

Tecnología Led para un Programa Mejorado de Luz Sustentable^a

RIGOBERTO ARROYO* / ROLANDO V. JIMÉNEZ**

FECHA DE RECEPCIÓN: 14/09/2013; FECHA DE APROBACIÓN: 02/02/2014

RESUMEN: El Programa de Luz Sustentable de México (PLS), iniciado en 2011 como respuesta a la necesidad de usar de modo más eficiente la energía eléctrica generada en el país y lograr una reducción en la tendencia creciente de la demanda, necesita ponerse al día con las nuevas tecnologías de iluminación. Se analiza aquí la prematura obsolescencia de este programa y los riesgos ocultos que implica al promover el uso de las lámparas fluorescentes compactas que, por contener materiales tóxicos como el mercurio, representan graves riesgos para la salud cuando se manejan de manera inadecuada al no estar el usuario debidamente informado. Se propone aquí la mejora del PLS en una segunda etapa, incorporando la tecnología de los *Leds* (diodos luminosos). Para sustentar la propuesta se presenta un estudio comparativo entre las tecnologías de iluminación disponibles actualmente, tomando en cuenta impactos económicos, eficiencia energética, eficacia lumínica, impactos ambientales y cumplimiento de normas de salud visual. Se hace una breve revisión de los orígenes y la evolución de las fuentes de iluminación eléctricas, desde su aparición como curiosidades de laboratorio hasta su desarrollo actual en que son imprescindibles para la vida de la sociedad moderna. El análisis comparativo se lleva a cabo mediante las herramientas de la inteligencia tecnológica, con el propósito de evaluar las ventajas y limitaciones de cada una en función de los requerimientos de su aplicación final, los costos económicos y los impactos ambientales. Los *Leds* resultan ser la tecnología más promisoría, pues representan ventajas para el ambiente, la eficiencia energética y, en el mediano plazo, la economía. Datos duros, estimaciones cuantitativas y tablas comparativas se muestran para sustentar los argumentos expuestos.

PALABRAS CLAVE:

- fuentes luminosas
- lámparas incandescentes
- lámparas fluorescentes compactas (LFC)
- leds
- eficacia lumínica
- Programa de Luz Sustentable

LED Technology for an Improvement Program of Sustainable Light

ABSTRACT: The Mexican Sustainable Light Program (Programa de Luz Sustentable, PLS), started in 2011 as an answer to the need of achieving higher energy efficiencies in the use of electricity and a leveling of the demand curve, must be put in consonance with the new illumination technologies. We analyze the PLS early obsolescence and the risks inherent to it for promoting the use of compact fluorescent lamps without warning the people about the toxic materials they contain and how to dispose the broken or damaged devices. A proposal is made to incorporate the Led technology for improving this program in a second phase. To this end, we present a brief description of the origin and evolution of the electric illumination sources, from their birth as scientific curiosities to the present “state of the art” in which they constitute a basic technological device in modern societies. Using the tools of technological intelligence, a comparative analysis is made between the different luminal technologies available at the market, in order to evaluate the advantages and limitations of each of them in relation to its final application, prices and ecological impacts. As a result we find that Leds (light emitting diodes) technology is the most promising one in what has to do with ecology care, efficient use of energy and, in the medium term, the economy. Some data, numerical estimates and comparative tables are presented to support the given arguments.

KEYWORDS:

- light sources
- incandescent lamps
- compact fluorescent lamps (CFL)
- leds
- luminous efficacy
- Sustainable Light Program

^a Los autores agradecen el apoyo financiero de la Secretaría de Investigación y Posgrado del IPN a través del Proyecto SIP-20130818.

* Estudiante de Posgrado en el CIECAS-IPN, Mexico.

** Profesor-investigador titular del CIECAS-IPN. Becario del SIBE y EDI-IPN, Mexico. Miembro del SNI-Mexico.

Introducción

Producir electricidad a partir de los combustibles fósiles fue una actividad de relativamente bajo costo y pocos efectos colaterales indeseados, hasta los años 70 del siglo XX. Pero en 1973 los precios del petróleo, y de los hidrocarburos en general, iniciaron una carrera alcista a raíz del embargo petrolero árabe: el precio del barril de petróleo pasó de unos tres dólares a más de doce en menos de un año, con lo cual la producción eléctrica se encareció y, en consecuencia, toda la producción industrial. Además, desde mucho antes la demanda de energía eléctrica ha venido creciendo de manera sostenida debido al aumento de la población (que en los últimos decenios ha estado aumentando a razón de mil millones de nuevos habitantes cada doce años), la elevación de los niveles de vida y el incremento de la actividad industrial. Esto ha traído aparejado un aumento de la contaminación ambiental producida por la quema de hidrocarburos, y esta contaminación se asocia con la elevación de la temperatura media del planeta (calentamiento global). Si a ello agregamos el agotamiento de los hidrocarburos, se comprenderá porqué el problema del aprovisionamiento de energía constituye en la actualidad una preocupación mundial. Este problema se ataca en dos frentes: por una parte, el desarrollo y uso de fuentes alternativas de energía, y por la otra, el empleo de mejores tecnologías que provean dispositivos energéticamente más eficientes, además de la adopción de mejores hábitos de consumo. Este trabajo se centra en las tecnologías de iluminación, que en el mundo actual consumen alrededor del 15% de toda la electricidad generada, debido en gran parte al empleo de las lámparas incandescentes que son sumamente ineficientes, pues de cada 100 watts consumidos, solamente entre 5 y 8 se convierten en luz; el resto se disipa en calor, generalmente indeseable. Sin embargo, aún existen características apreciables en un foco incandescente. Por ejemplo, al conectarse directamente a la tensión eléctrica, el filamento de tungsteno, que por su pequeñísimo diámetro presenta una gran resistencia al flujo de la corriente eléctrica, se calienta hasta la incandescencia produciendo cierto nivel de iluminación fijo; en este punto es muy sencillo controlarlo mediante un dispositivo (atenuador o *dimmer*) que vaya regulando la tensión eléctrica que lo alimenta, reduciendo o aumentando el valor de ésta, con lo que se controla la intensidad de la luz emitida. Esta facilidad de manipulación es algo que sólo tecnologías selectas de última generación son capaces de otorgar, y ha sido considerada como una característica

deseable en el desarrollo de las nuevas tecnologías: las lámparas fluorescentes y los *leds*, que se estudian en lo que sigue.

