - Neutro <i>Supply voltage : Phase to Neutral</i>	220/240 V
Frecuencia <i>Frequency</i>	FB3-50-6PC , 50Hz FB3-60-6PC , 60Hz
Corriente máxima de carga permanente (en el conjunto de tomas) <i>Maximum permanent load current (all plugs together)</i>	6A
Máxima corriente de sobrecarga <i>Maximum overload current</i>	10A (1 min seguido al menos de 5 min a nominal) <i>(1 min followed by minimum 5 min at rated current)</i>
Condiciones ambientales / Environment conditions	
Temperatura de trabajo <i>Working temperature</i>	-10° a +50 °C
Humedad relativa máxima sin condensación <i>Maximum relative humidity without condensation</i>	95 %.
Grado de protección IP <i>IP degree of protection</i>	IP23 (acc. EN 60.529)

DIMENSIONES / DIMENSIONS

Servicio Técnico

En caso de cualquier duda de funcionamiento o avería del equipo consulte www.circutor.es o avise al servicio técnico de Circutor S.A

Vial Sant Jordi, s/n
08232 - Viladecavalls
tel - 93 745 29 00 & fax - 93 745 29 14
E-mail : central @ circutor.es

Technical Service

For any inquiry or in case of malfunction, see www.circutor.es or contact with technical service of Circutor S.A

Vial Sant Jordi, s/n
08232 - Viladecavalls (SPAIN)
Telephone: + 34 - 93 - 7452900 FAX: + 34 - 93 - 7452914
E-Mail:central@circutor.es



FB3-5-06

FB3-5-06, Filtro del tercer armónico para red monofásica (50 Hz)

Código: R78101.

- > Sistema: Monofásico
- > Frecuencia (Hz): 50
- > Corriente máx. neutro: 6

Descripción

Los filtros FB3 son filtros de bloqueo del 3º armónico, diseñados para la reducción de dicho armónico en instalaciones con cargas monofásicas distorsionantes.

Aplicación

Para cargas monofásicas tales como ordenadores personales, pantallas TFT, proyectores, etc.



FB3-5-06

Filtro del tercer armónico

Código: R78101.

Especificaciones

Alimentación en alterna

Frecuencia	50 HZ (60 Hz bajo demanda)
Tensión nominal	220/240 Vca F-N

Características mecánicas

Tamaño (mm) ancho x alto x fondo	204 x 310 x 233 (mm)
Peso Neto (kg)	8

Características ambientales

Grado de protección	IP 23 (UNE-EN 60529)
Humedad relativa (sin condensación)	95%
Temperatura de trabajo	-10 ... +50 °C

Características eléctricas

Corriente máxima transitoria	10 A (1 min seguido al menos de 5 min a nominal)
------------------------------	--------------------------------------------------

Circuito de medida de corriente

Sobrecarga admisible	6 A (en el conjunto de tomas)
Sobrecarga permanente	6 A (en el conjunto de tomas)

型号类别 / IDENTIFICATION

产品型号	P-No.	SKS-HFI-0010-CLB/2
产品系列号	Model family	HFI
滤波器类别	单相谐波滤波器	
Filter type	Single Phase Harmonic Filters	



技术参数 / TECHNICAL DATA

相数	No. of phase		Single Phase
额定电压	Rated voltage	[V]	220
电压范围	Voltage range	[V]	198-242
额定频率	Rated frequency	[Hz]	50±5
配电线路要求	Requirements to Distribution line		According to EN 61000-2-4 Class III 符合EN 61000-2-4 Class III
额定电流	Rated current	[A]	10
适配电机功率*	Nominal motor load*	[KW]	2.2
过载能力	Overrating capacity	[%]	150% for 60sec. once per hour. 150% 过载持续60秒, 每小时一次
THDi	THDi	[%]	20% APPRO. 20% 左右
防护等级	IP Class		IP20
耐压测试	Test voltage	[kV]	3,0

运行条件 / TECHNICAL DATA

环境温度	Ambient tempatemper	[°C]	-10....+40
温升等级	Class ISO °C VDE		F
冷却方式	Type of cooling		AN
风速要求	Wind speed	[m/s]	-

