

Impacto de la Iluminación Residencial Eficiente en la Calidad de la Energía de una Red de Distribución*

Impact of Efficient Residential Lighting on Power Quality of a Distribution Network

Artículo de investigación científica - Fecha de Recepción: 23 de julio de 2014 - Fecha de Aceptación: 11 de noviembre de 2014

Jorge Luis Strack

Ingeniero Electromecánico. Universidad Nacional de Mar del Plata. Mar del Plata (Argentina). jlstrack@fi.mdp.edu.ar

Juan Antonio Suárez

Ingeniero Electricista. Universidad Nacional de Mar del Plata. Mar del Plata (Argentina). jsuarez@fi.mdp.edu.ar

Guillermo Fabián Di Mauro

Ingeniero Electricista. Especialista en Seguridad Laboral. Universidad Nacional de Mar del Plata. Mar del Plata (Argentina). gdimauro@fi.mdp.edu.ar

Susana Beatriz Jacob

Magíster en Recursos Naturales y Medio Ambiente. Ingeniera Electricista. Universidad Nacional de Mar del Plata. Mar del Plata (Argentina). sujacob@fi.mdp.edu.ar

Para citar este artículo / To reference this article:

J. Strack, J. Suárez, G. Di Mauro and S. Jacob, "Impacto de la Iluminación Residencial Eficiente en la Calidad de la Energía de una Red de Distribución," *INGE CUC*, vol. 10, no. 2, pp. 9–19, 2014.

Resumen: En este trabajo se analiza el impacto que produciría en las redes de distribución eléctrica el reemplazo masivo de lámparas incandescentes por las denominadas lámparas de bajo consumo, entre las cuales se destacan las LFC (Lámparas Fluorescentes Compactas) y las LED (Light Emitting Diode - Diodo Emisor de Luz). Se prevé a corto y mediano plazo que estas tecnologías emergentes reemplazarán a las lámparas incandescentes, puesto que desde junio de 2011 Argentina (siguiendo normas implementadas en otros países) puso en vigencia la prohibición de la venta de lámparas incandescentes de potencia superior a 25 W. Se modeló y simuló una red de distribución residencial y se investigó la influencia que tendría en los índices de calidad de la energía el incremento progresivo de lámparas con alto contenido de componentes armónicos. Los niveles de distorsión podrían superar los límites establecidos por la normativa vigente, pero no alcanzarían valores muy excesivos.

Palabras clave: Iluminación residencial, LED, LFC, calidad de la energía, red de distribución.

Abstract: This paper analyzes the possible impact of a massive replacement of incandescent lamps for power saving lamps -standing out CFLs (Compact Fluorescent Lamps) and LEDs (Light Emitting Diode) among them- on electric distribution networks. It is expected that, in a short or medium term, these emerging technologies will replace the incandescent lamps, inasmuch that since June 1, 2011, Argentina, following rules implemented in other countries, started banning the sale of incandescent lamps of 25 W or greater. A residential distribution network was modeled and simulated, and the influence on the power quality indices of the progressive increase of lamps with high harmonic components was investigated. Distortion levels could exceed the limits established by the regulations in force, but would not reach very excessive values.

Keywords: Residential lighting, LED, LFC, Power quality, Distribution network.

* Artículo de Investigación Científica derivado del proyecto de investigación titulado "Calidad de la Energía Eléctrica" de la Universidad Nacional de Mar del Plata (Argentina), con vigencia 2012-2014 y 2014-2016.

I. NOMENCLATURA

A. prim.: arrollamiento primario
A. sec: arrollamiento secundario
AT: alta tensión
ATP: Alternative Transients Program
BT: baja tensión
CS: coeficiente de simultaneidad
E1, E2, E3: escenario 1, 2 y 3 respectivamente
Ext. de línea: extremo de la línea de distribución en BT
FD: factor de disposición
FFT: transformada rápida de Fourier
FP: factor de potencia verdadero
I: corriente
Id.: identificación
Isc: máxima corriente de cortocircuito en el PCC
Im: máxima corriente demandada por la carga en el PCC
Ifund: corriente fundamental
In: armónico de corriente de orden n
Irms: corriente eficaz total
LED: diodo emisor de luz
LFC: lámpara fluorescente compacta
MT: media tensión
P: potencia activa
PCC: punto de conexión común
THDI: distorsión armónica total de corriente
THDU: distorsión armónica total de tensión
U: tensión
Z: impedancia

II. INTRODUCCIÓN

Desde fines de 2006, al menos 37 países (como Australia, Canadá, Colombia, Cuba, Rusia y países de la Unión Europea, entre otros) han fijado políticas tendientes a la prohibición de la producción, importación y venta de lámparas incandescentes. Otros países, como China, están considerando su adopción [1]. Los países comprometidos con esta política representan la mayoría de las economías de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) y suman más de un tercio de la demanda mundial de lámparas incandescentes.

En Argentina, a partir del 1° de junio de 2011 se ha implementado la Ley N° 26.473, que establece la mencionada restricción, quedaron excluidas aquellas lámparas cuya potencia es menor a 25 [W] o tensión nominal menor a 50 [V], y las que ingresen al país en carácter de importación temporaria y en tránsito [2].

Estas medidas implican que a mediano plazo la iluminación residencial será provista principalmente por lámparas LFC y LED, y por las últimas, probablemente en modo excluyente, en un futuro mediano.

Como reemplazante cercano de la lámpara incandescente se posiciona la LFC, la cual es capaz de proveer el mismo flujo lumínico con menor potencia activa, alrededor de una quinta parte. Esta ventaja se contrapone con el nivel de corrientes armónicas que

estas lámparas inyectan a la red, de modo que una alta concentración de ellas en un punto de la red puede ocasionar una deformación de la onda de tensión más allá de los límites impuestos por las normas [3].

La iluminación residencial tuvo un gran avance en los últimos 10 años, debido a la irrupción de nuevas tecnologías que han ido modificando las particularidades de uso en el sector. Entre ellas se destacan las LFC, que si bien están en el mercado argentino desde hace varios años, aparecen en la actualidad con una variedad creciente de modelos, potencias y calidades que las hacen óptimas para reemplazar a casi cualquier tipo de lámpara incandescente.

En los últimos años han tenido una gran difusión las lámparas LED, que buscan establecerse en el mercado como una opción más. Este lugar será conquistado, muy posiblemente, en pocos años, debido a un rendimiento lumínico en [lm/W] similar a las LFC y que viene en constante aumento con las nuevas tecnologías aplicadas. Si bien actualmente su principal desventaja es su elevado costo, poseen una larga vida útil de 25000 a 50000 horas según la marca y modelo, frente a las 3000 a 10000 horas de las LFC.

Las lámparas LED además abarcan una amplia gama de colores, que las hace muy atractivas para crear efectos decorativos, y son “dimerizables”; esto permite regular su intensidad lumínica de acuerdo con la necesidad de uso, lo cual favorece el ahorro energético.

