

Impacto de la iluminación led en la calidad de la energía

Ing. Luis Deschères

UBA-Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Profesor Titular-Cátedra; Iluminación y Color

Carrera de Especialización en Seguridad e Higiene en Ámbito Laboral

<https://exactas.uba.ar/ensenanza/carreras-de-posgrado/seguridad-e-higiene-en-el-ambito-laboral/>

Introducción

Diversas tecnologías de iluminación

En 1879, nació la primera fuente de luz artificial, la lámpara incandescente. En 1936, nació la lámpara fluorescente, y en 1996, la fuente led o diodo electroluminiscente. Con esta última fuente de luz, podemos decir que inició la "tercera revolución de la iluminación" [4]. El objetivo principal fue un permanente esfuerzo para lograr la mayor "eficiencia" posible en la transformación de la energía eléctrica en una energía radiante visible. Recordemos que el 87% de nuestra información sensorial se origina por la vista, y que el 50% de nuestro cerebro se utiliza para la "visión". En esta tercera etapa y particularmente en esta década, investigaciones realizadas desde los años '80 por Hall, Rosbach y Young pudieron demostrar la existencia del "reloj biológico interno (endógeno)", que controla el ritmo circadiano de humanos, animales y plantas. Sus resultados fueron premiados con el Nobel de Medicina 2017.

Al efecto visual de la luz se incorpora un efecto no visual que tiene que ver con nuestra fisiología y psicología. Estamos en el inicio de una nueva cultura de la luz. La Comisión Internacional de Iluminación (CIE) ha publicado un nuevo posicionamiento sobre los efectos no visuales de la luz. El nuevo término oficial "Integrative Lighting" ('iluminación integradora') se utiliza para referirse a la iluminación proyectada para incorporar estos efectos no visuales de la luz en beneficio de la salud, rendimiento y bienestar.

El objetivo es definir nuevos criterios de evaluación, nuevas métricas, nuevos protocolos de medición, nuevos modelos, nuevos criterios que evaluarán el impacto sobre los seres humanos, fauna y flora. En este aspecto, las nuevas fuentes led y sus fuentes de alimentación electrónicas (driver) son aptas para gestionar de manera inteligente todo tipo de programa para lograr esos objetivos.

Las fuentes de luz led (diodo emisor de luz inorgánico) y OLED (diodo emisor de luz orgánico) ya tienen una importante participación en las áreas residencial, comercial, industrial y pública. Los leds utilizan menos energía y ofrecen una oportunidad viable de eficiencia energética.



A nivel mundial y en la Argentina (2011), se implementaron políticas para erradicar el uso de lámparas incandescentes dada su muy baja eficiencia (lm/W). Esto potenció el uso de las lámparas fluorescentes compactas (LFC) que, a diferencia de las incandescentes, pero al igual que las lámparas led, requieren para su funcionamiento una fuente de alimentación electrónica integrada al bulbo (balasto electrónico). Con un flujo luminoso equivalente, una lámpara led de 14 W (72 lm/W) reemplaza una lámpara LFC de 25 W (40 lm/W), que a su vez reemplaza una incandescente de 100 W (10 lm/W). Esta notable mejora en cuanto a la eficiencia energética de la tecnología led respecto a la LFC, y ambas respecto a las incandescentes, requiere una fuente de alimentación para que la lámpara sea conectada a la red eléctrica (220 V-50 Hz). Todas las lámparas a descarga (LF, LFC, VM, SAP) requieren su fuente de alimentación, que se conoce como "balasto" inductivo, electrónico, incorporado o externo a la fuente de luz. Todas las lámparas leds tienen su fuente de alimentación electrónica incorporada, que se conoce como "driver". Las luminarias leds tienen, mayoritariamente, su fuente de alimentación, driver, exterior.

Nos encontramos en una situación en la cual la eficiencia energética que logramos con la tecnología led se ve amenazada por su impacto en la calidad de la energía.

Cargas no lineales

Es muy importante la aclaración sobre las fuentes de alimentación porque todas, sean electrónicas o incluso las inductivas, son cargas no lineales. Una carga se considera no lineal si su impedancia cambia con la tensión aplicada. Esto significa que la corriente consumida por la carga no lineal deja de ser una onda senoidal y se transforma en una onda distorsionada, aunque su tensión de alimentación sea una onda senoidal. A su vez, esta corriente distorsionada consumida por la carga contiene corrientes armónicas que

interactúan con la impedancia del sistema de distribución de energía, creando una distorsión de su onda de tensión que puede afectar tanto al equipo del sistema de distribución como a las propias cargas que están conectadas a él.

Las cargas no lineales contienen electrónica en su etapa de entrada (diodos, transistores, tiristores, IGBT, etc.). Ejemplos de estas cargas son el equipamiento informático, variadores de velocidad, las fuentes de alimentación de lámparas a descarga y las lámparas leds. En las instalaciones modernas, se supone que representan más del 50% de la potencia instalada. En las redes eléctricas, estas armónicas producen sobrecargas en cables y transformadores, pueden causar interrupciones de suministro y/o perturbaciones a muchos tipos de equipos tales como computadoras, teléfonos y máquinas rotantes. La vida útil de estos aparatos puede reducirse considerablemente. Estas armónicas no solo producen estrés en los equipos debido al sobrecalentamiento, sino también y, sobre todo, generan pérdidas adicionales de energía.

Nos encontramos en una situación en la cual la eficiencia energética que logramos con la tecnología led se ve amenazada por su impacto en la calidad de la energía. Esto requiere un profundo análisis de estas nuevas fuentes para tomar conocimiento cualitativo y cuantitativo del impacto de sus corrientes armónicas aguas arriba y aguas abajo.

En esta tarea, cabe destacar las investigaciones ya realizadas localmente y que aportan buena información sobre el tema ([1], [2], [3]). Es muy importante analizar, cuantificar y tomar conocimiento del verdadero impacto en la calidad de la energía, cuáles son las limitaciones exigidas y vigentes. De este modo, adecuaremos la tecnología de los leds y lograremos armonizar la eficiencia energética con la calidad de la energía.

Quienes tengan a su cargo proyectos o instalaciones nuevas o renovaciones previstas con la incorporación de estas nuevas tecnologías deben estar bien informados. Este tipo de carga mal seleccionada puede sorprendernos con disparos intempestivos de interruptores termomagnéticos, disyuntores diferenciales, parpadeo de la fuente de luz, interrupción de la luz por inadecuada protección de la fuente de

alimentación (driver) dada su extrema sensibilidad a las sobretensiones transitorias creadas por el rayo o las operaciones de conmutación en la red eléctrica de corriente alterna.

En particular, las redes eléctricas para la iluminación de exteriores están especialmente sometidas a perturbaciones eléctricas de todo tipo: permanentes, temporales o transitorias. Históricamente los equipos conectados a estas redes contaban con suficiente solidez como para tolerarlas sin incidentes importantes. La introducción de altas tecnologías electrónicas en estas redes exteriores cambia radicalmente el problema. Ahora las perturbaciones se convierten en una amenaza importante y real. Un ejemplo visible de esta nueva problemática es el alumbrado público que desde hace algunos años se inclina por la tecnología led. La finalidad es que los diseñadores o instaladores puedan garantizar las instalaciones nuevas o existentes con estos nuevos equipos y para ello hay tener claro los datos que se deben solicitar al proveedor de la lámpara o luminaria led.

Factor de potencia

La evaluación de la calidad de la energía de una carga en la red eléctrica está relacionada con la medición de su factor de potencia. Para este tipo de cargas, se requiere que su formulación esté expresada en su métrica compuesta consistente en el producto del factor de desplazamiento de la métrica primaria y el factor de distorsión. Con esta métrica se puede evaluar claramente la participación de las armónicas que conforman la onda de la corriente distorsionada, medir y calcular su distorsión y su impacto en la calidad de la energía.

Por definición, el factor de potencia es

$$(1) \quad \lambda = FP = P/S$$

donde 'P' es la potencia activa y 'S' la potencia aparente. El factor de potencia descrito por su métrica compuesta y que se utiliza para las cargas no lineales es el producto de los dos factores:

$$(2) \quad \lambda = K_{(\text{desplazamiento})} \cdot K_{(\text{distorsión})}$$

El factor de desplazamiento es el coseno del ángulo de fase φ_1 entre el armónico fundamental de la tensión de red y el armónico fundamental de la corriente de red. Se emplea para las fuentes luminosas de red que utilizan tecnología led u OLED. El factor de desplazamiento se mide a plena carga, con respecto a los ajustes de control de referencia, si son aplicables, con las piezas de control de la iluminación en modo de control y las piezas ajenas a la iluminación desconectadas, apagadas o ajustadas en su consumo mínimo siguiendo las instrucciones del fabricante.

$$(3) \quad K_{(\text{desplazamiento})} = \cos \varphi_1$$

$$(4) \quad K_{(\text{distorsión})} = 1 / \sqrt{1 + (THDi)^2}$$

$$(5) \quad THDi = \sqrt{\sum_{n=2}^{n=40} (I_n/I_1)^2}$$

Por lo tanto, el factor de potencia para las cargas no lineales resulta ser

$$(6) \quad \lambda = \cos \varphi_1 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (THDi)^2}}$$

' I_n ' es la amplitud del n -ésimo armónico de la corriente principal. El ángulo φ_1 es el ángulo de fase entre la fundamental de la tensión de alimentación y la fundamental de la corriente consumida de la red. La distorsión armónica total ($THDi$) se cuantifica (%) por los armónicos de la corriente no senoidal referidos a la fundamental I_1 (50 Hz), de acuerdo con IEC 61000-3-2.

