

Sistemas de Iluminación, situación actual y perspectivas

Lighting systems, current situation and perspectives

Enrique Saavedra ^{1*}, Francisco Rey ², Jaime Luyo³

¹ Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima-Perú

² Dpto. de Ing. Energética y Fluidomecánica - Escuela de Ing. Industriales, Universidad de Valladolid, Valladolid - España

³ Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima-Perú

Recibido : 22/11/2016 Aceptado: 30/01/2017

RESUMEN

El incremento de los precios de la energía eléctrica, las preocupaciones sobre el cambio climático, la independencia y seguridad energética impulsan el cambio del mercado mundial de la iluminación hacia fuentes de luz energéticamente más eficientes. La iluminación, según estimaciones de la International Energy Agency (IEA), representa casi el 20% del consumo mundial de energía eléctrica. En el Perú, según el Ministerio de Energía y Minas, aproximadamente el 35% de la energía primaria (después de la transformación y/o descontadas las pérdidas) es destinada a la generación eléctrica, la cual presenta consumos importantes en iluminación: Sector Residencial 15% a 30%, sector Comercial aprox. 33%, sector Público aprox. 24% y sector industrial 10% a 15%. Dados estos niveles importantes de consumo en sistemas de iluminación, el uso transversal en todos los sectores, la falta de un marco político regulatorio integral, así como la necesidad de determinar y establecer alternativas de eficiencia energética, es necesario el conocimiento de la situación actual y las perspectivas de los sistemas de iluminación. Para lograr el ahorro de energía en iluminación, la IEA recomienda a los gobiernos: Eliminación progresiva de productos de iluminación ineficientes; adoptar iluminación de calidad, fiabilidad y Estándares Mínimos de Eficiencia Energética (MEPS); apoyar el desarrollo, uso y actualización de las normas internacionales de pruebas y los protocolos de medición para reducir los costos de cumplimiento de la industria y apoyar los requerimientos de política nacional; exigir y promover un mejor diseño y gestión de sistemas de iluminación al asegurar que los códigos de construcción promuevan el uso de la luz natural e incluyan MEPS para sistemas de iluminación, incluya información y formación dirigidas a arquitectos, constructores, propietarios y gestores. Actualmente el mercado está dominado por las tecnologías de iluminación convencionales, las cuales están siendo desplazadas por la tecnología de Iluminación de Estado Sólido (SSL). A nivel mundial, la SSL que comprende LED, OLED y la gestión de los sistemas de iluminación, marcan la tendencia con grandes probabilidades de lograr los objetivos de ahorro y eficiencia energética. La SSL ofrece controlabilidad mejorada, nuevos factores de forma (que facilitan el reemplazo de tecnologías convencionales) y nuevas funcionalidades (base de la industria de la iluminación inteligente) que se pueden integrar con sistemas de sensores y de control, lo que permite mayor ahorro de energía. No obstante, la existencia de tecnologías de mayor eficiencia y características lumínicas, existen barreras para su adopción, principalmente: falta de información y sensibilización, falta de confianza, mayor costo inicial, incentivos inadecuados, temores percibidos relacionados a la salud y el ambiente. Así mismo, hay una serie de barreras para la adopción de productos SSL, estos comprenden principalmente costos iniciales, confiabilidad, estabilidad de color y compatibilidad; que pueden limitar la adopción.

Palabras clave: Sistema de iluminación, Eficiencia energética, Gestión energética, Lámpara, LED.

ABSTRACT

Rising electricity prices, concerns about climate change, independence and energy security drive the shift from the global lighting market to more energy-efficient light sources. Lighting, according to estimates by the International Energy Agency (IEA), accounts for almost 20% of the world's electricity consumption. In Peru, according to the Ministry of Energy and Mines, approximately 35% of primary energy (after processing and / or discounting losses) is destined to electricity generation, which presents important consumption in lighting: Residential Sector 15% to 30%, Commercial sector approx. 33%, Public sector approx. 24% and industrial sector 10% to 15%. Given these important levels of consumption in lighting systems, transverse use in all sectors, the lack of a comprehensive regulatory policy framework, as well as the need to determine and establish energy efficiency alternatives, it is necessary to know the current situation and The prospects of lighting systems. To achieve energy savings in lighting, the IEA recommends to governments: Progressive elimination of inefficient lighting products; Adopt quality lighting, reliability and minimum Energy Efficiency Standards (MEPS); Support the development, use and updating of international testing standards and measurement protocols to reduce compliance costs and support national policy requirements; Demand and promote better design and management of lighting systems by ensuring that building codes promote the use of natural light

La Revista Científica TECNIA protege los derechos de autor bajo la Licencia 4.0 de Creative Commons: Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

* Correspondencia:

E-mail: bsaavedra@uni.edu.pe

and include MEPS for lighting systems, including information and training for architects, builders, owners and managers. Currently the market is dominated by conventional lighting technologies, which are being displaced by Solid State Lighting (SSL) technology. Worldwide, SSL comprising LED, OLED and the management of lighting systems, mark the trend with great probability to achieve the goals of energy saving and efficiency. The SSL offers improved controllability, new form factors (which facilitate the replacement of conventional technologies) and new functionalities (base of the intelligent lighting industry) that can be integrated with sensor and control systems, allowing greater savings of Energy. However, the existence of more efficient technologies and light characteristics, there are barriers to its adoption, mainly: lack of information and sensitivity, lack of confidence, greater initial cost, inadequate incentives, perceived fears related to health and the environment. Also, there are a number of barriers to adoption of SSL products, these mainly include initial costs, reliability, color stability and compatibility; Which may limit adoption.

Keywords: Lighting system, Energy efficiency, Energy management, Lamp, LED

1. INTRODUCCIÓN

La CEPAL^{1*} y el IEA proponen 20 recomendaciones (4 de iluminación) sobre eficiencia energética, barreras del mercado, necesidades políticas para la integración y aumento de adopción de medidas de eficiencia energética; para ser consideradas en las políticas de eficiencia energética de los países de América Latina y el Caribe. Sobre iluminación recomiendan a los gobiernos [1]:

Implementar Estándares Obligatorios Mínimos de Eficiencia Energética (MEPS) y etiquetas de energía para la iluminación: actualización de normas y categorías de etiquetas, inclusión en la contratación pública y recursos de vigilancia y control. Eliminación gradual de productos menos eficientes: a través de impuestos, subsidios y regulaciones. Participar en la coordinación regional y la armonización de normas y procedimientos de prueba: para reducir los costos de cumplimiento y pruebas. Promover políticas de transformación del mercado: pueden ser complementarias y permitir cambios de comportamiento dando lugar a importantes ahorros de energía en un corto período de tiempo.