Como resultado de importantes investigaciones [4], conducidas por el Programa de Iluminación de Estado Sólido del Departamento de Energía de Estados Unidos, se concluye que el consumo de energía de las lámparas LED y el impacto ambiental (ambos evaluados durante todo su ciclo de vida en sus cuatro fases: producción, transporte, uso y disposición final) es considerablemente menor frente al de las lámparas incandescentes y LFC.

No obstante, si bien la tecnología LED presenta muy buenas características lumínicas y ambientales, al igual que las LFC, tienen un elevado contenido de armónicos, con una distorsión armónica total de corriente (THDI) en muchos casos superior al 100 %.

¿Cuál es la distribución actual de lámparas en usuarios residenciales? No existen demasiados antecedentes en la literatura técnica que den respuestas a este interrogante; solo se cita en publicaciones especializadas una encuesta, de hace ya algunos años, realizada en un número muy limitado de hogares, por alumnos de la Universidad de Buenos Aires, como parte de un proyecto final [5].

El impacto que provocará en las redes de distribución el reemplazo progresivo de lámparas que poseen características lineales por otras con alto contenido de armónicos es un tema que preocupa a muchos investigadores del área “Power Quality” (Calidad de la Energía) [3], [6-10].

III. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

En primer lugar se analizó el funcionamiento de cargas no lineales de uso residencial, efectuando ensayos en laboratorio de distintas lámparas de bajo consumo (LFC y LED) existentes en el mercado argentino. También se realizaron mediciones de campo en usuarios residenciales de diferentes electrodomésticos a fin de caracterizarlos y modelarlos en el software ATP (*Alternative Transients Program*), programa no comercial de análisis de fenómenos transitorios y electromagnéticos.

Por otro lado, se realizó una encuesta energética a usuarios residenciales de la ciudad de Mar del Plata con el fin de determinar la cantidad de lámparas por usuario y su distribución por tipos (incandescentes, halógenas, LFC, LED, etc.), potencias y horas de uso [11-12].

De los datos del Sistema de Información Geográfica (GIS) provistos por una empresa distribuidora de energía eléctrica de la zona se modeló en el ATP una red de distribución urbana real en Media Tensión (MT). Sobre la base de la red propuesta se realizó el análisis de la calidad del producto técnico al incorporar masivamente lámparas con alto contenido armónico y otras cargas residenciales, evaluando los niveles de distorsión armónica en corriente y tensión con la normativa vigente.

Las simulaciones se realizaron sobre tres escenarios posibles, uno actual y dos futuros; en el primero de ellos se considera la distribución actual de lámparas. En el segundo se reemplazan las lámparas incandescentes y halógenas por lámparas LFC, y en el tercer escenario se reemplazan por lámparas LED. En los tres escenarios se utilizaron las mismas cargas para representar los equipos electrodomésticos.

Por último se obtuvieron datos de mediciones en subestaciones transformadoras que alimentan preferentemente a usuarios residenciales y se compararon con los datos obtenidos en las simulaciones del escenario 1 a fin de validar la metodología empleada en el modelado de las cargas residenciales y de la red y asegurar un grado de consistencia en las simulaciones.

IV. DESARROLLO DEL PROYECTO

En la sección A se describe el proceso de ensayo y modelado de lámparas y equipos electrodomésticos y se presentan las principales magnitudes medidas de algunos de ellos; en la sección B se sintetizan los principales resultados de la encuesta energética realizada a usuarios residenciales, que fueron de gran utilidad en el presente trabajo; en la sección C se describe el proceso de modelado y simulación de cargas residenciales; en la sección D se aborda el modelado y simulación de la red de distribución; en la sección E se hace un resumen de la normativa vigente a nivel nacional e internacional en lo que res-

pecta a niveles de compatibilidad electromagnética y límites de emisiones armónicas; por último, en la sección F se presentan los resultados más relevantes que remiten a las conclusiones de este trabajo.

A. Ensayo y modelado de lámparas y equipos electrodomésticos

Se realizaron numerosos ensayos en laboratorio de diversas lámparas LFC, LED, fluorescentes, dicróicas, e incandescentes asequibles en el mercado argentino, y se hicieron mediciones de campo en instalaciones residenciales sobre diversos equipos electrodomésticos. Para este fin se utilizó un osciloscopio Fluke 97, un osciloscopio Fluke 123, una pinza amperométrica Prova 21 y una pinza transductora Prova 15.

En las tablas I y II se sintetizan los datos medidos de corriente eficaz total, distorsión armónica total de corriente respecto de la fundamental, potencia activa y factor de potencia verdadero de algunas de las lámparas LFC y LED ensayadas.

TABLA I. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE ALGUNAS LFC ENSAYADAS (B.F.: BLANCO FRÍO; B.C.: BLANCO CÁLIDO)

Lámparas LFC	Id.	I [mA]	THDI%	P[W]	FP(λ)
11W Espiral b.f.	S1	61	91	9.5	0.71
11W 3U b.f.	S3	76	86	11.8	0.72
18W 3U b.f.	S5	116	86	18.2	0.72
18W Espiral b.c.	S7	117	92	17.6	0.70
11W Gota b.f.	A7	68	102	9.9	0.67
15W Espiral Mini b.f.	A11	90	103	12.8	0.65
18W Mini 4U b.f.	A14	103	100	15.2	0.67
20W Standard 3U b.f.	A22	131	101	19.4	0.67
20W Mini 4U b.f.	A26	142	103	20.2	0.65
20W Espiral b.f.	A28	127	91	19.4	0.70
24W Globo b.f.	A30	125	130	16.3	0.59
26W Standard 3U b.f.	A34	160	100	23.7	0.67
36W Standard 4U b.f.	A36	233	111	32.2	0.63
22W 3U b.f.	J1	55	61	9.0	0.75
20W 3U b.c.	E1	71	88	10.8	0.70
13W 2U b.c.	AL1	78	86	12.0	0.70
13W 2U b.f.	AL2	53	87	8.1	0.70
20W 3U b.c.	GE7	96	125	12.8	0.61

Fuente: Autores.

TABLA II. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE ALGUNAS LED ENSAYADAS

Lámparas LED	Id.	I [mA]	THDI %	P[W]	FP(λ)
12W b.c. 6 LED	A1	80	141	9.3	0.54
8W b.c. 6 LED	A11	60	125	7.7	0.60
7W b.f. 16 LED	A13	55	135	6.4	0.53
4W b.f. 4 LED	A16	43	168	4.7	0.53
10W b.c. 8 LED	A21	43	52	6.5	0.71
12W b.c. 1 LED	A23	97	152	10.7	0.51
15W b.c. 12 LED	A25	67	9	13.5	0.92
9 W b.c. 3 LED	G1	57	140	6.8	0.54
6 W b.f. 3 LED	W1	51	137	6.5	0.59
1.7W b.f. 32 LED	J1	18	39	1.3	-
1.5W b.f. 15 LED	J5	21	27	0.9	-
1.7W b.c. 32 LED	J7	42	26	2.2	-
1.3W b.c. 20 LED	J8	21	31	1.2	-

Fuente: Autores.

