

# Iluminando con LEDs

Manuel Fco. Ortuño Sánchez, Sergi Gallego Rico, Andrés Márquez Ruiz, Augusto Beléndez Vázquez e Inmaculada Pascual Villalobos

En este trabajo se analizan las posibilidades de la tecnología de iluminación LED, comparándola con otras tecnologías como la lámpara halógena o la fluorescente. Se tratan aspectos clave como el rendimiento luminoso, el ahorro energético y la duración de las lámparas. Al mismo tiempo se introducen apuntes históricos del desarrollo de las tecnologías de iluminación que permiten una visión global y una reflexión sobre el futuro.

## Introducción

Las investigaciones relacionadas con las tecnologías ópticas y la luz han pasado de los laboratorios y los centros de investigación a los medios de comunicación de carácter general gracias a acontecimientos como el otorgamiento del premio Nobel de física de 2014 a los japoneses Isamu Akasaki y Hiroshi Amano, y al estadounidense Shuji Nakamura por la invención del LED (light-emitting diode) “azul”, o a la declaración por la Organización de Naciones Unidas de 2015 como año internacional de la luz (Figura 1) [1].

El citado Premio Nobel apoya una invención que ha tenido un rápido desarrollo tecnológico y que empieza a estar cada vez más presente en la iluminación de hogares y espacios públicos, conviviendo con tecnologías tan antiguas como el filamento de wolframio, calentado gracias al inevitable efecto Joule, y que ha experimentado un nuevo resurgimiento en forma de pequeñas ampollas halógenas situadas en el interior de bombillas convencionales. En este sentido, actualmente vivimos un momento de cambio tecnológico, uno más de tantos pero no por ello menos trascendente. No siempre es posible vivir una situación en la que tecnologías antiguas (filamento) se reinventan (halógenas), tecnologías maduras mejoran y abaratan costes (fluorescente) y tecnologías incipientes (LED) intentan abrirse camino y ganar cuota de mercado lo antes posible. Por tanto, es el momento ideal para comparar las diferentes tecnologías, analizando sus puntos fuertes y débiles.

## Tecnología de iluminación LED y rendimiento luminoso

La tecnología de iluminación LED es una tecnología moderna que promete un importante ahorro de costes por su mayor eficiencia, larga duración, funcionamiento instantáneo sin necesidad de precalentamiento y la posibilidad de control electrónico del nivel de iluminación [2].

Un LED es un diodo que emite luz gracias al efecto denominado electroluminiscencia. Cuando la unión P-N se encuentra en polarización directa, los electrones pueden recombinarse con los huecos en el dispositivo, liberando energía en forma de radiación electromagnética. La frecuencia de la radiación emitida y, en consecuencia, el color de la luz dependen de la banda de energía del semiconductor. Junto a la superficie radiante se utilizan componentes ópticos integrados para formar el patrón de emisión de radiación (Figura 2).

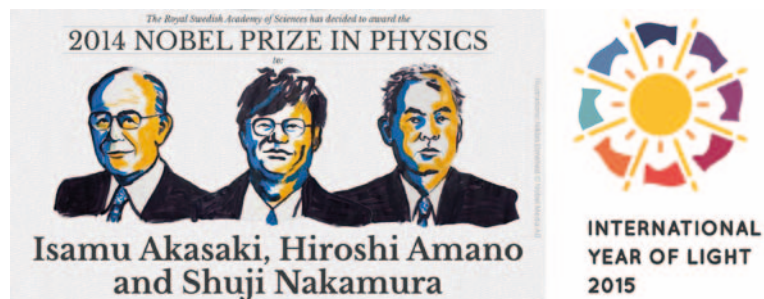


Fig. 1. Izquierda: ganadores del Nobel de física de 2014 (© Nobel Media 2014, autor: N. Elmehed, fuente: Nobel prize). Derecha: logotipo del año internacional de la luz 2015.