En el Perú, el Plan Energético Nacional 2014-2025 impulsa la política de eficiencia energética dirigida a la disminución de la dependencia externa, el aumento de la competitividad del sector energía, menores impactos ambientales y mejora en el acceso a la energía. El efecto de esta política en materia de reducción del gasto y/o costos operativos de los consumidores a todo nivel,

residencial, industrial, público y transporte, es significativo y contribuye de esta manera a aumentar su ingreso disponible y competitividad. La reducción del gasto y/o costos operativos se logra disminuyendo el consumo final de electricidad y diésel mediante el uso de tecnologías más eficientes tales como luminarias LED, termas solares, cocinas mejoradas a leña, cogeneración y la sustitución de calderos y motores eléctricos por otros de mayor eficiencia. En materia de consumo, en los próximos 10 años, el Perú contará con los Reglamentos de Etiquetado de Eficiencia Energética para iluminación, artefactos electrodomésticos, calentadores de agua, motores eléctricos, calderos y el establecimiento de estándares mínimos de eficiencia energética para los mismos. Con relación al cambio climático, deben intensificarse medidas de mitigación para reducir las emisiones e incorporar eficiencia en el uso de la energía en general y de la electricidad en particular en el sector residencial, industrial, público y transporte. [2]

2. SECTORES Y SUBMERCADOS DE ILUMINACIÓN

Para el análisis de la situación actual y perspectivas de los sistemas de iluminación, se considera el modelo presentado por el US-DOE (United State - Department of Energy), que se muestra en la Figura 1. El modelo examina ocho sub-mercados, en cuatro sectores, en los que un total de 15 categorías de tecnologías pueden competir.

^{1*} De la Mesa Redonda de Expertos (octubre de 2014 - Lima, Perú), en cooperación con la Comisión Económica de las Naciones Unidas para América Latina y el Caribe (UN-CEPAL) y el Ministerio de Energía y Minas del Perú.



Figura 1. Ámbito del Mercado de iluminación.

Los sectores residencial, comercial e industrial corresponden al alumbrado interior de las edificaciones, por lo que en muchas aplicaciones utilizan las mismas tecnologías de iluminación. Los sectores comercial e industrial tienen mayores semejanzas en tecnología de iluminación y tendencias de uso, se caracterizan por largas horas de funcionamiento (aprox. 10 horas al día) y salida de lúmenes más altos, normalmente tecnologías con alta eficacia y larga vida útil a pesar de los mayores costos iniciales. Estos sectores están dominados actualmente por la tecnología fluorescente lineal (alta eficiencia y larga vida útil) y HID (Descarga de Alta Intensidad), que se utilizan principalmente en los submercados de artefactos lineales y low/high bay (para locales de baja/alta altura), representando el mayor consumo de energía en iluminación de estos sectores. Los LED son proyectados para ofrecer mejoras sobre las tecnologías fluorescentes lineales y HID en el corto plazo y mejoras de rendimiento y precio en el largo

plazo, para reducir el consumo de energía en los sectores comercial e industrial. [3].

El sector iluminación exterior comprende los submercados de iluminación de vías, carreteras, estacionamientos y exteriores de edificios. Proporcionan la iluminación adecuada para el tráfico peatonal y automotor, creando una sensación de seguridad personal y llamar la atención a los negocios y espacios. Las lámparas fluorescentes lineales y HID son las tecnologías de iluminación predominantes utilizadas en exteriores.

En la Tabla 1 se presenta la comparación de los resultados de siete estudios que concluyen que la iluminación LED tendrá un gran crecimiento en lo que resta de esta década y comprenderán aproximadamente el 50% de todas las ventas de iluminación el 2020. Estos estudios varían en la metodología, las regiones cubiertas (mercado de Estados Unidos, mercado mundial) y las unidades (ventas por unidades, ventas en valor). [3]

TABLA 1. Comparación de pronósticos de participación de mercado de LED.

	Metric	Region	2020
McKinsey, 2012	%units	World	57%
IHS Research, 2011	%value	World	50%
DOE, 2014	%lumen-hours	United States	48%
McKinsey, 2011	%units	World	46%
Samsung Electronics, 2014	%units	World	42%
DOE, 2012	%lumen-hours	United States	36%
DOE, 2010	%lumen-hours	United States	21%

3. TECNOLOGÍA DE ILUMINACIÓN

Para la iluminación de áreas y superficies de trabajo es necesario que interactúen los componentes de los Sistemas de Iluminación y los respectivos Controles de

los Sistemas de Iluminación, que se muestran en la Figura 2.

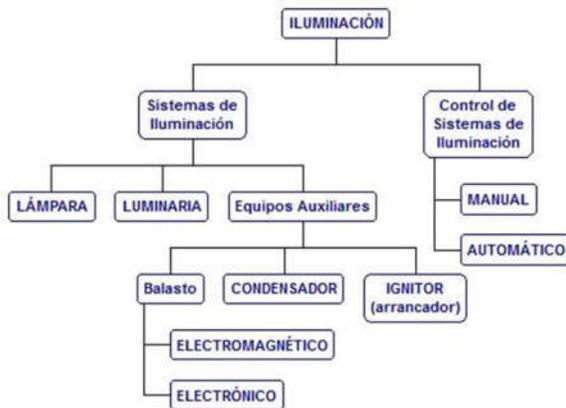


Figura 2. Componentes de la tecnología de iluminación.