Se ensayaron en total 59 lámparas fluorescentes compactas, 28 lámparas LED de alto rendimiento lumínico y 8 lámparas LED de bajo rendimiento lumínico.

Adicionalmente se realizaron ensayos de tubos fluorescentes, lámparas cíclicas, halógenas e incandescentes. En todos los casos se ensayaron lámparas de diversas marcas, modelos y colores de luz, con el fin de observar cómo varían sus características eléctricas. Se destaca que tanto las lámparas LFC como las LED en general tienen una elevada distorsión armónica en la corriente que inyectan a la red, superior al 86 % en la gran mayoría de los modelos, y alcanza valores de hasta 130 % en las LFC y 168 % en las LED.

En la tabla III se sintetizan las principales magnitudes eléctricas de los electrodomésticos ensayados. Se observa que la gran mayoría genera armónicos de corriente elevados, debido a la creciente proliferación de la electrónica de potencia en los mismos.

Una vez capturadas las formas de onda de tensión y corriente, se realizó la Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform: FFT*) en MATLAB a fin de obtener las amplitudes y fases para modelar las cargas residenciales ensayadas en el programa ATP.

Como muestra la Fig. 1, cada carga es modelada con una impedancia recorrida por la corriente fundamental y con fuentes de corrientes que inyectan las componentes armónicas a la red.

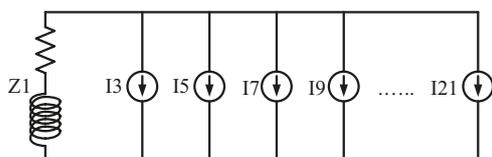


Fig. 1. Modelo representativo de una carga residencial Fuente: Autores.

TABLA III. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS ELECTRODOMÉSTICOS

Electrodoméstico	Id.	I [A]	THDI %	P[W]	FP(λ)
TV CRT 21"	2	0.378	150.5	46.2	0.55
TV CRT 14"	4	0.315	87.5	53.0	0.71
TV LCD 32"	5	0.500	11.3	107.0	0.98
Deco.TV dig.	7	0.065	140.2	8.1	0.57
Equipo audio 2 canales	8	0.113	41.0	19.7	0.80
Lavarropas	9	1.470	4.0	300.0	0.91
Horno a microondas	10	4.950	35.6	980.0	0.92
Heladera c/freezer	11	1.720	13.3	160.0	0.42
Heladera s/freezer	13	1.001	7.00	125.2	0.57
Freezer	15	0.900	10.0	90.0	0.45
Monitor LCD 19"	17	0.259	121.6	35.7	0.63
CPU encendida	18	0.347	112.2	50.7	0.66
CPU grabando datos	18.1	0.578	127.6	76.6	0.62
Modem Internet	19	0.080	31.2	10.9	0.62
Router WIFI	20	0.053	60.0	9.4	0.79

Fuente: Autores.

Para ilustrar el contenido armónico de las lámparas y electrodomésticos ensayados se presentan a continuación las formas de onda de tensión y corriente y los espectros armónicos de corriente de una lámpara LED (Figs. 2a y 2b); de una lámpara LFC (Figs. 3a y 3b); de un televisor CRT (Tubo de Rayos Catódicos) de 21 pulgadas (Figs. 4a y 4b); de un televisor LCD (Display de Cristal Líquido) de 32 pulgadas (Figs. 5a y 5b); de un horno microondas (Figs. 6a y 6b); y de una computadora personal de escritorio (Figs. 7a y 7b).

En todas estas figuras se observa que la forma de onda de la tensión es aproximadamente sinusoidal pura, mientras que la corriente tiene una forma de onda que dista mucho de una función sinusoidal. En los espectros armónicos de la corriente de cada carga se evidencia el elevado contenido de componentes armónicos.

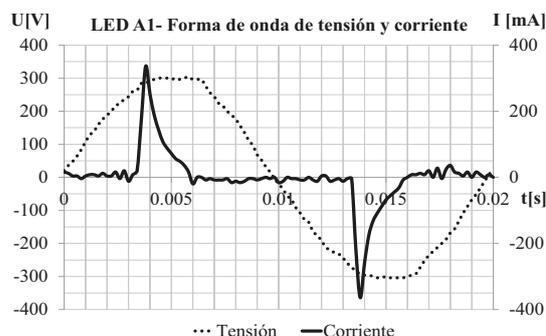


Fig. 2a. Forma de onda de tensión y corriente de una lámpara LED Fuente: Autores.

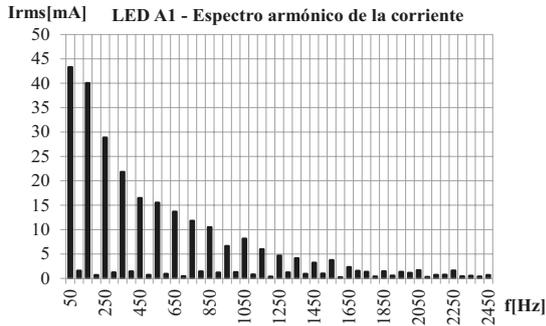


Fig. 2b. Espectro armónico de la corriente de una lámpara LED
Fuente: Autores.

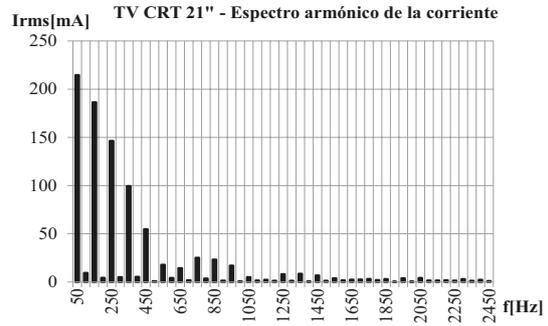


Fig. 4b. Espectro armónico de la corriente de un TV CRT de 21"
Fuente: Autores.

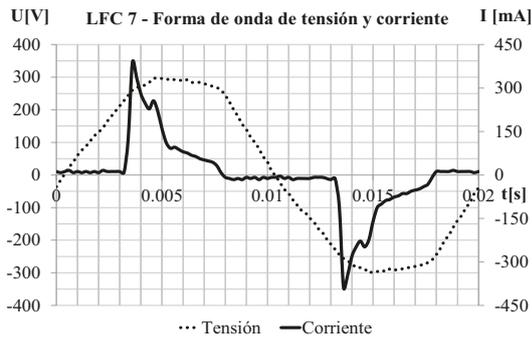


Fig. 3a. Forma de onda de tensión y corriente de una lámpara LFC
Fuente: Autores.

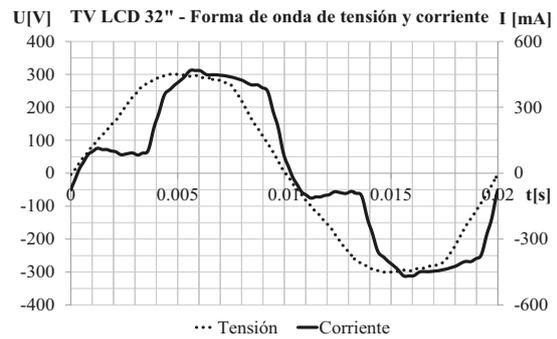


Fig. 5a. Forma de onda de tensión y corriente de un TV LCD de 32"
Fuente: Autores.