Antecedentes

Los primeros experimentos documentados sobre la aplicación de la electricidad para producir iluminación son los realizados por Sir Humphry Davy (1778-1839), químico británico considerado el fundador de la electroquímica. Davy hizo circular una corriente eléctrica por un delgado alambre de platino, y observó que éste emitía una luz intensa. Aunque el platino es un conductor de la electricidad, presenta, sin embargo, una cierta resistencia al paso de la corriente, y si el alambre hecho de este material es muy delgado (filamento), esta resistencia puede ser considerable y disipar, en forma de calor y de luz, una gran parte de la energía eléctrica que pasa por él: el filamento se calienta a varios cientos de grados Celsius y emite luz como cualquier metal a alta temperatura. Estos experimentos de Davy culminaron en 1815 con su invención de una lámpara de seguridad para los mineros, que lleva su nombre.

Sin embargo, el antecedente más reconocido de los focos incandescentes actuales es la lámpara desarrollada por Joseph William Swan (1828-1914), otro físico y químico inglés, quien alrededor de 1850 propuso usar filamentos de carbono contenidos en bulbos de vidrio al vacío para alargar la vida de los dispositivos. Por esa época era muy difícil obtener altos vacíos, y los filamentos de materiales orgánicos quemados (fibras textiles o hilos de algodón) eran muy defectuosos y de corta duración; sin embargo, Swan logró mejorar sus diseños y en 1881 pudo formar una empresa en Inglaterra para comercializar su invento, conocida como la Swan Electric Light Company. Obtuvo la patente británica de su lámpara en 1878.¹ Al mismo tiempo, Thomas Alva Edison (1847-1931) trabajaba en los Estados Unidos tratando de encontrar filamentos que pudieran tener vidas más largas. Después de miles de ensayos con diferentes materiales, Edison logró diseñar una lámpara con filamento de carbono realmente práctica por su operación y duración, por lo que muchos lo consideran el inventor de la lámpara incandescente, aunque en sentido estricto no fue el inventor sino su perfeccionador. Swan y Edison se asociaron para comercializar sus lámparas incandescentes, formando la empresa Edison & Swan United Electric Light Company (conocida como la Ediswan), pero la patente de Edison en los Estados Unidos se obtuvo un año después que la de Swan en Inglaterra. En 1892 esta empresa de Edison, fusionada con otra también creada por él, se convierte en la General Electric que conocemos en la actualidad. Fue en los laboratorios de la General Electric donde William Coolidge, entre 1908 y 1910, basándose en sus ensayos con nuevos materiales, desarrolla el filamento de tungsteno, con un color de luz cálida y mayor durabilidad que los filamentos de carbón; ésta es una tecnología que aún perdura.² La gran

¹ H. Sussman, *Victorian Technology, Invention, Innovation and the Rise of the Machine*, ABC CLIO, LLC, Santa Bárbara, California, Estados Unidos de Norteamérica, 2009.

² Edison Tech Center, 2010a. Recuperado el 12 de febrero de 2012, de William D. Coolidge, The Edison-Steinmetz Center: <http://edisontech-center.org/coolidge.html>

competencia comercial a inicios del siglo XX produjo el desarrollo de lámparas incandescentes de muy alta durabilidad (hasta 2500 horas) pero de baja eficiencia luminosa, pues menos del 10% de la energía eléctrica consumida se transforma en luz visible, como ya se ha mencionado.³ A pesar de estas limitaciones, el desarrollo de la lámpara eléctrica incandescente permitió que la mayor parte de las actividades humanas se llevara a cabo bajo una iluminación artificial mejorada, todo ello propiciado también por el enorme crecimiento de la industria eléctrica en el mundo.

Las lámparas ahorradoras

Las lámparas ahorradoras son un tipo particular de lámpara de descarga en la que en vez de calentar un filamento para la emisión de luz, se produce una descarga eléctrica entre dos electrodos contenidos en un recipiente hermético que contiene vapor de mercurio a baja presión y algún otro gas inerte. Una vez creado el arco de descarga, el vapor de mercurio emite radiación ultravioleta. Ciertos polvos fosforescentes que recubren la pared interior del recipiente de vidrio que rodea al gas absorben la radiación ultravioleta y emiten luz en el rango visible.⁴ Para poder operar estas lámparas con el voltaje disponible en los hogares (110-127 volts en el caso de México), es necesario alimentarlas a través de un dispositivo llamado “balastra” o “*starter*”, que provee las características adecuadas de voltaje, corriente y forma de onda para iniciar y mantener la operación de la lámpara. Estas balastras pueden ser de dos tipos: magnéticas y electrónicas. Las balastras electrónicas son más costosas que las magnéticas, pero son más ligeras y silenciosas, y reducen el molesto parpadeo de la luz producido por estas últimas.

Las lámparas fluorescentes se fabrican en diversas formas: tubular lineal, tubular circular, de forma helicoidal, de uno o varios arcos o espiras, etc. Una lámpara fluorescente compacta (LFC) hoy en día tiene propiedades de color de iluminación muy similares a las de un foco incandescente, pero con mejor eficacia lumínica, es decir, con un consumo menor de potencia (en watts, W) y menor disipación de calor al medio ambiente para la misma intensidad luminosa producida. Sin embargo, su temperatura de operación aún oscila alrededor de los 90°C, temperatura promedio en la base de los tubos de una LFC de 15 Watts (según mediciones realizadas por los autores), lo cual afecta notablemente la electrónica interna (balastra). Aun así, su principal ventaja es que solamente consume la cuarta parte (aproximadamente) de la energía eléctrica que requiere una lámpara incandescente para el mismo nivel de iluminación, permitiendo un ahorro energético hasta del 75%. El precio del producto es al presente todavía mayor que el de una lámpara incandescente, por un factor de tres a cuatro, pero los precios tienden a bajar.