Por otro lado, la Norma IRAM-AADL J2020-4 inciso 4.10 exige PF [λ] mayor a 0,90 y $THDi$ menor o igual a 15%. El cálculo de ' λ ' para las cargas no lineales (6) se especifica teniendo en cuenta que la distorsión total de la onda de tensión ($THDu$) es menor al 2%. El valor de la $THDu$ se calcula con la fórmula (7).

$$(7) \quad THDu = \sqrt{\sum_{n=2}^{n=40} (E_n/E_1)^2}$$

Valor eficaz

Se denomina "valor eficaz" al valor cuadrático medio de una magnitud eléctrica. El concepto de valor eficaz se utiliza especialmente para estudiar las formas

de onda periódicas, a pesar de ser aplicable a todas las formas de onda, constantes o no. También se la conoce con la sigla RMS (del inglés, 'Root Mean Square'). El valor eficaz es el valor de la tensión o corriente alterna que produce el mismo efecto de disipación de calor que su equivalente de tensión o corriente, en corriente continua sobre una misma resistencia. El valor eficaz de una forma cualquiera de onda periódica se obtiene con la fórmula (8).

$$(8) \quad E_{ef} = \sqrt{1/T \int_0^T [e(t)]^2 dt}$$

Supongamos ahora que la forma de onda periódica es una onda senoidal de tensión alterna y cuya función es "e(t) = E_m sen ωt". En este caso, consideramos "t = ω" y "T = π". Reemplazando la función "e(t)" en la (8) y resolviendo la ecuación, el valor eficaz para una onda de forma senoidal resulta:

$$(9) \quad E_{ef} = \sqrt{1/2\pi \int_0^{2\pi} [E_m \text{ sen } \omega t]^2 dt} \quad E_{ef} = E_m/\sqrt{2}$$

Para una onda senoidal de corriente alterna, el valor eficaz resulta

$$(10) \quad I_{ef} = \sqrt{1/2\pi \int_0^{2\pi} [I_m \text{ sen } \omega t]^2 dt} \quad I_{ef} = I_m/\sqrt{2}$$

Para completar la información sobre formas de onda periódicas, un valor muy importante es el factor de cresta, que se define como la relación entre el valor pico de la onda y su valor eficaz. Para el caso de una onda senoidal resulta "f_c = 1,41".

$$(11) \quad f_{(cresta)} = E_m/E_{ef} = I_m/I_{ef} = \sqrt{2} = 1,41$$

La finalidad es que los diseñadores o instaladores puedan garantizar las instalaciones nuevas o existentes con estos nuevos equipos, y para ello hay tener claro los datos que se deben solicitar al proveedor de la lámpara o luminaria led.

Si ahora queremos obtener el valor eficaz de una onda de tensión no senoidal, la función "e(t)" estará compuesta por una serie de componentes armónicos (serie de Fourier). A esa nueva función que representa una onda poliarmónica, le aplicamos la (8). Se puede demostrar que, si la onda tiene una componente continua, el valor eficaz para la tensión y para la corriente se obtiene aplicando la (12) y la (13).

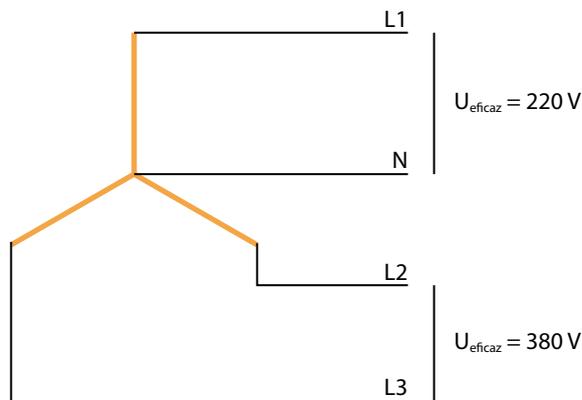
$$(12) \quad E_{ef} = \sqrt{E_0^2 + E_1^2 + E_2^2 + E_3^2 + \dots + E_n^2}$$

$$(13) \quad I_{ef} = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}$$

Estas dos ecuaciones son independientes de la relación de fase entre las ondas componentes y del punto de inicio de la onda. Es necesario utilizar instrumentos que midan el verdadero valor eficaz. Los modernos utilizan los principios de cálculo analógico o digital. También para una onda no senoidal es muy importante calcular el "factor de cresta" según (11). Una onda senoidal y una onda no senoidal pueden tener la misma corriente eficaz. Sin embargo, el factor de cresta de la primera será "f_c = 1,41" mientras que para las corrientes absorbidas por cargas no lineales como las computadoras, impresoras o lámparas como las que estamos analizando puede variar entre dos y tres, o más, dependiendo del diseño de los componentes electrónicos.

Otro efecto importante que tenemos que considerar es que no todos los armónicos que conforman la onda poliarmónica de corriente [I₁ (50 Hz); I₂ (100 Hz); I₃ (150 Hz) ... I₄₀ (2000 Hz)] poseen la misma secuencia. Los armónicos se clasifican como de secuencia positiva, negativa y de secuencia cero u homopolar (ver tabla 1).

	Secuencia		
	Positiva	Negativa	Cero
Orden del Armónico	I ₁	I ₂	I ₃
	I ₄	I ₅	I ₆
	I ₇	I ₈	I ₉



Los armónicos de orden 1, 4, 7, 10, 13, 16, 19, etc., son de secuencia positiva y dan origen a campos que rotan en el mismo sentido que la fundamental (I1). Los armónicos de orden 2, 5, 8, 11, 14, 17, 20, etc., son de secuencia negativa y originan campos en el sentido contrario con lo cual la corriente en el neutro resulta nula. Los armónicos de orden 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 son de secuencia cero y no generan campos rotatorios. En el caso de una red trifásica con neutro y cargas equilibradas, las corrientes I_1 (50 Hz) de las fases "L1", "L2" y "L3" son iguales y separadas por 120° , con lo cual se cancelan en el neutro. Para las corrientes I_2 (100 Hz) separadas por 120° también se completa la cancelación y esto es válido para los armónicos de orden par. Para las corrientes I_3 (150 Hz), ocurre que las tres corrientes de "L1", "L2" y "L3" se hallan en fase. La razón es que si bien están desplazadas una de otra por 120° esto equivale para el tercer armónico 360° y como consecuencia no hay desplazamiento. Esto también es válido para los múltiplos impares del armónico de orden 3, (9, 15, 21, 27, etc.) que son de secuencia cero, pero no pares.

Un alto nivel de distorsión de la señal de corriente o tensión está relacionado con la inestabilidad del sistema de suministro de energía, mayor consumo de energía reactiva, aumento de las pérdidas de potencia activa, una reducción en la eficiencia y durabilidad de los dispositivos.

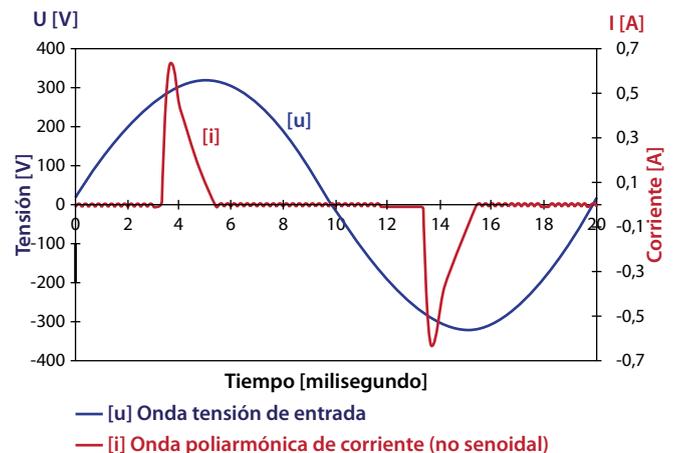


Figura 1. Lámpara LFC 20 W, fuente de alimentación (balasto electrónico incluido)

Aquí, prestar atención, ya que estas corrientes consecuencia de la carga no lineal se suman matemáticamente en el neutro y, de acuerdo a su valor, esta suma puede alcanzar hasta 1.732 veces la corriente que circula por la fase (ver figura 4). Esto representa un claro riesgo para el conductor del neutro por sobrecalentamiento y probable fusión. Con presencia de fuertes cargas no lineales como es habitual en estos tiempos, la solución más común consiste en utilizar neutros por lo menos con secciones iguales a las fases o superior. Los otros armónicos impares (5, 7, 11, 13, etc.) se suman vectorialmente en el neutro resultando en sumas y cancelaciones parciales, por lo tanto, su impacto no es apreciable como los impares anteriores que se suman matemáticamente. La elección de cargas de baja generación de contenido armónico reduce las pérdidas térmicas en el cableado. Para cargas con alto contenido de armónicos (superiores a los límites establecidos en la norma IEEE 519:2014) deben ser compensadas.

La medición de la tensión y de sus componentes armónicos nos permitirá evaluar la magnitud del impacto de la distorsión de la onda de tensión de la alimentación producida por la carga no lineal. A su vez, la medición de la corriente absorbida por la carga y la de sus componentes armónicos nos permitirá evaluar la distorsión de la onda de corriente, lo que finalmente nos permitirá apreciar el impacto sobre la calidad de la energía aplicando la fórmula (6), y en base al resultado saber si la eficiencia energética de nuestras fuentes

son una amenaza para nuestras redes aguas arriba y aguas abajo.

Lámpara fluorescente compacta LFC 20 W

Para clarificar el proceso, consideraremos un ejemplo de una carga no lineal correspondiente a una lámpara de uso domiciliario tipo LFC de 20 W (balasto electrónico integrado) cuya medición y descripción detallada forma parte del informe (1) [MSF Brugnoli, R Iribarne] y es una carga no lineal muy similar al de las lámparas leds (driver integrado) por la forma y composición de las armónicas que conforman la onda de corriente no senoidal u “onda de corriente poliarmónica”.

