



LOS NUEVOS SISTEMAS DE ILUMINACIÓN Y SU VINCULACIÓN CON LAS REDES DE SUMINISTRO ELÉCTRICO

G. A. Barbera*

M. A. Dalla Costa**

F. Issouribehere*

H. G. Mayer*

*** IITREE-FI-UNLP
Argentina**

**** GEDRE UFSM
Brasil**

RESUMEN

Desde ya hace algunos años se percibe en el mundo una marcada tendencia a la eficiencia energética y esto involucra, desde luego, a las distintas fuentes de luz eléctrica. La Argentina no ha sido ajena a estos cambios habiéndose prohibido en el país la fabricación y venta de lámparas incandescentes de potencias superiores a 25 W, incentivando de esta manera el uso de lámparas más eficientes como las fluorescentes compactas, mientras el mercado, recientemente, ha incorporado lámparas LED para uso general.

Las diferentes tecnologías no sólo tienen un impacto en el rendimiento energético sino que existe, entre otras cosas, una interacción desde el punto de vista de la Compatibilidad Electromagnética (CE) entre estos dispositivos y la red eléctrica de la que son alimentadas. Específicamente, en lo que ocupa a este trabajo, se hará referencia a distintos tipos de lámparas (principalmente incandescentes, fluorescentes y LEDs) en donde las mismas serán pasibles de aceptar perturbaciones provenientes de la red o de generarlas de acuerdo a sus características y principio de funcionamiento. De estas perturbaciones se analizarán las armónicas y las fluctuaciones de tensión (*flicker*).

En el artículo se presenta una breve descripción de los distintos sistemas de iluminación, las topologías requeridas para alimentar a las lámparas modernas y el encuadramiento de los distintos sistemas dentro de la Compatibilidad Electromagnética; particularmente la emisión de armónicas por parte de éstas y la susceptibilidad que las mismas poseen a las fluctuaciones de tensión.

Adicionalmente, se profundizará sobre la normativa internacional que vincula la CE con la iluminación y finalmente se presentarán resultados de ensayos de laboratorio caracterizando a las lámparas como cargas perturbadoras o susceptibles en las redes eléctricas.

PALABRAS-CLAVE

Armónicas – Balasto – Carga Perturbadora – Carga Susceptible – Compatibilidad Electromagnética (CE) – Flicker – Flujo Luminoso – Lámpara Incandescente – Lámpara Fluorescente Compacta – LED.

1. INTRODUCCIÓN

A modo de resumen, en la Figura 1 se expone un diagrama de Compatibilidad Electromagnética relacionado con las perturbaciones conducidas por la red. De estas perturbaciones se atenderá la generación de armónicas producidas por los nuevos dispositivos de iluminación y se efectuarán algunas consideraciones sobre el efecto que las fluctuaciones de tensión existentes en las redes eléctricas tienen sobre estos dispositivos. Por otro lado, justamente, estos dos tipos de perturbaciones son los que se encuentran actualmente regulados en Argentina.

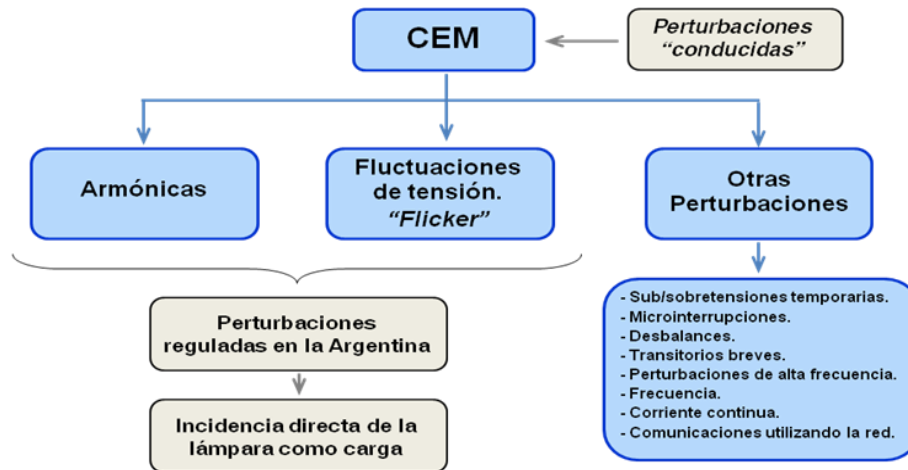


Fig. 1. Fenómenos abordados dentro de la CE, perturbaciones reguladas en la Argentina.

