

LÁMPARAS LEDs: IMPACTO EN EL USO EFICIENTE DE LA ENERGÍA

J. Suárez¹, G. Di Mauro², G. Murcia³, S. Jacob⁴, J. Strack⁵
Grupo de Investigación LAT

Departamento de Ingeniería Eléctrica – Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de Mar del Plata

J. B. Justo 4302 – C.P. B7608FDQ – Mar del Plata
Tel. 0223-4816600-Int. 230 – Fax 0223-4810046 e-mail: lat@mdp.edu.ar

Recibido: 10/08/12; Aceptado: 05/10/12

RESUMEN: A partir del pasado año nuestro país puso en vigencia la prohibición de la venta de lámparas incandescentes a partir de los 25 W. En este trabajo se analiza el impacto en el uso racional de la energía y la influencia en los índices de la calidad, que provoca el incremento progresivo del uso de lámparas con mayor contenido de componentes armónicos que las incandescentes que actúan como cargas lineales puras. Bajo el supuesto que en los próximos años, se imponga el uso masivo de las lámparas LEDs, se modelaron varias unidades en el ATP (Alternative Transients Program) junto a otras cargas residenciales típicas. Los valores finales resultantes de las simulaciones, muestran que la sustitución de lámparas actuales por LEDs no ocasiona mayores incrementos en los niveles de distorsión de corriente a la vez que supone una mejora en el impacto ambiental y un importante ahorro en el consumo de energía.

Palabras clave: armónicos, calidad de la energía, THDI, lámpara LED, simulación, Alternative Transient Program.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años la Unión Europea, Argentina, Canadá, Australia, Rusia, Colombia entre otros países, han fijado políticas tendientes a la prohibición, producción, importación y venta de las lámparas incandescentes.

En la Argentina, a partir del 1 de junio del 2011, se ha implementado la Ley N° 26.473, que establece esa restricción, quedando excluidas las de filamento de tungsteno cuya potencia sea menor a 25 W, las de tensión nominal igual o menor a 50V y las que ingresen al país en carácter de importación temporarias y en tránsito.

Estas medidas implican que en el mediano plazo, la iluminación en los usuarios residenciales será provista fundamentalmente por lámparas del tipo halógenas, LFCs (Lámpara Fluorescente Compacta) y LEDs (Diodo Emisor de Luz) y por estas últimas, en modo predominante, en un futuro no lejano, avalado por su constante mejora en el rendimiento lumínico.

Como primer reemplazante de la lámpara incandescente se posiciona la fluorescente compacta, que con una menor potencia activa es capaz de proveer aproximadamente el mismo flujo lumínico. Esta ventaja sin embargo, se contrapone con el nivel de armónicos que estas lámparas inyectan a la red, de modo que una alta concentración de ellas en un punto de la red, pueden ocasionar una deformación de la onda de tensión más allá de los límites impuestos por las normas, (Pileggi et al. 1993; Emmanuel ¹ et al. 1993; Khan et al., 1995).

Sobre el total de energía consumida en el país, el sector residencial participa con un 33%, ocupando el segundo lugar después del sector comercial. En la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, el porcentaje dedicado al sector residencial ocupa el primer lugar con una participación del 40%, (Brugnoni y Iribarne, 2006).

La iluminación residencial ha sufrido un importante cambio en los últimos años, debido principalmente a la aparición de nuevas tecnologías que han ido modificando las particularidades de uso en el sector. Entre ellas, se destacan las LFCs, originalmente diseñadas para ser intercambiadas con las lámparas incandescentes de 25 W a 100 W, y que si bien están en el mercado desde hace varios años, actualmente aparecen con una variedad creciente de modelos que la hacen óptima para el reemplazo de las incandescentes (Tanides y Iglesias Furfaro, 2005).

En los últimos años han tenido su difusión las LEDs, que buscan establecerse en el mercado como una opción más. Este lugar será conquistado, muy posiblemente, en pocos años más, gracias a un rendimiento lumínico en [lm/W] similar a las LFCs y que viene en constante aumento gracias a nuevas tecnologías aplicadas. Si bien cuenta como desventaja el elevado costo, se compensa con la ventaja de poseer una larga vida útil y un consumo energético bajo. Estas lámparas además son “dimerizables”, y se dividen en dos grandes grupos, las decorativas, que abarcan una amplia gama de colores, que las hace muy atractivas para realzar efectos decorativos y las de elevado rendimiento lumínico construidas con LEDs de alta potencia, cuya función principal es iluminar.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Mediciones individuales

Utilizando un osciloscopio digital Fluke, se realizaron ensayos de laboratorio de distintas lámparas LED, asequibles en el mercado actual y en el país. Las ondas de corrientes capturadas fueron procesadas con herramientas informáticas para obtener el espectro de corriente y valores índices de distorsión de corriente (THDI).

¹ Director del Grupo de Investigación LAT de la UNMDP

^{2,3,4} Integrante del Grupo de Investigación LAT de la UNMDP

⁵ Becario del Grupo LAT

En las Tablas 1 y 2 se resumen los datos medidos de corriente, potencia y THDi% de las lámparas decorativas y las de altos rendimientos lumínicos ensayados en laboratorio.

| Lámparas | Identificación | I [mA] | THDI [%] | P [W] |
|------------------------------|----------------|--------|----------|-------|
| 32 LEDs-1,7W blanco frío 1 | LBF1 | 18 | 39 | 1.3 |
| 32 LEDs-1,7W blanco frío 2 | LBF2 | 18 | 40 | 1.4 |
| 32 LEDs-1,7W blanco frío 3 | LBF3 | 18 | 40 | 1.4 |
| 32 LEDs-1,7W blanco frío 4 | LBF4 | 18 | 40 | 1.4 |
| 15 LEDs-1,5W blanco frío 5 | LBF5 | 21 | 27 | 0.9 |
| 15 LEDs-1,5W blanco frío 6 | LBF6 | 21 | 27 | 1.0 |
| 32 LEDs-1,7W blanco cálido 1 | LBC1 | 42 | 26 | 2.2 |
| 20 LEDs-1,3W blanco cálido 2 | LBC2 | 21 | 31 | 1.2 |