En la figura 1, podemos ver la onda de tensión [u] aplicada a la LFC y la forma de la onda de corriente absorbida [i], onda no senoidal o poliarmónica, cuyo valor eficaz medido es “ $I_{ef} = 0,162 \text{ A}$ ”, “ I_m = valor máximo 0,632 A, valor mínimo (-0,632 A)”, “valor pico-pico = 1,264 A”. El factor de cresta es “ $f_c = 3,90$ ” lo que nos indica claramente que se trata de una onda no senoidal. En la tabla 2 se indican los valores medidos de amplitud máxima (I_m) para todas las corrientes armónicas, pares e impares, el valor eficaz de corriente de cada armónico [A] y el valor porcentual de su relación respecto a la corriente eficaz de la fundamental (50 Hz) “ $I_1 = 0,0862 \text{ A}$ ”. El ángulo de fase [ϕ_n] entre esta

Orden del armónico	I_m medido	I_n calculado	I_n/I_1 calculado
1	0,1219 A	0,0862 A	100%
2	0,0013 A	0,0009 A	1,04%
3	0,1116 A	0,0789 A	91,55%
4	0,0011 A	0,0008 A	0,89%
5	0,0952 A	0,0673 A	78,12%
6	0,0018 A	0,0012 A	1,44%
7	0,0748 A	0,0529 A	61,36%
8	0,0014 A	0,001 A	1,16%
9	0,0552 A	0,0390 A	45,26%
10	0,0012 A	0,0009 A	1,02%
11	0,0403 A	0,0285 A	33,02%
12	0,0011 A	0,0008 A	0,88%
13	0,0334 A	0,0236 A	27,37%
14	0,0012 A	0,0008 A	0,97%
15	0,0316 A	0,0223 A	25,91%
16	0,0007 A	0,0005 A	0,57%
17	0,0297 A	0,021 A	24,34%
18	0,0016 A	0,0012 A	1,35%
19	0,0256 A	0,0181 A	20,98%
20	0,0016 A	0,0011 A	1,33%
21	0,0213 A	0,015 A	17,46%
22	0,0011 A	0,0008 A	0,92%
23	0,0179 A	0,0126 A	14,66%
24	0,0012 A	0,0008 A	0,97%
25	0,0153 A	0,0108 A	12,58%

Orden del armónico	I_m medido	I_n calculado	I_n/I_1 calculado
26	0,0012 A	0,0008 A	0,95%
27	0,0143 A	0,0101 A	11,75%
28	0,0011 A	0,0008 A	0,93%
29	0,0131 A	0,0093 A	10,75%
30	0,0009 A	0,0006 A	0,71%
31	0,0106 A	0,0075 A	8,71%
32	0,0011 A	0,0008 A	0,91%
33	0,0088 A	0,0063 A	7,25%
34	0,0006 A	0,0005 A	0,53%
35	0,0078 A	0,0055 A	6,4%
36	0,0005 A	0,0003 A	0,39%
37	0,0073 A	0,0052 A	5,98%
38	0,0004 A	0,0003 A	0,32%
39	0,0066 A	0,0047 A	5,44%
40	0,0008 A	0,0006 A	0,66%
41	0,0061 A	0,0043 A	5,04%
42	0,0007 A	0,0005 A	0,54%
43	0,0053 A	0,0038 A	4,36%
44	0,0007 A	0,0005 A	0,59%
45	0,0044 A	0,0031 A	3,6%
46	0,0009 A	0,0006 A	0,75%
47	0,0047 A	0,0033 A	3,88%
48	0,0007 A	0,0005 A	0,54%
49	0,0049 A	0,0035 A	4,04%
50	0,0006 A	0,0004 A	0,51%

Tabla 2. Valores correspondientes al espectro armónico ed la onda de corriente poliarmónica (figura 1). Lámpara LFC 20 W

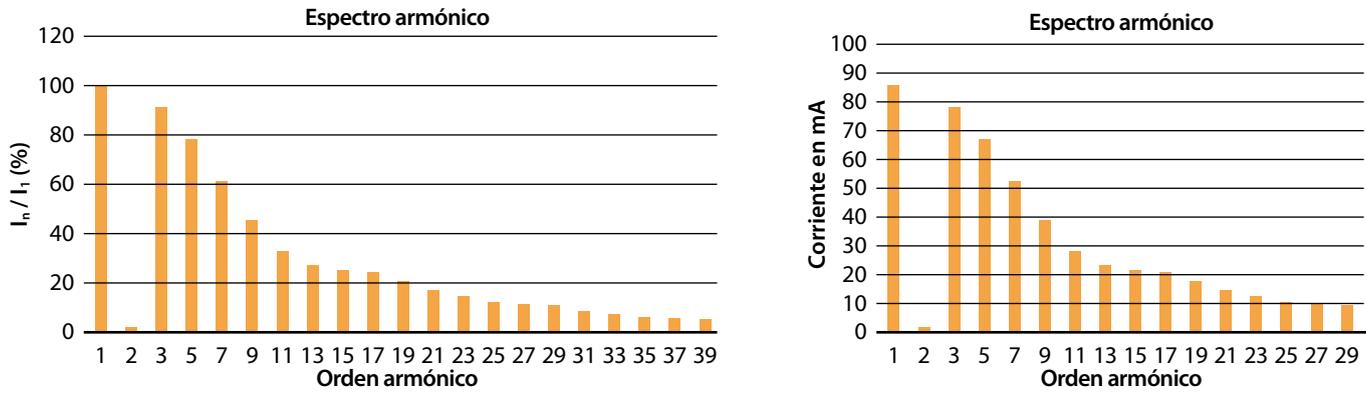
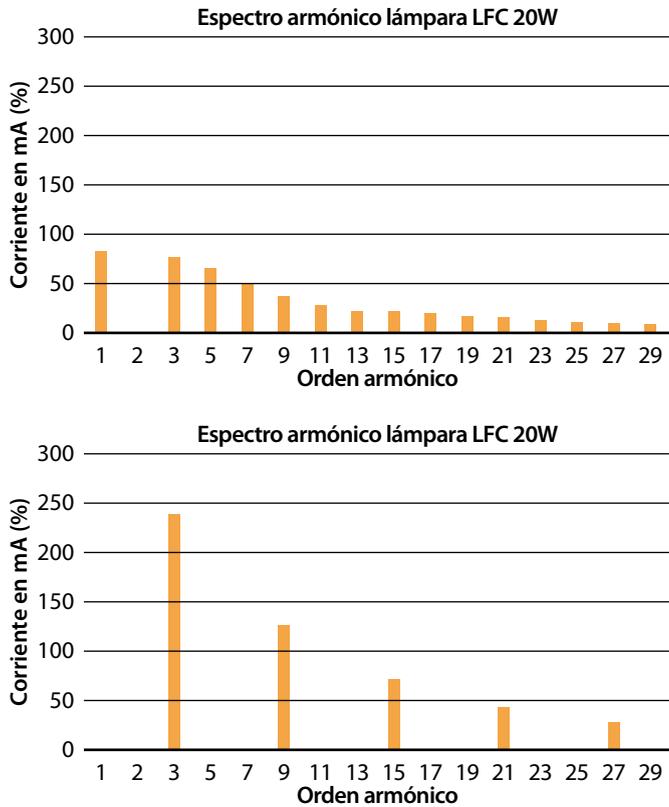


Figura 2. Espectro armónico de la lámpara LFC 20 W. Armónicos de corriente como porcentajes de la corriente de entrada a la frecuencia fundamental (izquierda). Armónicos de corriente expresados en sus valores de corriente eficaz (derecha)



Orden armónico	Corriente armónico en L1 [A]	Corriente armónico LN [A]
I_3	0,079	0,237
I_9	0,039	0,117
I_{15}	0,022	0,670
I_{21}	0,015	0,045
I_{27}	0,010	0,030
$I_{ef}(\text{neutro})$		0,278

$$I_{ef(\text{fase L1})} = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_{29}^2}$$

$$I_{ef(\text{neutro})} = \sqrt{I_3^2 + I_9^2 + I_{15}^2 + I_{21}^2 + I_{27}^2}$$

$$I_{ef(\text{neutro})} = 1,73 \text{ veces } I_{ef(\text{fase L1})}$$

Figura 3. Circuito trifásico con neutro. Espectro armónico de la corriente de una fase (L1) comparado con el espectro de la corriente que circula por el neutro

fundamental y la onda de tensión aplicada [u] cuya tensión eficaz medida es “ $U_{ef} = 224,12 \text{ V}$ ” resulta ser de $16,3^\circ$ con lo cual el “ $\cos \varphi_1 = 0,96$ ”. La potencia activa medida es “ $P = 18,98 \text{ W}$ ”.

La solución del problema pasa por un diseño global y racional de filtros de armónicos como los filtros activos.

Con esta información disponible, podemos analizar su impacto en la calidad de la energía empezando por calcular su factor de potencia [λ] expresado en su métrica compuesta, consistente en el producto del factor de desplazamiento y el factor de distorsión. Con estos valores se puede evaluar claramente la participación de las armónicas que conforman la onda de la corriente distorsionada de esta fuente luminosa utilizada fundamentalmente en el área residencial y en reemplazo de las lámparas incandescentes. Con los valores indicados en la tabla 2 y utilizando las fórmulas (3) a (6)

$$(2) \lambda = K_{(\text{desplazamiento})} \cdot K_{(\text{distorsión})}$$

El valor del factor de potencia es el mismo independientemente del método que se utilice. Las métricas fundamentales permiten al usuario de datos que identifique claramente si la causa raíz del deterioro del factor de potencia es el desplazamiento de la corriente, la distorsión de la corriente o ambos.