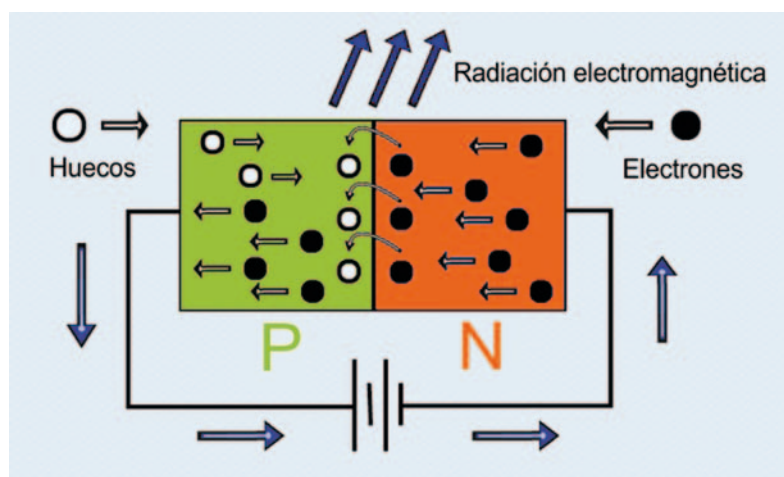
Vamos a repasar las principales características que se asocian a las lámparas LED especialmente su eficiencia y duración, comparándolas con otras tecnologías. Teniendo en cuenta la definición de lumen y que una fuente de luz blanca es, por definición, no monocromática, el máximo rendimiento luminoso teórico se sitúa en 250 lm/W [3].

La llamada “ley de Haitz”, el equivalente a la ley de Moore en los microprocesadores, prevé para los LED una disminución exponencial en el coste por lumen y un aumento en el rendimiento luminoso que alcanzaría los 200 lm/W en 2020 si se destinan los recursos necesarios para investigación [4]. Por tanto, en 2015 la tecnología de iluminación LED ya ha superado los 100 lm/W, un valor, que siendo elevado, es similar al obtenido por otras tecnologías (Tabla 1).

De hecho, hay lámparas de sodio o de halogenuros metálicos que superan los 100 lm/W aunque con un bajo índice de reproducción cromática, que no las hace adecuadas para la mayoría de aplicaciones. Las que consiguen una reproduc-

Tabla 1. Tipos de lámpara y rendimiento luminoso

Tipo de lámpara	Rendimiento luminoso (lm/W)
Filamento incandescente	12-18
Halógena	30
Fluorescente compacta	50-80
Tubo fluorescente	60-100
LED	100
Halogenuros metálicos	65-120
Sodio alta presión	80-150
Sodio baja presión	100-200



**Fig. 2.** Izquierda: recombinación de electrones y huecos en la unión P-N de un LED en polarización directa. Derecha: LED de alta potencia de la empresa Sunshine Opto-electronics (China) y lente para formar el patrón de emisión.

ción cromática alta, próxima al LED blanco, como el tubo fluorescente o la lámpara fluorescente compacta, no tienen un rendimiento luminoso tan alto aunque se aproxima bastante.

A fecha de hoy no todas las lámparas LED alcanzan los 100 lm/W, de hecho la mayoría tienen un rendimiento luminoso muy inferior y sólo los modelos más avanzados de los principales fabricantes se aproximan a ese valor. Un ejemplo es la lámpara Sylvania ToLEDo+ T8, con una forma externa que se asemeja a la de un tubo fluorescente alcanza un rendimiento luminoso de 96 lm/W.

Pero una lámpara eficiente no garantiza un nivel de iluminación adecuado, porque la lámpara se acopla a una luminaria y el diseño de ésta es un factor decisivo que a menudo pasa desapercibido. Se define el rendimiento de una luminaria como la relación entre el flujo luminoso total procedente de la luminaria y el flujo luminoso emitido por las lámparas instaladas. Por tanto, una lámpara de gran rendimiento luminosa instalada en una luminaria con poco rendimiento puede conseguir un nivel de iluminación inferior a una lámpara de menor rendimiento luminosa instalada en una luminaria de gran rendimiento. Esta situación se suele dar cuando se sustituyen directamente lámparas fluorescentes o halógenas por lámparas LED sin cambiar las luminarias. En estos casos puede ocurrir, y generalmente ocurre, que el nivel de iluminación es inferior al que se tenía con la antigua lámpara.