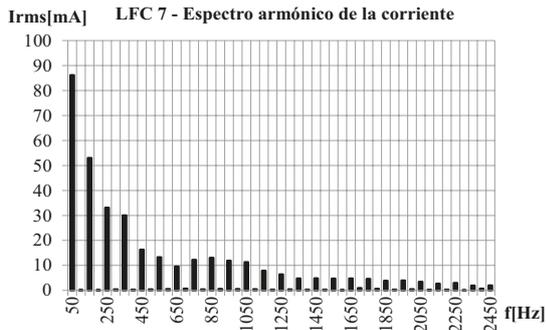


Fig. 3b. Espectro armónico de la corriente de una lámpara LFC
Fuente: Autores.

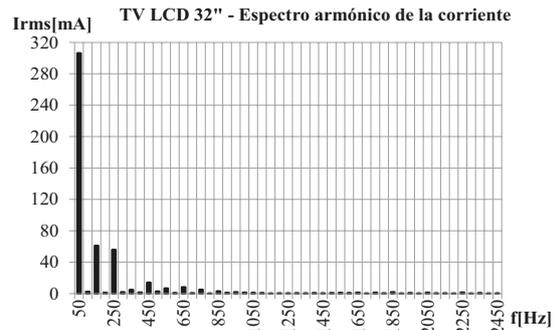


Fig. 5b. Espectro armónico de la corriente de un TV LCD de 32"
Fuente: Autores.

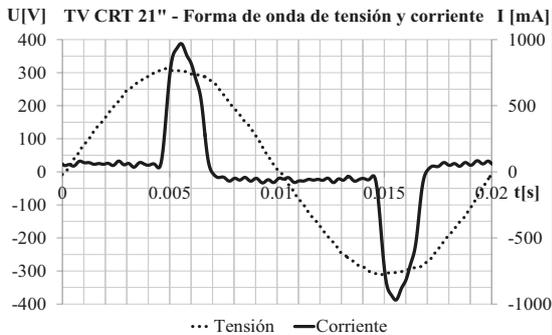


Fig. 4a. Forma de onda de tensión y corriente de un TV CRT de 21"
Fuente: Autores.

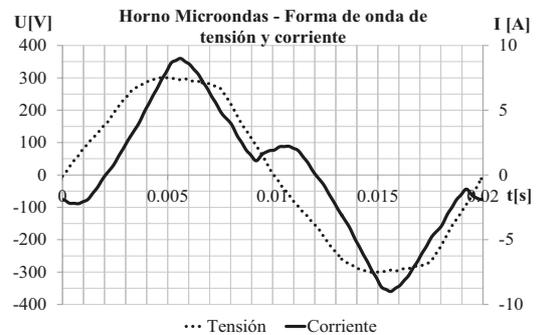


Fig. 6a. Forma de onda de tensión y corriente de un horno microondas
Fuente: Autores.

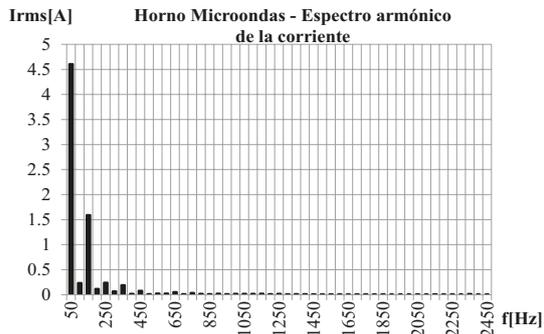


Fig. 6b. Espectro armónico de la corriente de un microondas
Fuente: Autores.

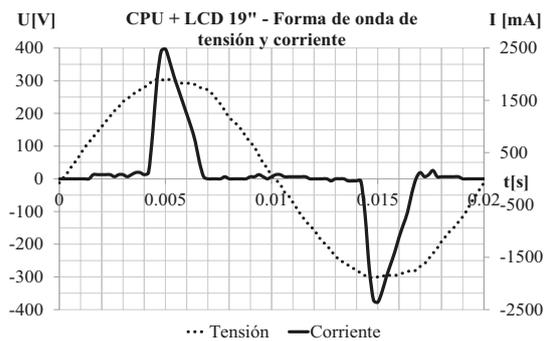


Fig. 7a. Forma de onda de tensión y corriente de una computadora personal de escritorio (CPU + LCD de 19")
Fuente: Autores.

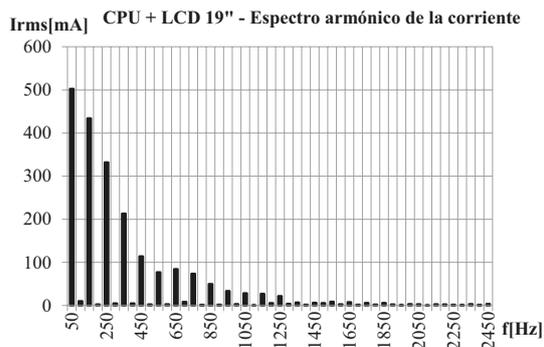


Fig. 7b. Espectro armónico de la corriente de una computadora personal de escritorio (CPU + LCD de 19")
Fuente: Autores.

B. Encuesta energética a usuarios residenciales

Hacia mitad de 2012 se realizó una encuesta en 61 hogares de la Ciudad de Mar del Plata, cuya categoría tarifaria es T1R-Residencial (menos de 10 kW de demanda) en el 100 % de los usuarios. La encuesta fue realizada por el Grupo de Investigación LAT (Laboratorio de Alta Tensión), perteneciente al Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar

del Plata, con el propósito de obtener información que permita desarrollar trabajos sobre calidad de la energía, eficiencia energética y uso racional de la energía [11-12]. La misma fue entregada a cada uno de los 61 usuarios encuestados y completada en su domicilio durante aproximadamente una semana. Se relevó información acerca de:

- Tipo de vivienda y superficie de la misma.
- Cantidad de habitantes.
- Características de las lámparas y su uso.
- Características de los electrodomésticos y su uso.
- Conocimiento sobre contaminación de las LFC desechadas y destino final de las mismas.
- Consumo bimestral a lo largo del año leído en la factura del suministro de energía eléctrica.
- Nivel educacional de los habitantes.
- Conocimiento sobre ahorro energético.

Resultados principales utilizados en este trabajo:

El consumo promedio anual es de 170 [kWh/mes]. El relevamiento dio un total de 1258 lámparas, 41679 [W], distribuidas de acuerdo con las gráficas de las Figs. 8 y 9.

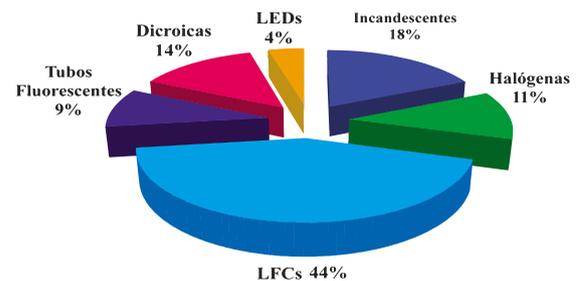


Fig. 8. Distribución de lámparas en instalaciones residenciales
Fuente: Autores.