Tabla 1: Características de las lámparas LEDs decorativas ensayadas.

| Lámparas | Identificación | I [mA] | THDI [%] | P [W] |
|------------------------------|----------------|--------|----------|-------|
| 6 LEDs-12W blanco cálido 1 | LED A1 | 82 | 145 | 9.6 |
| 6 LEDs-12W blanco cálido 2 | LED A2 | 81 | 150 | 9.9 |
| 6 LEDs-12W blanco cálido 3 | LED A3 | 81 | 135 | 10.1 |
| 6 LEDs-12W blanco cálido 4 | LED A4 | 76 | 139 | 9.4 |
| 6 LEDs-12W blanco cálido 5 | LED A5 | 78 | 135 | 9.7 |
| 6 LEDs-12W blanco cálido 6 | LED A6 | 82 | 138 | 10.3 |
| 6 LEDs-12W blanco cálido 7 | LED A7 | 74 | 136 | 9.5 |
| 6 LEDs-12W blanco cálido 8 | LED A8 | 81 | 137 | 10.2 |
| 6 LEDs-12W blanco cálido 9 | LED A9 | 83 | 141 | 10.3 |
| 6 LEDs-12W blanco cálido 10 | LED A10 | 78 | 136 | 9.8 |
| 6 LEDs-8W blanco cálido 1 | LED A11 | 64 | 142 | 7.8 |
| 6 LEDs-8W blanco cálido 2 | LED A12 | 63 | 145 | 7.7 |
| 16 LEDs- 7W blanco frío 1 | LED A13 | 60 | 155 | 6.9 |
| 16 LEDs- 7W blanco frío 2 | LED A14 | 68 | 149 | 8.2 |
| 4 LEDs- 4W blanco frío 1 | LED A15 | 48 | 176 | 5.0 |
| 4 LEDs- 4W blanco frío 2 | LED A16 | 43 | 168 | 4.7 |
| 4 LEDs- 4W blanco frío 3 | LED A17 | 42 | 162 | 4.6 |
| 4 LEDs- 4W blanco frío 4 | LED A18 | 41 | 161 | 4.6 |
| 4 LEDs- 4W blanco frío 5 | LED A19 | 45 | 151 | 5.3 |
| 4 LEDs- 4W blanco frío 6 | LED A20 | 40 | 151 | 4.6 |
| 8 LEDs- 10W blanco cálido 1 | LED A21 | 43 | 60 | 7.4 |
| 8 LEDs- 10W blanco cálido 2 | LED A22 | 45 | 47 | 8.1 |
| 1 LED- 12W blanco cálido 1 | LED A23 | 107 | 176 | 11.3 |
| 1 LED- 12W blanco cálido 2 | LED A24 | 98 | 160 | 11.1 |
| 12 LEDs- 15W blanco cálido 1 | LED A25 | 68 | 10 | 14.4 |
| 12 LEDs- 15W blanco cálido 2 | LED A26 | 70 | 26 | 14.3 |
| 3LEDs- 9W blanco cálido 1 | LED G1 | 64 | 171 | 6.8 |

Tabla 2: Características de las lámparas LEDs de alto rendimiento lumínico ensayadas.

En la figura 1 se observa la forma de la onda de corriente para una lámpara LED decorativa y en la figura 2 para una lámpara de alto rendimiento lumínico.

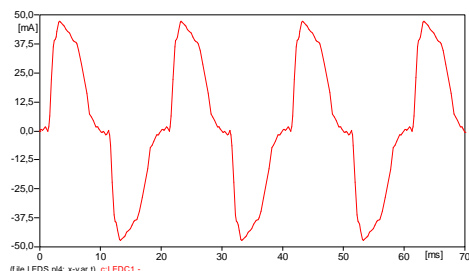


Figura 1: Forma de la onda de corriente de una lámpara LED blanco cálido de 2.3 W decorativa.

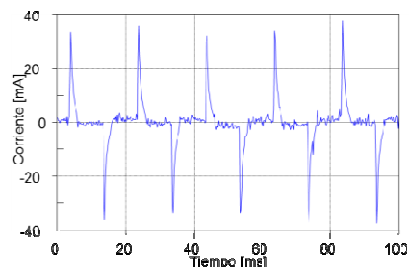


Figura 2: Forma de la onda de corriente de una lámpara blanco cálido de 6 LEDs y 12 W de alto rendimiento lumínico.

Mediciones Combinadas

Cuando consideramos un gran número de cargas no lineales, la corriente resultante no es una simple suma aritmética de los componentes armónicos. Hay dos efectos que mitigan en parte el nivel de los armónicos: uno es el conocido como atenuación, que está definido como una disminución en el THDI, causado por un determinado incremento en la distorsión de la tensión. El segundo efecto es la diversidad, provocado por las pequeñas desviaciones en los ángulos de fase de los componentes armónicos de las cargas no lineales. Esto conduce a que el vector suma sea menor que la suma aritmética.

El factor diversidad está definido como la relación entre el vector resultante y la suma aritmética de los armónicos. El efecto diversidad y atenuación ha sido ampliamente analizado por la literatura técnica, abarcando las consecuencias en las líneas de distribución (Suárez et al., 2005; Mansoor et al., 2005; El-Saadany y Salama, 1998; Cuk et al., 2010; Blanco y Parra, 2010). Con el propósito de evaluar el efecto diversidad, en el laboratorio se ensayaron 10 lámparas LEDs obteniendo los resultados individuales y en conjunto que se resumen en las Tablas 3 y 4.