3.1. Sistemas de iluminación

Las fuentes mostradas en la Figura 3, que interactúan para dar luz artificial, tienen las siguientes características [4]:

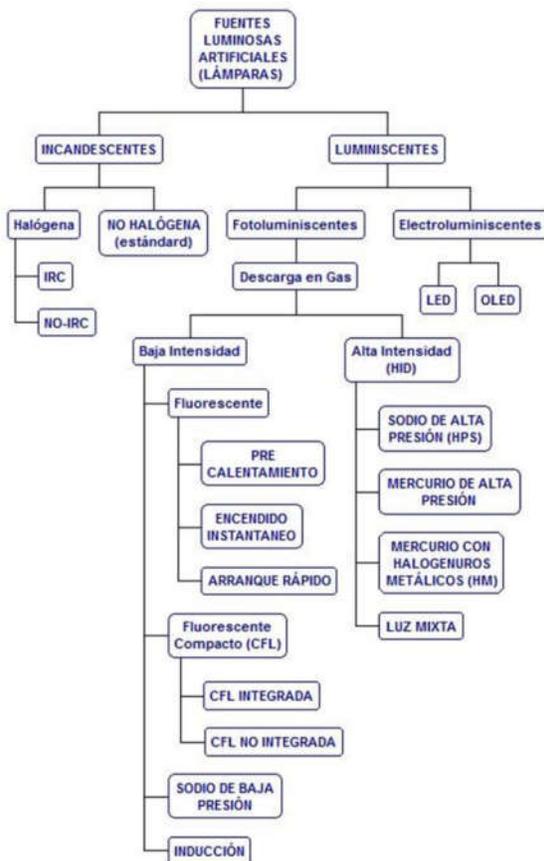


Figura 3. Clasificación de las fuentes luminosas artificiales.

3.1.1. Tecnologías de Fuentes Luminosas Artificiales.

Incandescentes no-Halógenas: también conocidas como lámparas de Servicios de Iluminación General

(GLS), de filamento de tungsteno, es la tecnología de iluminación tradicional que todavía domina el mercado en la mayoría de los países. El 2010, alrededor del 52% de las ventas de lámparas en la UE eran lámparas GLS [5]. Estas lámparas son muy ineficientes si se compara con las tecnologías de iluminación modernas, casi todos los países de la OCDE y muchos países fuera de la OCDE están eliminando lámparas incandescentes GLS en favor de las lámparas más eficientes. [6], [7], [5]

Incandescentes Halógenas: están comercialmente disponibles en dos variantes: lámparas con Recubrimiento Infrarrojo (IRC) y lámparas no-IRC. Las lámparas IRC utilizan un filamento diseñado con mayor precisión en una cápsula de cuarzo llena de gas halógeno, que se recubre con materiales espectralmente selectivos. El recubrimiento permite a la luz visible salir de la lámpara, pero refleja la luz infrarroja de nuevo en el filamento. Es una lámpara de mayor eficacia de luminancia porque se necesita menos energía eléctrica para mantener el filamento a una temperatura de funcionamiento dado. Las halógenas IRC son una nueva tecnología que está menos disponible en el mercado en comparación con la halógena no-IRC. Sin embargo, ellas pueden llegar a ser más importantes en un futuro próximo debido a que la inversión en I + D y la competencia están impulsando mejoras de eficacia y reducción de costes. En los países con programas avanzados de eliminación progresiva (Corea, Australia y el Reino Unido), el cambio de GLS por lámparas halógenas ha sido mayor de lo previsto. [8].

Tubos fluorescentes lineales: están disponibles en tres diámetros: T12 (12/8" =38 mm), T8 (8/8" =26 mm) y T5 (5/8=16 mm) [9]. Los tubos T12 son considerados obsoletos [8]. Así mismo se fabrican en los tipos: Pre Calentamiento, Arranque Instantáneo (Slimline) y Arranque Rápido [10].

Lámparas Fluorescentes Compactas (CFL): funcionan de manera similar a los tubos fluorescentes lineales. Se componen de 2, 4 ó 6 seis pequeños tubos fluorescentes, ya sean integradas o no integradas. Las CFL integradas tienen una base común adjunta al balasto, mientras que las CFL-no integradas se conectan a una luminaria que incluye el balasto. Las políticas de eliminación progresiva de las lámparas incandescentes GLS, implementadas en muchos países, se han traducido en una creciente participación de mercado de las CFL. [8], [6].

Lámparas de Sodio de Baja Presión: es la de más alta eficacia 200 lm/W, pero muy pobre IRC (Índice de Rendimiento Cromático), requiere de balasto para su operación y un tiempo de calentamiento para que alcance la máxima luminosidad. Son usadas donde el

color no es importante porque tiene tonalidades amarillas o grises, siendo apropiadas para iluminación de cierto tipo de vías e iluminación de seguridad [6].

Lámparas de Inducción: operan mediante el suministro de una potencia de alta frecuencia a una bobina de inducción, que genera un campo electromagnético dentro de la lámpara. Este campo excita el material de plasma dentro de la cápsula de vidrio, causando que los átomos de mercurio emitan luz ultravioleta. Cuando la luz ultravioleta atraviesa el revestimiento de fósforo se convierte en luz visible de la misma manera que en las lámparas fluorescentes. Tiene alta eficacia, buen IRC y 100 000 horas de vida útil debido a que no tiene electrodos (motivo de falla de los otros tipos de lámparas), así como un arranque y re arranque instantáneos [6].

Lámparas de Descarga de Alta Intensidad (HID): se utilizan principalmente para la iluminación de vías, pero en ocasiones también se utilizan en otros entornos no domésticos. Están disponibles en el mercado en tres variantes principales:

- *Lámparas de Vapor de Mercurio de Alta Presión:* son de las más antiguas y usadas alrededor del mundo, en general, son de menor costo y todavía tienen presencia en el mercado a pesar de sus características de rendimiento y los costos de ciclo de vida notablemente menores que los ofrecidos por las lámparas de halogenuros metálicos y sodio de alta presión.
- *Lámparas de Vapor de Sodio de Alta Presión (HPS):* tienen la más alta eficacia de todas las lámparas HID, de 70 a 140 lm/W, pero producen una luz dorada de apariencia cálida, con bajo IRC. Tienden a ser utilizados donde las consideraciones cromáticas son menos importantes que la economía. En general, las lámparas de sodio de alta presión tienen IRC de 21% a 83%, la Temperatura de Color de 1900 a 2500 K y vida útil de 5000 a 28000 h. [6]
- *Lámparas de Halogenuros Metálicos (MH):* producen una luz más blanca, más natural, están estrechamente relacionadas con lámparas de vapor de mercurio, pero incluyen otros elementos metálicos que se dosifican como un haluro de metal, como yoduro de sodio y yoduro de escandio, en combinación con el mercurio. Tienen vida útil de 6000 a 20000 h, IRC de 65% a 92%, la Temperatura de Color de 3000 a 6500 K y eficacia inicial de 47 a 105 lm/W. [6].
- *Luz Mixta:* Con el fin de corregir el color azulado de la luz producida en las lámparas de vapor de mercurio de alta presión, se mezcla adicionando un filamento incandescente al interior del bulbo.

