

MEDICIONES DE PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE LÁMPARAS LED E IMPACTO EN LA CALIDAD DE ENERGÍA

MEASUREMENTS OF ELECTRICAL PARAMETERS OF LED LAMPS AND IMPACT ON POWER QUALITY

Mg Ing. Adrian F D'Andrea, Ing. Carlos G. Pacheco

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Departamento Ingeniería Eléctrica

Cel.: 3425401331- Lavaisse 610, Cp.: S 3004EWB, Santa Fe, Argentina

afadandrea@gmail.com

RESUMEN

El consumo energético a nivel mundial crece constantemente. Para el año 2040, se espera que aumente un 56% o más, y como la iluminación representa prácticamente el 10% del mismo, el reto energético que nuestro planeta tiene por delante es grande. Por este motivo existe un trabajo constante en la búsqueda por mejorar la eficiencia energética de los artefactos eléctricos y del tipo de iluminación, presentes en hogares, comercios e industrias. El surgimiento de la tecnología de iluminación LED representa un hito importante en el tratamiento de este problema. Las lámparas LED utilizan un 75% menos de energía que las lámparas incandescentes, aumentando enormemente la eficiencia energética. Pero como contrapartida los diodos emisores de luz o Leds son cargas no lineales que pueden ocasionar efectos no deseados. Para evitar estos efectos perjudiciales sobre los distintos componentes de una red (cargas, transformadores, etc.), estas cargas alineales deberían cumplir con los límites de calidad establecidos en las normativas vigentes. Por tal motivo nos propusimos verificar el efecto que producirían en un sistema eléctrico de baja tensión, debido a la utilización de lámparas de diodos emisores de luz (LED), en cuanto al impacto energético y calidad de energía. Para las mediciones y análisis, se utilizaron lámparas LED de diferentes potencias, distintos modelos y marcas. Las mediciones se realizaron en forma individual y combinando algunas. Los resultados de las mediciones de los parámetros eléctricos y de calidad de energía como THDI, THDV, se compararon con los límites establecidos por el ENRE.

Palabras claves: armónicos; calidad; energía; corriente; LED.

SUMMARY

Global energy consumption is constantly growing. By the year 2040, it is expected to increase by 56% or more, and since lighting represents practically 10% of it, the energy challenge that our planet faces is great. For this reason there is constant work in the search to improve the energy efficiency of electrical devices and the type of lighting, present in homes, businesses and industries. The emergence of LED lighting technology represents an important milestone in addressing this problem. LED lamps use 75% less energy than incandescent lamps, greatly increasing energy efficiency. But as a counterpart, light emitting diodes or LEDs are non-linear loads that can cause unwanted effects. To avoid these detrimental effects on the different components of a network (loads, transformers, etc.), these nonlinear loads should comply with the quality limits established in current regulations. For this reason we set out to verify the effect that they would produce in a low voltage electrical system, due to the use of light emitting diode (LED) lamps, in terms of energy impact and energy quality. For the measurements and analysis, LED lamps of different powers, different models and brands were used. The measurements were made individually and by combining some. The results of the measurements of electrical and power quality parameters such as THDI, THDV, were compared with the limits established by the ENRE.

Keywords: harmonics; quality; energy; current; LED.

Introducción

Armónicos

Cualquier onda periódica, independientemente del nivel de distorsión que posea, puede ser descompuesta en una suma de componentes senoidales de frecuencias múltiplos de la correspondiente a la onda original, con sus correspondientes fases, más una componente unidireccional (de corriente continua). Estas componentes senoidales de la onda original, que tienen una frecuencia que es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental, se las denomina armónicas, y se identifican por tal múltiplo, que se llama orden de la armónica. La onda correspondiente al número 1 (uno), posee la frecuencia de la onda original y se denomina componente fundamental. Normalmente, la distorsión de la onda de tensión y corriente, y por ende la presencia de las armónicas, es generada por la existencia de cargas no-lineales como lo son los equipos con semiconductores e inductancias saturada [1].

Ensayos de lámparas LED

Se realizaron mediciones de diferentes parámetros eléctricos de lámparas LED, tales como corriente, tensión, potencia, factor de potencia, distorsión armónica, factor de cresta etc., con el propósito de conocer el comportamiento de estas cargas no lineales. Para esto se utilizó el analizador de calidad de energía Fluke 435. El uso de este equipo además permitió registrar información tal como ondas de tensión, de corriente, gráficos de armónicos y diagramas fasoriales.

Para el trabajo se seleccionaron lámparas LED de distintos fabricantes y de distintas potencias de hasta 15 W, disponibles en el mercado y con el analizador de energía Fluke 435 se realizó un registro de los parámetros eléctricos más importantes para lámparas conectadas individualmente y agrupadas. Se optó por un tiempo de integración de 1 minuto y 15 minutos de registro. Las mediciones comenzaron después de una previa estabilización de las lámparas. Luego se analizaron los registros obtenidos, lo cual permitió obtener la información resumida que aparece en la Tabla 1, esta incluye valores promedio de: corriente eficaz, THD I, potencia activa, factor de potencia, factor de potencia de desplazamiento (DFP) y factor de cresta, para cada una de las 9 lámparas ensayadas.

En la Figura 1 se aprecia la evolución en el tiempo del THD I para todas las lámparas estudiadas

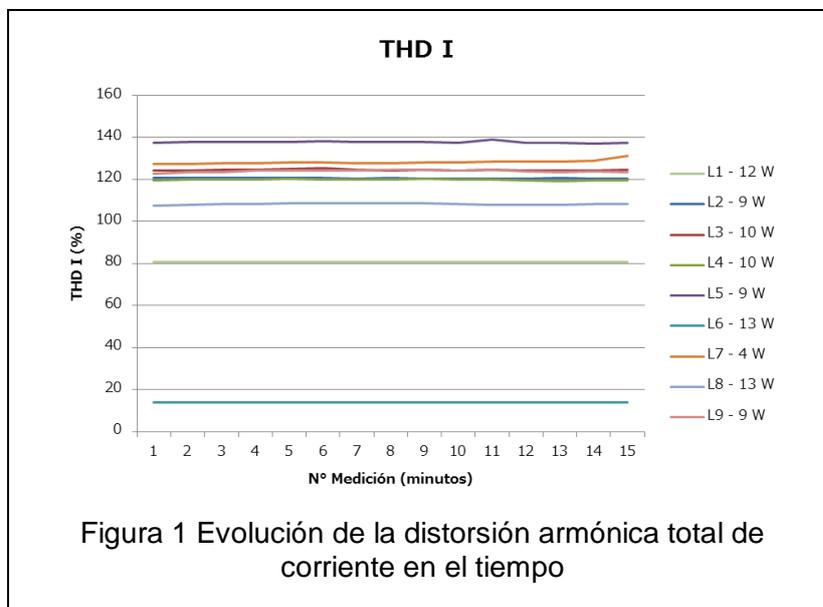


Tabla 1

Registro de parámetros de las lámparas ensayadas de pequeña potencia (hasta 13 W).