| Lámpara | U [V] | THDU % | THDI % | P [W] | S [VA] | λ f _{pv} | cos ϕ_1 | I [mA] | I(1) [mA] | I(3) [mA] | I(5) [mA] | I(7) [mA] | I(9) [mA] | I(11) [mA] |
|------------------|-------|--------|--------|-------|--------|---------------------------|--------------|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| LED A1 | 220.5 | 4.5 | 145 | 9.6 | 21.8 | 0.555 | 0.996 | 82 | 46 | 38 | 26 | 17 | 17 | 18 |
| LED A2 | 220.3 | 4.4 | 150 | 9.9 | 17.9 | 0.551 | 0.997 | 81 | 46 | 38 | 26 | 17 | 16 | 17 |
| LED A3 | 220.2 | 4.7 | 135 | 10.1 | 18.3 | 0.551 | 0.997 | 81 | 48 | 41 | 30 | 23 | 21 | 19 |
| LED A4 | 220.9 | 4.6 | 139 | 9.4 | 17.1 | 0.552 | 0.997 | 76 | 45 | 38 | 28 | 21 | 19 | 18 |
| LED A5 | 220.8 | 4.7 | 135 | 9.7 | 17.3 | 0.558 | 0.997 | 78 | 46 | 39 | 29 | 21 | 20 | 18 |
| LED A6 | 220.1 | 4.8 | 138 | 10.3 | 18.2 | 0.556 | 0.995 | 82 | 49 | 41 | 30 | 23 | 22 | 21 |
| LED A7 | 220.3 | 4.8 | 136 | 9.5 | 16.8 | 0.560 | 0.997 | 74 | 45 | 38 | 28 | 20 | 18 | 18 |
| LED A8 | 220.8 | 4.8 | 137 | 10.2 | 18.4 | 0.555 | 0.996 | 81 | 48 | 41 | 30 | 23 | 21 | 20 |
| LED A9 | 220.4 | 4.7 | 141 | 10.3 | 18.7 | 0.548 | 0.995 | 83 | 49 | 41 | 31 | 24 | 22 | 21 |
| LED A10 | 220.6 | 4.8 | 136 | 9.8 | 17.6 | 0.558 | 0.996 | 78 | 46 | 39 | 29 | 21 | 20 | 19 |
| Todas conectadas | 220.6 | 4.5 | 131 | 98.5 | 190.3 | 0.602 | 0.997 | 758 | 460 | 380 | 275 | 284 | 227 | 188 |

Tabla 3: Características de las lámparas LEDs de alto rendimiento lumínico ensayadas en frío.

| Lámpara | U [V] | THDU % | THDI % | P [W] | S [VA] | λ f _{pv} | cos ϕ_1 | I [mA] | I(1) [mA] | I(3) [mA] | I(5) [mA] | I(7) [mA] | I(9) [mA] | I(11) [mA] |
|---------------|-------|--------|--------|-------|--------|---------------------------|--------------|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| LED A1 | 220.7 | 3.0 | 185 | 9.5 | 21.7 | 0.438 | 0.975 | 93 | 44 | 41 | 34 | 28 | 24 | 22 |
| LED A1+A2 | 220.9 | 3.1 | 185 | 18.9 | 41.4 | 0.456 | 0.976 | 185 | 88 | 82 | 71 | 56 | 49 | 45 |
| LED A1+...+A3 | 220.7 | 3.1 | 180 | 28.6 | 61.6 | 0.463 | 0.976 | 277 | 134 | 124 | 106 | 87 | 74 | 67 |
| LED A1+...+A4 | 220.4 | 3.0 | 177 | 37.9 | 80.4 | 0.471 | 0.978 | 363 | 177 | 164 | 141 | 113 | 99 | 88 |
| LED A1+...+A5 | 221.3 | 3.1 | 174 | 47.5 | 99.3 | 0.478 | 0.979 | 445 | 221 | 204 | 174 | 143 | 118 | 107 |
| LED A1+...+A6 | 220.6 | 3.2 | 167 | 57.6 | 116.5 | 0.491 | 0.981 | 524 | 269 | 247 | 209 | 168 | 137 | 117 |
| LED A1+...+A7 | 221.2 | 3.3 | 165 | 66.9 | 133.1 | 0.502 | 0.983 | 601 | 312 | 286 | 243 | 197 | 159 | 136 |
| LED A1+...+A8 | 220.8 | 3.1 | 160 | 77.1 | 150.3 | 0.512 | 0.985 | 682 | 362 | 332 | 280 | 223 | 178 | 145 |
| LED A1+...+A9 | 221.6 | 3.3 | 159 | 87.5 | 169.1 | 0.518 | 0.988 | 759 | 405 | 371 | 414 | 250 | 197 | 163 |
| LEDA1+...+A10 | 220.1 | 3.3 | 156 | 96.9 | 185.5 | 0.521 | 0.989 | 834 | 450 | 412 | 347 | 275 | 214 | 172 |

Tabla 4: Características de las lámparas LEDs de alto rendimiento lumínico ensayadas en caliente.

En la Tabla 3 se muestran las características de las lámparas LEDs ensayadas en frío, es decir sin que la lámpara alcance su temperatura de servicio, en forma individual y luego conectando todas en forma simultánea. Se midió la tensión (U), y el índice de distorsión de la misma (THDU), la corriente total (I), su índice de distorsión (THDI) y sus componentes armónicos (I(1), I(2), ..., I(11)). También se registró la potencia activa (P), potencia aparente (S), el factor de potencia de la señal fundamental (cos ϕ) y el verdadero factor de potencia (λ).

Luego se procedió a ensayar las lámparas conectándolas de a una en forma sucesiva. A medida que aumenta el número de lámparas conectadas, al incrementar su temperatura, las mediciones comenzaban a fluctuar de manera evidente en especial en las primeras unidades alimentadas. Por lo mencionado, se procedió a conectar las 10 lámparas, esperando el tiempo suficiente para que todas alcancen la temperatura de servicio en forma uniforme, procediendo a desconectar de a una y realizando las mediciones de los parámetros eléctricos correspondientes. De esta manera se logró desafectar la influencia de la temperatura y se pudo analizar fielmente el efecto diversidad de los armónicos en la corriente. Las mediciones obtenidas se resumen en la Tabla 4. Se aprecia que a medida que aumenta el número de lámparas conectadas disminuye el índice de distorsión de la corriente (THDI%). Esto se debe a que los ángulos de fase de los armónicos son levemente diferentes debido a las tolerancias en las características de los componentes constitutivos de cada lámpara a pesar de pertenecer a igual modelo y potencia. Por tanto se produce una cancelación parcial de armónicos ya que los mismos no se suman algebraicamente, sino fasorialmente. Al conectar todas las lámparas la distorsión de corriente disminuye desde un máximo individual del 150% a 131% en frío (Tabla 3) y de un 185% a 156% en caliente (Tabla 4) como consecuencia de la dispersión en los valores eficaces y ángulos de fase de los componentes armónicos.