Los Leds

Los Leds (del inglés “light emitting diodes”) son dispositivos semiconductores de estado sólido que convierten directamente la energía eléctrica en luminosa sin pasar por la producción de calor. Pueden ser extremadamente pequeños y durables (en la actualidad, hasta cien veces más que una lámpara incandescente), producen poco calor y menos interferencia eléctrica que los tipos de lámparas anteriores. Se ha podido en la actualidad producir *leds* prácticamente para cualquier color de luz deseado: blanco, blanco cálido, luz de día, de cualquier color,⁵ y los precios, aunque todavía poco competitivos, están bajando aceleradamente.

Es importante señalar que tanto un diodo rectificador básico como un *led*, son dispositivos electrónicos discretos, constituidos por dos semiconductores, uno del tipo P y otro del tipo N unidos metalúrgicamente, cuya función es restringir o dejar pasar la corriente eléctrica en un solo sentido (semiciclo positivo o negativo de una onda de corriente alterna, según el caso; este es el llamado “efecto rectificador”). Sólo que, además, un *led* tiene la característica de emitir un haz de luz al pasar los electrones del electrodo negativo al positivo (a este fenómeno se le llama ‘electroluminiscencia’). Para efectos prácticos, en arreglos electrónicos el consumo de potencia eléctrica de un solo diodo es despreciable,⁶ y tal ventaja

³ Edison Tech Center, 2010b. Recuperado el 25 de marzo de 2012, de Incandescent Lamps: <http://www.edisontechcenter.org/incandescent.html>

⁴ D. Stahle, S. Ladner y H Jackson, *Maine Compact Fluorescent Lamp Study*, Department of Environmental Protection, Augusta, Maine, 2008.

⁵ N. Pousset, *Caracterisation du rendu des couleurs des nouvelles sources: les diodes électroluminescentes*, Conservatoire National des Arts et Métiers, Francia, 2009.

⁶ A diferencia de un diodo rectificador de uso general que disipa 80 mW a 25°C con tensiones de 80 volts de corriente alterna, un LED de 5mm tipo ‘30045’ (preparado para producir luz super-blanco CIE Coordinates Typ X:0.3 Y:0.31) consume típicamente de 100 a 120 mW con tensiones de 3.6 volts de corriente continua y 20 miliamperes (mA) con temperatura de operación entre -25 a +80°C; además de esta diferencia, este LED típico emite un haz de luz de 16000 milicandelas (mcd) con un ángulo de 22°. Según la luminotecnia, 16000 mcd son equivalentes a 1.85 lúmenes (lm) o bien, 1.85 luxes a 2.95 metros de distancia; por su parte, un foco incandescente o halógeno típico de 60W produce alrededor de 702 lm (Koninklijke Philips Electronics N.V., 2010) con un ángulo de 360° y 33% de eficiencia en dicho ángulo para este tipo de lámparas, por lo que se puede inferir que para igualar este nivel de iluminación con LEDs se necesitaría un arreglo de $(n=[702/1.85]*0.33)$ 125 LEDs del tipo ‘30045’ (considerados como 100% eficientes), resultando un consumo de potencia teórica de 15 watts, esto concuerda significativamente con la guía de sustitución de lámparas de Philips, donde su lámpara a LEDs de 12 watts sería sustitutiva de una lámpara incandescente de 60W. Claro que los tipos de LEDs que la Philips incluye en su modelo ofertado son diferentes, pero el núcleo de la tecnología base es el mismo.

actualmente está siendo trasladada hacia aplicaciones reales de iluminación general, y en casos como el de este estudio, iluminación doméstica, donde el consumo de potencia es cada vez más bajo incluso que el de una LFC equivalente. Además, no necesitan de balastras tan complejas para acondicionar la corriente eléctrica y producir el encendido, a diferencia de un tubo LFC lleno de gas de mercurio que sí las necesita, así como otros componentes eléctricos y electrónicos, para acondicionar tanto el voltaje como la corriente y la frecuencia.

Por tal razón, el tipo de tecnología de iluminación *led* o similar de frontera (lámparas magnéticas o a base de *leds* orgánicos: “oleds”) es clave para subsanar la creciente demanda de nuevos usuarios en la red eléctrica nacional, pues al migrar hacia un consumo significativamente más eficiente, podría la misma red alimentar a un mayor número de usuarios manteniendo la misma capacidad de generación.

Un condensado de la evolución de las tecnologías de iluminación se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1
Evolución de las tecnologías para iluminación general