- » $K_{(\text{desplazamiento})} = 0,96$
- » $THDi = 158\%$
- » $K_{(\text{distorsión})} = 0,535$
- » $\lambda = 0,514$

En el caso de esta lámpara LFC 20 W y con la métrica utilizada, podemos ver claramente que el bajo valor de [λ] está fuertemente definido por la alta distorsión de la onda de corriente producida por la emisión de los armónicos y sus altos valores comparados con la fundamental. En la figura 2 (derecha) podemos ver en el espectro armónico los valores eficaces en miliamperes de las corrientes armónicas comparadas con la corriente eficaz de la fundamental. Como resultado, el $THDi$ de 158% es extremadamente alto. Esta métrica vigente internacionalmente nos permite visualizar la causa fundamental del deterioro en la calidad de energía. Si en cambio usamos la métrica clásica, el factor



Figura 4. Principales componentes que integran la tecnología de iluminación led

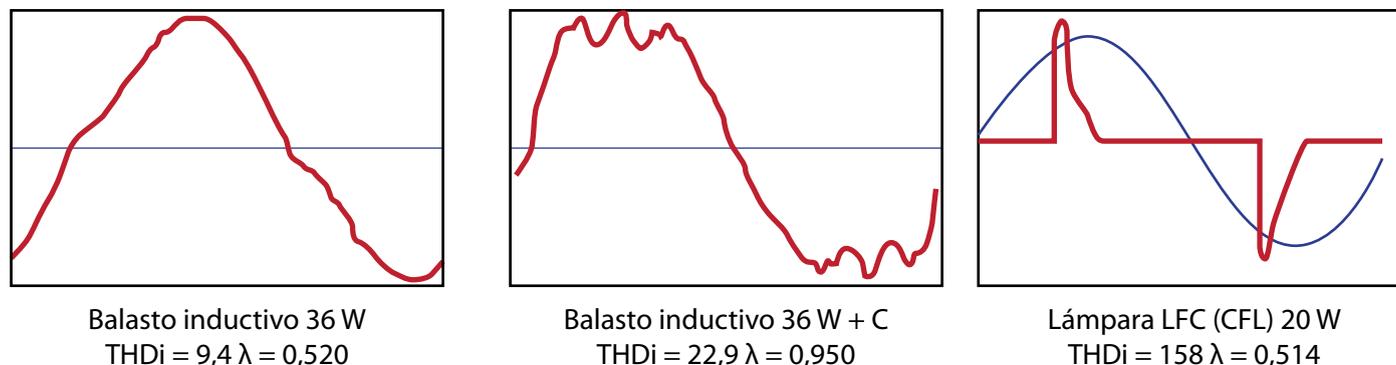


Figura 5. Formas de onda de corriente de las cargas de iluminación a descarga

de potencia nos dará el mismo valor que el obtenido, pero no nos puede orientar tal como lo logramos con el K(distorsión).

Armónicos aguas abajo

Analicemos ahora el impacto de los armónicos aguas abajo en la red eléctrica donde están las cargas no lineales. La figura 3, nos muestra el resultado debido a los armónicos de secuencia cero e impares múltiplos del tercer armónico (9, 15, 21, 27, etc.). Estos armónicos también se los denomina "triplen". Cuando se trata de un circuito trifásico con neutro a tierra, los valores de corriente de esos armónicos se suman en el neutro.

La corriente eficaz total absorbida por la carga no lineal en cada una de las fases "L1", "L2" y "L3" es de 0,161 A. Tratándose de un sistema equilibrado, podríamos suponer que la corriente por el neutro debería ser mínima o nula. Sin embargo, la corriente eficaz total en el neutro debido a los armónicos de secuencia cero e impares múltiplos del tercer armónico resulta ser de 0,278 A, es decir 1,73 veces el valor de la corriente de fase "L". Como consecuencia, tenemos riesgo de sobrecalentamiento del neutro y su probable fusión. En estos casos, se recomienda dimensionar o utilizar un neutro de sección igual al de la fase.

Componentes usados en la tecnología de la iluminación led

En la figura 4, podemos visualizar cómo se configuran lámparas y luminarias de la iluminación led que iniciaron la tercera revolución de la iluminación. Por un lado, tenemos la fuente de luz constituida por diodos electroluminiscentes (leds) en sus respectivas actualizaciones y encapsulados. A su vez y a los fines de establecer un flujo luminoso, los diodos se agrupan en modo módulo o placa led.

Para su funcionamiento, estos diodos deben estar conectados a una fuente de corriente continua. Para ello, se requiere una fuente de alimentación que, conectada a la red de baja tensión de corriente alterna (220 V-50 Hz), proporcione la tensión y corriente continua adecuada al módulo o placa. De este modo, transformamos la energía eléctrica en energía radiante visible con una alta eficiencia energética. Esta fuente es la que denominamos "driver" y, básicamente, es un rectificador de corriente alterna/continua realizado con la tecnología de semiconductores. Dependiendo de la tecnología utilizada, y de la conexión utilizada (monofásica o trifásica), este tipo de fuente genera distintos espectros de armónicos. La iluminación led es típicamente una carga monofásica conectada entre fase y neutro.

La presencia de armónicos en las redes de distribución es cada vez mayor, causando una serie de problemas de deterioro de la calidad de la onda de tensión, haciendo necesario un sobredimensionamiento de las

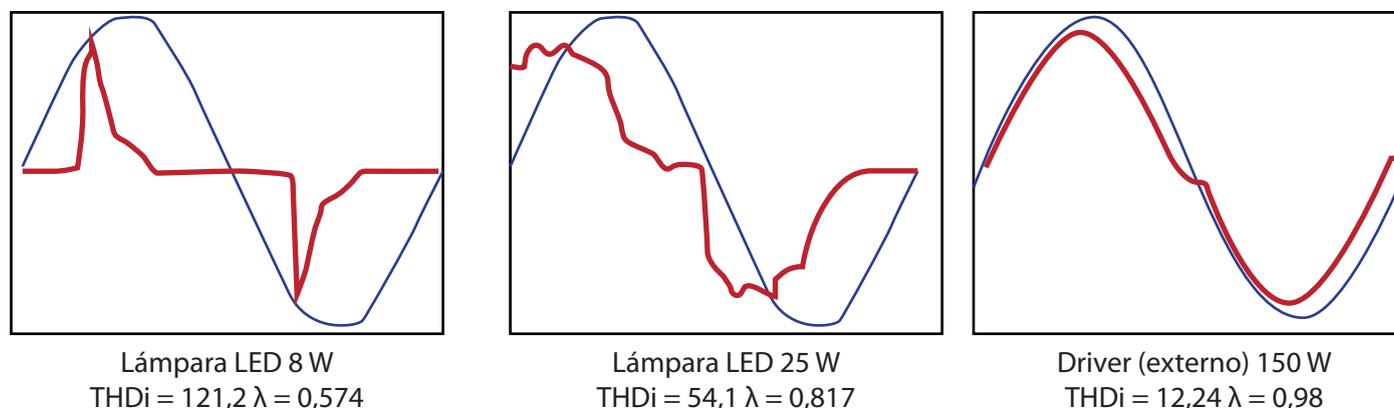


Figura 6. Formas de onda de corriente de las cargas de iluminación led

instalaciones y ocasionando pérdidas adicionales significativas.

Un alto nivel de distorsión de la señal de corriente o tensión está relacionado con la inestabilidad del sistema de suministro de energía, mayor consumo de energía reactiva, aumento de las pérdidas de potencia activa, una reducción en la eficiencia y durabilidad de los dispositivos.

En motores y generadores, provocan un aumento de las pérdidas en el devanado y los circuitos magnéticos en motores de inducción trifásicos. Los armónicos de secuencia negativa (por ejemplo, 5 u 11) generan un campo giratorio en la dirección opuesta a la rotación del rotor y por tanto generan un par de frenado, y como consecuencia de ello, son una carga adicional para el motor.

En los transformadores, la corriente distorsionada provoca un aumento de las pérdidas, tanto en el devanado, como en el núcleo. En los condensadores, se manifiestan en forma de sobrecargas de corriente y tensión; esto puede causar descargas locales en el dieléctrico, que consecuentemente conducen a cortocircuitos en las placas y daño permanente al condensador. En interruptores, contactores o relés, los armónicos pueden alterar el correcto funcionamiento, pueden apagarse de manera aparentemente injustificada produciendo tiempos de inactividad. Los problemas relacionados con las distorsiones de la onda de corriente son cada vez más complicados y a las cargas

electrónicas que han ido creciendo constantemente desde la década de los '60 se ha sumado y, con un fuerte crecimiento, también la iluminación con lámparas y luminarias led.

La alta eficiencia de estas fuentes de luz nos permiten reducir los consumos. Pero debemos reducir su impacto en la calidad de la energía. Es importante que la eficiencia energética de nuestras fuentes de luz no sean una amenaza para nuestras redes aguas arriba y aguas abajo. Tengamos en cuenta que, a nivel mundial, el consumo en iluminación respecto al total del consumo de energía eléctrica es del orden del 20%. En nuestro país, se han realizado importantes proyectos y obras con esta moderna y actual tecnología y es el inicio de un cambio que seguirá creciendo. Por eso es importante que quienes tengan proyectos de redes, tableros, reemplazo de luminarias tradicionales por led estén bien informados de los requerimientos necesarios del equipamiento de iluminación para limitar adecuadamente el impacto de la iluminación led en la red pública de acuerdo a las normas vigentes.