Cuando combinamos lámparas de distintas potencias y/o tipo de luz (blanco frío y blanco cálido), la distorsión resultante está más cerca de la de menor THDi. Así un THDi% del 176% de una lámpara LED blanco frío de 4W (LED A15), combinado con el THDi% del 10% de una lámpara LED blanco cálido de 15W (LED A25) resulta una distorsión del 45%, Tabla 5. Mientras que un THDi% del 145% de una lámpara LED blanco cálido de 12W (LED A1), combinado con el THDi% del 47% de una lámpara LED blanco cálido de 10W (LED A22) resulta en una distorsión del 87% aun cuando es menor el aporte de potencia y corriente de la lámpara de menor THDi%, 45 [mA] frente a los 82 [mA] de la lámpara de mayor THDi%. Combinando los 8 modelos distintos de lámparas LEDs cuyos THDi% van desde 10% (LED A25) hasta 176% (LED A15), potencias desde 4W (5W reales), (LED A15) hasta 15W (14.4W reales), (LED A25) y corrientes desde 45 [mA] (LED A22) hasta 98 [mA] (LED A24) se obtuvo un THDi% total de 101%. En general, este ensayo puede considerarse representativo de una instalación residencial real en la que varían las potencias y tipo de luz dependiendo el ambiente que se desea iluminar.

| Lámparas | I_{RMS} [mA] | THD_i [%] | λ f_{pv} | P [W] | S [VA] | F (Pot. ficticia) |
|---|----------------|-------------|--------------------|-------|--------|-------------------|
| LED A1 + LEDA22 | 113 | 87 | 0.686 | 17.6 | 25.5 | 18.5 |
| LED A15 + LED A25 | 102 | 45 | 0.830 | 19.9 | 23.5 | 15.0 |
| LED A2 + LED A11 + LED A13 | 205 | 149 | 0.547 | 24.5 | 45.9 | 38.6 |
| LED A2 + LED A11 + LED A13 + LED A15 | 247 | 151 | 0.525 | 29.5 | 55.8 | 47.5 |
| LED A2 + LED A11 + LED A13 + LED A15 + LED A22 + LED A24 | 360 | 122 | 0.607 | 49.2 | 81.1 | 64.5 |
| LED A2 + LED A11 + LED A13 + LED A15 + LED A22 + LED A24 + LED A25 + LED G1 | 471 | 101 | 0.670 | 70.1 | 104.7 | 77.7 |
| LED A1 + LED A2 + LED A25 + LED A26 | 265 | 64 | 0.806 | 47.5 | 59.0 | 35.0 |
| LED A1 + LED A2 + LED A25 + LED A26 + LED A21 + LED A22 | 328 | 46 | 0.856 | 62.5 | 73.2 | 37.8 |

Tabla 5: Distorsión de corriente resultante de combinación de LEDs.

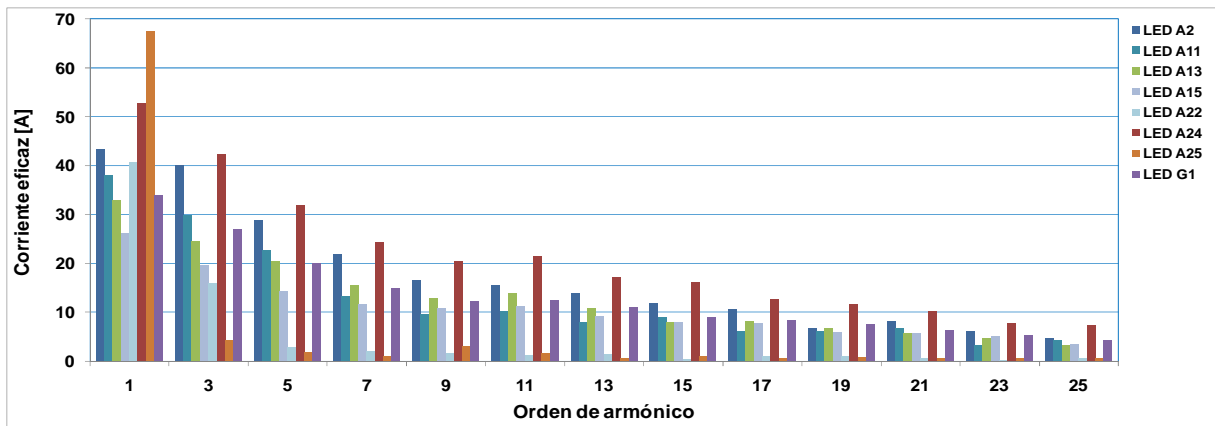


Figura 5: Espectro armónico de valores eficaces de la onda de corriente de 8 lámparas LEDs de alto flujo lumínico de distintos modelos, color de luz y potencias ensayadas.