Siendo la mayor ventaja la mejora del IRC y que se puede conectar directamente a la red. [10].

En algunos países de la OCDE, se espera que las ventas de lámparas de descarga disminuyan. La política se ha trasladado a promover el uso de las lámparas eficientes ‘blancas’ en muchos programas de iluminación nueva y de reemplazo. Estas luces son sustituidas cada vez más por LED y lámparas fluorescentes, que son más eficientes en energía y tienen una vida útil más larga [8].

Diodo Emisor de Luz (LED): La tecnología LED está teniendo un gran impacto en la industria de la iluminación. La gran mejora de la eficacia de los LED en un período corto de tiempo en comparación con otras fuentes de luz se puede ver en la Figura 4. En la próxima década, se prevé que los LED reemplazarán más del 60% de todas las otras fuentes de iluminación [11]. Tenemos un nuevo tipo de diodo emisor, el HB-LED (Diodo Emisor de Luz de Alto Brillo), en comparación con las fuentes de luz existentes muestra una mejor percepción visual, ahorro de espacio y gran energía. Actualmente se pueden conseguir HB-LED con eficacias de 92 lm/W, 119 lm/W, 169 lm/W. Dentro de las ventajas que ofrecen los LED están baja radiación de calor, no generan luz ultravioleta, no poseen partes móviles como filamentos que puedan deteriorarse por vibraciones y un tiempo de vida útil alrededor de 50 000 horas continuas, además los HB-LED pueden generar luz blanca neutral, fría y cálida, que mejora la percepción visual de los espacios. El tiempo de encendido es prácticamente instantáneo y al utilizar luz blanca neutral o fría se necesitan menos lúmenes para generar la misma sensación de iluminación que si se utiliza luz de color cálida (amarilla). Por otro lado, el ángulo de emisión de luz es menor a 180 grados, toda la luz generada está enfocada hacia la parte frontal del LED. [12].

Diodo Emisor de Luz Orgánico (OLED): son tecnologías más recientes de iluminación de alta eficiencia. La penetración de mercado actual de LED y OLED es relativamente baja, pero se espera convertirse en líderes en tecnologías para la iluminación interior en el futuro. Esto es debido al alto costo y la falta de conocimiento del consumidor sobre los beneficios [5]. Los OLED han estado disponibles en el mercado desde 2009, pero se utilizan principalmente en aplicaciones de visualización, como teléfonos móviles, televisores y computadoras. Actualmente sigue el rendimiento similar a los LED, a largo plazo se espera que los OLED logren una alta eficacia y uso generalizado en la producción de luz blanca [13], sin embargo, en este momento no hay comercialmente disponibles productos OLED de iluminación general, por otra parte, no es seguro que estarán disponibles en más de 100

lm/W. La investigación de OLED se centra en la fiabilidad, la cantidad y calidad de la producción de luz y el tiempo de vida de operación. [9].

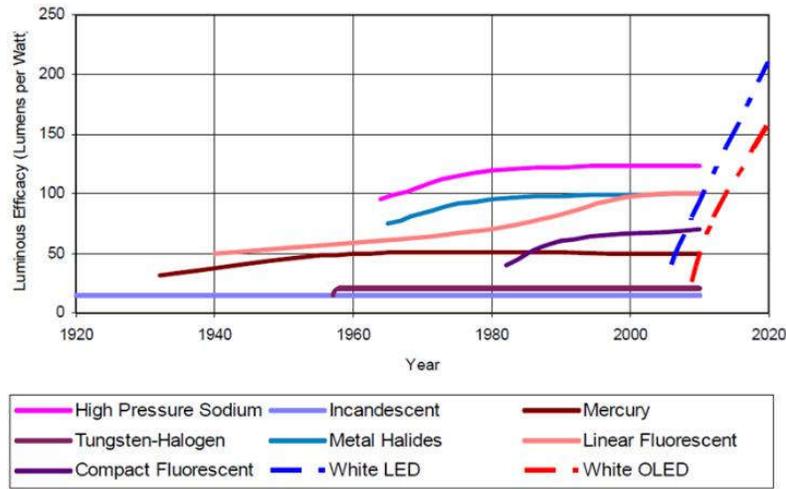


Figura 4. Desarrollo de Eficacia Luminosa de principales tipos de lámparas.

3.1.2. Luminarias

La función principal de la luminaria es distribuir, difundir y dirigir la luz emitida por las lámparas sobre una superficie deseada [6]. La eficiencia de una luminaria se mide por la relación de la salida de luz de la luminaria respecto a la salida de luz de las lámparas y se expresa como un porcentaje (LOR – Light Output Ratio). Valores de LOR superiores al 50% por lo general se clasifican como eficiente, pero la eficiencia también depende de la distribución de la iluminación necesaria. [8].