执行标准 / STANDARDS

类型 / TYPE	标志 / SIGNS
EN 61 558 Teil 1	CE
EN 61 558 Teil 20	

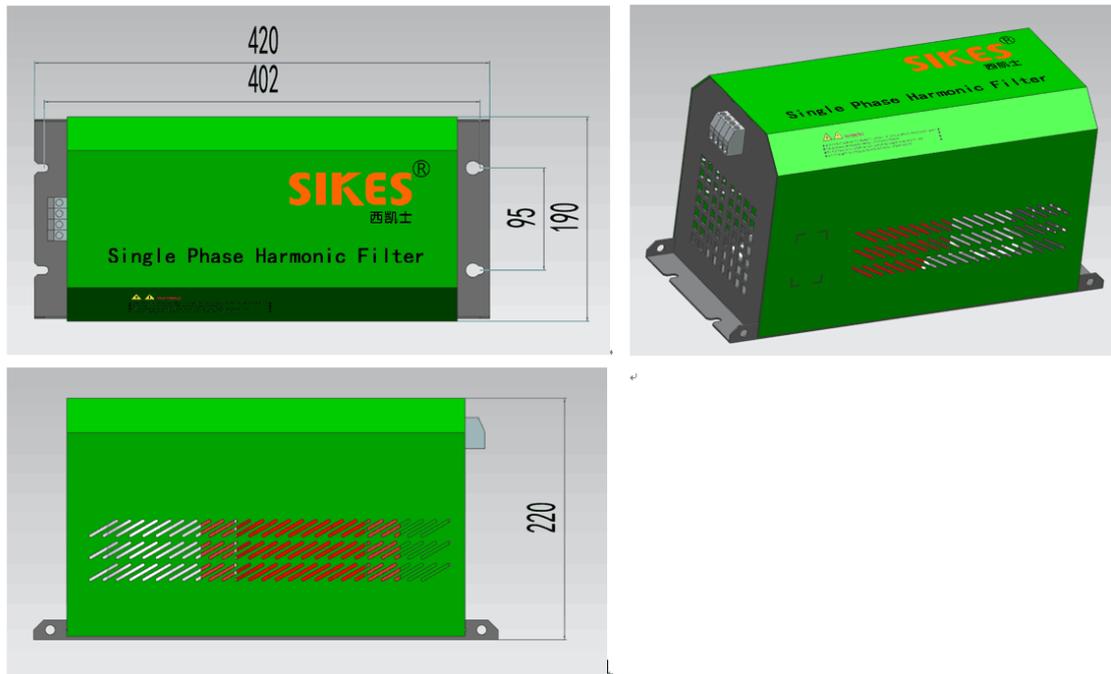
注释 / NOTES

典型技术规格
可能因材料和生产公差而有所不同。
*=IE2 假定电机效率和逆变器效率> 95%

Technical specifications are typical.
They can vary due to material and production tolerances.
*=IE2 motor efficiencies and inverter efficiency >95% assumed

外形尺寸及安装尺寸 / Dimensions and mounting dimensions

All in mm



重量 / WEIGHT

重量	Weight	[kg]	21
----	--------	-------	----

连接端子 / TERMINALS

输入	Input	[L, N]
输出	Output	[L',N']

注释 / NOTES

图纸中的技术规格我司没有义务保证100%准确。
一般公差符合DIN 7168-m。
如有变更,恕不另行通知

Technical specifications in the drawing are without obligation.
General tolerance to DIN 7168-m.
Subject to change.

ANEXO XIII: Diseño y cálculo preliminar de un filtro pasivo

En este Anexo, se presenta una primera aproximación para abordar la compensación del factor de potencia, inicialmente mejorando el factor de desplazamiento, seguido por la mitigación de la presencia de armónicos mediante la implementación de un filtro pasivo. Se tiene como referencia el proyecto final “Estudio de la calidad de la Energía Eléctrica en el Complejo Universitario (UNMDP)” de Juan B. Carelli y Juan P. Dadan y las publicaciones científicas: “Cálculo de parámetros de filtros pasivos de armónicos” en la revista *Energética* de Ignacio P. Abril e “Implementación de un filtro pasivo para compensación armónica y corrección del factor de potencia” en la revista *Científica* de Leonardo Astudillo-Mora, Alejandro Vásquez-Vega y Juan Rojas-Serrano.