Si bien la normativa Argentina no distingue a las lámparas como una carga particular al momento de regular la emisión de armónicas hacia la red eléctrica, estos dispositivos quedan incluidos dentro de los límites generales para los niveles correspondientes de tensión y potencia de suministro, como se detallará más adelante. Esta emisión de armónicas hacia la red eléctrica guarda estricta relación con la masiva incorporación de electrónica en funcionamiento alineal en dispositivos de iluminación convencional y, en el caso particular de las llamadas lámparas LED, esto es aún más marcado.

2. LA NORMATIVA IEC 61000-3-2

La normativa internacional de Compatibilidad Electromagnética que define los límites de emisión de armónicas de equipos electrónicos con corriente nominal inferior a 16 A por fase es la IEC 61000-3-2 [1]. Esta normativa clasifica los equipos electrónicos en 4 clases: A, B, C y D. La clase C es exclusiva para los equipos de iluminación, los que son divididos en dos familias, de acuerdo a la potencia activa de la entrada. La potencia que divide a estas dos familias es justamente 25 W.

2.1. Potencia activa de entrada mayor a 25W (P>25W)

Esta clasificación es la más restrictiva para los equipos de iluminación; las armónicas de la corriente de entrada de estos equipos no deben sobrepasar los límites relativos indicados en la Tabla I.

Tabla I. Límites para emisión de armónicas para equipos de iluminación con P>25W.

Orden del Armónico (n)	Corriente armónica máxima admisible expresada como porcentaje de la corriente de entrada a la frecuencia fundamental (%)
2	2
3	30 x FP
5	10
7	7
9	5
11 ≤ n ≤ 39	3

Donde FP es el factor de potencia del circuito. De la armónica 3 hasta la 39 sólo son limitadas armónicas impares.

2.2. Potencia activa de entrada inferior o igual a 25W ($P \leq 25W$)

La gran mayoría de los equipos de iluminación empleados en el ámbito residencial se encuentran incluidos en esa clasificación, la cual es menos restrictiva que la anterior, habida cuenta que se trata de potencias más pequeñas y por tanto con menor incidencia sobre el Sistema de Potencia. En este caso, los equipos de iluminación deben atender al menos **una** de las siguientes condiciones:

2.2.1. Opción I: Límites impuestos en la Tabla II

Las armónicas de la corriente de entrada de estos equipos no deben sobrepasar los límites relativos indicados en la Tabla II, los que son expresados en mA referidos a la potencia nominal de la lámpara.

Tabla II. Límites para emisión de armónicas para equipos de iluminación con $P \leq 25W$.

Orden del Armónico (n)	Corriente armónica máxima admisible por W (mA/W)
3	3,4
5	1,9
7	1,0
9	0,5
11	0,35
$13 \leq n \leq 39$	$3,85 / n$

2.2.2. Opción II: Ángulo de conducción de la corriente de entrada

En esta opción el equipo de iluminación debe atender dos condiciones: 1) la tercera armónica ($n=3$), expresada como porcentaje de la fundamental, no debe sobrepasar 86% y la quinta armónica ($n=5$) no debe sobrepasar 61%; 2) la forma de onda de la corriente de entrada debe empezar antes de 60° , su último pico debe empezar antes de 65° , y no debe terminar antes de 90° . En este caso, la referencia de 0° es el cruce por cero de la tensión de entrada.