3.1.3. Equipos auxiliares

- **Balasto:** Son necesarios en todas las lámparas de descarga (tubos fluorescentes, CFL, lámparas LPS y HID), para permitir el encendido y funcionamiento, y puede influir en la eficacia de la propia lámpara [6]. Hay dos categorías de balastos: electromagnéticos y electrónicos. En Europa, los balastos se clasifican de acuerdo con el sistema de Índice de Eficiencia Energética (IEE), que incluye 7 clases: A1, A2, A3, B1, B2, C y D. Los balastos electrónicos son calificados como balastos 'A', con A1 el más eficiente. Balastos electromagnéticos se clasifican como 'B', con 'B1' el más eficiente [14], [15]. Balastos clasificados como C y D están descontinuados. Un balasto puede utilizar desde un bajo porcentaje hasta el 40% de la electricidad total del sistema de iluminación. La mayoría de los países de la OCDE tienen los requisitos para el uso de electricidad del balasto, pero las diferencias en el rendimiento son todavía muy significativas [6].
- **Ignitor (arrancador):** se utiliza en varios tipos de lámparas fluorescentes. Cuando se aplica tensión a la lámpara fluorescente, el arrancador (que es un

interruptor temporizado) permite que la corriente fluya a través de los filamentos en los extremos del tubo. La corriente hace que los contactos del arrancador se calienten y abran, interrumpiendo así el flujo de corriente, la lámpara es entonces encendida, el balasto sirve como un limitador de corriente. Las lámparas fluorescentes de precalentamiento utilizan una combinación de filamento/cátodo en cada extremo de la lámpara en conjunción con un interruptor mecánico o automático que conecta inicialmente los filamentos en serie con el balasto y de ese modo precalentar los filamentos antes de formar el arco. [4]

- **Condensadores:** El balasto da lugar a una potencia reactiva, cobrada por las empresas proveedoras de energía, por lo que es de interés de los usuarios disminuir al máximo este consumo. Esto se logra al utilizar el condensador como corrector del factor de potencia. [10]

3.2. Control del sistema de iluminación

Regula la iluminación en respuesta a las necesidades de los usuarios. Puede ser Manual o Automático:

3.2.1. Control Manual

El control se da por conmutación manual, propenso a grandes desperdicios de energía debido a la falta de oportunidad de la operación de encendido y apagado de la iluminación, así como su atenuación. Puede ser [12]:

- **Interruptor de encendido/apagado (general, localizado),** por acción manual directa, en tiempo real.

- *Temporizador de desconexión*, desconecta y vuelve a conectar el sistema de iluminación, previa programación manual del temporizador.
- *Regulador (dimmer)*, adapta los niveles de potencia y la salida de luz gradualmente a lo largo de un intervalo especificado. Puede generar importantes ahorros de energía. [9].

3.2.2. Control automático

Controlan la iluminación con soporte en la tecnología. Los sistemas cambian automáticamente por cambios en la ocupación y/o luz natural. La conmutación también puede ser aceptable cuando los ocupantes son transitorios o para la realización de tareas no críticas. Los sistemas de conmutación son a menudo apropiados para atrios, pasillos, entradas, almacenes y centros de tránsito, sobre todo cuando hay abundante luz natural. Usado en poca proporción y que representa ahorro considerable de energía [12]. El sistema de control automático tiene los componentes: Control, Sensor y Actuador.

- *Control*, sistema organizado de dispositivos electrónicos utilizados en edificaciones para controlar el funcionamiento de una o varias fuentes de luz a la vez. La mayoría de los controladores de iluminación puede controlar reguladores, que, a su vez, controlan la intensidad de las luces. Varían en tamaño y complejidad en función de los tipos de edificios (de pequeños edificios a grandes). [4]
- *Sensor*, mide o detecta una condición del mundo real, como el movimiento o nivel de luz y convierte la condición en una representación análoga o digital. Las especificaciones del sensor incluyen factores de rendimiento (rango, precisión, repetibilidad, sensibilidad, deriva, linealidad y la respuesta de tiempo) y consideraciones prácticas y económicas (costos, mantenimiento, compatibilidad con otros componentes y normas, el medio ambiente y la sensibilidad al ruido). Podrían ser:
 - Sensor de iluminancia, detecta y mide el nivel de iluminancia de un ambiente interior o exterior.
 - Sensor de día/noche, permite la comparación de iluminación al aire libre con un umbral predefinido para desencadenar acciones en la iluminación exterior (alumbrado público) o el cierre de persianas. Desarrollados principalmente para el alumbrado público y son generalmente muy robustos.
 - Sensor de presencia, detectan la presencia de ocupantes mediante la detección de sus movimientos. Los sensores más comunes utilizados en el sector de la construcción son Sensores Infrarrojos Pasivos (PIR) que reaccionan a las variaciones de las radiaciones infrarrojas debido a la circulación de personas.

- Sensor Infrarrojo Pasivo (PIR), suelen estar equipados con lentes de Fresnel que definen la zona de detección. Se distinguen dos tipos: sensor de movimiento y sensor de ocupación, difieren en el número de áreas exploradas
- Sensor PIR Multifunción, puede integrar hasta 4 funciones: Detección de ocupación. sensor de iluminación interior (nivel de iluminancia para el interruptor de encendido de las lámparas), sensor de infrarrojos y temporizador (encender las lámparas después de un cierto retardo).

Los sensores PIR tienen algunos inconvenientes, algunas actividades humanas se realizan con poco o ningún movimiento y pueden ser consideradas irrelevantes.

- *Sensor Infrarrojo Activo*, un diodo infrarrojo envía constantemente o episódicamente rayos infrarrojos en la zona controlada. Un receptor monitoriza los niveles de ondas reflejadas. La no aparición de un rayo reflejado o una modificación de sus propiedades (longitud de onda o amplitud) indica que se produjo un cambio en la zona de detección.
- *Sensor de Presencia Ultrasónico (UP)*, envía ondas sonoras inaudibles. Al mismo tiempo, un dispositivo de exploración espera las ondas de sonido que se reflejan en una tasa específica. Si se detecta un cambio en la onda reflejada, indica que algo o alguien se ha movido en la zona de detección.
- *Sensores Pasivos de Tecnología Dual*, hay productos que combinan las dos tecnologías, por ejemplo, el PIR y las detecciones de presencia de ultrasonidos. Ellos ven y oyen al ocupante de modo que se detecte la presencia, incluso si no hay movimiento.
- *Sensor de posición*, para obtener una indicación relevante del nivel de iluminación en el plano de trabajo, el sensor de iluminación debe estar instalado en el plano de trabajo. Por razones prácticas, los sensores no se colocan en el plano de trabajo. Del mismo modo, para tener una evaluación apropiada del nivel de confort térmico, el nivel de temperatura y la humedad deben ser medidos en el centro de la habitación. Esto no es posible en la práctica en un espacio ocupado. Es muy importante para los sensores de movimiento tener una buena vista del espacio para que correctamente puedan detectar el movimiento en el área [4].
- *Actuador*, procede de acuerdo a lo que el controlador decide en función de las señales recibidas del sensor, se utiliza para la automatización en todo tipo de procesos técnicos. Dependiendo del tipo de suministro, pueden ser clasificados como actuadores neumáticos, hidráulicos o eléctricos. [4]