1875	Joseph Swan (UK), primer bulbo incandescente (filamento de carbón), patentado en 1878.
1907	Joseph Henry Round (1881-1966), primera emisión de luz por un dispositivo semiconductor ;
1908-1910	William Coolidge (General Electric), lámpara con filamento de tungsteno (dúctil)
1910	Georges Claude (1870-1960), lámpara de descarga con gas inerte (tubo neón) ;
1927	Oleg Vladimirovich Losev (1903-1942), primera patente de un diodo electroluminiscente inorgánico (LED);
1938	General Electric y Westinghouse corporation, lámpara fluorescente;
1959	Edward George Zubler (1925-2004) y Frederick Mosby, lámpara de halógeno, que ofrecía mejor vida útil que las simples lámparas incandescentes;
1962	Nick Holonyak y Sam Bevacqua de General Electric, primer LED rojo;
1987	Ching W. Tang y Steven Van Slyke, empleados de Kodak en los Estados Unidos de América (EUA), primer diodo emisor de luz orgánico (OLED).
1993	Nichia Corp. (Japón), Shuji Nakamura: primero en desarrollar el LED azul de alto brillo (1 candela, cd), cuya tecnología será base para el LED blanco.
1996	Nichia (JP); Nakamura desarrolla LED a base de Galio, pat. US5578839, “Light-emitting gallium nitride-based compound semiconductor device”
1996	Nichia Corp. (Japón) desarrolla el LED blanco, patente No. US5777350, Nitride semiconductor light-emitting device (Nitrógeno y base de Y Al y Ga: YAG).
2003	Nichia Corp. (Japón) desarrolla el LED <i>blanco cálido</i> (“Technical Innovation Award” at the LIGHTFAIR 2003), patente no. JP- 2002-225043
2003-2006	Primeras aplicaciones comerciales de los LED’s con aplicaciones para iluminación general, inicialmente con luz de color blanco frío.
2008-2011	LEDs de alta eficiencia y rendimiento (alto-CRI). Actualmente con blancos cálido y puro. Múltiples fabricantes, principalmente China, Japón, Corea del Sur, Taiwan, Holanda y Alemania.

Fuente: Tabla elaborada con datos del listado inicial de Pousset y otros obtenidos de la USPTO (Oficina de Patentes y Marcas de los EUA). N. Pousset, *Caracterisation du rendu des couleurs des nouvelles sources: les diodes electroluminescentes*, Conservatoire National des Arts et Métiers, Francia, 2009, p. 43.

El ojo humano y la mejor percepción de luz-color-objeto

Diversos estudios se han hecho respecto al ojo humano y su respuesta a diversas fuentes de iluminación. Por ejemplo, el trabajo de Nicolas Pousset⁷ sobre “*caracterisation du rendu des couleurs des nouvelles sources: les diodes*

electroluminescentes” (caracterización del rendimiento de los colores de las nuevas fuentes: los diodos electroluminiscentes), se ha tomado aquí como referencia fundamental para este estudio. En dicho trabajo se analiza la comodidad visual asociada a las nuevas tecnologías, cuyo reto principal es ser más eficientes y producir un color de luz lo suficientemente cercano a la luz natural, que es la luz del Sol reflejada dentro de la biósfera terrestre. Para ello, el mismo color de luz que en las simples lámparas incandescentes se desarrolló en los últimos años se tomará como referencia, pues como

⁷ N. Pousset, *op. cit.*

tecnología casi extinta pero aceptada durante muchos años, ese factor debe ser la estafeta de cambio, en la medida de lo posible, para la construcción simple de las nuevas lámparas.

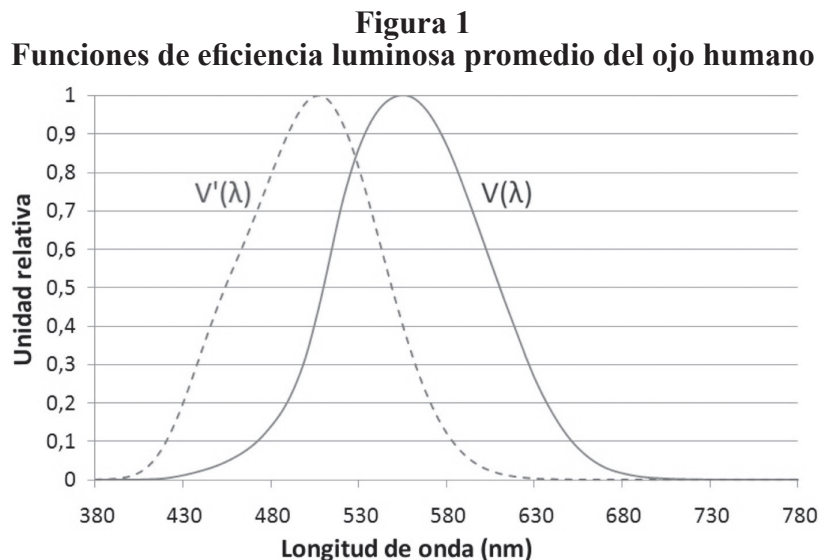
“El ojo humano es un órgano sensorial completo que tiene por función el recibir los rayos de luz y transformarlos en señales bioeléctricas para que sean analizadas por el cerebro”.⁸ Como la luz, según la teoría corpuscular, es semejante a una lluvia de partículas (fotones) que golpean la retina (rodoxina), los electrones de esta sustancia atrapan esos fotones y producen un pulso electroquímico que viaja hasta el cerebro haciendo posible la percepción.⁹ La calidad de tal percepción estará acorde con una combinación de factores: el objeto de color, la visión humana y, lo más importante, la calidad de la fuente luminosa (distribución espectral). Por lo tanto, de acuerdo con Pousset, se considerarán a continuación las “funciones de eficiencia luminosa espectral relativa al ojo humano”.

Se definen dos funciones de eficiencia luminosa promedio del ojo humano, denominadas $V(\lambda)$ y $V'(\lambda)$, según la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) (por sus siglas en francés, ‘Commission Internationale de l’Éclairage’) (véase Figura 1).

En la Figura 1 se observa que para fines prácticos, el promedio eficaz entre ambas funciones, para un valor relativo de 0.9, oscila entre longitudes de onda que van de los 490 a los 580 nm (nanómetros).

A continuación se comparan las ondas espectrales de emisión *led*, tanto de las tecnologías llamadas “blanco frío” como “blanco cálido” (véase Figura 2).

De la Figura 2 se desprende entonces que la forma de onda espectral de emisión del *led* blanco cálido tiene una semejanza óptima con la curva $V(\lambda)$ de las funciones de eficiencia luminosa promedio del ojo humano según la CIE, incluso con un pico entre 570



Fuente: Adaptado de N. Pousset, *Caracterisation du rendu des couleurs des nouvelles sources: les diodes électroluminescentes*, Conservatoire National des Arts et Métiers, Francia, 2009, p. 7.