Se parte considerando la vivienda con el peor factor de potencia promedio hallado, esta corresponde a la medición 11 del Capítulo 4. La misma arroja los siguientes valores de media y mediana:

$$\overline{FP} = 0,675 \wedge \widetilde{FP} = 0,666$$

$$\bar{S} = 429 \text{ VA} \wedge \tilde{S} = 420 \text{ VA}$$

En este caso, tanto la media como la mediana adoptan valores muy similares por lo que, a fines de cálculo, se empleara la media.

Como primer paso, se debe calcular la cantidad de compensación capacitiva necesaria para alcanzar el factor de potencia objetivo. Para esto es útil visualizar el triángulo de potencias, asumiendo como una primera aproximación un comportamiento lineal de las cargas, de acuerdo con la Figura A.4:

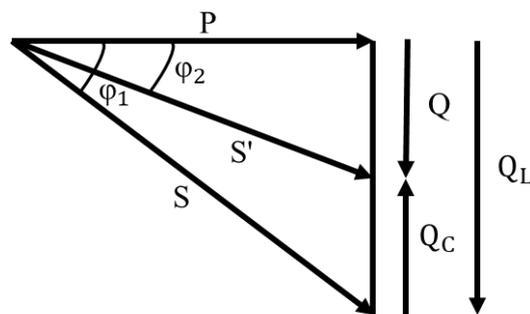


Figura A.4. Triángulo de corrección de factor de potencia. Fuente: elaboración propia.

A partir de dicho triángulo, es posible deducir la siguiente relación:

$$P = S * \text{Cos}(\varphi_1)$$

$$Q_C = P * (\text{Tan}(\varphi_1) - \text{Tan}(\varphi_2))$$

Donde P es la potencia activa que demanda la instalación, φ_1 es el ángulo de desplazamiento inicial y φ_2 es el ángulo objetivo, en este caso, se adopta un valor conservador donde $\text{Cos}(\varphi_2)$ es igual a 0,95. Por lo tanto:

$$Q_C = 221,35 \text{ VAR}$$

Seguidamente, la impedancia del capacitor monofásico deberá ser:

$$X_C = \frac{V^2}{Q_C} = 238,99 \Omega$$

Siendo necesario entonces un capacitor de capacitancia:

$$C = \frac{1}{2 \pi * f * X_C} * 10^6 = 13,32 \mu\text{F} \cong 12 \mu\text{F}$$

En esta primera aproximación se considera un equipo de compensación fijo a la red, por lo que a baja carga y/o cuando el factor de potencia de la instalación ya es elevado, se puede tener una inyección de potencia reactiva a la red. Este fenómeno también es perjudicial ya que, llegado el caso, puede resultar en elevaciones de tensión por encima de los márgenes.

Para calcular un filtro pasivo sintonizado que cumpla la doble función, es decir, de compensación de potencia reactiva y trampa para una determinada componente armónica, el procedimiento es similar, pero se debe hallar además el valor de la reactancia inductiva.

Primeramente, se calcula la potencia reactiva a compensar de la misma manera que en el caso anterior, sin embargo, el valor de la impedancia capacitiva es función de n, que es el orden del armónico a ser filtrado.

$$X_C = \frac{V^2}{Q_C} * \left(\frac{n^2}{n^2 - 1} \right)$$

En este caso, se sintonizará el filtro para el tercer armónico por ser el más usual e importante en las cargas residenciales de acuerdo a las mediciones realizadas en el Capítulo 3.



$$X_C = 268,87 \Omega$$

$$\rightarrow C = \frac{1}{2 \pi * f * X_C} * 10^6 = 11,84 \mu\text{F} \cong 12 \mu\text{F}$$

La reactancia inductiva del filtro será tal que a la frecuencia a filtrar se cumpla:

$$n = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \therefore X_L = \frac{X_C}{n^2} = 29,87 \Omega$$

$$\rightarrow L = \frac{X_L}{2 \pi * f} * 10^3 = 95,09 \text{ mH} \cong 100 \text{ mH}$$