Análisis comparativo de las fuentes de luz y su impacto en la calidad de energía

La sustitución de las lámparas incandescentes se inició progresivamente desde el nacimiento de la lámpara fluorescente (1936). A partir de allí, fue necesario

Fuente de alimentación	1	2	3	4	4	6
Potencia	36 W	36 W	20 W	8 W	25 W	150 W
Potencia activa	45 W	44 W	14 W	8,3 W	25,2 W	281,7 W
Potencia aparente	87 VA	47 VA	28 VA	9,1 VA	27,1 VA	285,5 VA
Tensión eficaz	220 V	220 V	220 V	220 V	220 V	220 V
Factor de cresta	1,5	1,36	3,9	3,09	1,97	1,54
THDU	1,9%	1,9%	2,2%	2,2%	2,2%	0,1%
Corriente eficaz	0,395 A	0,215 A	0,127 A	0,04 A	0,119 A	1,31 A
THDI	9,4%	22,9%	158%	121,2%	54,1%	12,24%
Fase	58 °ind	16 °ind	16 cap	24,5 cap	21,5 cap	8,11 cap
$K_{(\text{desplazamiento})}$	0,53	0,96	0,96	0,91	0,93	0,99
$K_{(\text{distorsión})}$	0,99	0,97	0,535	0,636	0,879	0,992
Factor de potencia	0,52	0,95	0,514	0,578	0,817	0,98
I_3 (150 Hz)	9%	20,2%	92%	88,5%	46,4%	10,8%
I_5 (250 Hz)	2,2%	4,9%	78%	60,4%	11%	4,4%
I_7 (350 Hz)	1,3%	7,1%	61%	38,7%	15,2%	2,9%
I_9 (450 Hz)	0,7%	4%	45%	36,3%	6,1%	1,8%
I_{11} (550 Hz)	0,5%	3%	33%	30,5%	9,7%	1,1%
I_{15} (750 Hz)	0,3%	0,3%	25,9%	23,4%	8,6%	0,01%
I_{17} (850 Hz)	0,3%	1,44%	24,3%	16,8%	6,1%	0%

Tabla 3. Fuentes de luz y su impacto en la calidad de energía

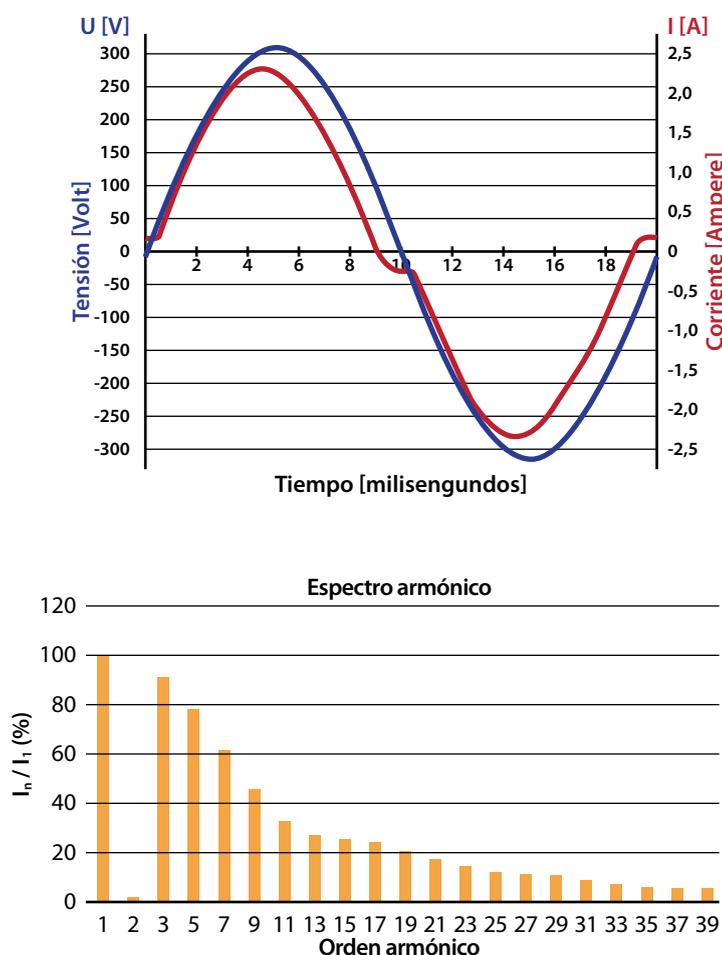
Tabla comparativa de fuentes de alimentación. 1. Balasto inductivo, 2. Balasto inductivo más capacitor (datos de laboratorio Wamco), 3. Lámpara LFC 20 W (datos de referencia 1), 4. lámpara led de 8 W (datos de referencia 7), 5. lámpara led de 25 W (datos de referencia 7), 6. Driver 150 W (datos parciales en referencia UNT-DLLyV-Lab)

la incorporación de una fuente de alimentación para su funcionamiento denominado “balasto inductivo”, “balasto electrónico”, porque estas nuevas fuentes no pueden conectarse directamente a la red de corriente alterna de baja tensión (220 V-50 Hz) como las incandescentes. Finalmente se llega a la lámpara fluorescente compacta LFC (E27) con balasto electrónico incorporado en el bulbo, gran paso que permitió iniciar el recambio definitivo y masivo de las lámparas incandescentes, principalmente a nivel domiciliario.

En nuestro país, a partir de la implementación de la Ley N.º 26.473 (junio de 2011) se prohibió la producción, importación y venta de lámparas incandescentes con una potencia mayor a 25 W. En la iluminación, las cargas no lineales empezaron con la lámpara fluorescente. Las figuras 5 y 6 nos muestran las distintas

formas de ondas de corriente correspondiente a las fuentes de luz a descarga y led. La tabla 3 resume los valores calculados, según la métrica actual, del factor de potencia $[\lambda]$ y la distorsión armónica total THDI.

Durante todo el tiempo durante el cual las fuentes de alimentación para todas las familias de lámpara a descarga (LF, LFC, VM, SAP) fueron balastos inductivos, los bajos valores del factor de potencia $[\lambda]$ se corregían con un capacitor adecuado. Como podemos ver en la tabla 3, mediciones hechas sobre el balasto inductivo 36 W nos indican que el THDI de 9,4% es muy bajo, lo que significa que el factor de distorsión “K” es despreciable, mientras que el factor de desplazamiento “K” es muy importante y es el que determina finalmente el bajo valor de $[\lambda]$. Instalado el capacitor correspondiente, el ángulo φ entre la onda de tensión y la corriente



Fuente de alimentación
150 W
Driver externo

Orden armónico	I _n /I ₁ [%]	Orden armónico	I _n /I ₁ [%]
1	100		
2	0,04	21	0,09
3	10,83	23	0,12
5	4,39	25	0,16
7	2,88	27	0,2
9	1,77	29	0,21
11	1,07	31	0,19
13	0,64	33	0,16
15	0,34	35	0,13
17	0,14	37	0,09
19	0,06	39	0,07

Figura 7. Fuente de alimentación driver 150 W. Eficiencia energética + calidad de energía

pasa de 58 a 16 °ind, y el factor de potencia [λ] pasa de 0,520 al muy buen valor de 0,920. Como podemos apreciar, el agregado del capacitor distorsiona más la onda de corriente, pero su impacto THDI de 22,4% resulta, en este caso, despreciable.

La situación empieza a cambiar fuertemente cuando, con el objetivo fundamental de bajar los consumos, se logra reemplazar el balasto inductivo por el electrónico y finalmente adecuar su función y tamaño para que se pueda fabricar una lámpara a descarga con rosca E27 y conectarla directamente a la red como la incandescente. La nueva fuente de alimentación es una carga no lineal, con fuerte distorsión de la onda de corriente y la onda de tensión. Por ejemplo, reemplazamos una lámpara incandescente de 100 W por una de fluorescente compacta LFC de 25 W.

Actualmente con la gran evolución de la tecnología de estado sólido, reemplazamos la LFC de 25 W por una led de 14 W.

La figura 6 nos indica formas de onda de corriente típicas para lámparas led (driver incorporado) y la forma de onda típica para driver externo que normalmente se utiliza para las luminarias led. En el primer caso, vemos una lámpara de 8 W con porcentajes altos en los armónicos de orden 3 y 5, resultando un fuerte impacto en el THDI (121,2%) y, por lo tanto, bajo factor de potencia [$\lambda = 0,578$]. La segunda lámpara, de 25 W, presenta sustanciales reducciones en los dos armónicos. Ello se debe a que la fuente (driver incorporado) utiliza filtros de armónicos con especial atención a la reducción de los armónicos de orden 3 y 5. Se utilizan diferentes tipos de filtros de armónicos que

permiten reducir el valor de la THDI. Valores orientativos referencia [7], el denominado “pasivo” (THDI entre 105-110%), el “valley fill” (THDI entre 67-72%) y el “activo” (THDI entre 30-35%). Felizmente, los valores de las corrientes armónicas para las lámparas led (ejemplo, tipo E27) son de muy bajo valor en amperes. Esto hace que su uso en reemplazo de las incandescentes y respetando las normas que limitan su emisión a la red pública como la IEC 61000-3-2 sean las adecuadas para esta etapa. Además, su encendido instantáneo, tiempo de arranque menor a 0,5 segundos, ciclos de encendido mayor a 50,000, vida útil superior a 10.000 horas, variedad de temperatura de color correlacionada, buen índice de reproducción del color (IRC) superior a 80, superan ampliamente a las LFC, con el agregado amigable para el medioambiente, dado que no contienen mercurio como todas las lámparas a descarga.

La solución del problema pasa por un diseño global y racional de filtros de armónicos como los filtros activos, lo cual permite costos razonables y fácilmente amortizables por la compensación del ahorro en pérdidas con impacto fuerte en la calidad de energía. Esta aplicación se refleja muy bien en la forma de onda de la fuente de alimentación (driver externo), que con una potencia nominal de 150 W logra un THDI de 12,24% y un factor de potencia de 0,98.