Los conocidos plafones “downlight” con lámparas fluorescentes compactas fueron una evolución de reflectores parabólicos equipados con bombillas halógenas destinados a conseguir un ahorro energético. Se mantuvo el diseño de la luminaria y se cambió el tipo de lámpara. Como la lámpara fluorescente tiene un tamaño mucho mayor que la lámpara halógena no quedó más remedio que ponerla en horizontal, con lo que ya no estaba en el foco de la parábola. Además la relación entre el volumen del paraboloide y el volumen de la lámpara también disminuyó. Como consecuencia, el nivel de iluminación que logra esta luminaria es muy inferior al que puede obtenerse con este tipo de lámpara si el diseño de la luminaria se adapta a sus características.

### Coste por lumen

La Tabla 2 compara la moderna lámpara Sylvania ToLEDo+ T8 con su homóloga fluorescente Sylvania T8 F58W/835 G13 LuxLine Plus White Deluxe. A los datos que proporciona el fabricante se ha añadido el precio de la lámpara y se ha calculado el rendimiento luminoso y la relación coste/rendimiento.

Se observa que la lámpara LED tiene una relación coste/rendimiento 100 veces mayor a su homóloga fluorescente, con un flujo luminoso inferior y un índice de reproducción cromática similar. Es decir, para conseguir el mismo nivel de iluminación que produce la lámpara fluorescente necesitaremos un mayor número de lámparas LED y una inversión 100 veces superior. La vida media útil de la lámpara LED, más del doble que la fluorescente, no compensa su elevado coste. La única situación práctica de iluminación en la que la lámpara LED resulta con una clara ventaja es cuando se necesite encender y apagar la lámpara repetidamente, ya que la lámpara fluorescente vería acortada su vida útil drásticamente. Por tanto, será necesario que el coste de las nuevas lámparas LED disminuya y que se mantenga o mejore su rendimiento luminoso y su duración para que puedan desbancar al tubo de fluorescente o a la fluorescente compacta en la mayoría de aplicaciones de iluminación. En este sentido, la investigación se encamina hacia la optimización de los diodos orgánicos, denominados OLED, que sustituyen los costosos materiales inorgánicos que forman los semiconductores P y N por moléculas orgánicas que tienen un coste muy inferior. Entre sus ventajas cabe citar que son más delgados y flexibles, tienen menor consumo y son más económicos tanto en los componentes como en la tecnología necesaria para su fabricación. Entre los retos que se deben afrontar están el aumento de la vida útil para aproximarla a la de los LED, lograr que las tecnologías de fabricación puedan producir a gran escala con bajo coste y resolver el tema del reciclado para evitar problemas de contaminación medioambiental por parte de los componentes orgánicos [5].

**Tabla 2.** Comparación entre la lámpara LED Sylvania ToLEDo+ T8 y su homóloga fluorescente Sylvania T8 F58W/835 G13 LuxLine Plus White Deluxe.

Características	ToLEDo+ T8	T8 F58W/835 G13 LuxLine Plus White Deluxe
Potencia (W)	23	58
Temperatura de color (K)	4000	3500
Índice de reproducción cromática	80-89	80-89
Vida media útil (h)	40000	15000
Flujo luminoso (lm)	2200	5200
Etiqueta eficiencia energética	A+	A
Precio (euros)	50	3.5
Rendimiento luminoso (lm/W)	96	90
Relación coste/rendimiento (euros W lm <sup>-1</sup> )	0.52	0.039

## Duración de las lámparas

En cuanto a la duración de las lámparas cabe indicar que no es que un principio físico sea más duradero que otro, algo que en ocasiones se olvida, sino que son los fabricantes, en definitiva los que desarrollan la tecnología, los que influyen en gran medida en la duración de los productos. Actualmente se compara la larga vida útil de los LED con la corta vida de la bombilla de filamento incandescente o de la halógena. La mayoría de bombillas de filamento incandescente no superaba las 2 000 h de funcionamiento. Esto se suele presentar como una debilidad de la tecnología, si bien se sospechó que los fabricantes añadieron esa condición a un producto que en su origen tenía una duración muy superior. El extraoficial “cartel Phoebus” fue un supuesto pacto entre los principales fabricantes de bombillas entre 1924 y 1939 para controlar la fabricación y venta de bombillas, lo que incluía limitar su duración a 1 000 h [6].