3.3. Características luminotécnicas de las lámparas

La visión depende de la luz, la mayor parte de la información que recibimos la obtenemos a través de la vista, por lo que el rol de los diseñadores de iluminación es proveer un entorno en el cual las personas, por el sentido de la vista, puedan desempeñarse efectiva, eficiente y confortablemente [10], [9]. Para lograr este objetivo se debe evaluar las características y el rendimiento de las lámparas mediante las siguientes características principales:

- *Flujo luminoso*: La cantidad de luz visible emitida por una lámpara o luminaria se mide en lúmenes (lm). Cuanto mayor es el número de lúmenes, más luz emite.
- *Apariencia de Color*: Descrito por la temperatura de color y se mide en Kelvin (K), indica la calidez o frialdad de la luz emitida por una fuente de luz. Las fuentes de luz con una temperatura baja (2700 - 3000 K) emiten luz que es cálida en apariencia; fuentes con valores más altos de temperatura (4000 - 6500 K) proporcionan luz con una apariencia de color más frío. Una lámpara

incandescente GLS tendrá una temperatura de color cálido de 2700 K a 3000 K, en comparación con una temperatura de color frío de 4000 a 6000 K de un tubo fluorescente de luz blanca fría.

- *Rendimiento de color*: Descrito por el índice de rendimiento de color (IRC o Ra), mide qué tan bien una lámpara muestra colores con precisión. Las lámparas de mejor rendimiento como las incandescentes tienen valores entre 80 y 100.
- *Eficacia de luminancia*: Medido como lúmenes por watt (lm/W), que describe la eficiencia energética con la que una lámpara convierte la electricidad en luz. Cuanto mayor sea el valor, más eficiente es la lámpara. (Figura 4).
- *Vida útil de la lámpara*: Es el tiempo estimado en horas después del cual es preferible sustituir las lámparas de una instalación para evitar una disminución excesiva de los niveles de iluminación.

Las características y los requisitos apropiados de la lámpara, así como la elección de la tecnología dependen principalmente de la aplicación (iluminación residencial, comercial, industrial, exterior). [8], [16]

TABLA 2. Eficacia y precio de lámparas LED y convencionales.

Product Type	Luminous Efficacy (lm/W)	CCT (K)	L ₇₀ (hours)	Price (\$/klm)
LED A19 Lamp (Dimmable, Warm-White) ¹	78	2700	25,000	\$11
LED PAR38 Lamp (Warm-White) ¹	67	3000	28,000	\$23
LED T8 Tube (Neutral-White) ¹	108	4100	45,000	\$16
LED 6" Downlight (Warm-White) ¹	60	3500	36,000	\$30
LED Troffer 2' x 4' (Warm-White) ¹	93	3500	56,000	\$31
LED High/Low-Bay Fixture (Warm-White) ¹	90	4000	75,000	\$38
LED Street Light ¹	93	5000	55,000	\$50
OLED Luminaire ²	46	3000	40,000	\$870
HID (High Watt) System ³	115	3100	15,000	
Linear Fluorescent System ³	108	4100	25,000	\$4
HID (Low Watt) System ³	104	3000	15,000	
CFL A19 Replacement	70	2700	12,000	\$2
CFL (Dimmable) A19 Replacement	70	2700	12,000	\$10
Halogen A19	20	2750	8,400	\$2.5
Incandescent A19	15	2760	1,000	\$0.6

Notes:

1. Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) conducted a consumer survey finding that more than 80% of respondents purchased a lamp at or below the 25th percentile price, and more than 90% purchased at or below the median price. From the survey, LBNL concluded that the mean and median are volatile metrics that represent the tail of the purchase distribution and that the 25th percentile of their web-scraped data best represents the characteristic price for LED lamps [4]. Based on this assessment, the 25th percentile was used to characterize the typical purchase price for LEDs, and the average efficacy, CCT, and lifetime were found for products matching this price point.
2. Based on Acuity Brands Luminaires' *Chalina 5-Panel Brushed Nickel OLED Pendant* available from Home Depot April 2015 [5].
3. Includes ballast losses.

3.4. Características de sistemas de iluminación led

Las lámparas y luminarias LED y OLED, denominadas tecnología SSL presentan una penetración incremental en el corto plazo y mayor participación de mercado en el largo plazo, marcando la tendencia en regiones y mercados del mundo por su mayor eficacia, disminución de precios, gran potencial de ahorro de energía en iluminación y aplicaciones de valor añadido. En la Tabla 2 se presenta la comparación de las características de las diversas tecnologías de lámparas convencionales con las lámparas LED. Además del ahorro de energía, ofrece un gran potencial para mejorar el rendimiento, el valor añadido de la iluminación y crear nuevos paradigmas. [17]

3.4.1. Fuente Eficiente

Las luminarias LED ya son más eficientes que las lámparas incandescentes, lámparas halógenas, lámparas fluorescentes compactas (CFL) y la mayoría de las luminarias fluorescentes lineales, mientras que los productos iniciales de luminarias OLED tienen una eficacia al nivel de las lámparas fluorescentes compactas. La Tabla 2 muestra que ya son tan eficientes, o más eficiente, que la mayoría de las otras tecnologías disponibles a finales de 2014, pero tienen un mayor precio inicial de compra. Hay amplio margen de mejora en términos de rendimiento y precio de los productos SSL basados en LED. Ofrecerán mejoras mayores a 100 lm/W, más que las mejores eficacias posibles para las tecnologías convencionales. La tecnología OLED está todavía en su inicio, pero ofrece potencialidad para una alta eficacia y bajo costo, podría alcanzar los 190 lm/W, un bajo brillo y fuente de luz de bajo deslumbramiento [17].