Nº	Lámpara	I [mA]	THD I [%]	P [W]	FP	DFP	FC
1	L1 - 12 W Luz día 6500K	82	80,71	10,5	0,56	0,96	3,65
2	L2 - 9 W Luz fría Blanco frío 6500K	49	120,55	6,2	0,56	0,89	3,74
3	L3 - 10 W Luz fría 6500K	52	124,55	6,5	0,56	0,90	3,73
4	L4 - 10 W Luz fría 6500K	67	119,93	8,6	0,57	0,90	3,63
5	L5 - 9 W Bco Luz de Día 6500K	66	137,73	8,1	0,55	0,93	3,56
6	L6 - 13 W	63	13,81	13,4	0,95	0,96	1,57
7	L7 - 4 W Luz cálida 3000K	37	128,30	4,7	0,56	0,91	3,43
8	L8 - 13 W Blanco cálido 2700K	82	108,30	11,3	0,60	0,88	3,11
9	L9 - 9 W Blanco cálido 2700K	68	123,96	8,7	0,57	0,90	3,47

En la figura 1 se observa la distorsión armónica total de corriente. La única lámpara que tiene corrección de armónicos (L6) presenta un valor promedio de 13,8%, muy por debajo del resto de las lámparas ensayadas. En cuanto a las lámparas no corregidas, mostraron un THD I que va desde un valor promedio de 108,3% hasta 137,7%, excepto por la lámpara L4 que arrojó un valor de 80,7%, bastante por debajo en comparación con las demás.

Por otra parte, se puede decir que el efecto de la corrección de armónicos es muy importante, pasando de un THD I de 137,7% para una lámpara L5 (de 9 W) a un THD I diez veces menor para la lámpara L6 (de 13 W) corregida (ambas pertenecientes al mismo fabricante). La mayoría de estas presentan un THD I con valores entre 120% y 130%.

En la figura 2 se puede observar la potencia promedio consumida por las lámparas ensayadas y también la relación entre la potencia consumida y la nominal.

En la figura 3 se observa el valor promedio de distorsión de corriente que se observó en cada una de las lámparas. Este gráfico junto con el de la Figura 5 y muestran el efecto de la corrección de armónicos (lámpara L6).

El factor de potencia de desplazamiento (Cos. Fi) en casi todos los casos se encuentra en el rango de $0,90 \pm 0,02$, llegando en dos lámparas a 0,96 (figura 5).

En la tabla 1 y gráficos anteriores se observa que el THDI medido se encuentra aproximadamente entre 80 y 140% para lámparas no corregidas y 13,8% para la lámpara corregida. Estos valores de distorsión son significativos. Cuando estos dispositivos funcionan en conjunto, el comportamiento no es igual a la suma aritmética de los armónicos, sino que aparecen factores que atenúan la distorsión, lo que se va a analizar más adelante. El análisis en conjunto de las lámparas va permitir además comparar los resultados obtenidos en las respectivas mediciones con la normativa en cuanto a límites de distorsión armónica. En cuanto a la forma de onda y a la composición armónica, hay similitudes en un grupo de lámparas, pero en otras son muy diferentes, como por ejemplo la lámpara corregida L6, siendo el factor de potencia medido de 0,95 muy superior con respecto al resto (Figura 6). Si bien los valores de THDI son muy elevados, los niveles de corriente y potencia asociados son poco importantes. Por esto, es necesario considerar cómo se comportan estos

equipos actuando en forma combinada, cuando ya los valores de corriente y potencia comienzan a tomar mayor importancia, y por lo tanto empiezan a entrar en consideración los límites establecidos por la normativa.

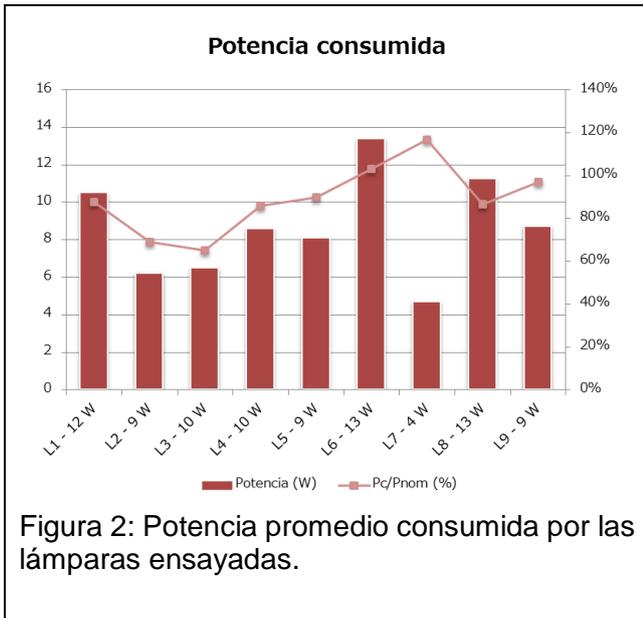


Figura 2: Potencia promedio consumida por las lámparas ensayadas.

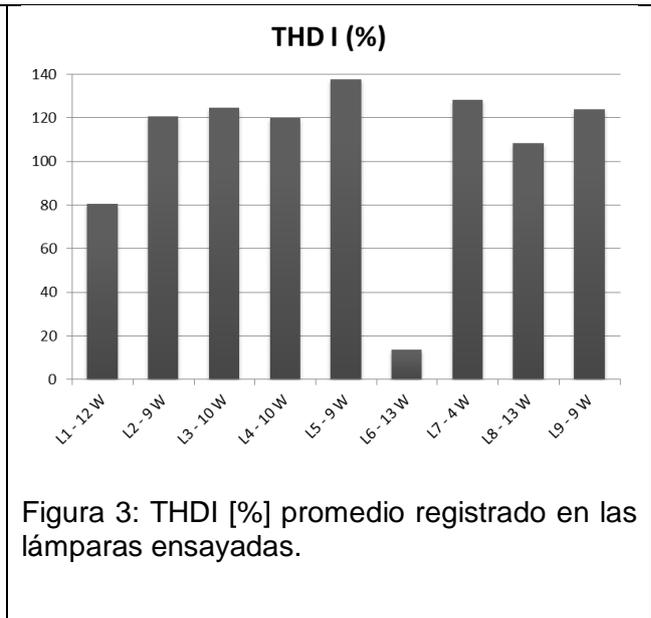


Figura 3: THDI [%] promedio registrado en las lámparas ensayadas.