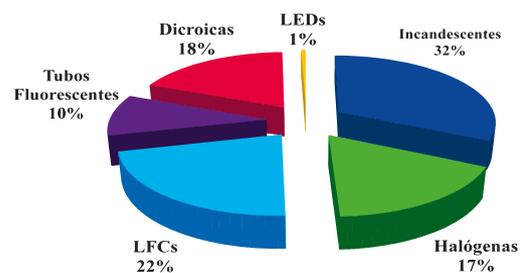


Fig. 9. Distribución de potencias de lámparas en instalaciones residenciales
Fuente: Autores.

C. Modelado y simulación de las cargas residenciales

Con la encuesta se determinó la cantidad, potencia, tipo de lámparas, electrodomésticos y horas de uso en un usuario residencial promedio. Con los datos obtenidos se realizó un análisis de la carga residencial durante el periodo comprendido entre las 19 y 22 hs, horario de mayor carga [13], planteando tres

escenarios uno con la distribución actual de lámparas combinadas con electrodomésticos y dos escenarios futuros, tal como se describió en el apartado II.

Determinación de la carga de iluminación

En los tres escenarios se consideró un coeficiente de simultaneidad de iluminación para un usuario promedio igual a 0.5, entre las 19 y 22 hs. En función de las potencias nominales comerciales se adoptó la siguiente distribución:

Escenario 1:

- Incandescentes: (1x100+1x60+1x40+1x25) [W]
- Halógenas: (1x70+1x42) [W]
- LFC: (1x36+1x26+1x20+1x18+1x15+4x11) [W]
- Tubos fluorescentes: (1x40+1x20) [W]
- Dicroicas: (2x50+1x20) [W]
- LED: 1x7 [W]

Escenario 2:

- LFC: (1x36+1x26+3x20+1x18+3x15+9x11) [W]
- Tubos fluorescentes: (1x40+1x20) [W]
- LED: 1x7 [W]

Escenario 3:

- LED: (27x7+3x12+3x4) [W]

Determinación de la carga de equipos domésticos

De los datos de la encuesta se determinó, para cada equipo electrodoméstico, un factor de disposición (FD) asociado a la cantidad de electrodomésticos que posee cada usuario promedio y un coeficiente de simultaneidad (CS) que representa qué proporción de equipos están conectados a la red en forma concurrente. En la tabla IV se presenta la distribución de electrodomésticos en una vivienda media.

TABLA IV. DISTRIBUCIÓN DE ELECTRODOMÉSTICOS EN UNA VIVIENDA MEDIA

Electrodoméstico	Factor de disposición (FD)	Coefficiente de simultaneidad (CS)	Cantidad c/10 usuarios
TV CRT 21"	1.57	0.50	8
TV LCD 32"	0.51	0.50	3
Radio-grabador chico	0.61	0.15	1
Lavarropas aut. med.	0.92	0.10	1
Microondas de 20 lt.	0.76	0.30	2
Heladera c/freezer	0.91	0.70	6
Heladera s/freezer	0.09	0.70	1
PC de escritorio	0.93	0.45	4
Monitor LCD 19"	0.49	0.45	2
Monitor CRT 17"	0.44	0.45	2
Cargador Netbook14"	0.64	0.30	2

Fuente: Autores.

Una vez determinadas las cargas de iluminación y electrodomésticos de un usuario medio, se simuló en el programa ATP, y se obtuvieron los gráficos de las Figs. 10a, 10b y 10c, que muestran las formas de onda de tensión y corriente de los escenarios 1, 2 y 3.

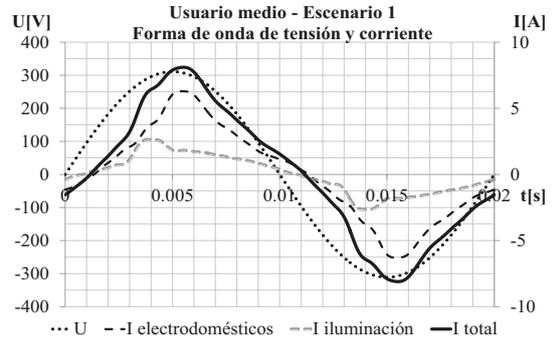


Fig. 10a. Forma de onda de tensión y corriente de un usuario medio correspondiente al escenario 1
Fuente: Autores.

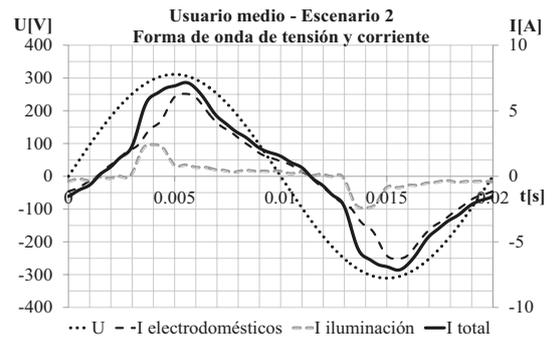


Fig. 10b. Forma de onda de tensión y corriente de un usuario medio correspondiente al escenario 2
Fuente: Autores.

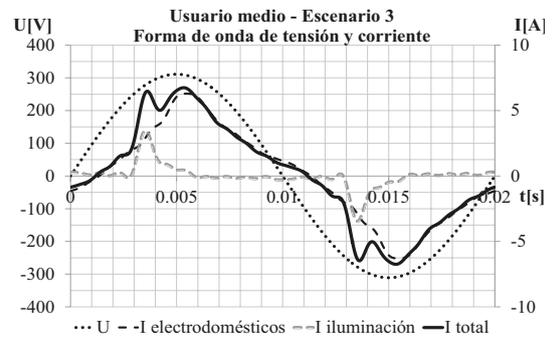


Fig. 10c. Forma de onda de tensión y corriente de un usuario medio correspondiente al escenario 3
Fuente: Autores.

En la tabla V se describen los valores de corriente y distorsión armónica de un usuario medio para los tres escenarios. Se observa que al reemplazar las lámparas convencionales por LFC (escenario 2) y

por LED (escenario 3), la corriente en iluminación y total de la instalación disminuyen, debido a la reducción de potencia activa. Por otro lado, se incrementa ampliamente la distorsión armónica por las características no lineales de este tipo de lámparas.

TABLA V. COMPARACIÓN DE LOS TRES ESCENARIOS

ESCENARIO 1			
	Electrodomésticos	Iluminación	Total
THDI (f) %	23.74	25.97	19.07
Irms [A]	3.46	1.43	4.83
Ifund. [A]	3.36	1.39	4.74
ESCENARIO 2			
	Electrodomésticos	Iluminación	Total
THDI (f) %	23.74	80.74	25.60
Irms [A]	3.46	0.95	4.23
Ifund. [A]	3.36	0.74	4.10
ESCENARIO 3			
	Electrodomésticos	Iluminación	Total
THDI (f) %	23.74	129.52	27.06
Irms [A]	3.46	0.90	3.88
Ifund. [A]	3.36	0.55	3.75

Fuente: Autores.