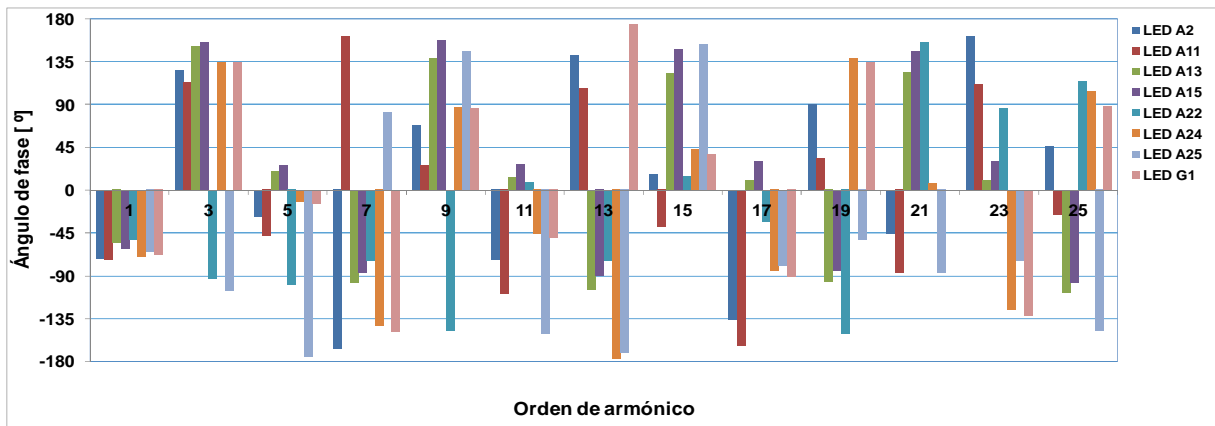


Figura 6: Espectro armónico de ángulos de fase de la onda de corriente de 8 lámparas LEDs de alto flujo lumínico de distintos modelos, color de luz y potencias ensayadas.

En las figuras 5 y 6 se representan los espectros de corrientes eficaces y ángulos de fase de las 8 lámparas distintas ensayadas. Se distingue claramente que los valores eficaces y ángulos de fase de los primeros 25 armónicos difieren considerablemente en los distintos tipos de lámparas, por este motivo al conectarlas en conjunto se produce la cancelación parcial de armónicos, lo que produce un $THD_i\%$ total menor que el máximo THD_i que tenga un determinado tipo de lámpara en forma individual. El mismo fenómeno ocurre cuando se conectan diversos electrodomésticos simultáneamente con la iluminación.

En las figuras 7 y 8 se observa que debido a los efectos diversidad en los valores eficaces y ángulos de fase de las distintas lámparas, la forma de onda resultante de la corriente total cuando están todas conectadas, no es simétrica como lo era la de cada lámpara en forma individual. Sin embargo la asimetría no es suficientemente grande como para que aparezcan armónicos pares de magnitud comparable con los impares, por tanto como sucede usualmente con las formas de onda simétricas prevalecen en mayor medida armónicos impares.

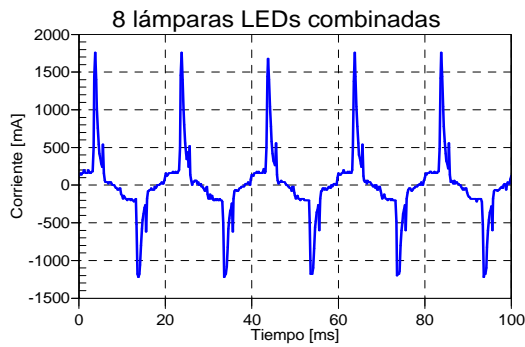


Figura 7: Forma de la onda de corriente de 8 lámparas LEDs de distintos modelos, color de luz y potencias ensayadas, conectadas simultáneamente.

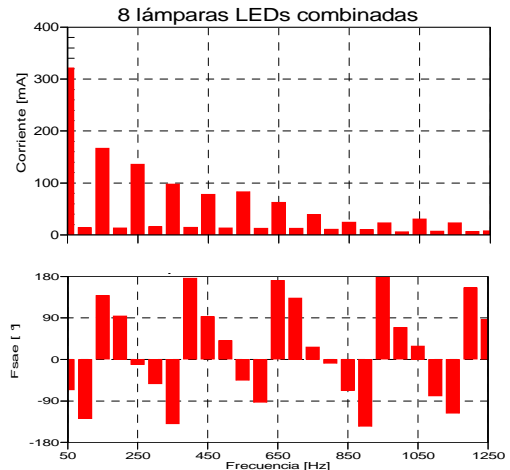


Figura 8 (derecha): Espectro armónico de valores eficaces y ángulos de fases de la onda de corriente de las 8 lámparas LEDs de distintos modelos, color de luz y potencias ensayadas, conectadas simultáneamente.

Adicionalmente se registraron las ondas de corrientes de distintos electrodomésticos y aparatos electrónicos, que usualmente podemos encontrar en una vivienda típica residencial (heladera, televisor, horno a microondas, lavarropas, computadora-monitor, videograbadoras, componentes de audio, etc.). En la Tabla 6 se resumen los datos característicos de los equipos ensayados.

| Aparato | I[A] | U[V] | THD ₁ % | THD _n % | P[W] | FP |
|--|-------|-------|--------------------|--------------------|-------|------|
| (1) TV LCD 32" Led Encendido | 0.313 | 225.6 | 29.0 | 5.6 | 65.4 | 0.92 |
| (2) TV LCD 32" Led STB (espera) | 0.041 | 224.6 | 51.5 | 5.7 | 5.6 | 0.61 |
| (3) TV LCD 32" | 0.500 | 225.0 | 11.3 | 5.0 | 107.0 | 0.98 |
| (4) TV LCD 40" | 0.456 | 228.0 | 30.0 | 5.1 | 96.0 | 0.91 |
| (5) TV 14" | 0.315 | 224.0 | 87.5 | 5.6 | 53.0 | 0.71 |
| (6) TV 21" | 0.552 | 220.0 | 113.0 | 4.3 | 76.4 | 0.63 |
| (7) TV 14" STB | 0.039 | 225.5 | 44.0 | 5.6 | 7.0 | 0.83 |
| (8) Decodificador TV Digital Encendido | 0.104 | 224.5 | 93.5 | 5.7 | 16.5 | 0.71 |
| (9) Decodificador TV Digital con grabador(DVR) | 0.212 | 229.0 | 132.0 | 5.0 | 29.0 | 0.65 |
| (10) Cable-Modem internet | 0.080 | 228.0 | 31.2 | 5.3 | 10.9 | 0.62 |
| (11) Router WIFI | 0.053 | 225.0 | 60.0 | 5.1 | 9.4 | 0.79 |
| (12) Heladera c/ Freezer | 1.720 | 223.8 | 13.3 | 5.5 | 160.0 | 0.42 |
| (13) Heladera c/ freezer | 1.109 | 218.8 | 14.8 | 3.6 | 152.6 | 0.64 |
| (14) Freezer | 0.900 | 225.0 | 10.0 | 4.5 | 90.0 | 0.45 |
| (15) Lavarropas | 1.470 | 222.3 | 4.0 | 5.6 | 300.0 | 0.91 |
| (16) Horno a Microondas | 4.950 | 220.0 | 35.6 | 6.1 | 980.0 | 0.92 |
| (17) Pc Monitor 17" | 0.088 | 219.7 | 107.6 | 3.7 | 127.0 | 0.65 |
| (18) Equipo Audio 2 canales (STB) | 0.080 | 227.0 | 26.0 | 4.7 | 10.0 | 0.60 |
| (19) Equipo Audio 2 canales -volumen bajo- | 0.113 | 227.0 | 41.0 | 4.7 | 19.7 | 0.80 |