3.4.2. Utilización de Luz

La eficacia de la lámpara y luminaria son indicadores incompletos de la eficiencia energética. La eficiencia de una luminaria también está influenciada por la utilización de la luz, que representa lo bien que la luz generada llega a la aplicación de destino y proporciona una iluminación adecuada. Dos indicadores son útiles para comparar la utilización de la luz entre los productos para una aplicación específica; la eficacia de la aplicación y eficiencia de utilización. La eficacia de aplicación indica el consumo de potencia necesario para alcanzar los criterios de iluminancia especificados en el área objetivo [18]. La eficiencia de utilización se define como la relación entre el flujo neto de luz que alcanza la superficie de trabajo respecto al flujo luminoso total desarrollada por las lámparas en el sistema. Para cualquier uso de la iluminación, el uso de menos luz para alcanzar los niveles de iluminación requeridos representa una mejora en la utilización de la luz. Si una luminaria dirige un mayor porcentaje de luz a la zona de destino, esta puede proporcionar la iluminancia

requerida con menos energía. Esto es especialmente importante dado que las características de SSL permiten nuevos factores de forma que puedan dar lugar a una mejor utilización de la luz y por lo tanto aún más ahorro de energía. La fuente LED de pequeño tamaño puede permitir un mejor control óptico y la direccionalidad, por el contrario la fuente de tamaño grande OLED en conjunto con baja luminosidad y bajo resplandor puede permitir su uso muy cerca de la zona de trabajo. Maximizar la utilización de la luz de ambas fuentes LED y OLED probablemente requerirán un avance más allá de los factores de forma heredados como la bombilla y la luminaria empotrada, hacia otros que maximicen la eficiencia de utilización, de aplicación, así como la eficiencia óptica, eléctrica y térmica. Nuevos factores de forma, los enfoques de integración edificio-diseño de iluminación permitirán nuevas mejoras en la utilización de la luz. Otro aspecto de utilización de la luz es el uso de los controles que minimicen el consumo de energía de la fuente de luz sin afectar la aplicación de iluminación. Fuentes LED y OLED son inherentemente controlables (regulable y encendido/apagado instantáneo) que los hace compatibles con toda la gama de controles de iluminación. [17]

3.4.3. Costo de Propiedad

El alto costo inicial de productos de iluminación LED ha sido la barrera principal para muchas personas que consideran la compra de productos de reemplazo. Los precios de los productos LED varían debido al nivel de confiabilidad, calidad del color, eficacia, consistencia, materiales, estética, y salida de luz en las lámparas y luminarias. La mayor eficiencia operativa y más larga vida útil de operación (reducción de costes de mantenimiento y de sustitución) determinan que la iluminación LED es altamente competitiva considerando un criterio de Costo Total de Propiedad (TCO). Un análisis TCO incluye todos los gastos incurridos durante la vida útil del sistema. El periodo de recuperación es el tiempo que toma el consumidor para recuperar el TCO (un producto más eficiente de energía tiene como resultado menores costos de operación). Como se muestra en la Figura 5, la recuperación de la inversión del uso de un LED puede ser tan rápido como un año, dependiendo de las condiciones específicas de operación.

Los valores de la Tabla 2 y Figura 5 muestran el costo incremental de incandescentes, halógenos y lámparas CFL regulables en comparación con el típico LED regulable reemplazado durante su vida útil de 25 años, asumiendo que la lámpara opera 1000 horas al año (aproximadamente 3 horas por día) [19]. Además, dado que las lámparas incandescentes, halógenas y CFL tienen vidas más cortas que las lámparas LED, que

tendrían que ser reemplazadas varias veces durante la vida útil de 25 años de una lámpara LED.

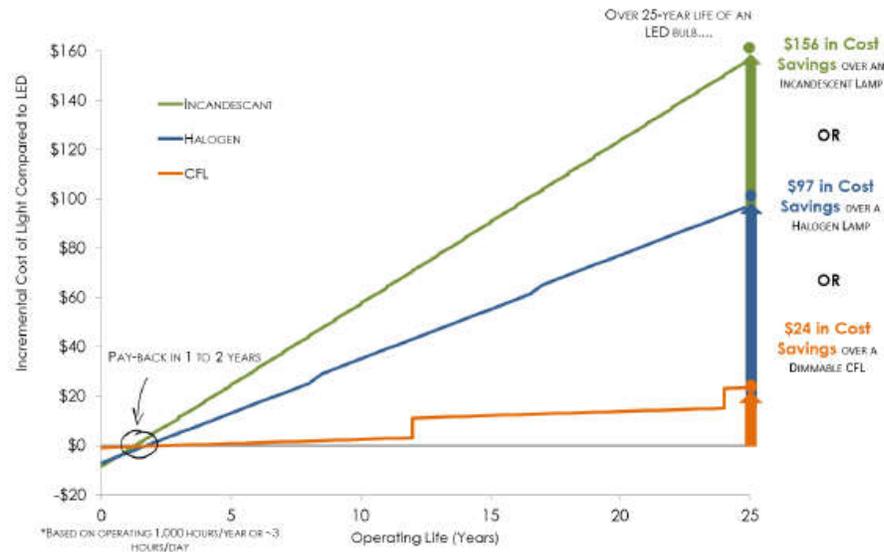


Figura 5. Comparación de costos de LED y otras tecnologías.

El costo de estos reemplazos es un factor en el costo incremental, y se representa en la Figura 5 como los escalones en el gráfico. Debido a que las lámparas fluorescentes compactas regulables tienen casi el mismo costo inicial como las lámparas LED regulables y también son menos eficientes, la recuperación de la inversión se produce en poco más de 2 años. Además, los LED ofrecen beneficios adicionales sobre las lámparas fluorescentes compactas al considerar la calidad del color, compatibilidad de regulación, impacto ambiental, distribución de la luz, y la funcionalidad añadida [17].