D. Modelado y simulación de la red de distribución

Para analizar el impacto de las cargas residenciales no lineales se modeló un tramo de una red real de distribución de energía eléctrica urbana, cuya carga es preferentemente residencial. El mismo consta de un alimentador radial de Media Tensión (MT) que alimenta a 11 estaciones transformadoras que reducen a Baja Tensión (BT) y alimentan a una gran cantidad de usuarios residenciales. En la Fig. 11 se presenta un diagrama unifilar simplificado del tramo de red. Todos los datos de la red y más detalles de la simulación se encuentran en [14].

Luego de modelar la red y sus cargas en cada escenario se configuraron los parámetros de simulación del programa ATP para ejecutar la misma en el dominio del tiempo.

E. Resumen de la normativa vigente

La norma europea IEC 61000-3-6/06 especifica niveles de compatibilidad electromagnética (CEM) de armónicos de tensión en redes de baja, media y alta tensión. Los niveles de compatibilidad son valores de referencia para coordinar la emisión e inmunidad del equipo que es parte de una red o alimentado por la misma, con el propósito de garantizar la CEM del sistema completo, incluyendo la red y los equipos conectados.

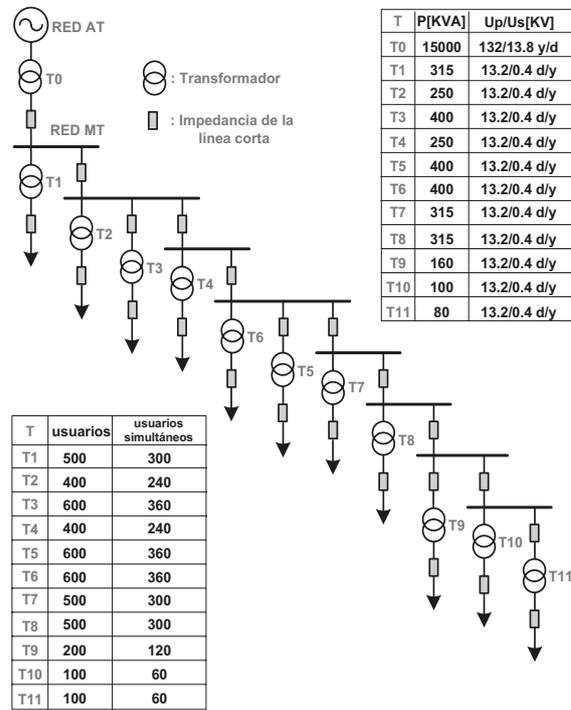


Fig. 11. Diagrama unifilar reducido de la red analizada. Fuente: Autores.

La norma norteamericana IEEE 519/92 fija límites de distorsión de tensión en distribuidores y límites de distorsión de corriente para la inyección a la red de armónicos de corriente por parte de usuarios individuales conectados a la misma.

A nivel nacional, en Argentina, el marco legal está conformado por la Ley de Energía Eléctrica 24065/92, el Decreto Reglamentario 1398/92 y las Resoluciones del Ente Nacional Regulador de la Electricidad (ENRE) 99/97 y 184/00. Los límites de emisión establecidos en varios países de América Latina, incluida Argentina, parece ser el producto de una adaptación de la norma europea 61000-3-6.

En la tabla VI se sintetizan los niveles de compatibilidad electromagnética y límites de emisiones armónicas que se aplican a la red que se estudia en este trabajo, de acuerdo con la normativa mencionada.

TABLA VI. NIVELES DE COMPATIBILIDAD ELECTROMAGNÉTICA Y LÍMITES DE EMISIONES ARMÓNICAS SEGÚN LA NORMATIVA VIGENTE

Normativa	THDU%		THDI%	
	BT y MT	AT	BT y MT	AT
IEC 61000-3-6	8	3	-	-
IEEE 519	5	2,5	12	6
Res. ENRE 99/97	-	-	20	12
Res. ENRE 184/00	8	3	-	-

Fuente: Autores.

F. Resultados Principales

En la Fig. 12 se graficó el THDI de cada transformador en el lado primario y secundario en los tres escenarios, y los límites de emisiones armónicas según la normativa vigente nacional e internacional.

De los resultados de las simulaciones surge que en el escenario 1, en el primario y secundario de todos los transformadores, el THDI está por debajo de los límites máximos del 12 % en líneas de alta tensión y 20 % en líneas de media y baja tensión exigidos por la Resolución 99/97 del ENRE a nivel nacional; mientras que en los secundarios de todos los transformadores MT/BT, el THDI supera el límite de 12 % en líneas de baja tensión, exigido por la Norma IEEE 519 a nivel internacional, la cual es más conservadora.

En el escenario 2 solo en el secundario de los transformadores MT/BT T10 y T11, el THDI está por encima del límite máximo del 20 % en líneas de baja tensión, exigido por la Resolución 99/97 del ENRE a nivel nacional; mientras que en los secundarios de todos los transformadores MT/BT el THDI supera el límite máximo de 12 % en líneas de baja tensión, exigido por la norma IEEE 519 a nivel internacional.

En el escenario 3 solo en el secundario de los transformadores MT/BT T9, T10 y T11, el THDI está por encima del límite máximo del 20 % en líneas de baja tensión, exigido por la Resolución 99/97 del ENRE a nivel nacional; mientras que en el primario del transformador AT/MT T0, el THDI está por encima del límite máximo del 6 % en líneas de alta tensión, exigido por la norma IEEE 519 a nivel internacional. Y en los secundarios de todos los transformadores MT/BT, el THDI supera el límite máximo del 12 % en líneas de baja tensión, exigido por la misma norma.

En la Fig. 13 se graficó el THDU de cada transformador en el lado primario, secundario y extremo de línea en los tres escenarios y los niveles de compatibilidad según la normativa vigente.

Se concluye que en el escenario 1 (electrodomésticos y lámparas de distintos tipos, según la distribución actual) solo en el extremo de línea del transformador MT/BT T1, el THDU supera el nivel máximo del 8 % en líneas de baja tensión, exigido por la Resolución 184/00 del ENRE a nivel nacional y de la norma IEC 61000-3-6 a nivel internacional; mientras que en los extremos de línea de los transformadores MT/BT T1-T9, el THDU supera el nivel máximo del 5 % en líneas de baja tensión, exigido por la norma IEEE 519 a nivel internacional, la cual es más conservadora.

En el escenario 2 (los mismos electrodomésticos del escenario 1 y todas las lámparas convencionales reemplazadas por lámparas fluorescentes compactas), en los extremos de línea de los transformadores MT/BT T1, T3, T7 y T8, el THDU supera el nivel máximo del 8 % en líneas de baja tensión, exigido por

la Resolución 184/00 del ENRE a nivel nacional y de la norma IEC 61000-3-6 a nivel internacional; mientras que en los extremos de línea de todos los transformadores MT/BT, excepto T10, el THDU supera el nivel máximo del 5 % en líneas de baja tensión, exigido por la Norma IEEE 519 a nivel internacional.