3. SITUACIÓN REGULATORIA EN ARGENTINA

En la República Argentina la regulación de los límites de emisión, en este caso no a nivel de equipos electrónicos sino de usuarios que poseen distintos tipos de cargas y entre ellas los sistemas de iluminación, son establecidos por el Ente Nacional Regulador de la Electricidad (ENRE) [2]. En las Tablas III y IV se muestran estos límites de emisión. Sólo se exponen aquí los límites de aquellas categorías de usuarios que corresponden a suministros en baja tensión.

Tabla III. Límites de emisión de armónicas impares no múltiplo de tres para usuarios según ENRE.

Orden de Armónica [n]	Usuarios T1	Usuarios T2 y T3
	Límite [A]	Límite (% de corriente de carga contratada)
Armónicas impares no múltiplos de 3		
5	2,28	12
7	1,54	8,5
11	0,66	4,3
13	0,42	3
17	0,26	2,7
19	0,24	1,9
23	0,2	1,6
25	0,18	1,6
> 25	$4,5/n$	$0,2+0,8*25/n$

Tabla IV. Límites de emisión de armónicas impares múltiplo de tres y pares según ENRE.

Orden de Armónica	Usuarios T1	Usuarios T2 y T3
[n]	Límite [A]	Límite (% de corriente de carga contratada)
Armónicas impares múltiplos de 3		
3	4,6	16,6
9	0,8	2,2
15	0,3	0,6
21	0,21	0,4
> 21	4,5/n	0,3
Armónicas pares		
2	2,16	10
4	0,86	2,5
6	0,6	1
8	0,46	0,8
10	0,37	0,8
12	0,31	0,4
> 12	3,68/n	0,3
TDTI [%]	-	20

4. TOPOLOGÍAS UTILIZADAS PARA ACCIONAMIENTO Y CONTROL

4.1. Balastos electrónicos para Lámparas Fluorescentes Compactas (LFCs)

Los balastos electrónicos son equipos electrónicos ya consolidados en la industria y su circuito clásico está mostrado en la Figura 2. Este circuito está compuesto por un puente rectificador (D_1 a D_4), un capacitor de bus (C_B), un inversor medio puente (S_1 y S_2), un filtro resonante (L_s , C_s y C_p) y la propia lámpara [3].

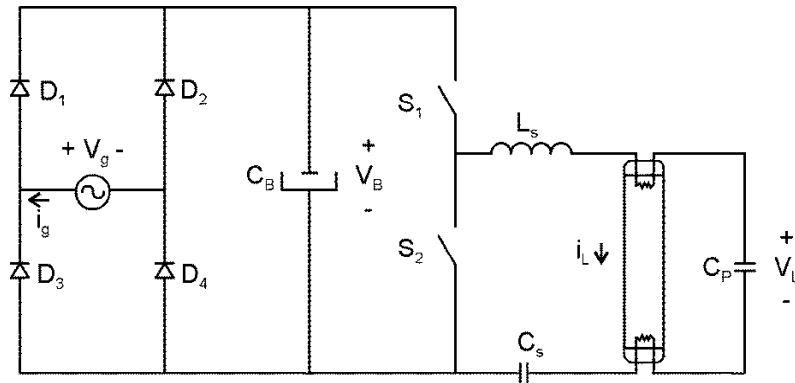


Fig. 2. Balasto electrónico para LFC.

El resultado de la simulación de la característica de entrada en este tipo de balasto está mostrado en la Figura 3. Se observa que el ángulo de conducción de la corriente de entrada (I_g) puede ser controlado por la ondulación de la tensión de bus (U_B). O sea, para incrementar el ángulo de conducción de la corriente de entrada con el propósito de disminuir su contenido armónico, se debe aumentar la ondulación de la tensión de bus, incluyendo un capacitor C_B de valor más pequeño. Sin embargo, esta ondulación se reflejará en la corriente de la lámpara (I_L) lo que disminuye la vida útil de la lámpara y puede producir fluctuaciones en la intensidad luminosa de una frecuencia del doble de la de red (100 ó 120 Hz, según sea el país que se analice).