Se debe considerar que el inductor no es ideal y presenta cierta resistencia. Algunos autores optan por asumir que la misma se encuentra entre la 50va y las 150vas partes de la reactancia inductiva. Mientras que, en otros casos, definen el factor de calidad (Q) del inductor (relación entre la impedancia inductiva y la propia resistencia) como:

$$Q = n * \frac{X_L}{R} \rightarrow 20 \leq Q \leq 50$$

A fines de poder hallar la resistencia se adopta un factor de calidad igual a 50:

$$\therefore R = n * \frac{X_L}{Q} = 1,79 \Omega \cong 1,8 \Omega$$

Concluyendo, los valores de una primera aproximación de los parámetros de un filtro sintonizado para la tercera armónica son:

$$C \cong 12 \mu\text{F}$$

$$L \cong 100 \text{ mH}$$

$$R \cong 1,8 \Omega$$

De esta manera, el esquema de conexión del filtro en la vivienda y el comportamiento teórico de su impedancia se muestran en la figura A.5:

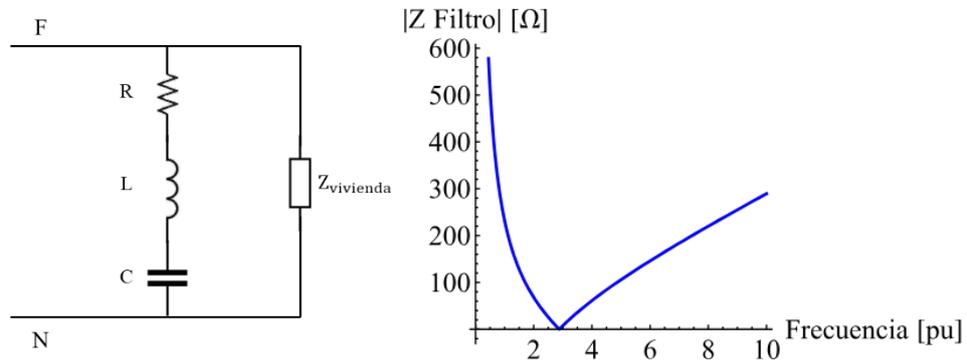


Figura A.5. Esquema de conexión y comportamiento del módulo de impedancia del filtro pasivo. Fuente: elaboración propia.

Se observa que la impedancia mínima se da levemente por debajo del tercer armónico, más precisamente a una frecuencia de 144 Hz, esto está dentro de los límites admisibles ya que la sintonización se suele ajustar aproximadamente entre un 3% y un 15% por debajo de la frecuencia armónica a filtrar.

Es importante destacar que el filtro pasivo se encuentra permanentemente conectado a la red, lo que significa que enfrenta los mismos problemas que la corrección del factor de desplazamiento, además de generar un costo adicional debido a la disipación de energía en la resistencia. Sin embargo, se calcula esta energía para dejar en evidencia que el mayor inconveniente de adoptar un filtro son los costos iniciales de diseño e inversión.

$$\text{Pérdida} = \left(\frac{V}{|Z_{\text{filtro}}|} \right)^2 * R$$

Se debe saber que el primer término corresponde a la intensidad de corriente que atraviesa el filtro, siendo su impedancia a la frecuencia fundamental igual a 232 Ω, mientras que el segundo término se refiere exclusivamente a la resistencia asociada.

$$\text{Pérdida} = 1,77 \text{ W} \therefore \text{Energía} = 1,77 \text{ W} * 24 \text{ hs} * 30 \text{ días} \cong 1,27 \text{ kWh}$$

Considerando que el consumo mensual promedio de una vivienda oscila los 250 kWh¹, la energía asociada a la instalación del filtro representaría apenas un poco más del 0,5%.

¹ Casas, X. (04 de agosto de 2022). Cuánta energía consumen los electrodomésticos del hogar y cuál es el nuevo límite para evitar perder los subsidios. *Infobae*. <https://www.infobae.com/economia/2022/08/04/los-subsidios-de-luz-tendran-tope-en-400-kwh-como-saber-cual-es-consumo-mensual/>