En 1880 Thomas Alva Edison patentaba la que fue la primera bombilla de filamento incandescente que se podía comercializar, al tener un filamento de carbono y vacío en su interior que le daba 40 h de vida útil (Figura 3).

Algunos hechos experimentales demuestran que es posible fabricar bombillas de filamento incandescente de gran duración. Varias patentes de Estados Unidos reclaman la invención de bombillas con una duración de 200 000 h. En el parque de bomberos de Livermore (California) se encuentra una bombilla de filamento incandescente que lleva encendida desde el año 1901, lo que supone cerca de un millón de horas [7].

La bombilla de filamento incandescente tiene unas características propias que la distinguen de otros tipos de lámpara. Dado que emite un espectro continuo con una temperatura de color de 2 500 K no ofrece muy buena reproducción de los colores, si bien transmite una sensación de calidez que puede ser más adecuada en determinadas situaciones de iluminación. Su eficacia para iluminar es muy baja, convirtiendo en luz visible en torno al 15 % de la energía consumida. El resto se transforma en radiación ultravioleta e infrarroja. Hay que tener en cuenta que esta característica puede ser una ventaja en determinadas situaciones, por ejemplo si se quiere iluminar y dar calor al mismo tiempo. También se puede utilizar su emisión simultánea en el visible y el ultravioleta para iniciar reacciones de polimerización. En estos casos su eficacia en cuanto a las aplicaciones a las que se destina sería, paradójicamente, muy alta. A este respecto conviene recordar que este tipo de bombilla tiene un rendimiento muy alto en cuanto a la transformación de energía eléctrica en radiación electromagnética. Aunque desde septiembre de 2012 han dejado de fabricarse, los nostálgicos de la bombilla pueden estar tranquilos, pues el concepto se mantiene con la reciente adaptación de una lámpara halógena en

el interior de una bombilla “incandescente” (Figura 4).

La lámpara halógena es una lámpara de filamento incandescente que contiene una pequeña cantidad de un halógeno (yodo o bromo). El filamento y los gases se encuentran en equilibrio químico, mejorando el rendimiento del filamento y aumentando su vida útil. El vidrio se sustituye por un compuesto de cuarzo, que soporta mucho mejor el calor. Esto permite lámparas de tamaño mucho menor para potencias altas. La lámpara halógena tiene un rendimiento luminoso un poco mayor que la bombilla de filamento incandescente (Tabla 1). El halógeno consigue que el wolframio desprendido del filamento se vuelva a depositar sobre él, formando un ciclo. De esta forma, puede funcionar a una temperatura superior a una lámpara de filamento incandescente tradicional, por tanto su temperatura de color también es mayor y permite una mejor reproducción de los colores al dar la sensación de una iluminación menos amarillenta.

En 1894, el inventor estadounidense Daniel Moore, colaborador de Nikola Tesla, fabricó una lámpara comercial que competía con las bombillas de filamento incandescente inventadas por su antiguo jefe Edison. Estas lámparas contenían nitrógeno y dióxido de carbono y tuvieron un éxito moderado debido a que las labores de mantenimiento y reparación eran complejas.

A principios del siglo xx se mejoró esta tecnología añadiendo un polvo fluorescente que absorbe la radiación ultravioleta emitida por el gas en estado de plasma, produciendo una luz blanca uniforme. Actualmente las lámparas fluorescentes usan la misma tecnología, si bien en los últimos años se ha sustituido el cebador y el balasto por un balasto electrónico que permite encender la lámpara de forma instantánea, aumentando su duración y eliminando el parpadeo debido a la frecuencia de la corriente alterna, que puede resultar molesto para algunas personas. Es interesante destacar cómo esta evolución ha salido al mercado justo en el momento en que la tecnología de iluminación LED inicia su despliegue.