Tabla 6: Características de aparatos electrónicos y electrodomésticos comunes en usuarios residenciales.

ANÁLISIS LUMINOTÉCNICO

Puesto que todavía no hay resoluciones del Ente Nacional Regulador de la Electricidad, (ENRE), que regulen y normalicen el etiquetado de los envases de las lámparas LEDs se procedió a realizar mediciones luminotécnicas de lámparas incandescentes y LEDs y compararlas para encontrar los posibles reemplazos que provean condiciones lumínicas similares.

En la figura 9 se observan los espectros de iluminancias medidas y representadas a través de círculos, cuyo radio es proporcional a las mismas. En la Tabla 7 se indica la iluminancia media, mínima y máxima en la superficie analizada para cada tipo de lámpara.

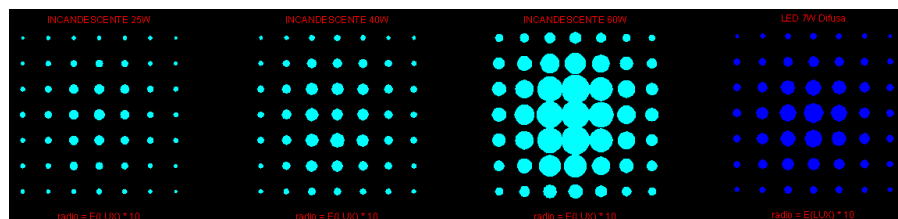


Figura 9: Espectro de iluminancias de lámparas incandescentes de 25,40 y 60W y de una lámpara LED de 7W difusa que puede reemplazar a una incandescente.

De acuerdo a los espectros de iluminancias de la Figura 9 y a las iluminancias medias, mínimas y máximas de la Tabla 7, se concluye que la lámpara LED Difusa de 7W puede reemplazar lumínicamente a una lámpara incandescente de 40W, ya que posee buena distribución de iluminancias, por lo que el flujo lumínico está bien distribuido; las iluminancias mínimas son iguales y las iluminancias máxima y media son superiores a las correspondientes a la lámpara incandescente de 40W.

La lámpara LED Dicroica de 4W puede reemplazar a una dicroica de 35W, ya que tiene una iluminancia media aproximadamente igual e iluminancia mínima similar y mayor iluminancia máxima.

La lámpara LED AR111 puede reemplazar lumínicamente a dicroicas de 50W, aunque no tenga exactamente la misma forma física se puede adaptar la instalación para su colocación.

| Lámparas | Iluminancia media E [lux] | Iluminancia mínima E [lux] | Iluminancia máxima E [lux] |
|-------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Incandescente 25W | 6,31 | 3 | 12 |
| Incandescente 40W | 9,02 | 4 | 17 |
| Incandescente 60W | 18,20 | 7 | 33 |
| LED Difusa 7W | 10,63 | 4 | 23 |
| Dicroica 20W | 16,12 | 2 | 387 |
| Dicroica 35W | 12,80 | 1 | 140 |
| Dicroica 50W | 28,37 | 4 | 300 |
| LED Dicroica 4W | 11,08 | 1 | 193 |
| LED Luz Concentrada 8W | 12,31 | 1 | 195 |
| LED Luz Concentrada 12W | 13,35 | 1 | 228 |
| LED AR111 12W | 23,76 | 1 | 344 |

Tabla 7: Iluminancias medias, mínimas y máximas de las lámparas LEDs ensayadas.

HIPÓTESIS Y SIMULACIÓN

Como dato de partida tomaremos como referencia una encuesta realizada en 61 hogares de la Ciudad de Mar del Plata, encuadrados en la categoría tarifaria T1R (consumo promedio anual 170 kWh/mes, 100% del total de usuarios). Este relevamiento arrojó un total de 1258 lámparas, distribuidas de la siguiente manera: 18% incandescentes (1330W), 11% halógenas (7240W), 44 % LFCs (9105W), 9 % tubos fluorescentes (4136W), 14% dicroicas (7650W) y 4% LEDs (218W), Figura 10.

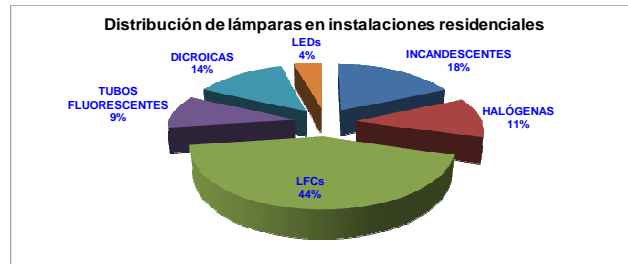


Figura 10: Distribución de lámparas en 61 instalaciones residenciales de la ciudad de Mar del Plata.

A partir de estos datos relevados por la encuesta podemos proponer una “vivienda media” con la siguiente distribución de luminarias:

- Incandescentes: 2 unidades de 60W, 1 de 40W y 1 de 75W.
- Halógenas: 2 unidades de 50W.
- LFCs: 9 unidades de 15W.
- Tubos fluorescentes: 3 de 20W.
- Dicroicas: 2 unidades de 50W y 1 de 20W.
- LEDs: 1 unidad de 4W.