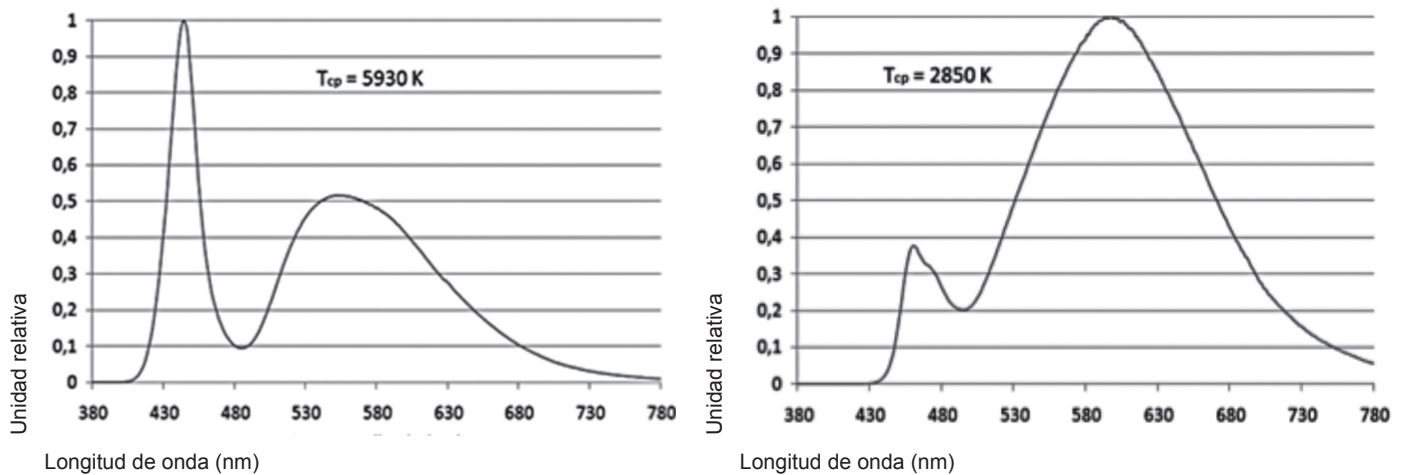
y 620 nm para una unidad relativa de 0.9, y éste cae dentro de la región de $T_{CP}=2850K$ (Índice de Correlación de Temperatura, ICT, que asocia el color de la luz producida con una temperatura). En cambio la onda espectral de emisión del *led* blanco frío con una región de $T_{CP}=5930K$, no presenta una respuesta óptima respecto a las funciones de eficiencia luminosa promedio del ojo humano.

La longitud de onda en que responde el ojo humano se relaciona directamente con el ICT expresado en unidades equivalentes de Kelvin (Figura 4); por ejemplo, 3000K será un color de temperatura que se encuentra fácilmente en la emisión de luz visible de un foco incandescente. Al ICT de 3000K le corresponde una longitud de onda de 590 nm (amarillo-verde).

⁸ *Ibid.*

⁹ E. Ganem y M. D. Aranda, *El Explicador*, 08 marzo, México, 2011.

Figura 2
Ejemplos de ondas espectrales de emisión led blanco frío (izquierda) y blanco cálido (derecha)



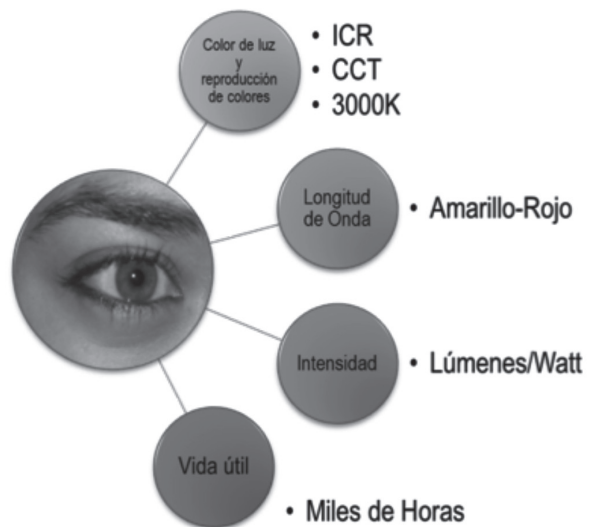
Fuente: N. Pousset, *Caracterisation du rendu des couleurs des nouvelles sources: les diodes électroluminescentes*, Conservatoire National des Arts et Métiers, Francia, 2009, p. 58.

Yoshi Ohno,¹⁰ en su estudio sobre las “consideraciones de diseño espectral del rendimiento de color para los leds blancos” obtiene resultados en general buenos para el índice de rendimiento de color (CRI, por *color rendering index*) de diversos tipos de *leds* blancos (tanto encapsulados como *chips*); algunos tuvieron buena eficiencia luminosa, sobre todo los tipos a base de fósforo de *cuádruple-chip*. Sin embargo, se identificaron algunos problemas de medición de CRI en los *leds* blancos, sobre todo enfocados a aplicaciones como fuentes de iluminación convencionales, puesto que uno de los índices (Ra) es poco confiable para la ejecución del rendimiento de color en *leds* blancos.

El ICT de lámparas fluorescentes, por ejemplo, ha sido diseñado para la preferencia de la gente en los mercados objetivo de diferentes países. Para los hogares en Estados Unidos (EUA), el blanco cálido (2800 K a 3000 K) es dominante; por lo que la luz blanca (6500 K) no sería aceptable para esos hogares. Pero en Japón, por ejemplo, 5000 K es dominante. Otros países prefieren aún mayor

ICT, hasta 7500 K. Las preferencias para oficinas son diferentes. Por ejemplo, 4200 K es común en EUA. Por lo tanto, la “luz natural” no describe todos los mercados y aplicaciones.¹¹

Figura 4
Determinación de las características pertinentes de la tecnología led para el ojo humano



¹⁰ Y. Ohno, “Spectral design considerations for white LED”, en *Optical Engineering*, 44(11), 111302, 9, 2005.