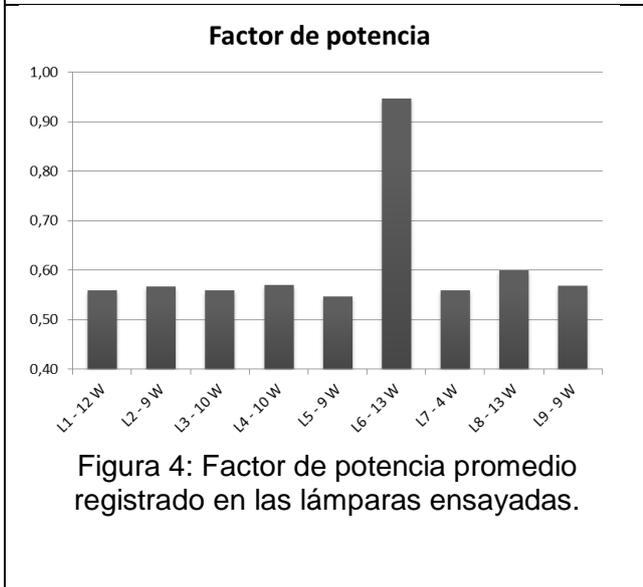


Figura 4: Factor de potencia promedio registrado en las lámparas ensayadas.

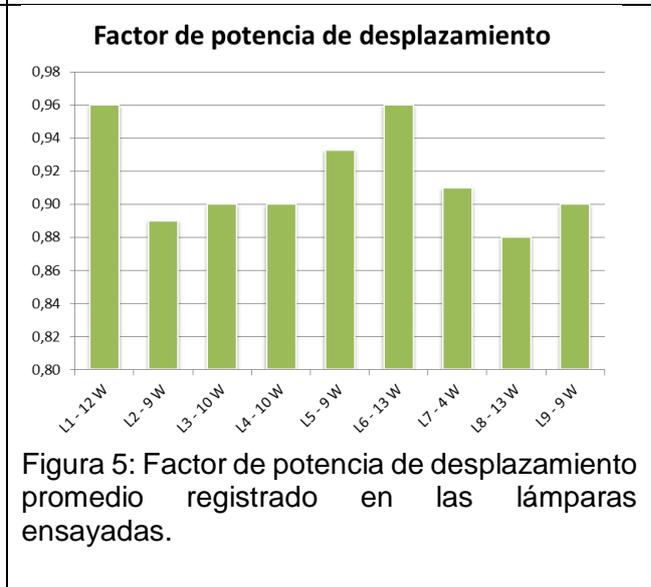


Figura 5: Factor de potencia de desplazamiento promedio registrado en las lámparas ensayadas.

Estudio de lámparas combinadas

Al ser cargas no lineales, si se conectan dos o más lámparas LED simultáneamente se observan dos efectos que reducen la distorsión de la corriente. En primer lugar, debido al aumento en la distorsión de la tensión de alimentación producido fundamentalmente por la caída de tensión en la impedancia de la red. Esta distorsión de la tensión trae como consecuencia una reducción del THDI, denominándose este efecto como “atenuación”. En segundo lugar, existen diferencias entre los ángulos de fase de los distintos armónicos de corriente de cada lámpara (incluso si son de la misma marca y potencia debido a las tolerancias de las características de las mismas), por lo que estos no se suman de forma aritmética. Este efecto se denomina “diversidad” y también da como resultado una menor distorsión.

En este caso se va a analizar el efecto de diversidad, pudiendo despreciarse el efecto de atenuación en estos ensayos debido al bajo consumo de las cargas. La suma de los armónicos va a ser geométrica, y la relación entre el vector suma y la suma aritmética de los mismos es el factor de diversidad, para el armónico. Este punto se divide en dos partes. En primer lugar, se realizan mediciones con 5 lámparas de baja potencia trabajando al mismo tiempo. Una vez que las mismas se estabilizan térmicamente, se inicia el registro de parámetros eléctricos, asignándose un tiempo de integración de 30 segundos. Luego, cada 5 minutos se retiraron una a una cada lámpara. En segundo lugar, se repite el ensayo, pero con equipos de la misma potencia y del mismo fabricante.

Estudio de lámparas combinadas de distinta marca y potencia

Los resultados obtenidos en este ensayo se resumen en la Tabla 3, donde se muestran los valores promedio calculados a partir de las mediciones.

Tabla 3
Parámetros eléctricos registrados en el ensayo de lámparas combinadas de baja potencia (hasta 13W)

N° Med	Lámp.	I [mA]	THDI [%]	U [V]	THDV [%]	P [W]	S [VA]	FP	DPF
1	1	50	115,75	225,42	2,42	6,83	11,37	0,6	0,92
2	1-2	106	111,18	225,07	2,37	14,83	23,97	0,62	0,93
3	1-3	176	108,24	224,84	2,42	25,33	39,46	0,64	0,95
4	1-4	229	101,12	223,47	2,45	33,7	51,09	0,66	0,95
5	1-5	270	100,5	222,68	2,4	39,67	60,19	0,66	0,94
N° Med	Lámp.	FC	I ₁ [%f]	I ₃ [%f]	I ₅ [%f]	I ₇ [%f]	I ₉ [%f]	I ₁₁ [%f]	I ₁₃ [%f]
1	1	3,64	100	77,08	52,74	37,91	30,83	20,89	13,49
2	1-2	3,1	100	79,83	55,75	37,64	28,46	19,76	9,22
3	1-3	3,28	100	80,77	55,63	33,68	21,53	15,11	9,62
4	1-4	3,07	100	78,46	50,38	27,7	16,61	9,13	4,49
5	1-5	2,97	100	77,93	49,2	26,77	16,28	7,9	2,94
N° Med	Lámp.	I ₁₅ [%f]	I ₁₇ [%f]	I ₁₉ [%f]	I ₂₁ [%f]	I ₂₃ [%f]	I ₂₅ [%f]	I ₁ [mA]	I ₃ [mA]
1	1	15,25	16	15,26	15,45	13,82	10,3	32,8	25,3
2	1-2	2,02	3,74	3,81	4,35	4,28	2,5	70,9	56,6
3	1-3	6,57	5,49	4,82	5,19	4,7	2,6	119,3	96,3
4	1-4	7,83	8,35	7,61	7,82	6,29	3,2	160,9	126,2
5	1-5	8,9	9,92	9,26	9,42	7,64	4,2	190,5	148,5
N° Med	Lámp.	I ₅ [mA]	I ₇ [mA]	I ₉ [mA]	I ₁₁ [mA]	I ₁₃ [mA]	I ₁₅ [mA]	I ₁₇ [mA]	I ₁₉ [mA]
1	1	17,3	12,4	10,1	6,9	4,4	5	5,3	5
2	1-2	39,5	26,7	20,2	14	6,5	1,4	2,7	2,7
3	1-3	66,3	40,2	25,7	18	11,5	7,8	6,6	5,8
4	1-4	81,1	44,6	26,7	14,7	7,2	12,6	13,4	12,2
5	1-5	93,7	51	31	15,1	5,6	17	18,9	17,6
N° Med	Lámp.	I ₂₁ [mA]	I ₂₃ [mA]	I ₂₅ [mA]					
1	1	5,1	4,5	3,4					
2	1-2	3,1	3	1,8					
3	1-3	6,2	5,6	3,1					