En la figura 7, se representa el espectro armónico de la fuente donde podemos apreciar la fuerte reducción de los armónicos de orden 3 (150 Hz) y de orden 5 (250 Hz) por el uso de filtros activos. Ahora con un mejor conocimiento del tema, es importante señalar las limitaciones exigidas por las normas IEC válidas tanto para las lámparas como las luminarias led.

Normas vigentes para la limitación de las corrientes armónicas

Las fuentes de alimentación para la iluminación led, al igual que cualquier otro equipo eléctrico y electrónico, deben cumplir los requisitos para la limitación de emisión de corrientes armónicas a la red pública de suministro en baja tensión. Estos requisitos se establecieron en la IEC 61000-3-2. En particular, su edición IEC 61000-3-2:2019-04 (ver [14]) considera limitaciones

Orden armónico	Corriente armónica máxima
3	3,4 mA/W
5	1,9 mA/W
7	1 mA/W
9	0,5 mA/W
11	0,35 mA/W
de 13 a 39 (solo impares)	3,85/n mA/W

Tabla 4. Valores admisibles de los armónicos de corriente para equipamiento de iluminación (clase C) con una potencia activa de entrada menor o igual a 25 W ([14])

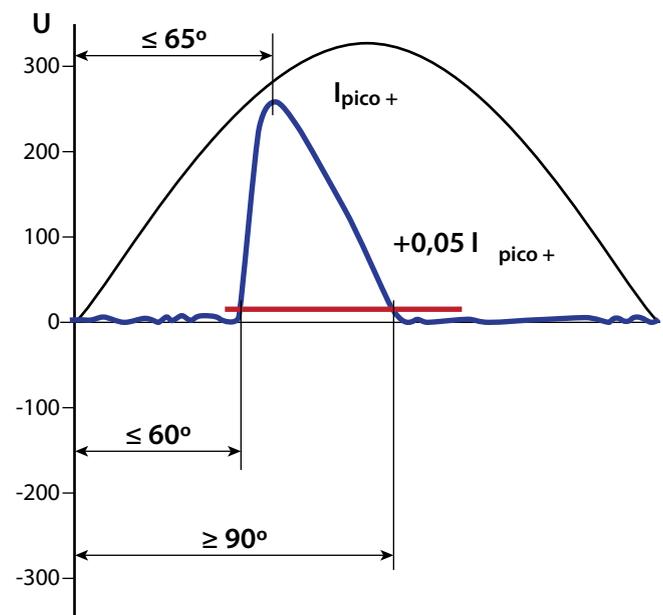


Figura 8. Ejemplo de un semiperiodo

actualizadas para potencias de hasta 25 W inclusive. Según la norma, los equipos eléctricos y electrónicos con corriente de entrada menor o igual a 16 A por fase, se dividieron en cuatro grupos: “A”, “B”, “C” y “D”. Las fuentes de alimentación de la luz led, consideradas como equipos de iluminación, se clasificaron en el grupo “C”.

En este grupo, el equipo de iluminación se divide en subgrupos, y la potencia activa consumida por el dispositivo se asumió como criterio de división. Las cargas cuya potencia superen los 25 W pertenecen a un grupo, y el segundo grupo comprende cargas con

una potencia de hasta 25 W inclusive. El valor de la potencia activa se debe especificar por el fabricante y documentar en el informe de ensayo. Este valor es el que se utiliza para establecer los límites durante los ensayos de emisión cuando los límites vienen especificados en función de la potencia. Si la potencia medida está dentro de los límites, que oscilan entre el 90 y el 110% de la potencia nominal del equipo, se debe seleccionar la potencia declarada por el fabricante. Si, por el contrario, el valor de la medida supera los límites especificados, se tiene en cuenta la potencia medida.

En la IEC 61000-3-2: 2019-4 [14] se presentaron dos conjuntos de requisitos para equipos de iluminación con una potencia activa menor o igual a 25 W; sin embargo, se enfatizó claramente que era suficiente cumplir con uno solo de los requisitos para cumplir con la norma.

- » Las corrientes armónicas convertidas en miliamperes sobre watt de la potencia activa de entrada no deben sobrepasar los límites proporcionales a la potencia indicada en la tabla 4.
- » La amplitud de las corrientes armónicas de orden 3 y 5 expresadas como porcentajes de la corriente fundamental no deben sobrepasar el 86 ni el 61%, respectivamente. Además, la forma de onda de la corriente de entrada debe ser tal que empiece a 60° o antes, que tenga su última cresta (si hay varias crestas por semiperiodo) a 65° o antes y que no termine antes de 90°, asumiendo que el

paso por cero de la fundamental de la tensión de alimentación sea en 0°.

Se fija un umbral de referencia del 5% de su valor pico para ambas situaciones y en función de la fase en grados con respecto a la onda de tensión senoidal. La onda de corriente en su crecimiento hacia su valor pico debe alcanzar el umbral del 5% en una fase menor o igual a 60°, y luego alcanzar su valor pico en una fase menor o igual a 65°; mientras que en su decrecimiento no debe caer por debajo del umbral del 5% en una fase mayor o igual a 90° (ver figura 8).

Para los equipos de iluminación con una potencia activa superior a 25 W, se establecen los siguientes requisitos.

- » Las corrientes armónicas expresadas en porcentaje de la corriente de entrada a la frecuencia fundamental no deben sobrepasar los límites relativos indicados en la tabla 5.

Orden armónico	Corriente armónica máxima
2	2%
3	30 λ
5	10%
7	7%
9	5%
de 11 a 39 (solo impares)	3%

Tabla 5. Valores admisibles de los armónicos de corriente para equipamiento de iluminación (clase C) con una potencia activa mayor a 25 W

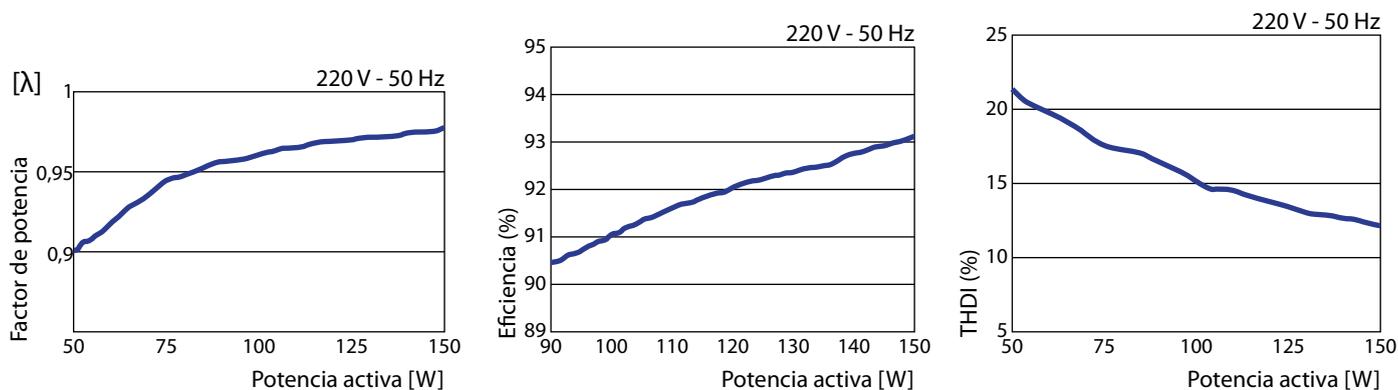


Figura 9. Especificaciones técnicas tipo fuente de alimentación 150 W

Los ejemplos puestos en la tabla 3 nos permiten evaluar cómo es el impacto de la iluminación en la calidad de la energía considerando unidades individuales de fuentes de luz desde las fuentes a descarga a las de diodos electroluminiscentes led. La situación más crítica se presenta con las lámparas led con potencias activas menores o iguales a 25 W. Por otro lado, son las de mayor aplicación dado su reemplazo por la iluminación incandescente. Por ejemplo, la lámpara led de 8 W no cumple con la amplitud de la corriente armónica de orden 3. La de 25 W cumple con la limitación de las de orden 3 y 5. Habría que hacer mediciones y ver si, además, su forma de onda está dentro de las limitaciones de la expresada en la norma (figura 8).

El ejemplo 6 para potencias activas mayores a 25 W cumple con los requisitos de la Norma IEC 61000-3-2 en cuanto a las corrientes armónicas admisibles expresadas en porcentaje de la corriente de entrada a la frecuencia fundamental (ver figura 7).

Con estos valores medidos, podemos calcular la distorsión armónica total de la corriente THDI y el factor de potencia. Finalmente podemos verificar el cumplimiento de la Norma IRAM-AADL J2020-4 inciso 4.10 que exige un factor de potencia mayor a 0,9 y THDI menor o igual a 15%.

Para la iluminación led, tanto de interior como de exterior y público, las fuentes de luz requeridas para lograr los niveles de iluminación necesarios y considerando una eficiencia del orden de 100 lm/W, estamos en potencias activas superiores a 25 W. Es muy importante la información de la fuente de alimentación exterior (driver) y la presentación de la documentación de ensayo realizada en laboratorios oficialmente reconocidos por el IRAM.