En el escenario 3 (los mismos electrodomésticos del escenario 1 y todas las lámparas convencionales reemplazadas por lámparas LED), en los extremos de línea de todos los transformadores MT/BT, excepto T10 y T11, el THDU supera el nivel máximo del 8 % en líneas de baja tensión, exigido por la Resolución 184/00 del ENRE a nivel nacional y de la norma IEC 61000-3-6 a nivel internacional; mientras que en los extremos de línea de todos los transformadores MT/BT, y en los secundarios de todos los transformadores MT/BT, excepto T10, el THDU supera el nivel máximo del 5 % en líneas de baja tensión, exigido por la norma IEEE 519 a nivel internacional.

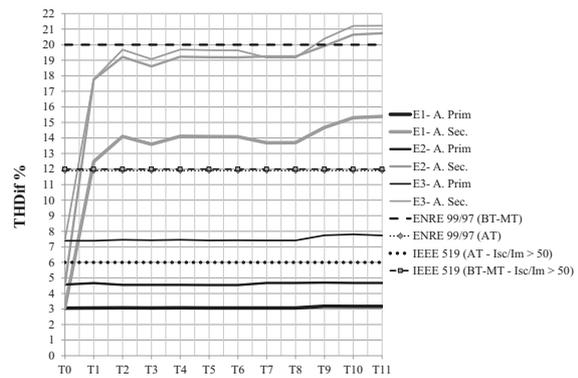


Fig. 12. THDI en cada transformador y valores límites
Fuente: Autores.

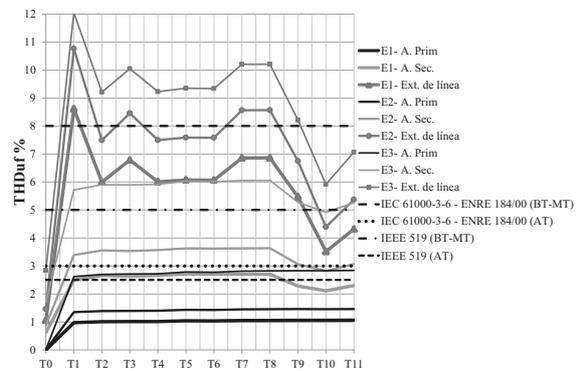


Fig. 13. THDU en cada transformador y valores límites
Fuente: Autores.

G. Validación de las simulaciones

Se obtuvieron datos de mediciones en subestaciones transformadoras que alimentan preferentemente a usuarios residenciales y se compararon con los datos

obtenidos en las simulaciones del escenario actual (escenario 1) a fin de validar la metodología empleada en el modelado de las cargas residenciales y de la red y asegurar un suficiente grado de consistencia en las simulaciones.

En la Fig. 14 se observa el perfil de potencia activa registrado a lo largo de una semana. En la Fig. 15 se muestra la evolución de la corriente fundamental en la fase 1 a lo largo de un día. La máxima corriente se da entre las 21.00 y 23.00 hs, parte de la banda horaria en la que se realizaron las simulaciones (19.00- 23.00hs).

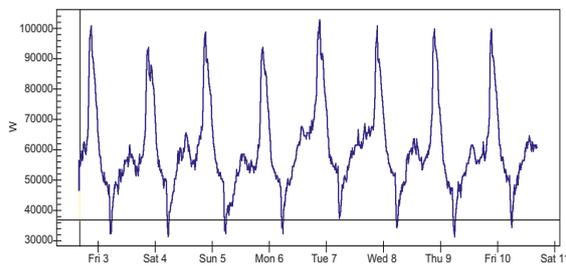


Fig. 14. Perfil de potencia activa en la subestación transformadora registrada a lo largo de una semana
Fuente: Autores.

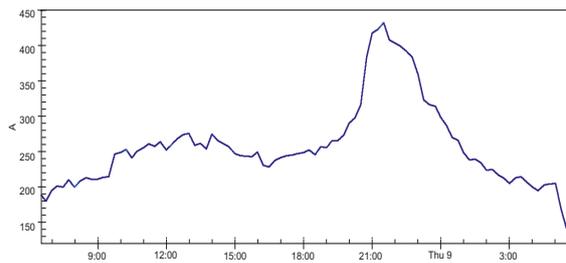


Fig. 15. Variación de la componente fundamental de corriente en la fase 1 a lo largo de un día
Fuente: Autores.

En la Fig. 16 se graficó la evolución de los componentes armónicos 3, 5 y 7 de la fase 1 en la banda horaria de 15.00 a 6.00 hs. Se observa que en la banda horaria comprendida entre las 19.00 y 23.00 hs:

- El tercer armónico de corriente varía entre 10 y 12 % de la corriente fundamental, mientras que en la simulación del escenario 1 varía entre 12.02 y 14.95 % en los 11 transformadores de la red.
- El quinto armónico de corriente varía entre el 2 y 6 % de la corriente fundamental, mientras que en la simulación del escenario 1 varía entre 2.50 y 2.59 % en los 11 transformadores.
- El séptimo armónico de corriente varía entre un 1.8 y 2.2 % de la corriente fundamental. En la simulación del escenario 1 varía entre 0.91 y 0.95 % en los 11 transformadores.

En la Fig. 17 se aprecia la variación del THDI en las tres fases entre las 11:00 y 7:00 hs. Si se analiza la banda horaria de 19.00 a 23.00 hs, se observa que:

- El THDI toma valores comprendidos en el intervalo 9 – 14 % aproximadamente, mientras que en la simulación del escenario 1 el THDI varía entre un 12.49 y 15.38 % en los 11 transformadores de la red.

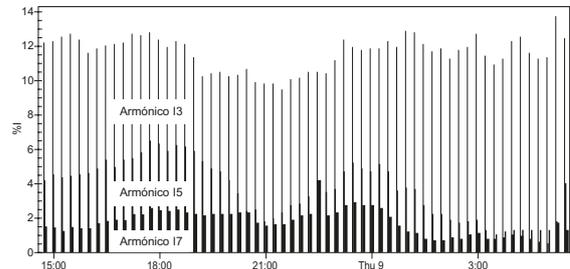


Fig. 16. Evolución de los componentes armónicos 3, 5 y 7 en la banda horaria 15:00 - 6:00 hs de la fase 1
Fuente: Autores.

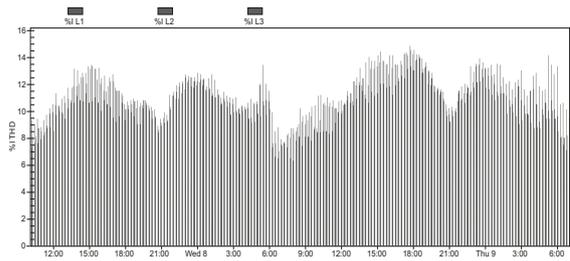


Fig. 17. Variación del THDI en las tres fases entre las 11:00 y 7:00 hs
Fuente: Autores.