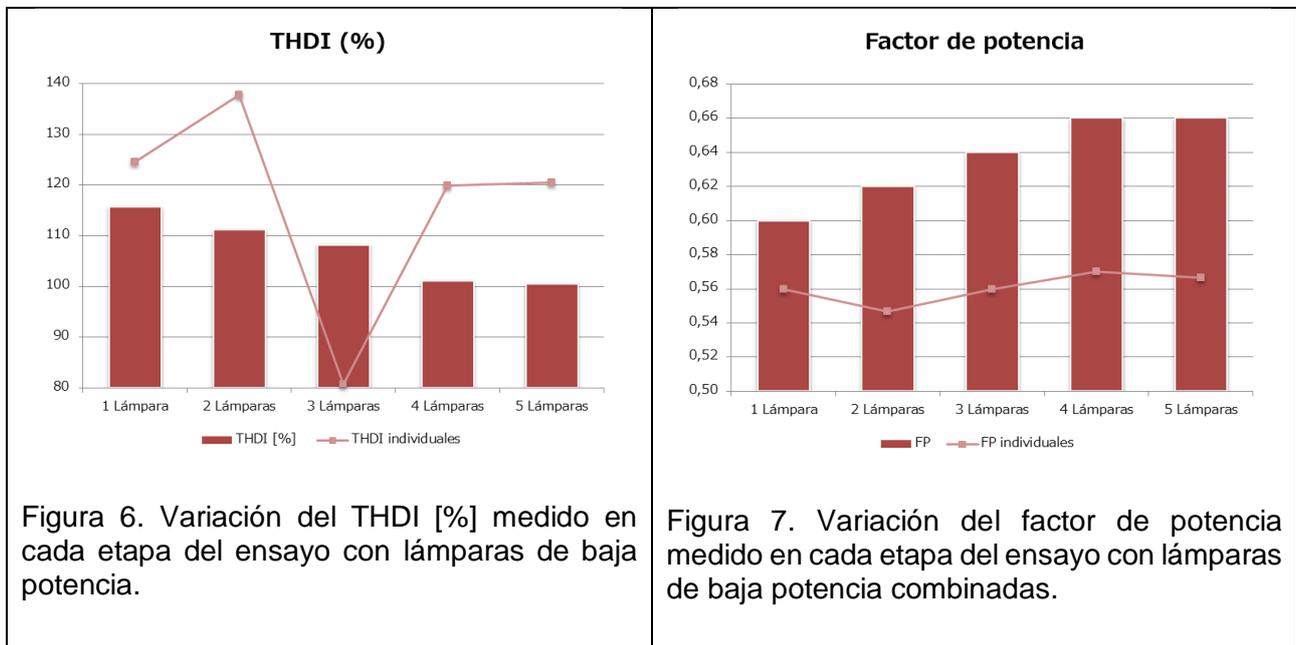
4	1-4	12,6	10,1	5,1
5	1-5	17,9	14,6	7,9

Referencias:

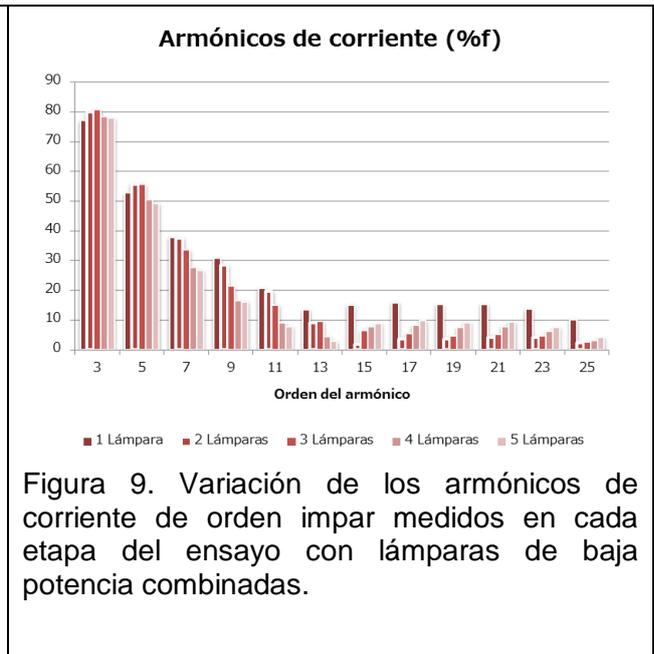
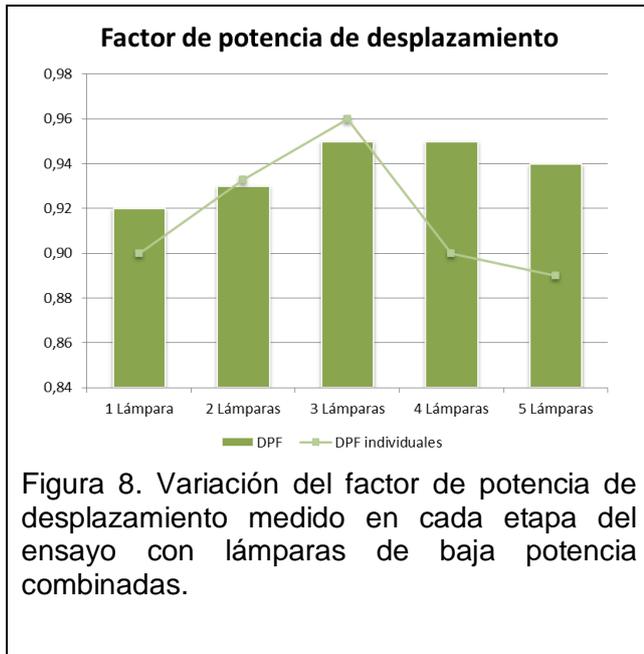
- Lámpara N° 1: 9 W (L2)
- Lámpara N° 2: 10 W (L4)
- Lámpara N° 3: 12 W (L1)
- Lámpara N° 4: 9 W (L5)
- Lámpara N° 5: 10 W (L3)

Nota: Estas fueron las lámparas estudiadas en este trabajo. Entre paréntesis se indica, a modo informativo, la nomenclatura usada para cada una en ese punto.