¹¹ *Ibid.*

En estudios multidisciplinarios más recientes, Faranda, Guzzetti y Leva¹² en colaboración con T. Liu, F. Yang, J. Yu y Y. Wang,¹³ concluyen que el desarrollo de la iluminación *led* es cada vez más una solución asequible para satisfacer las necesidades de iluminación moderna tanto en productos como en sistemas. Según estos autores:

- Los *leds* han alcanzado en la actualidad características interesantes, tales como:
- alta eficacia luminosa (por lo menos 90-100lm/W);
- pérdidas inferiores en el control de la distribución del flujo luminoso en comparación con las lámparas tradicionales (ya que emiten sólo un haz de 120°, mientras que las tradicionales emiten en los 360°);
- dimensiones extremadamente pequeñas y, en consecuencia, extrema flexibilidad de uso;
- buena reproducción del color (CRI \geq 80);
- amplia gama de temperatura de color;
- encendido de forma instantánea;
- totalmente regulables (*dimnable*) sin variación de color;
- luz de diversos colores sin necesidad de filtros adicionales;
- control dinámico del color.

De esta forma, sobre el futuro potencial, teniendo en cuenta las perspectivas tecnológicas de crecimiento de estos dispositivos de iluminación en los próximos años, y los resultados positivos previstos en un tiempo relativamente corto desde su entrada en el diseño de iluminación, en el corto-medio plazo su uso puede extenderse a las zonas más tradicionales de iluminación.¹⁴

Una última característica a considerar es respecto a la interferencia eléctrica producida por la conexión de estos nuevos dispositivos a la red de distribución doméstica, en comparación con la tecnología actualmente usada para el PLS. Un buen ejemplo de referencia es el estudio breve que realizaron Dolara y Leva,¹⁵ que consistió en un análisis comparativo en laboratorio sobre el desempeño en calidad de energía eléctrica y de distorsión armónica de los dispositivos de usuario final, es decir, de lámparas residenciales, tanto del tipo LFC como *led*.

Los resultados entre ambas tecnologías son muy distintos, tanto en dispositivos *led* tipo reflector como en las denominadas nuevas LFCs, que sería una última generación de esta vertiente de lámparas (ya que se compararon también LFC manufacturadas con tecnología más temprana): los *leds* introducen significativamente menos distorsión armónica que las LFC. Una comparación más general se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2
Comparativa de fuentes luminosas comerciales

Tipo de producto	Eficacia Luminosa	Flujo luminoso	Potencia Watts	ICT	CRI	Vida Útil
Led blanco frío	130 lm/W	130 lm	1.0 W	5650 K	70	50 KHrs
Led blanco cálido	93 lm/W	205 lm	2.2 W	3500 K	80	50 KHrs
Led blanco cálido (A19)	64 lm/W	800 lm	12.5 W	2700 K	80	25 KHrs
Led blanco cálido (PAR38)	52.5 lm/W	1050 lm	20 W	3000 K	80	25 KHrs
Panel OLED	28 lm/W	50 lm	2 W	2700-6500 K	80	8 KHrs
DAI*	120 lm/W 111 lm/W	37800 lm	315 W 341 W	3000 K	90	20 KHrs
Fluorescente lineal y balastra	118 lm/W 108 lm/W	3050 lm 6100 lm	26 W 56 W	4100 K	85	25 KHrs
DAI y Balastra (bajo wattaje)	104 lm/W 97 lm/W	7300 lm	70 W 75 W	3000 K	90	12 KHrs
LFC	63 lm/W	950 lm	15 W	2700 K	82	12 KHrs
Halógeno	20 lm/W	970 lm	48 W	2750 K	ND*	4 KHrs
Incandescente	15 lm/W	900 lm	60 W	3300 K	100	1 KHrs

(*DAI: Descarga Alta Intensidad; ND: No disponible)

El Programa de Luz Sustentable

En México el 26.3% de la electricidad generada se consume en las viviendas, que constituyen aproximadamente el 83% de las edificaciones del país. El 73.7% restante de la energía eléctrica se divide entre el uso industrial (58%, tanto en edificios como en procesos de producción), comercio (5.7%), agricultura (6.45) y servicios públicos (3.6%), según datos de la CFE.¹⁶ Como un gran porcentaje del consumo se destina al servicio doméstico, esto trae como consecuencia un notable crecimiento de la demanda de energía, pues es precisamente el nivel doméstico el

¹² R. Faranda, S. Guzzetti S. Leva, "La virtuosa applicazione dei Led Nel settore dell'illuminazione", en *L'Impianto Elettrico & Domotico*, Italy, 2010, pp. 44 - 49.

¹³ T. Liu, F. Yang, J. Yu y Y. Wang, "Designing of LED Illuminating System and Testing Notice", Proc. WASE International Conference on Information Engineering, 2009, pp. 277-280.

¹⁴ R. Faranda, S. Guzzetti y S. Leva, *op. cit.*

¹⁵ A. Dolara y S. Leva, "Power quality and harmonic analysis of end users devices", en *Energies*, 2012, pp. 5453-5466.

¹⁶ CFE, Indicadores de CFE y LFC, Subsecretaría de Electricidad, 2011. Consultado el 24 oct., 2011. Disponible en: http://www.sener.gob.mx/portal/indicadores_de_cfe_y_lfc.html

que mayor índice de crecimiento registra en los países en desarrollo, tanto debido al aumento de la población como a la mejora de los niveles de vida.