Impactos adicionales a considerar por la iluminación led

El factor de potencia es fundamental para asegurar la calidad de la energía. Por otro lado, su evaluación con la métrica compuesta como la indicada en [4] nos permite comprender dónde está el impacto más fuerte. Los fabricantes de fuentes de alimentación (driver externo) incorporan los datos necesarios para tener un

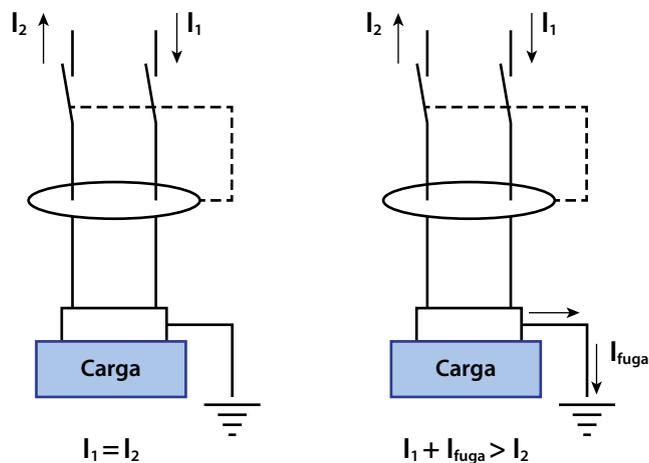


Figura 10. Esquema de funcionamiento de un disyuntor diferencial

panorama de la fuente en cuanto a su impacto en la calidad de energía. Por ejemplo, para un modelo como el de la figura 7 con una potencia activa declarada de 150 W, nos indica gráficamente la variación del factor de potencia, THDI, y la eficiencia en función de la potencia activa.

La fuente de alimentación está diseñada para una potencia activa máxima de 150 W. Si la placa o módulo led para la cual lo vamos a utilizar requiere una potencia menor, por ejemplo 100 W, vemos que aumenta la THDI a un 15% y baja el factor de potencia. Esta información permite al usuario determinar si para su fuente de luz el driver es el adecuado en cuanto a sus parámetros vinculados a la calidad de energía.

La tecnología utilizada en la fuente de alimentación (driver) para convertir CA/CC y la necesaria incorporación de los filtros para limitar las corrientes armónicas y su puesta a tierra, generan impactos que tienen consecuencias sobre los componentes que integran los tableros de distribución de las redes eléctricas internas. Estos impactos involucran a los disyuntores diferenciales y también a los interruptores termomagnéticos. El primer caso, se relaciona con el valor de la corriente de fuga a tierra (en inglés, 'leakage current to earth'), el segundo caso con la corriente pico de entrada (en inglés, 'inrush current').

Corriente de fuga a tierra

Para su buen funcionamiento, los balastos electrónicos para fuentes de luz a descarga, al igual que su moderno reemplazo (driver) para fuente de luz led, poseen filtros con puesta a tierra. Esto significa que estamos en presencia de una corriente de fuga a tierra permanente a 50 Hz que es generalmente inferior a 1 mA. Por razones de seguridad para las personas, en las instalaciones de iluminación en áreas comerciales y/o industriales se incorporan disyuntores diferenciales de 30 mA.

Tal como se indica en la figura 10, mientras “ $I_1 = I_2$ ” significa que no hay corriente de fuga, las luminarias conectadas a ese circuito funcionan normalmente. Si hay una corriente de fuga superior a 30 mA, se suma a I_1 y resulta la desigualdad “ $I_1 + I_{FUGA} > I_2$ ”, y entonces esa “ ΔI ” circula por el bobinado del disyuntor y acciona los contactos del interruptor desconectando la carga. Corregida la situación, se vuelve a conectar el interruptor y nuevamente “ $I_1 = I_2$ ”. La sensibilidad del dispositivo convencional está diseñada para actuar con corrientes de fuga no permanentes. Cuando se empezaron a utilizar balastos electrónicos con filtros, cada equipo va conectado a tierra. Cuando está conectado a la red, tenemos una corriente de fuga unitaria permanente del orden de 0,3 mA, si hay unas cuarenta lámparas fluorescentes, hay una corriente de fuga permanente de 12 mA. Este valor, en forma permanente, es suficiente para producir el disparo intempestivo del disyuntor. Una fuente driver puede tener valores de corriente de fuga del orden de 0,3/0,5 mA o el valor que declare el fabricante que debe figurar en su hoja técnica.

El problema fundamental es que una corriente de fuga permanente es perjudicial para la sensibilidad del disyuntor, ya que no está diseñado para esa condición operativa. A medida que se van conectando más fuentes driver, va aumentando la corriente de fuga y este incremento puede sensibilizar el diferencial de manera que cualquier transitorio adicional puede provocar su disparo intempestivo.

En general, se recomienda que la corriente de fuga permanente no debe superar un 30% del valor límite del disyuntor. En el caso de los balastos electrónicos,

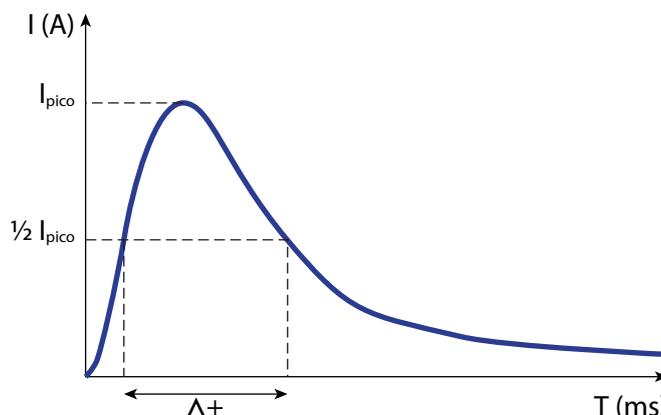


Figura 11. Corriente pico típica de arranque, con una carga capacitiva y tensión eficaz de entrada 220 V, 50 Hz

algunos fabricantes indican la cantidad máxima de unidades a conectar para un mismo circuito con disyuntor diferencial.

Es muy importante que la hoja técnica de la fuente driver indique el valor de la corriente de fuga de cada unidad para prevenir al proyectista y/o al instalador.

Cuando se desea proponer una protección diferencial, hay que considerar los problemas que están presentes en las instalaciones, ya que no contemplar el tipo de carga puede repercutir directamente en el funcionamiento de la protección diferencial instalada. Pueden ocurrir disparos intempestivos afectando la continuidad del servicio y lo más importante es que puede inhabilitar el diferencial y, por ende, poner en peligro la vida de las personas.

Para garantizar el funcionamiento y correcta operación diferencial en redes perturbadas con presencia de transitorios tales como fuerte presencia de corriente armónicas, sobretensiones atmosféricas, arranque de motores, etc., conviene utilizar un disyuntor del tipo superinmunizado que posee un circuito de acumulación de energía, lo que le permite superar esos transitorios sin producir el disparo intempestivo. Con este tipo de disyuntor diferencial se pueden colocar más del doble de cargas que con el convencional. También se debe considerar que la forma de onda no sinusoidal tiene un impacto en la corriente de disparo de un RCD, sensible solo a la corriente alterna. Como resultado, se debe utilizar un RCD tipo A, sensible a la corriente

alterna y/o la corriente pulsante con componente de corriente continua.

Cuando se desea proponer una protección diferencial, hay que considerar los problemas que están presentes en las instalaciones, ya que no contemplar el tipo de carga puede repercutir directamente en el funcionamiento de la protección diferencial instalada.

Corriente de arranque

La corriente pico de arranque de las fuentes driver se ha convertido en un tema de preocupación en la industria de la iluminación. La corriente pico de arranque de las fuentes se refiere a la corriente de entrada de corta duración que fluye hacia el driver, durante la puesta en marcha inicial, para cargar los condensadores en el lado de entrada.

Normalmente, se trata de una corriente de corta duración cuya amplitud es mucho mayor que la corriente de funcionamiento o de estado estable. La corriente de entrada se debe al filtro EMC en la entrada y al condensador a masa en el circuito de refuerzo, esto es inherente a la tecnología led. La figura 11 muestra la naturaleza de la corriente pico de arranque para una fuente driver típica con su valor pico y el valor " Δt ", que es el tiempo durante el cual el pulso de la corriente de arranque es igual al 50% del valor pico.

Estos dos valores dependen del fabricante y modelo del driver. Para tomar conciencia de la magnitud del problema consideremos una fuente driver típica de 100 W y 600 mA. La corriente de arranque es de 50 A durante un tiempo " $\Delta t = 350$ microsegundos". Si en la instalación de la planta hay varias luminarias led que se encienden al mismo tiempo, la corriente de entrada máxima y su duración pueden activar el o los interruptores termomagnéticos debido a la superación del límite de sobrecarga producido por esta alta corriente

de arranque típica de la tecnología de las fuentes de alimentación (driver). Esta situación se puede presentar tanto en un proyecto nuevo como en una renovación de la iluminación existente. Por ejemplo, luminarias con lámparas fluorescentes reemplazadas por nuevas luminarias led con el fin de mejorar la eficiencia de cada una de ellas. En este caso, la red eléctrica se conserva ya que se han bajado los consumos en un 30%.

Supongamos que nuestra instalación tiene dieciséis bocas y que hemos reemplazado dieciséis luminarias de 100 W y 600 mA por otras dieciséis de 70 W y 450 mA logrando un mejor nivel de iluminación inicial y con una reducción de un 30% en el consumo. Las dieciséis bocas están conectadas a un interruptor termomagnético tipo C 16 A.

Bajo esta situación, suponemos que el interruptor termomagnético instalado tipo C 16 A, no tendrá problemas. Sin embargo, al encender las luminarias, se produce el disparo del interruptor termomagnético aún con menos consumo de corriente por unidad. Cada driver instalado de 80 W en el momento del encendido absorbe una corriente de arranque de 50 A durante 350 microsegundos. Si bien el tiempo es muy breve, se trata de dieciséis unidades en paralelo y la simultaneidad del encendido provoca la superación del límite del relevo magnético.

Para evitar esta situación, es necesario tener información del fabricante de la fuente de alimentación (driver) respecto al valor de la corriente pico de arranque (inrush current) y su tiempo de duración. No obstante y, para facilitar el trabajo de la selección del interruptor termomagnético, es preferible que la hoja técnica del driver tenga, además de esos dos valores, una indicación de cuántas unidades de ese modelo se pueden conectar como máximo en un interruptor termomagnético tipo por ejemplo C16 A.