En la Figura 6 se aprecia la variación del THD I promedio medido para cada parte de la medición. También se muestran los THD I individuales de cada lámpara que se agrega a la medición correspondiente del grupo, de forma de comparar qué sucede con el THD I del grupo cuando se agregan las lámparas de mayor o menor THD I individual. La disminución del THD I global parece no depender significativamente del THD I individual de la lámpara que se añade en cada etapa, siendo el efecto de diversidad el factor determinante. El THD I observado varía de 116% para una lámpara individual a 100% para las cinco lámparas combinadas, un valor menor al promedio de THD I de las lámparas individuales (116%). Por otra parte, en las Figuras 6 a 8 se muestra gráficamente los valores promedio de los distintos parámetros en cada etapa de la medición.

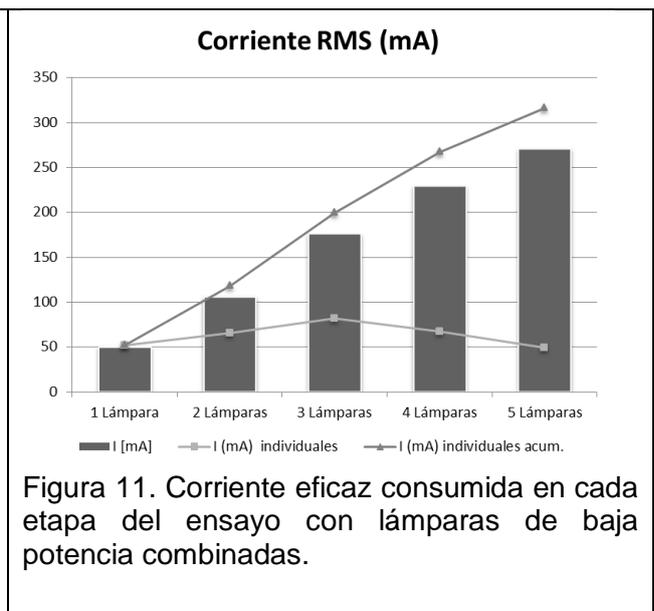
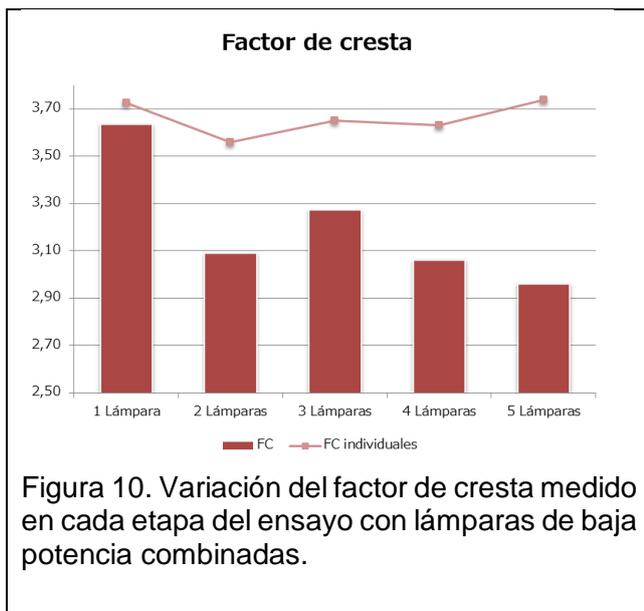


El factor de potencia muestra una mejora importante cambiando desde un valor de 0,60 (para una lámpara) hasta un valor de 0,66 (para 4 y 5 lámparas). En cuanto al factor de potencia de desplazamiento, este tiende a un valor intermedio respecto del valor correspondiente a las lámparas individuales.



En la figura 9 anterior, se discriminan los distintos armónicos de orden impar. Se ve la evolución de cada uno en cada parte de la medición. Al aumentar el número de lámparas, si bien el tercer armónico muestra una leve oscilación en su valor, la disminución de los armónicos de orden 5, 7, 9, 11 y 13 determina la caída del THD I. La incidencia de los armónicos 15º y superiores es muy escaso.

Al igual que en el caso del THD I, el factor de cresta muestra una mejora significativa pasando de un valor de 3,64 para una lámpara, a 2,97 para las cinco lámparas combinadas.



Como era de esperar, también la corriente eficaz consumida muestra una atenuación, respecto a la suma de las corrientes individuales consumidas por cada lámpara, disminuyendo en un 15% para las 5 lámparas (Figura 11).

En la Tabla 4 se resumen los resultados más importantes obtenidos en este punto y en la Tabla 5 se resume a partir de qué niveles de potencia es necesario tomar acciones para reducir el nivel de armónicos en la instalación bajo estudio y cuáles pueden ser tales acciones:

Tabla 4
Resumen de resultados. Lámparas LED de baja potencia combinadas

THDI individual promedio	THDI final	Evolución THDI	FP inicial	FP final
116,7%	100%	Decreciente	0,60	0,66
FC inicial	FC final	Suma de corrientes individuales (mA)	Corriente total (mA)	Atenuación de corriente
3,64	2,97	316	270	14,6%

Tabla 5
Problemas de armónicos y soluciones. Lámparas LED de baja potencia

Caso	Potencia	Se requiere	Posible solución	1 ^{ros} armónicos a filtrar
a	> 400 W	Filtrado de armónicos superiores (>13)	Filtro pasivo pasa alto en paralelo	21, 15, 17, 23
	> 1 kW	Filtrado de armónicos inferiores y superiores	Filtro activo p/ armónicos de orden 3 a 50	-
b	> 400 W	Filtrado de armónicos superiores (>13)	Filtro pasivo pasa alto en paralelo	15, 21
	> 1,5 kW	Filtrado de armónicos inferiores y superiores	Filtro activo p/ armónicos de orden 3 a 50	15, 21, 9