El uso más extendido de la energía eléctrica en las viviendas del país es en la iluminación, con porcentajes que van desde un 60% en los hogares con pocos electrodomésticos hasta un 7% en los hogares de mayores ingresos. El Programa de Luz Sustentable, puesto en práctica en todo el país por el Gobierno Federal desde el inicio de 2011, tiene como finalidad primera la gradual suspensión de la venta al público de lámparas incandescentes, y a la fecha ha contribuido al reemplazo de unos 40 millones de estos focos por lámparas ahorradoras fluorescentes compactas (LFC), pero su impacto quizá más perdurable es la creación de una conciencia en el consumidor acerca de lo conveniente que resulta adoptar las nuevas tecnologías que reducen los consumos energéticos y contribuyen al cuidado del ambiente. Este programa tiene, sin embargo, algunos riesgos y limitaciones superables: si Greenpeace Internacional hubiese estudiado antes el real impacto a gran escala que tiene el uso de las LFCs en los hogares y sus riesgos para la salud (aunque se presumen muy bajos), quizá hubiese dudado en presionar tanto a los representantes políticos por sustituir las lámparas incandescentes por las “ahorradoras”, puesto que estudios recientes indican que cuando los bulbos de vidrio de éstas se rompen y liberan el gas de mercurio contenido, la peor decisión que alguien puede tomar es limpiar de inmediato la zona donde se rompió la lámpara.¹⁷ Los dispositivos adquiridos comúnmente en los supermercados de México no contienen instrucciones suficientes relativas a su correcta disposición (desecho), a diferencia de las detalladas recomendaciones en las páginas electrónicas de los gobiernos de EUA y Canadá, donde expresan que

la prioridad es no limpiar el área donde ocurrió el rompimiento del bulbo de una LFC, sino que en su lugar debe abandonarse el recinto y ventilarse durante los primeros 15-20 minutos; posteriormente, la limpieza deberá hacerse con sumo cuidado mediante el uso de guantes, y depositar los vidrios, material electrónico de la(s) LFC(s) y los mismos guantes utilizados durante la limpieza *dentro de una botella de vidrio con tapa metálica*.¹⁸

¹⁷ D. Stahle S. Ladner y H. Jackson, “Maine Compact Fluorescent Lamp Study”, Department of Environmental Protection; Augusta, Maine, 2008.

¹⁸ Health Canada, *IT'S YOUR HEALTH: The Safety of Compact Fluorescent Lamps*, Minister of Health of Canada, 2011.

¹⁹ PLS, “Programa Luz Sustentable”, en *Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía 2009-2012 (PRONASE)*, diciembre, 2011. Disponible en: <http://www.luzsustentable.gob.mx/paginas/home.php>

Por el contrario, en varios productos de este tipo, incluido el paquete de 4 LFCs del PLS,¹⁹ se asegura que se puede desechar todo dentro de una bolsa plástica gruesa, lo cual deja expuesto el vidrio de los tubos (que contienen hasta 5mg de vapor de mercurio), con alto riesgo de romperse en su traslado. Por lo tanto, si el personal de los centros de acopio no está consciente y capacitado para la recepción y manejo de estas bolsas plásticas, se tendrá un serio problema ambiental y de salud.

Consideraciones económicas y costos

Los reportes de los laboratorios especializados indican que si se toma como referencia el consumo de un foco incandescente de 100 watts, y se compara con los llamados focos de halógeno ahorradores, disponibles en el mercado, que en apariencia son idénticos a los primeros, se logran con estos últimos ahorros hasta del 30% de la energía; los precios de éstos son del orden de cuatro veces mayores pero duran el doble, unas dos mil horas. En cambio, las lámparas fluorescentes compactas (LFC) reducen el consumo eléctrico hasta en un 75%, (es decir, consumen solamente entre un 23-25% de lo que un incandescente) para el mismo nivel de iluminación; cuestan entre diez y doce veces más pero duran entre 5 mil y 10 mil horas, es decir, de cinco a diez veces la vida de una lámpara incandescente, con lo cual ya se tiene una recuperación en plazos razonables de la inversión económica inicial.

Sin embargo, la tecnología más prometedora, que ya empieza a comercializarse, es la de los focos *Leds* que pueden ser muy compactos y resistentes a impactos. En la actualidad ya se dispone de leds para prácticamente cualquier color de luz, cálida o fría, y de potencias equivalentes a los varios centenares de watts de una lámpara incandescente. Sus consumos pueden ser tan bajos como un 10% de estos últimos, su duración puede superar las 50 mil horas y los precios están bajando rápidamente, aunque todavía en la actualidad pueden parecer altos si no se consideran sus demás ventajas. En el mercado mexicano es posible adquirir un foco *led* para sustituir a uno incandescente de 100 watts por unos \$260.00, y con una vida útil superior a las 10 mil horas. No cabe duda de que esta será la tecnología que se generalice en el hogar, en la industria, en el comercio y en el alumbrado público. Como se ha mencionado, el CRI (Índice de Rendimiento de Color, *Color Rendering Index*) es un indicador de la capacidad de una fuente luminosa de no alterar los colores de los objetos que ilumina. Un CRI de 100% corresponde a la luz del Sol; existen *leds* que tienen prácticamente este rendimiento, pues no cambian de manera sensible el color de los objetos iluminados.

El cálculo de costos en situaciones específicas varía de una situación a otra, pero en general se recomienda la sustitución de las fuentes de iluminación domésticas empezando por aquellas que más tiempo se utilicen. Así, en una primera fase no es conveniente sustituir los focos interiores de un refrigerador, puesto que se encienden durante tiempos muy cortos y son de baja potencia; algo similar podría decirse de los focos usados en un baño. En cambio, en otros casos el tiempo de uso puede acortar el tiempo de recuperación de la inversión.