Cantidad de unidades driver por circuito tipo C 16 A

- » Respecto a I_n : 25
- » Respecto a I_{pico} : 8
- » I_{pico} : 50 A
- » Δt : 350 microsegundos

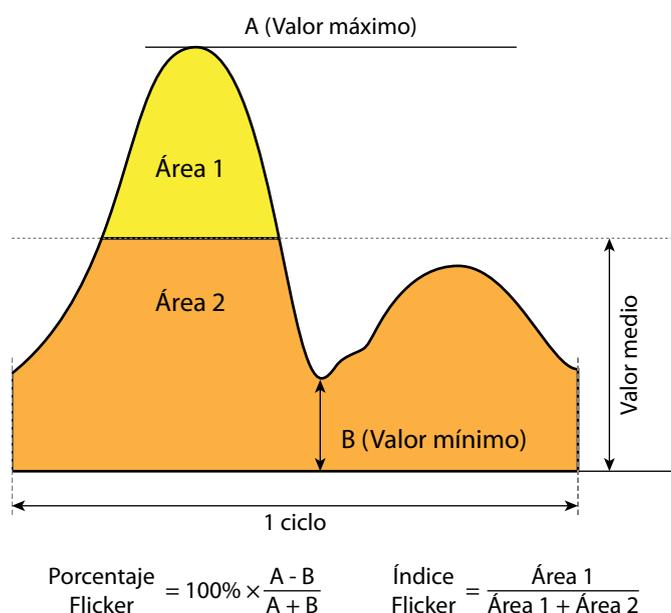


Figura 12. Métrica utilizada para la evaluación del parpadeo. Porcentaje e índice de parpadeo.

Como podemos apreciar, el encendido simultáneo de las dieciséis luminarias led con el interruptor termomagnético existente no es posible ya que su corriente de arranque pico de 50 A durante 350 microsegundos lo pone fuera de servicio. Como vemos, es un dato sumamente importante que debe tener la hoja técnica. Con esta información previa, se pueden tomar distintas soluciones para evitar los disparos imprevistos del termomagnético:

- » Reemplazar el termomagnético existente de curva C 16 A por uno mayor corriente, por ejemplo, C 40 A, ya que podrá soportar hasta veinte unidades respecto de la corriente pico.
- » Reformar la instalación distribuyendo las fuentes driver en más de un interruptor, por ejemplo, dos circuitos cada uno con un C 16 A. También se puede iniciar el encendido de las fuentes driver en forma secuencial y evitar un encendido simultáneo.
- » Otra posibilidad es incorporar al circuito un dispositivo limitador de corriente pico entre el interruptor termomagnético y las fuentes driver, lo que reduce efectivamente la posibilidad de que

el interruptor se dispare imprevistamente y, por lo tanto, se aumenta la fiabilidad del sistema.

La corriente pico de entrada y el tiempo de duración de las fuentes de alimentación (driver) difieren de un fabricante a otro y de un modelo a otro. Por esta razón es muy importante disponer la información detallada de la fuente a utilizar y evitar disparos intempestivos de los interruptores termomagnéticos.

Flickering o parpadeo de la fuente de luz

El parpadeo ("flickering") periódico de la fuente de luz de una luminaria (efecto estroboscópico) está presente en casi todas las fuentes de luz artificial y es provocado por el rizado en la corriente de salida del driver del led. Este dato permite cuantificar la magnitud del problema: un parpadeo por debajo del 15% evita mareos, náuseas, dolores de cabeza. Por debajo del 8% no es perjudicial (según IEEE SA-1789-2015).

Los efectos en la salud que puede producir el parpadeo se dividen en aquellos que son el resultado inmediato de una exposición de breves segundos, como ataques epilépticos; y los que son el resultado menos obvio de exposición a largo plazo, tales como el malestar general, dolores de cabeza y un deterioro en el rendimiento visual. El primero se asocia con el parpadeo visible, típicamente dentro del intervalo ~3~70 Hz. El segundo, con la modulación de la luz invisible a frecuencias superiores. Los efectos biológicos negativos en los seres humanos se dan en función de la frecuencia del parpadeo, la profundidad de modulación, el brillo, el uso de la iluminación y otros factores.

La norma IEEE SA 1789-2015 presenta una ecuación a través de la cual se puede calcular el porcentaje máximo de parpadeo aceptable. Para ello, se multiplica la frecuencia de una fuente de luz por 0,08 y se redondea hasta calcular el porcentaje máximo, permitiéndose un 10% de parpadeo como tope a 120 Hz.

$$\% \text{ máximo parpadeo} = 0,08 \times (\text{frecuencia de la fuente de luz})$$

La frecuencia de alimentación, generalmente 50 Hz en Europa y 60 Hz en Estados Unidos, se traduce a 100 y 120 Hz, respectivamente, en los rectificadores de

onda completa (drivers), al haber dos apagados por cada ciclo original.

La frecuencia de alimentación de las redes en Argentina es de 50 Hz y por lo tanto el porcentaje máximo de parpadeo según la Norma será del 8%. El parpadeo del led proviene del driver. Algunos fabricantes (pocos) dan los datos del parpadeo, expresados en "ripple %" (porcentaje de rizo de la corriente de salida del driver).

La única norma que emite recomendaciones precisas para proteger la salud del ser humano es la norma estadounidense IEEE 1789, publicada en 2015. Las recomendaciones se basan en la experiencia en salud, incluidos los análisis de riesgos. El grupo de trabajo confirma que la mayoría de las lámparas incandescentes supera el límite seguro recomendado por IEEE 1789 y confirma que los parámetros utilizados en el estándar IEEE 1789 (frecuencia y porcentaje de modulación) son totalmente aplicables a la gran mayoría de lámparas y luminarias led. Las propuestas de luminarias led ya incorporan en sus propuestas el cumplimiento de IEEE 1789.

Conclusiones

La eficiencia energética, que también tenemos como objetivo en la iluminación, debemos lograrla preservando la calidad de la energía. Es muy importante analizar, cuantificar y tomar conocimiento del verdadero impacto en la calidad de la energía y saber cuáles son las limitaciones exigidas y vigentes. De este modo, adecuaremos la tecnología de los leds y lograremos armonizar la eficiencia energética con la calidad de la energía. Estamos en el inicio de una nueva cultura de la luz. La Luz debe ser eficiente, saludable, sustentable, acorde con la economía circular y el ecosistema.

Las nuevas fuentes de luz led, diodo emisor de luz inorgánico y OLED y sus fuentes de alimentación electrónicas (driver) son aptas para gestionar de manera inteligente todo tipo de programa para lograr esos objetivos. Es muy importante para quienes tengan a su cargo proyectos o instalaciones nuevas o renovaciones previstas con la incorporación de estas nuevas tecnologías tener buena información para armonizar la eficiencia energética con la calidad de la energía. ❖

Referencias

- [1] "Estudio de Impactos en Redes de Distribución(I) y Medio Ambiente (II) Debidos al Uso Intensivo de Lámparas Fluorescentes Compactas"-Secretaría de Energía-Programa de Calidad de Artefactos Energéticos (PROCAE). M.S.F. Brugnoni, R.Iribarne – (Mayo 2006)
- [2] "Lámparas LED: impacto en el uso eficiente de la energía" J. Suárez, G. Di Mauro, G. Murcia, S. Jacob, J. Strack Grupo de Investigación LAT- (Marzo 2013)
- [3] "Evaluación de armónicos en propiedades residenciales" - Carlorosi M.V., Manzano E.R. "XI Jornada Argentinas de Luminotecnia- (Octubre 2013)".
- [4] "Demain, l'éclairage sera très différent" Gaël Obein- Président-AFE Association Française de l'éclairage)-Entrevista Ingénierie Territoriale -N° 53 Mars 2020.
- [5] Impact of large-scale installation of LED lamps in a distribution system-Uddin et al. (2015)
- [6] Power Quality: a Requirement for GSLs.- Steve Coyne- 6 Nov 2019.
- [7] Disturbances Generated by Lighting Systems with LED Lamps and the Reduction in Their Impacts-Łukasz Putz Karol Bednarek and Ryszard Nawrowski-14 November 2019
- [8] Impacts of LED lighting on Power Quality. Remi Bolduc.Schneider Electric White Paper.
- [9] Harmonics and Reduction of Energy Consumption in Lighting Systems by Using LED Lamps. Natthanon Phannil, Chaiyan Jettanasen and Atthapol Ngaopitakkul - 15 November 2018.
- [10] LED Drivers Power Quality, PF, Displacement and Harmonic Factors ALA – Signify-July 2018
- [11] Differences in the performance between CFL and LED lamps under different voltage distortions. Gil-de-Castro, A., Medina-Gracia, R.Ronnberg, S.K.Blanco, A.M., Meyer,
- [12] Light Wavelength and Power Quality Characteristics of CFL and LED Lamps under Different Voltage Harmonic Levels. Kamran Dawood et al., Vol.3, No.1, 2017.
- [13] Harmonics Monitoring Survey on LED Lamps. Abdelrahman Ahmed Akila. Kamelia Youssef, Ibrahim Yassin.
- [14] Standard IEC 61000-3-2:2019-04—Electromagnetic compatibility (EMC)—Part 3-2: Limits—Limits for Harmonic Current Emissions (Equipment Input Current ≤16 A per Phase); International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2019.
- [15] Harmonics and Reduction of Energy Consumption in Lighting Systems by Using LED Lamps. Natthanon Phannil, Chaiyan Jettanasen and Atthapol Ngaopitakkul - 15 November 2018.