Nota: La potencia está dada por fase. En el caso b el sistema es trifásico

Tabla 6
Problemas de armónicos y soluciones para lámparas LED de baja potencia

Caso	Potencia	Se requiere	Posible solución	1 ^{ros} armónicos a filtrar
a	> 400 W	Filtrado de armónicos superiores (>13)	Filtro pasivo pasa alto en paralelo	23, 21
	> 500 W	Filtrado de armónicos inferiores y superiores	Filtro activo p/ armónicos de orden 3 a 50	>13, 9, 11
b	> 450 W	Filtrado de armónicos superiores (>13)	Filtro pasivo pasa alto en paralelo	21, 15
	> 700 W	Filtrado de armónicos de orden múltiplo impar de tres	Filtro pasivo pasa alto en paralelo	21, 15, 9
	> 1,75 kW	Filtrado de armónicos inferiores y superiores	Filtro activo p/ armónicos de orden 3 a 50	-

Nota: La potencia está dada por fase. En el caso b el sistema es trifásico

Se corrobora que el efecto de diversidad es un factor importante que se debe tener en cuenta en un análisis de armónicos. También se observa que en un sistema de mayor potencia (caso b) destacan los armónicos múltiplo impar de tres como los primeros que deben corregirse si se quiere estar dentro de los límites previstos por la norma.

Estudio de lámparas combinadas de la misma marca y potencia

En esta medición se analizan los parámetros de consumo de lámparas de baja potencia conectadas en grupo, siendo estas todas de la misma marca y potencia. Para esto se utilizaron cinco lámparas LED de potencia nominal igual a 12 Watts. Los resultados obtenidos en este ensayo se resumen en la Tabla 7, donde se muestran los valores promedio calculados a partir de las mediciones.

Tabla 7
Parámetros eléctricos registrados en el ensayo de lámparas combinadas de baja potencia

N° Med.	Lámp.	I [mA]	THDI [%]	U [V]	THDV [%]	P [W]	S [VA]	FP	DPF	FC
1	1	92	134,21	227,10	2,80	11,41	20,85	0,55	0,91	4,20
2	1-2	180	134,73	225,94	2,83	22,34	40,69	0,55	0,92	4,08
3	1-3	268	133,79	225,88	2,81	33,46	60,59	0,55	0,92	4,00
4	1-4	355	133,26	225,35	2,79	44,25	79,88	0,5516	0,92	3,93
5	1-5	441	132,34	225,26	2,75	55,36	99,40	0,5588	0,92	3,84

N° Med	Lámp.	I ₁ [%f]	I ₃ [%f]	I ₅ [%f]	I ₇ [%f]	I ₉ [%f]	I ₁₁ [%f]	I ₁₃ [%f]	I ₁₅ [%f]	I ₁₇ [%f]
1	1	100	78,75	57,23	47,06	44,02	36,43	26,67	21,70	18,76
2	1-2	100	79,69	57,70	47,29	44,44	37,09	27,21	21,86	18,82
3	1-3	100	79,93	57,67	46,82	43,88	36,63	26,72	21,30	18,29
4	1-4	100	80,19	57,81	46,61	43,55	36,45	26,57	21,02	18,02
5	1-5	100	80,47	58,09	46,48	43,10	35,90	25,81	20,08	17,27

N° Med	Lámp.	I ₁₉ [%f]	I ₂₁ [%f]	I ₂₃ [%f]	I ₂₅ [%f]	I ₁ [mA]	I ₃ [mA]	I ₅ [mA]	I ₇ [mA]	I ₉ [mA]
1	1	14,51	12,77	13,36	12,54	54,8	43,2	31,4	25,8	24,1
2	1-2	14,28	11,97	12,42	11,58	107,3	85,5	61,9	50,7	47,7
3	1-3	13,86	11,66	12,22	11,43	160,6	128,4	92,6	75,2	70,5
4	1-4	13,56	11,13	11,70	10,99	212,8	170,6	123,0	99,2	92,7
5	1-5	13,01	10,59	11,22	10,56	266,1	214,1	154,6	123,7	114,7

N° Med	Lámp.	I ₁₁ [mA]	I ₁₃ [mA]	I ₁₅ [mA]	I ₁₇ [mA]	I ₁₉ [mA]	I ₂₁ [mA]	I ₂₃ [mA]	I ₂₅ [mA]
1	1	20,0	14,6	11,9	10,3	8,0	7,0	7,3	6,9
2	1-2	39,8	29,2	23,5	20,2	15,3	12,8	13,3	12,4
3	1-3	58,8	42,9	34,2	29,4	22,3	18,7	19,6	18,4
4	1-4	77,6	56,6	44,7	38,4	28,8	23,7	24,9	23,4
5	1-5	95,5	68,7	53,4	46,0	34,6	28,2	29,9	28,1

Nota: Lámparas de igual marca y modelo, de 12 W

En la figura 12 se aprecia la variación del THD I promedio medido para cada parte de la medición. También se muestran los THD I individuales de cada lámpara que se agrega a la medición correspondiente del grupo, de forma de comparar qué sucede con el THD I del grupo cuando se agregan las lámparas de mayor o menor THD I individual. La disminución del THD global parece no depender del THD I individual de la lámpara que se añade en cada etapa, siendo el efecto de diversidad el factor determinante.

El THD I observado varía de 134,2% para una lámpara individual a 132,3% para las cinco lámparas combinadas, un valor menor al promedio de THD I de las lámparas individuales (135, 0%). Por otra

parte, en las Figuras 12 a 14 se muestra gráficamente los valores promedio de los distintos parámetros en cada etapa de la medición.

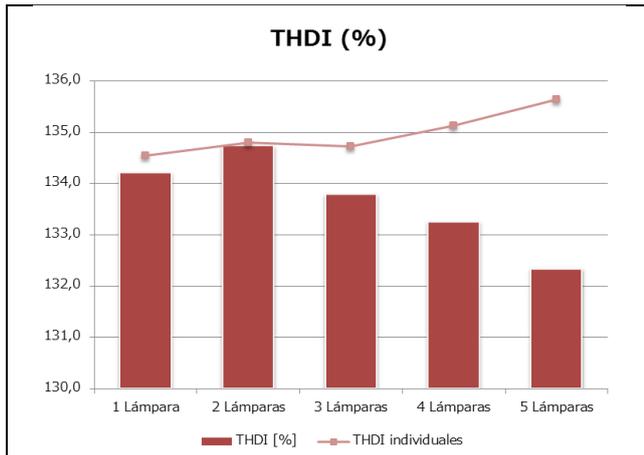


Figura 12: Variación del THDI [%] medido en cada etapa del ensayo con lámparas de iguales de baja potencia.