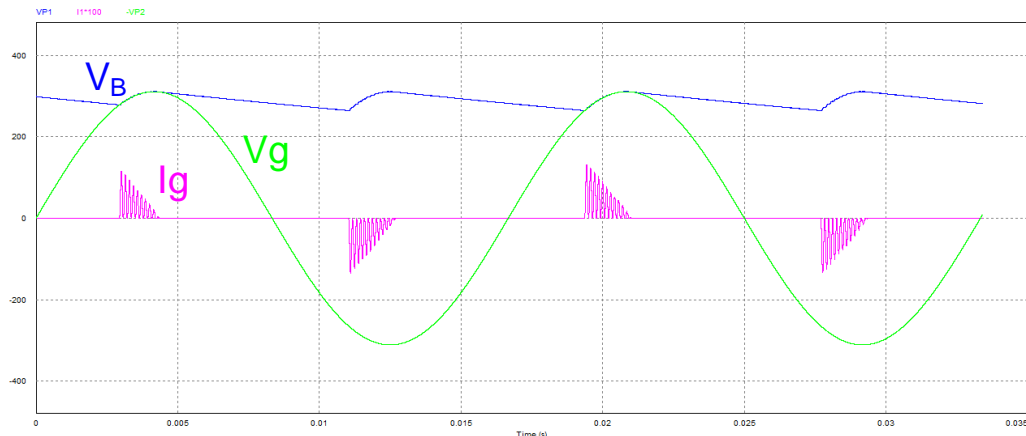


Fig. 3. Tensión y corriente de entrada, y tensión de bus para LFCs.

4.2. Circuitos de alimentación para Diodos Emisores de Luz (LEDs)

A pesar de que la alimentación de los LEDs es muy distinta a la de las LFCs, la etapa de entrada de estos dos tipos de circuitos es idéntica, como puede ser observado en la Figura 4. De ese modo, las formas de onda de la corriente de entrada para los dos circuitos pueden ser representadas por la Figura 3. De la misma manera que para las LFCs, la ondulación de la tensión de bus se refleja en la corriente de los LEDs, y un rizado de corriente elevado en los LEDs disminuye su eficiencia y vida útil.

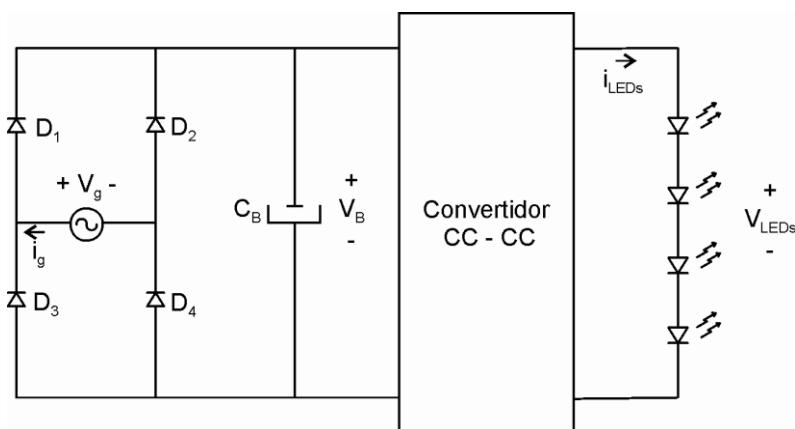


Fig. 4. Circuito de Alimentación para LEDs.

Del análisis presentado anteriormente, se concluye que para equipos de iluminación con potencia activa inferior o igual a 25W es posible lograr que los mismos cumplan la normativa IEC 61000-3-2 sólo aumentando el ángulo de conducción de la corriente de entrada. Sin embargo, esto afectaría negativamente la alimentación de las LFCs o LEDs.

En el caso de equipos de iluminación con potencia superior a 25W, como se presenta en las luminarias de iluminación pública, debido a las restricciones más severas de la normativa, sería necesario incorporar una etapa activa para corrección del factor de potencia y filtrado de armónicas, a los efectos de provocar menos perturbaciones en la red de suministro eléctrico.