Proponemos ahora el análisis de dos escenarios, uno actual y otro futuro bajo el supuesto de reemplazar todas las lámparas por las del tipo LED.

Escenario 1: Luminarias con la distribución actual, potencia media instalada 683W. Consideraremos un factor de simultaneidad 0.3 entre las 19 y 22hs. horario de mayor encendido de las lámparas, y lo combinaremos con equipos y electrodomésticos que pueden estar en funcionamiento. Para el usuario residencial típico seleccionado para el análisis, supondremos las siguientes unidades conectadas como “carga base”:

- Horno a microondas
- Televisor LCD 32”
- PC y monitor
- Conversor TV digital (televisor 21”)
- Heladera y freezer

Escenario 2: Reemplazando en la “vivienda media” las lámparas incandescentes por 6 LED A13, las halógenas por 3 LED A13, los tubos fluorescentes por 3 LED A1, las LFCs por 4 LED A13 y las dicroicas por 3 LED A15, manteniendo el mismo nivel de luminancia.

Las cargas fueron modeladas en el programa ATP (Alternative Transients Program) como impedancias series, acoplado en paralelo (para las unidades no lineales) fuentes de corrientes representativas del comportamiento de los componentes armónicos. Configurando las cargas en el ATPDraw (interfaz gráfica del programa ATP) y alimentándolas con una fuente sinusoidal de tensión 220V, se realizaron simulaciones en el dominio del tiempo, obteniendo los resultados resumidos en la Tabla 8 para ambos escenarios.

| | <i>Escenario 1</i> | | | | <i>Escenario 2</i> | | | |
|---------------------|--------------------|--------|---------------|--------------|--------------------|--------|---------------|--------------|
| | $I_{RMSi}[A]$ | THDi % | $I_{RMSb}[A]$ | $I_{RMS}[A]$ | $I_{RMSi}[A]$ | THDi % | $I_{RMSb}[A]$ | $I_{RMS}[A]$ |
| Iluminación | 2.32 | 28.67 | 0.67 | 2.41 | 0.21 | 130.53 | 0.27 | 0.35 |
| Otras Cargas | 6.54 | 17.73 | 1.16 | 6.64 | 6.54 | 17.73 | 1.16 | 6.64 |
| Total | 8.43 | 19.09 | 1.61 | 8.58 | 6.67 | 19.05 | 1.27 | 6.79 |

Tabla 8: Análisis de las corrientes resultantes de los escenarios simulados en el ATPDraw.

Como se puede ver de la Tabla 8, al comparar los escenarios de estas dos “viviendas medias”, la disminución de corriente total es de 8,58A a 6,79A. Esto implica un ahorro del orden de 0,35 kWh, que multiplicado por un supuesto de 4 h de iluminación residencial promedio produce un ahorro energético diario de 1,4 kWh.

La Secretaría de Energía y la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la República Argentina determinan anualmente el factor de emisión de CO₂ de la red eléctrica nacional. En documentos como (SEN, 2007) se establece una metodología de estimación de cuanto dióxido de carbono se emite a la atmósfera por cada MWh eléctrico producido. Si bien esta estimación depende de factores puntuales, diversos ejemplos muestran que actualmente se está en el orden de 0,43 a 0,47 ton CO₂/MWh. Por tanto, considerando una media de 0,45 ton CO₂/MWh, una reducción de 1,4 kWh implica que se dejan de emitir a la atmósfera unos 630 g CO₂ diarios por vivienda. Si consideramos además que la combustión de un litro de gasolina produce unos 2300 g CO₂ y el gasoil unos 2600 gr, se tiene que esta reducción del consumo de energía debido al cambio de los sistemas de iluminación equivale a no consumir unos 0,27 litros diarios de gasolina o unos 0,24 litros de gasoil.

Otro aspecto a considerar en el reemplazo de las lámparas incandescentes es la generación de nuevos residuos. Los sistemas de iluminación producen diversos tipos de desechos, siendo el mercurio uno de los más perjudiciales. El mercurio es un metal pesado que se encuentra en casi todas las lámparas de descarga. Su efecto perjudicial se potencia cuando la ampolla de la lámpara es destruida, cosa que ocurre en la mayoría de los casos cuando la basura es compactada para depositarla en los vertederos o rellenos sanitarios de nuestro país. En esta forma “libre” puede contaminar el suelo o el agua, medio por el cual puede depositarse en los tejidos vivos de plantas e ingresar en la cadena alimentaria.

El contenido típico de mercurio de una LFC varía de 3 a 5 mg. Si se reemplazaran 5 millones de lámparas incandescentes por LFCs, se estaría liberando al ambiente unos 15 a 25 kg de mercurio. Se impone la necesidad de elaborar una campaña para gestionar esta corriente de residuos que evite la liberación de este contaminante.

CONCLUSIONES

Se han analizado distintos tipos de lámparas y artefactos electrodomésticos usualmente encontrados en un hogar residencial a partir de una encuesta realizada por nuestro Grupo de Investigación en 61 hogares de la ciudad de Mar del Plata. Se ensayaron en el laboratorio lámparas LEDs decorativas y de alto flujo lumínico. Posteriormente con software específico para el tratamiento de la transformada rápida de Fourier para todas las señales capturadas en formato digital, se obtuvo sus espectros en frecuencia (componentes armónicos en amplitud y fase). Complementariamente se midieron potencias, corrientes, distorsión y armónicos de diferentes electrodomésticos y aparatos de electrónica usualmente encontrados en los hogares de usuarios residenciales.