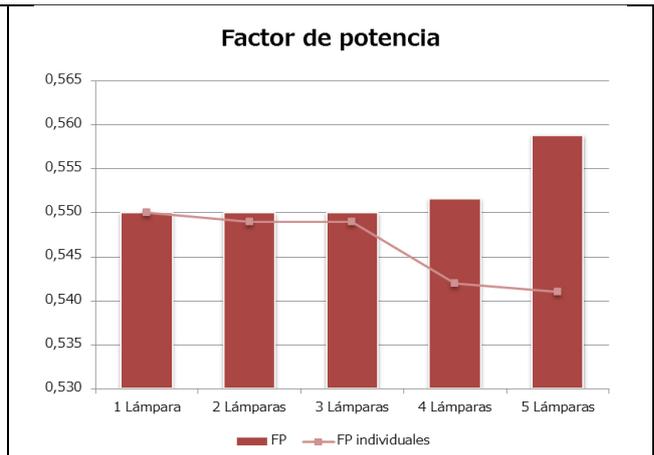


Figura 13: Variación del factor de potencia medido en cada etapa del ensayo con lámparas iguales de baja potencia combinadas

El factor de potencia muestra a su vez una pequeña mejora con un valor que va desde 0,55 (para una lámpara) a 0,56 (para 5 lámparas). En cuanto al factor de potencia de desplazamiento, este también muestra poca variación en su valor al agregar lámparas adicionales.

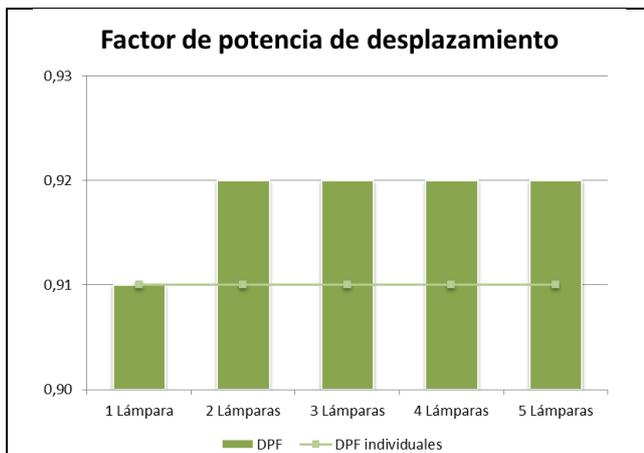


Figura 14: Variación del factor de potencia de desplazamiento medido en cada etapa del ensayo con lámparas iguales de baja potencia combinadas.

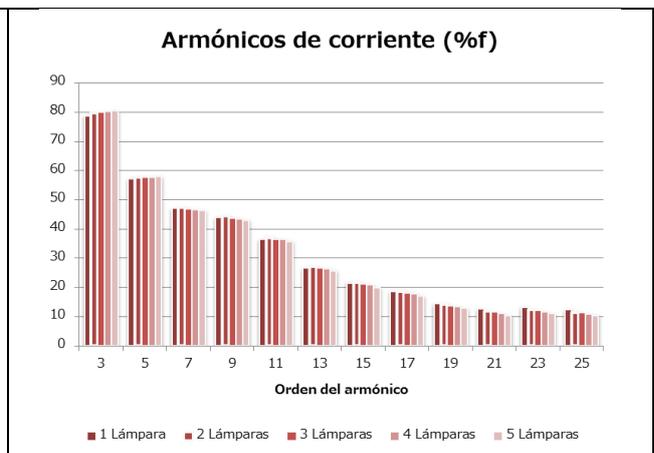
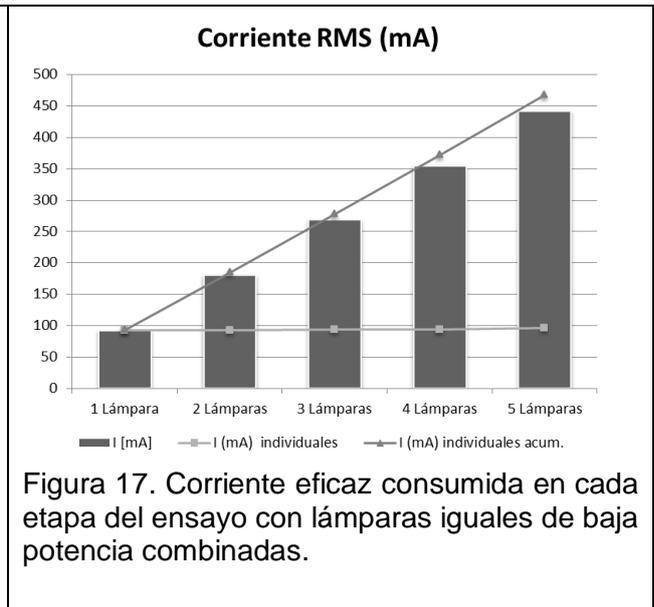
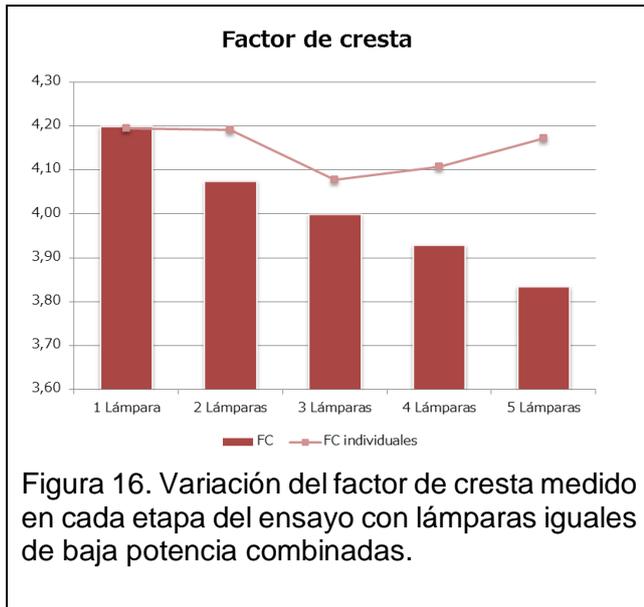


Figura 15: Variación de los armónicos de corriente de orden impar medidos en cada etapa del ensayo con lámparas iguales de baja potencia combinadas

En la Figura 15 anterior se discriminan los distintos armónicos de orden impar. Se ve la evolución de cada uno en cada parte de la medición. Al aumentar el número de lámparas, si bien los armónicos tercero y quinto muestran un leve aumento en su valor, la disminución de los armónicos de orden 7, 9, 11, 13 y superiores determina la caída del THD I.