5. ENSAYOS DE LABORATORIO EN LÁMPARAS

En este punto se expondrán las características de emisión de armónicas de dos tipos de lámparas comerciales de uso doméstico actual. Las mediciones se realizaron utilizando instrumental adecuado para la determinación de parámetros de calidad de servicio [4].

5.1. Caso de Lámpara Fluorescente Compacta

La lámpara aquí ensayada es del tipo fluorescente compacta con potencia declarada en 11 W. La misma, como es sabido, está constituida por un tubo fluorescente tradicional, pero su excitación se establece a partir de un circuito electrónico incorporado, como el de la Figura 2. En la Figura 5 se observa el contenido armónico en la corriente de entrada (I_e) junto a su correspondiente tabla reducida extraída del propio instrumento, en porcentaje respecto de la fundamental. La proliferación de armónicas impares se hace evidente, ya que la rectificación y la posterior conmutación periódica de llaves electrónicas en frecuencias de algunos kHz es la base de la operación de la LFC.

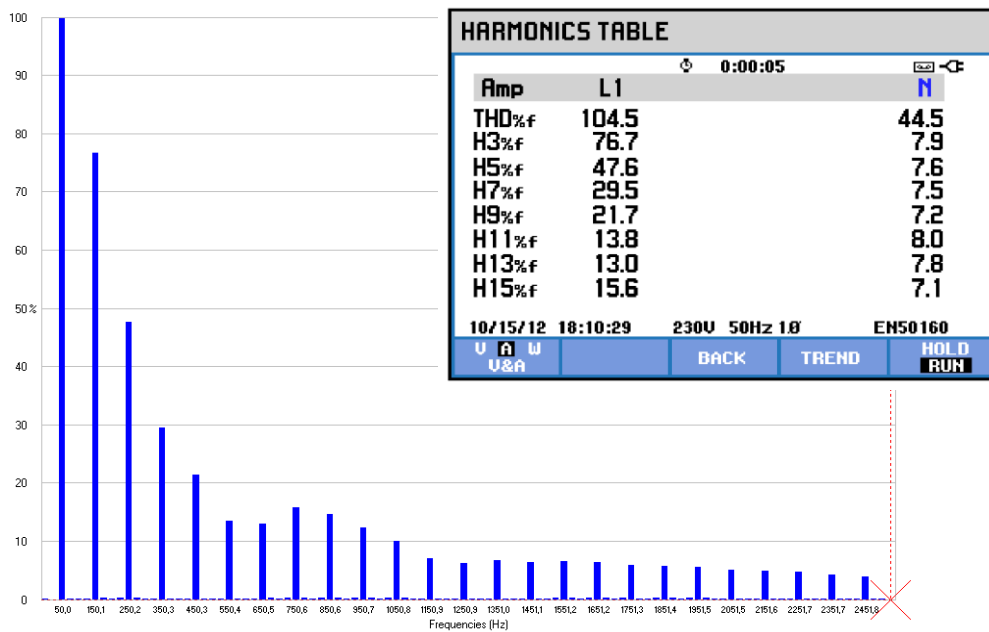


Fig. 5. Espectro correspondiente a armónicas en corriente de LFC de 11 W.

La forma de onda de la corriente distorsionada que produce el dispositivo ensayado en este caso puede verse en la Figura 6. Tal como se predijo por medio de la simulación, la onda es compatible con los pulsos de carga de un rectificador de onda completa con capacitor.

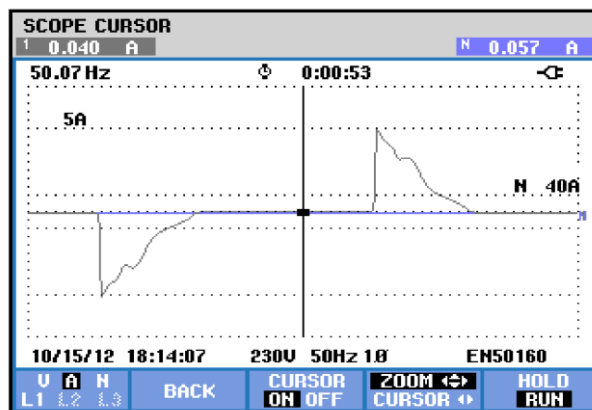


Fig. 6. Forma de onda de la corriente de LFC de 11 W.