Esta tecnología modificada en los nuevos tubos fluorescentes es muy similar a la de la lámpara fluorescente compacta. Su principal inconveniente es que los ciclos de encendido y apagado afectan a la duración de su vida útil, reduciendo el ahorro energético. En los últimos años se ha creado cierta polémica al detectarse numerosas

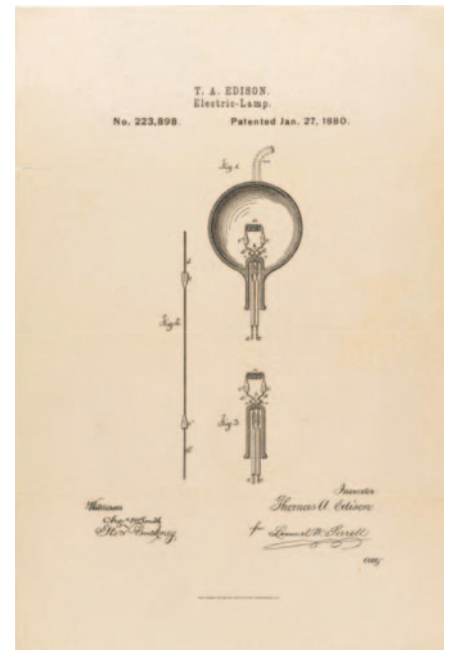


Fig. 3. Dibujo de la bombilla de Edison en una de sus patentes.





Fig. 4. Bombilla halógena Philips "camuflada" como bombilla "incandescente" tradicional.

quejas de consumidores que apuntaban a que este tipo de lámparas tenían una duración muy corta incluso en condiciones óptimas de utilización, sin ciclos de encendido y apagado repetidos. En 2006, El Instituto Nacional de Tecnología Industrial de Argentina realizó un estudio sobre 600 lámparas fluorescentes de distintas marcas con una vida útil anunciada por el fabricante de 3 000-8 000 h. Se encontró que en algunas marcas había un porcentaje importante de lámparas que tenía una vida útil inferior a las 100 h. Esto no hace más que apoyar la idea expresada anteriormente de que los fabricantes pueden actuar sobre la duración de la lámpara de forma más significativa que las limitaciones

del principio físico que soporta su tecnología y que las autoridades competentes deberán estar alerta durante la implantación de la nueva tecnología de iluminación LED.

### Referencias

- [1] [www.light2015.org/Home.html](http://www.light2015.org/Home.html)
- [2] [www.eldiario.es/turing/led-inventores-premio-nobel-fisica\\_0\\_313569623.html](http://www.eldiario.es/turing/led-inventores-premio-nobel-fisica_0_313569623.html)

- [3] <http://physics.ucsd.edu/~tmurphy/papers/lumens-per-watt.pdf>
- [4] [www.nature.com/nphoton/journal/v1/n1/full/nphoton.2006.78.html](http://www.nature.com/nphoton/journal/v1/n1/full/nphoton.2006.78.html)
- [5] H. SASABE y J. KIDO, "Multifunctional Materials in High-Performance OLEDs: Challenges for Solid-State Lighting", *Chem. Mater.* 23, 621-630 (2011).
- [6] M. KRAJEWSKI, "The Great Lightbulb Conspiracy" *IEEE Spectrum*, 24/09/2014.
- [7] [www.centennialbulb.org](http://www.centennialbulb.org)



**Manuel Fco. Ortuño Sánchez, Sergi Gallego Rico, Andrés Márquez Ruiz, Augusto Beléndez Vázquez**  
 Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal, Universidad de Alicante  
**Inmaculada Pascual Villalobos**  
 Departamento de Óptica, Farmacología y Anatomía, Universidad de Alicante





**the vacuum projects**

Fabricación de cámaras, componentes y sistemas de vacío a medida de sus necesidades.  
 Suministro de componentes standard de vacío.  
 Soldadura Electro Beam Welding y Brazing.  
 Ingeniería y asistencia técnica.

The Vacuum Projects, S.L.U.      Tel. +34 96 134 48 31  
 Parque Empresarial Táctica      Fax +34 96 134 48 30  
 C/ Velluters, 17  
 E-46988 PATERNA (Valencia)  
 España      [comercial@vacuum-projects.net](mailto:comercial@vacuum-projects.net)  
                                  [www.vacuum-projects.net](http://www.vacuum-projects.net)