Como ejemplo ilustrativo se presenta la siguiente tabla de comparación:

Tabla 3
Comparativa de costos de la energía consumida por 4 tipos de lámparas

TIPO DE FOCO	Incandescente	Halógeno	LFC	LED
Potencia, watts	100	70	25	11
Precio en pesos por unidad	4	22	60	260
Tiempo de vida en horas	1,000	2,000	5,000	10,000
Tiempo de uso promedio diario (tomado arbitrariamente)	3.5 hrs.	3.5 hrs.	3.5 hrs.	3.5 hrs.
Costo anual de la energía en pesos	257	190	78	28.3
Ahorro anual en pesos por energía consumida	Referencia	66.8	178.9	228.7

Como puede verse, en menos de catorce meses se recupera la inversión de un foco led, que durará además, en este ejemplo, 7.8 años. Después de 16 meses lo que sigue es ahorro neto. También, en este caso, puede verse que en los 7.8 años que dura el led se tendrían que usar 5 focos incandescentes que costarían, si los precios se

conservan, 20 pesos (5x4), asumiendo un costo de 4 pesos por foco; el costo de la energía necesaria sería de $257 \times 7.8 = 2004.60$ pesos; focos más energía costarían entonces 2,024.60 pesos. Un foco led de 260 pesos consumiría en estos mismos 7.8 años $7.8 \times 28.3 = 220.74$ pesos en energía, de modo que el costo total sería de $260 + 220.74 = 480.74$ pesos. El ahorro en pesos con esta última tecnología sería de $2024.60 - 480.74 = 1543.86$ pesos.

Conclusiones

En los últimos 30 años, acuciada por el encarecimiento de la energía, la contaminación ambiental y el agotamiento de muchos recursos naturales, la tecnología ha hecho notables avances en el desarrollo de fuentes luminosas de alta eficiencia energética, gran durabilidad (varias decenas de miles de horas) y precios que están siendo cada vez más accesibles para la gran población. En particular los leds constituyen en la actualidad la tecnología más prometedora y más compatible con el cuidado ambiental. El reciente anuncio de la empresa Cree²⁰ de que el precio de una lámpara led de 60 W equivalentes ha alcanzado niveles por debajo de los 10 dólares (casi la mitad que un año antes) hace pensar que esta tendencia permitirá en corto plazo que esta tecnología se difunda rápidamente. Esto hará al PLS²¹ obsoleto en pocos años, además de permitir eliminar los riesgos que lleva implícitos.

Pero no todas las soluciones tienen que esperarse de la tecnología. Es importante desarrollar hábitos adecuados como consumidores de energía y de otros recursos, teniendo en cuenta que mediante un uso eficiente, que debe entenderse como ahorro en lo económico y ambiental pero sin sacrificar calidad de vida, es parte de la solución en el mediano y largo plazos.

Bibliografía

- ◆ CFE, “Indicadores de CFE y LFC”, Subsecretaría de Electricidad Consultado el 24/oct/2011. Disponible en: http://www.sener.gob.mx/portal/indicadores_de_cfe_y_lfc.html
- ◆ Cree, Nota de prensa de la empresa Cree, marzo, 2013. Disponible en: <http://www.cree.com/news-and-events/cree-news/press-releases/2013/march/bulbs>
- ◆ Dolara, A. y S. Leva, “Power quality and harmonic analysis of end users devices”, en *Energies*; 2012, pp. 5453-5466.
- ◆ Edison Tech Center, *Edison Tech Center*, 2010a. Recuperado el 12 de febrero de 2012, de William D. Coolidge The Edison-Steinmetz Center: <http://edisontechcenter.org/coolidge.html>
- ◆ Edison Tech Center, *Edison Tech Center*, 2010b. Recuperado el 25 de marzo de 2012, de Incandescent Lamps: <http://www.edisontechcenter.org/incandescent.html>

²⁰ Cree, Nota de prensa de la empresa Cree, marzo, 2013. Disponible en: <http://www.cree.com/news-and-events/cree-news/press-releases/2013/march/bulbs>

²¹ PLS, “Programa Luz Sustentable”, en *Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía 2009-2012* (PRONASE), diciembre, 2011. Disponible en: <http://www.luzsustentable.gob.mx/paginas/home.php>

- ◆ Faranda, R., S. Guzzetti S. Leva, “La virtuosa applicazione dei Led Nel settore dell’illuminazione”, en *L’Impianto Elettrico & Domotico*, Italy, 2010, pp. 44 - 49.
- ◆ Ganem, E. y M. D. Aranda, *El explicador*, 08 marzo, 2011, México.
- ◆ Guzzetti, S. y S. Leva, “Design and Technology for Efficient Lighting”; in *Pahts to Sustainable Energy*, InTech Publishers, Croatia, 2010, pp. 597-620.
- ◆ Health Canada, *IT’S YOUR HEALTH: The Safety of Compact Fluorescent Lamps*, Minister of Health of Canada, 2011.
- ◆ Liu, T., F. Yang, J. Yu y Y. Wang, „Designing of LED Illuminating System and Testing Notice”, en *Proc. WASE International Conference on Information Engineering*, 2009, pp. 277-280.
- ◆ Ohno, Y. “Spectral design considerations for white LED”, en *Optical Engineering*, No. 44(11), 111302, 9, 2005.
- ◆ PLS, “Programa Luz Sustentable”, en *Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía 2009-2012* (PRONASE), diciembre 2011. Disponible en: <http://www.luzsustentable.gob.mx/paginas/home.php>
- ◆ Pousset, N. *Caracterisation du rendu des couleurs des nouvelles sources: les diodes électroluminescentes*, Conservatoire National des Arts et Métiers, Francia, 2009.
- ◆ Stahle, D., S. Ladner y H. Jackson, *Maine Compact Fluorescent Lamp Study*, Maine Department of Environmental Protection, Maine Augusta, 2008.
- ◆ Sussman, H. *Victorian Technology, Invention, Innovation, and the Rise of the Machine*, ABC CLIO, LLC, Santa Bárbara, California, Estados Unidos de Norteamérica, 2009.