El contenido armónico es importante, de hecho los valores de las armónicas en [mA] referidos a la potencia nominal están por encima de lo establecido en el Punto 2.2.1. Sin embargo, de la evaluación tanto del espectro (armónicas 3^a y 5^a) como de la forma de onda de la corriente, se concluye que la lámpara cumple con los requerimientos presentados en el Punto 2.2.2.

5.2. Caso de lámpara LED

Luego, se analizó el tipo de lámpara LED, con potencia declarada en 6 W, construida con electrónica de estado sólido en su totalidad. En la Figura 7 se observa el correspondiente diagrama de armónicas presentes en la corriente del mencionado dispositivo junto a una tabla reducida extraída del propio instrumento, en porcentaje respecto de la fundamental. Se obtuvieron porcentajes más altos de corrientes armónicas que en el caso anterior, también impares, pero con una característica más propia de un rectificador de onda completa con capacitor.

Comparando estos valores con los especificados para estos dispositivos por los aportados por la Norma IEC 61000-3-2 específica, resulta que se incumplen los límites de emisión allí especificados, tanto en el Punto 2.2.1 como en el Punto 2.2.2 (armónicas 3^a y 5^a). Por lo tanto, esta lámpara no cumpliría con la Norma.

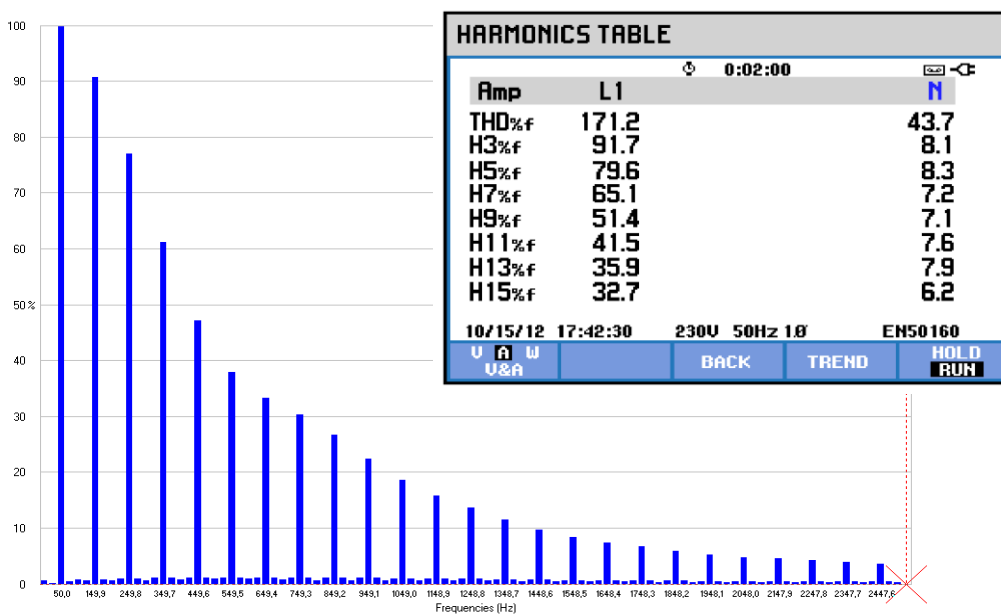


Fig. 7. Espectro correspondiente a armónicas en corriente de lámpara LED de 6 W.

En la Figura 8 se muestra la correspondiente forma de onda de corriente de la lámpara LED ensayada donde se observa el correlato de lo comentado anteriormente en el dominio del tiempo.