Al igual que en todas las mediciones anteriores el factor de cresta es el parámetro que más varía en el proceso, disminuyendo en este caso desde un valor de 4,20 hasta 3,84 según se observa en la figura siguiente.



También la corriente eficaz consumida muestra una atenuación, respecto a la suma de las corrientes individuales consumidas por cada lámpara, disminuyendo en un 5,6% para las 5 lámparas.

En este punto ya se pueden observar importantes diferencias entre la medición de cinco lámparas combinadas de baja potencia de diferentes marcas y potencias similares, y esta medición. En el primer caso la atenuación del THDI, la mejora del factor de potencia y la atenuación de la corriente son mucho mayores. Esto se explica porque el efecto de diversidad es mucho mayor, debido al mayor desfase entre los armónicos como consecuencia de la mayor variación de los elementos que componen cada lámpara. En cambio, en el segundo caso se tienen diferencias menores entre los componentes de cada artefacto, las cuales se deben a las tolerancias de fabricación de los mismos.

En la Tabla 8 se resumen los resultados más importantes obtenidos.

Tabla 8
Resumen de resultados. Lámparas LED iguales de baja potencia

THDI individual promedio	THDI final	Evolución THDI	FP inicial	FP final
135,0%	132,3%	Decreciente	0,55	0,56
FC inicial	FC final	Suma de corrientes individuales (mA)	Corriente total (mA)	Atenuación de corriente
4,20	3,84	467	441	5,6%

En la Tabla 9 se resume a partir de qué niveles de potencia es necesario tomar acciones para reducir el nivel de armónicos

Tabla 9
Problemas de armónicos y soluciones. Lámparas LED de baja potencia

Caso	Potencia	Se requiere	Posible solución	1 ^{ros} armónicos a filtrar
a	> 300 W	Filtrado de armónicos superiores (>13)	Filtro pasivo pasa alto en paralelo	-

	> 350 W	Filtrado de armónicos inferiores y superiores	Filtro activo p/ armónicos de orden 3 a 50	>13, 13, 11
b	> 350 W	Filtrado de ciertos armónicos superiores	Filtro pasivo pasa alto en paralelo	15, 21
	> 570 W	Filtrado de armónicos de orden múltiplo impar de tres	Filtro pasivo pasa alto en paralelo	15, 21, 9
	> 1,3 kW	Filtrado de armónicos inferiores y superiores	Filtro activo p/ armónicos de orden 3 a 50	15, 21, 9, 13, 11

Nota: La potencia está dada por fase. En el caso b el sistema es trifásico

Nuevamente se corrobora la importancia del efecto de diversidad. También se observa que en un sistema de mayor potencia (caso b) destacan los armónicos múltiplo impar de tres como los primeros que deben corregirse si se quiere estar dentro de los límites previstos por la norma.

Conclusiones

Para lámparas de distinta marca y potencia

El THD I observado varía de 116% para una lámpara individual a 100% para las cinco lámparas combinadas, un valor menor al promedio de THD I de las lámparas individuales (116%).

Al aumentar el número de lámparas, si bien el tercer armónico muestra una leve oscilación en su valor, la disminución de los armónicos de orden 5, 7, 9, 11 y 13 determina la caída del THD I.

La corriente eficaz consumida muestra una atenuación, respecto a la suma de las corrientes individuales consumidas por cada lámpara, disminuyendo en un 15% para las 5 lámparas.

El factor de potencia de desplazamiento tiende a un valor intermedio respecto del valor correspondiente a cada lámpara.

El factor de cresta muestra una mejora significativa pasando de un valor de 3,64 para una lámpara, a 2,97 para las cinco lámparas combinadas.

Para lámparas de igual marca y potencia

El THD I observado varía de 134,2% para una lámpara individual a 132,3% para las cinco lámparas combinadas, un valor menor al promedio de THD I de las lámparas individuales (135%).

Los armónicos tercero y quinto muestran un leve aumento en su valor, la disminución de los armónicos de orden 7, 9, 11, 13 y superiores determina la caída del THD I.

El factor de cresta disminuye en este caso desde un valor de 4,20 hasta 3,84

La corriente eficaz consumida muestra una atenuación, respecto a la suma de las corrientes individuales consumidas por cada lámpara, disminuyendo en un 5,6% para las 5 lámparas.

Conclusión General

Se observó importantes diferencias entre la medición de cinco lámparas combinadas de baja potencia de diferentes marcas y potencias similares, con respecto a las de la misma marca y potencia. En el primer caso la atenuación del THDI, la mejora del factor de potencia y la atenuación de la corriente son mucho mayores. Esto se explica porque el efecto de diversidad es mucho mayor, debido al mayor desfase entre los armónicos como consecuencia de la mayor variación de los elementos que componen cada lámpara

En una instalación nueva donde los equipos deben ser adquiridos, se debe considerar como una posible solución al problema de armónicos la adquisición de equipos corregidos a través de especificaciones de compra que cumplan con la normativa.

Por otra parte, desde el punto de vista medioambiental los LED representan un gran avance, mejorando la eficiencia de los equipos eléctricos de iluminación, con la consecuente reducción de emisiones contaminantes por parte del sistema de generación de energía eléctrica

Referencias

[1]. - Calidad de potencia para usuarios y empresas eléctricas, primera edición, Juan Carlos Gómez Tarragona 2005.

- Manual de Calidad de la Energía, primera edición, septiembre de 2000, Industrias SICA S.A.I.C. and PIRELLI CABLES S.A.I.C.

- Ley 19.587, decreto reglamentario 351/79. Seguridad e higiene en el trabajo.

- Análisis de la distorsión armónica y los efectos de atenuación y diversidad en áreas residenciales. J. A. Suárez, G. F. Di Mauro, D. Anaut y C. Agüero.

- Estudio de impactos en redes de distribución y medio ambiente debido al uso intensivo de lámparas fluorescentes compactas; Secretaria de Energía de la República Argentina.

- Medición del impacto causado por la introducción de lámparas fluorescentes compactas en el sector residencial de la ciudad de Buenos Aires; C.G. Tanides y G.S. Dutt; Facultad de Ingeniería de la UBA