Para evaluar finalmente la evolución de los índices de distorsión de corriente en la red, se plantearon dos escenarios, simulando el reemplazo de todas las luminarias por lámparas LEDs. En las distintas simulaciones se combinaron con los modelos ensayados de electrodomésticos y aparatos electrónicos (equipos de audio, televisores, computadoras, etc.). Los modelos fueron planteados como fuentes de corrientes, representando los diferentes componentes armónicos en amplitud y fase. Esta evaluación se realizó en el dominio del tiempo aplicando el ATPDraw (Alternative Transients Program), verificando que una alta concentración de lámparas LEDs no modifica los índices de distorsión, esto en gran parte debido a que la inyección de armónicos individuales serán de menor valor nominal, habida cuenta que sus potencias son sensiblemente inferiores a las incandescentes y halógenas.

Finalmente enumeramos las conclusiones más destacadas de este trabajo:

- La potencia que actualmente es dedicada a la iluminación en un usuario residencial medio con veinte luminarias, se reduce significativamente si todas las lámparas (fluorescentes, incandescentes) se sustituyen por las de tecnología LEDs. En el horario de 19 a 22hs el reemplazo de todas las lámparas por las del tipo LED, supone un ahorro de 0,35kWh, esto es un total diario de 1.4kWh.
- El nivel de THDI% en las lámparas LEDs es muy variable, dependiendo del modelo y potencia de la unidad. Así se obtuvieron valores desde el 10% hasta un máximo del 176%.

- Si bien el valor del THDI% resultante de la corriente de iluminación es alto, hay que considerar que los efectos diversidad y atenuación no han sido evaluados en las simulaciones planteadas. En los ensayos realizados en el laboratorio se demostró que conectar 10 lámparas LEDs, el THDI disminuyó un 16%. En este sentido hay investigaciones realizadas combinando lámparas LFCs y LEDs que demuestran una considerable disminución de armónicos preferentemente en los de orden mayor [9].
- Cada vez que se reemplace una lámpara por una de tecnología LED mayor cantidad de armónicos se inyectarán a la red, sin embargo, no aportarán niveles de distorsiones de corriente importantes, por cuanto la eficiencia lumínica expresada en lm/W es sustancialmente mayor a las incandescentes. Simulaciones realizadas con cargas mixtas de LFCs y LEDs en dos distribuidores (IEEE 13) y otro correspondiente a uno real, demuestran que los niveles de distorsión en tensión no llegan a ser importante, dependiendo esto de la topología de la red y de cuan balanceado esté el sistema [10].
- Una LFC tiene entre 3 a 5mg de mercurio, mientras que las LEDs están exentas de ese metal. Por tanto un reemplazo de incandescentes por LEDs trae aparejado una mejor preservación del medio ambiente.

NOMENCLATURA

THD_I% - Índice de distorsión armónica total de corriente.
 THD_U% - Índice de distorsión armónica total de tensión.
 I_{RMS} - Valor eficaz total de la corriente.
 I_{RMS1} - Valor eficaz de la componente fundamental de corriente.
 I_{RMSh} - Valor eficaz total de los componentes armónicos

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la empresa ALIC, en particular al Director, Alan Tesler, por la valiosa colaboración al donar al Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la UNMdP, todas las lámparas LEDs de alto flujo lumínico ensayadas en este trabajo.

ABSTRACT: Since last year, our country enacted the ban on the sale of incandescent lamps from the 25 W. This paper analyzes the impact on the rational use of energy and influence on quality indices, with the progressive increase of lamps with high content of harmonic components that will be replacing incandescent bulbs that act as linear loads. Under the assumption that in the coming years, the imposition of massive use of LED lamps, various types were modeled in the ATP (Alternative Transients Program) along with other typical residential loads. The final values resulting from the simulations show that the replacement of existing lamps by LEDs do not cause further increases in levels of current distortion while an improvement in environmental impact and significant savings in energy consumption.

Keywords: harmonics, power quality, THDI, lamp LED, simulation, Alternative Transient Program.

REFERENCIAS

- Pileggi D. J., Gulachenski E.M., Root C. E., Gentile T.J., Emanuel A. J., "Effect of modern compact fluorescent lights on voltage distortion" IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 8, no. 3, pp. 1451-1459. 1993.
- Emmanuel A. E., Gentile T. J., Pileggi D. J., Gulachenski E. M., Root C. E., "The Effect of Modern Compact Fluorescent Lights on Voltage Distortion", IEEE Transaction On Power Delivery, Vol. 8, N° 3, Julio 1993.
- Khan A. K., Dwyer R., McGranaghan M., "Evaluation of Harmonic Impacts from Compact Fluorescent Lights On Distribution Systems", IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 10, No 4, Noviembre 1995.
- Brugnoni M. y Iribarne R., "Estudio de impacto en redes de distribución y medio ambiente debidos al uso intensivo de lámparas fluorescentes compactas" Facultad de Ingeniería, UBA. Dirección Nacional de promoción, Secretaría de Energía, Mayo de 2006.
- Tanides C. G. y Iglesias Furfaro H. D., "Iluminación Eficiente en el Sector Residencial Argentino: Evolución y Perspectivas Futuras", Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 14, 2010.ISSN 0329-5184.
- Suárez J., di Mauro G., Anaut D., Agüero C. Análisis de la distorsión armónica y los efectos de atenuación y diversidad en áreas residenciales. Revista IEEE América Latina, 3(5):71-77, diciembre, 2005.
- Mansoor A., Grady W. M., Chowdhury A. H., y Samotyj M. J., "An Investigation of Harmonics Attenuation and Diversity Among Distributed Single-Phase Power Electronic Loads", IEEE Trans. On Power Delivery, vol. 10, no. 1, Enero 1995, pp. 467-473.
- El-Saadany E. y Salama M., "Reduction of the net harmonic current produced by single-phase non-linear loads due to attenuation and diversity effects," Electrical Power & Energy Systems, vol. 20, no.4, pp. 259-268, Mayo 1998.
- Čuk V., Cobben J. F. G., Kling W. L. y Timens R. B.; "An analysis of diversity factors applied to harmonic emission limits for energy saving lamps", Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2010 14th International Conference on, 26-29 Sept. 2010.
- Blanco A. M. y Parra E. E., "Effects of High Penetration of CFLs and LEDs on the Distribution Networks", Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2010 14th International Conference on, 26-29 Sept. 2010.