Por la similitud entre los resultados obtenidos en la simulación del escenario 1 y las mediciones realizadas en subestaciones transformadoras que alimentan preferentemente a usuarios residenciales, se concluye que el modelado de las cargas residenciales y de la red es consistente.

V. CONCLUSIONES

La potencia actualmente dedicada a la iluminación residencial se reduce significativamente si todas las lámparas se sustituyen por lámparas LFC, y aun más si se reemplazan por las de tecnología LED, debido a su gran eficiencia energética.

El nivel de THDI en las lámparas LFC y LED, y en los electrodomésticos, es muy variable, dependiendo de la marca, modelo y potencia de la unidad, pero en general son niveles de distorsión elevados, debido a la proliferación de la electrónica de potencia en estos tipos de tecnologías. En las LFC se han medido valores de THDI que varían desde 61 hasta 130 %; en las LED valores desde 9 hasta 168 %, y en los electrodomésticos, valores desde 4 hasta 150 %.

Si bien los valores individuales de THDI en lámparas LFC, lámparas LED y electrodomésticos es elevado, los valores de THDI resultantes de la combinación de dichas cargas son menores (alcan-

za valores de 19.07 %, 25.60 % y 27.06 %) para un usuario residencial promedio correspondientes a los escenarios 1, 2 y 3, respectivamente. Esto se debe a la variedad de las amplitudes y ángulos de fase de cada armónico, y se conoce como efecto diversidad.

En las simulaciones de la red de distribución se obtuvo una distorsión armónica de corriente (THDI) de hasta 15.4 %, 20.7 % y 21.2 %, que se da en las líneas de baja tensión en los escenarios 1, 2 y 3 respectivos. Estos valores son menores que los de un usuario individual, debido al efecto de atenuación de corrientes armónicas que se produce en las redes cuando hay una gran cantidad de cargas conectadas, debido a la distorsión de tensión que se produce por la propia impedancia de cortocircuito de las líneas y transformadores. Esta distorsión de tensión (THDU) alcanzó valores de 8.6%, 10.8 % y 12.0 % en los extremos de línea más alejados de los transformadores MT/BT de los tres escenarios respectivos.

Con respecto a la normativa vigente, se observa que en los tres escenarios, en algunos puntos de la red se superan los límites de alguna de las normas, tanto en distorsión de tensión como de corriente. En el escenario 2 se alcanzan distorsiones mayores que en el 1, y en el 3 se alcanzan distorsiones aun mayores que en el escenario 2. Si bien en la realidad los factores de diversidad y atenuación pueden ser mayores y, en consecuencia, atenuarse aun más las tasas de distorsión, es posible que en un futuro no tan lejano, si se realiza un reemplazo masivo de lámparas incandescentes y halógenas por lámparas LFC y LED, se excedan los límites en valores tales, que justifiquen la implementación de filtros que mitiguen los efectos nocivos de los armónicos en las redes de distribución. Aun así, los niveles de distorsión de tensión y corriente, si bien podrían superar los límites establecidos por la normativa vigente, no alcanzarían valores muy excesivos, por los motivos mencionados.

Finalmente, las distorsiones medidas en subestaciones reales durante la banda horaria 19-23hs son similares a las obtenidas en la simulación del escenario 1, el cual representa la situación de carga actual en dicho periodo de tiempo. Con esto se verifica que los datos de la encuesta energética, los ensayos de laboratorio y las simulaciones son consistentes.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad Nacional de Mar del Plata, Argentina, por financiar este trabajo por medio de una Beca de Investigación de Estudiante Avanzado.

REFERENCIAS

- [1] P. Waide, "Phase Out of Incandescent Lamps: Implications for International Supply and Demand for Regulatory Compliant Lamps", *EA Energy Papers*, vol. 2010/05, Apr. 2010. DOI: 10.1787/5knh3nhp62s0-en
- [2] Ley 26.473, "Importaciones. Lámparas incandescentes. Prohibición"; y Decreto 2060/2010 de la República Argentina. Disponible en: www.infoleg.gov.ar
- [3] D. Pileggi, E. Gulachenski, C. Root, T. Gentile, and A. Emanuel, "Effect of modern compact fluorescent lights on voltage distortion", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, n° 3, pp. 1451-1459, 1993.
- [4] U. S. Department of Energy. 2012, "Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts of LED Lighting Products. Part 1: Review of the Life-Cycle Energy Consumption of Incandescent, Compact Fluorescent and LED Lamps. Available: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/2012_LED_Lifecycle_Report.pdf
- [5] C. Tanides y H. Iglesias Furfaro, "Iluminación Eficiente en el Sector Residencial Argentino: Evolución y Perspectivas Futuras", *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 14, pp. 07.55-07.60, 2010.
- [6] A. Khan, R. Dwyer, and M. McGranaghan, "Evaluation of Harmonic Impacts from Compact Fluorescent Lights On Distribution Systems", *IEEE Transactions On Power Delivery*, vol. 10, n° 4, November 1995.
- [7] V. Cuk, J. F. G. Cobben, W. L. Kling, and R. B. Timens, "An analysis of diversity factors applied to harmonic emission limits for energy saving lamps", in *Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power - ICHQP 2010*, pp. 1-6.
- [8] A. M. Blanco and E. E. Parra, "Effects of high penetration of CFLS and LEDS on the distribution networks," in *Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power-ICHQP*, 2010, pp. 1-5.
- [9] S. K. Rönnerberg, M. H. J. Bollen, and M. Wahlberg, "Harmonic emission before and after changing to LED and CFL - Part I: Laboratory measurements for a domestic customer", in *Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power - ICHQP*, 2010, pp. 1-7.
- [10] A. Gil-de-Castro, S. Ronnberg, M. H. J. Bollen, A. Moreno-Munoz, and V. Pallares-Lopez, "Harmonics from a domestic customer with different lamp technologies", in *Proceedings of 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power - ICHQP*, 2012, pp. 585-590.
- [11] S. Jacob, J. Strack, J. Branda y J. Suárez, "Evaluación del Consumo Eléctrico en el Sector Residencial de Mar del Plata. Propuestas de Ahorro y Eficiencia Energética", *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 16, pp. 06.65-06.72, 2012.
- [12] S. Jacob, J. Strack, J. Branda, G. Murcia y J. Suárez, "Evaluación del Consumo Eléctrico en el Sector Residencial de Mar del Plata. Aspectos Económicos y Ambientales", *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 1, pp. 01.91-01.98, 2013.
- [13] C. Tanides, "Auditorías Energéticas de la Iluminación Residencial", *Manual de Iluminación Eficiente*, cap. 14. Argentina: UTN y ELI Argentina. 2002.
- [14] J. L. Strack, *Lámparas bajo consumo: análisis armónico y su impacto en los sistemas eléctricos de potencia*. Mar del Plata: Editorial Suárez, 2013. Disponible en: <http://www3.fi.mdp.edu.ar/electrica/archivos/TesisJLS-TRACK.pdf>