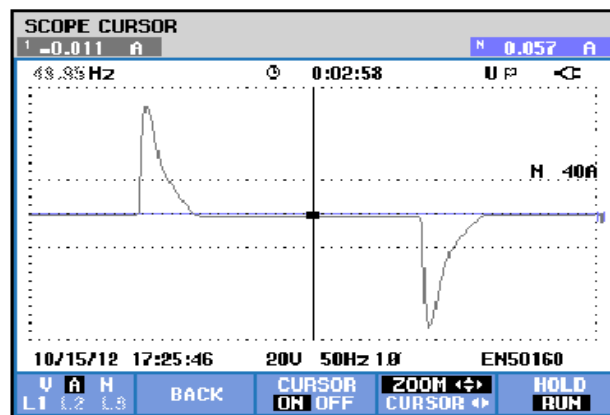


Fig. 8. Forma de onda de la corriente de lámpara LED de 6 W.

6. COMENTARIOS SOBRE LA SUSCEPTIBILIDAD AL FLICKER

Los primeros estudios sobre flicker se realizaron en lámparas incandescentes. La reacción de una lámpara incandescente a las fluctuaciones de tensión puede ser descrita por un *factor de ganancia* (G), el que se estima a partir de la relación entre la fluctuación relativa de la intensidad de luz y la fluctuación relativa de la tensión de alimentación.

Naturalmente, a los efectos que la intensidad luminosa provista por las lámparas sea constante y no cause molestia a los usuarios, debe procurarse que dicho factor de ganancia se mantenga lo más pequeño posible. En el caso particular de una lámpara incandescente, debido a su principio de funcionamiento, se observa una importante variación en el flujo luminoso al ser excitada con una tensión fluctuante.

En este sentido, resultó de sumo interés determinar la vulnerabilidad de las lámparas más modernas al ser alimentadas con tensiones fluctuantes. Para ello, se utilizó un equipo preparado para generar flicker con distintos niveles de severidad.

Al evaluar las lámparas fluorescentes compactas se observó que si bien la fluctuación de flujo luminoso se encontraba presente, el mismo resultó sustancialmente menor que en el caso de las incandescentes. Esta menor vulnerabilidad claramente se debe a que la electrónica presente entre la tensión de alimentación y la lámpara atenúa la fluctuación.

Por último, al aplicarle la tensión fluctuante a la lámpara LED se observó que la variación de flujo luminoso fue prácticamente despreciable, provocando ningún tipo de molestia al ojo humano.

7. CONCLUSIONES

- En la actualidad se presenta un claro cambio de paradigma en materia de sistemas de iluminación.
- Los sistemas más modernos presentan notables ventajas en términos de eficiencia energética y desarrollo sustentable.
- Es menester, por otro lado, evaluar el comportamiento de las lámparas dentro del marco de la Compatibilidad Electromagnética en los sistemas eléctricos.
- En ese sentido, por un lado, se observó un aumento significativo en la emisión de armónicas por parte de las lámparas actuales, al compararlas con las lámparas incandescentes. De hecho, a partir de los ensayos realizados se comprobó que ciertas lámparas comerciales LEDs no cumplieron con las especificaciones de la norma IEC.
- De acuerdo a las topologías utilizadas para su control, las estrategias apropiadas para reducir el contenido armónico van en detrimento de la vida útil de las lámparas.
- En la medida que estas cargas tengan un mayor peso en el total demandado, podría darse que los usuarios transgredan los límites de emisión establecidos por el ENRE en la Argentina, aún cuando las lámparas individuales cumplan con los límites de la Norma sobre equipos.
- Por otro lado, en los sistemas modernos se vislumbró una notable mejora en lo que se refiere a la susceptibilidad de las lámparas a las fluctuaciones de tensión.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] IEC 61000-3-2. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits – “Limits for harmonic current emissions (equipment input current $\leq 16 A$ per phase)”.
- [2] Ente Nacional Regulador de la Electricidad (ENRE). Anexo a la Resolución ENRE 99/97. Base Metodológica para el Control de la Emisión de Perturbaciones. Etapa 2. 1997.
- [3] Mohan, Undeland, Robbins, “Power Electronics”. 2nd Edition. John Wiley and Sons, 1995.
- [4] IEC 61000-4-7. Part 4: Testing and measurement techniques. Section 7: “General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply system and equipment connected thereto”.