3.4.4. Rendimiento y Diseño de Iluminación mejorados

La mayoría de las tecnologías de iluminación LED, para el uso en el plazo más cercano, han sido diseñadas con formas similares a las convencionales para ser introducidas como lámparas de repuesto modernizadas, que promueve la rápida aceptación de los clientes mediante la oferta de productos familiarizados y proporcionando uso similar a los productos existentes. Hay aproximadamente 40 millones de conexiones para lámparas en el mundo, por lo que estos factores de forma representan una enorme oportunidad de mercado y de ahorro de energía. Sin embargo, los factores de forma de la lámpara típicos complican la integración de paquetes de LED en un producto de iluminación. Con la mayoría no hay un camino térmico natural para conducir el calor lejos de los paquetes LED. Muchas lámparas requieren distribución de luz más allá de la emisión semiesférica 180° que es natural para la tecnología LED. La

integración de fuentes de alimentación en lámparas individuales puede ser costosa e ineficiente. Las luminarias modernizadas suelen tener un mayor volumen y permiten una mayor flexibilidad de integración más optimizada y rentable de productos de iluminación LED. La conexión eléctrica de las luces también se puede mejorar mediante el uso de redes de corriente continua (DC) en el edificio, eliminando el requisito de conversión de corriente alterna a corriente continua en cada lámpara o luminaria LED.

Las lámparas OLED no son capaces de replicar fácilmente la mayoría de las formas de las lámparas y luminarias convencionales, que es a la vez una desventaja y una ventaja. Esto crea una barrera para la adopción a corto plazo de la tecnología OLED, también acelera el desarrollo de sistemas totalmente optimizados de iluminación y aplicaciones que están en consonancia con las características únicas de esta tecnología (área grande, bajo brillo, factor de forma delgada y superficies no planas).

3.4.5. Nueva funcionalidad en iluminación

La iluminación inteligente, iluminación conectada y la iluminación adaptativa describen las recientes innovaciones en la industria de la iluminación impulsada por la aparición de SSL. Es fundamentalmente regulable, encendido /apagado instantáneos y puede ser diseñado para ser sintonizable espectralmente, ofreciendo nuevos niveles de control. Se está moviendo rápidamente hacia un futuro en el que todos los sistemas de edificaciones, incluida la iluminación, sistemas de climatización (calefacción, aire acondicionado, ventilación) y seguridad, serán conectados en red a través de componentes de internet

habilitado. La integración de sensores compactos y de bajo costo, tecnología de red inalámbrica, teléfonos inteligentes y análisis sofisticados está dando lugar a nuevas posibilidades en el área de sistemas de gestión de la energía de edificaciones y posiblemente podría conducir a completamente nuevos modelos de negocio tales como ofrecer la iluminación como un servicio. Un sistema de gestión de energía del edificio en red puede proporcionar acceso simplificado a toda la información de los sistemas de energía pertinentes y producir informes en tiempo real del consumo de energía. Esta información permitiría a los administradores de edificios controlar el consumo de energía en todos los dispositivos que componen el sistema, proporcionando la capacidad de responder a patrones específicos de consumo de energía (desconectar dispositivos que consumen energía, pero no se están utilizando o apagar las luces en espacios no ocupados). Sin embargo, la implementación de un sistema totalmente interconectado puede traer sus propios desafíos, tales como la integración y la gestión de sistemas dispares con protocolos de comunicación diferentes (tanto de código abierto y de propietario) sin comprometer la fiabilidad y la seguridad [17].

3.4.6. Controles de Iluminación

Los controles de iluminación ahorran energía reduciendo o apagando la luz automáticamente cuando no se necesita. Los sistemas de control pueden estar basados en la detección de ocupación, aprovechamiento de la luz del día o pueden ser diseñados para responder a los controles personales. Tales sistemas son particularmente bien adaptados a la iluminación SSL y han sido presentados para proporcionar ahorros de energía adicionales de 20% a 60% dependiendo de la aplicación y el caso de uso [20]. Como los controles se han vuelto cada vez más importantes, una serie de fabricantes de lámparas y luminarias, ya sea por cuenta propia o en asociación, han empezado a integrar dispositivos de control dentro de sus productos, incluyen detección de ocupación y aprovechamiento de la luz del día, además la temperatura de color de campo ajustable. Las luminarias están equipadas con sensores de ocupación y de luz ambiental, interruptores reguladores y están interconectados con una malla inalámbrica [17].

3.4.7. Comunicaciones e Interoperabilidad

Comunicaciones: La mayor parte de las principales empresas de iluminación han implementado una arquitectura de sistema de control usando interconexiones inalámbricas o con cables para conectar los sensores, interruptores, reguladores y artefactos de iluminación a un controlador centralizado. A pesar que no existe una arquitectura común aceptada, hay muchos protocolos de comunicación

existentes utilizados en los sistemas de control de iluminación. Las tecnologías como Wi-Fi, Bluetooth y ZigBee se encuentran ahora en muchos dispositivos, mejorando su facilidad de uso y capacidades. Los controles de iluminación pueden llegar a ser más fáciles de usar y crear oportunidades para ofrecer funcionalidades nuevas de valor añadido, además de reducir el consumo de energía. Un usuario puede definir una nueva funcionalidad con un sistema de control existente a través de una aplicación de software ('app') que se puede descargar en un teléfono inteligente. Esta facilidad de integración ha llevado a organizaciones promover protocolos inalámbricos abiertos incluyendo ZigBee (IEEE 802.15.4), Z-Wave, Bluetooth y Wi-Fi. [17].

Interoperabilidad: La integración de sistemas dispares y lograr que se comuniquen es el mayor obstáculo impidiendo la gestión de energía del edificio y el aprovechamiento de su verdadero potencial. Un sistema de control en red comprende las capas físicas y de enlace de datos (donde se crea los datos), seguido de las capas de transporte y de red (donde se encamina datos), y finalmente las capas de aplicaciones (donde los datos se manipulan y son entendidos). Los estándares abiertos con una mejor definición pueden ayudar a garantizar la interoperabilidad, la tecnología a prueba de futuro y ofrecer la integración más simple. Estas normas pueden conducir a la independencia del proveedor, lo que minimiza el riesgo para el cliente y beneficia a todos los actores en el ecosistema. Los retos se incrementarán con el tiempo a medida que más sistemas se interconectan en apoyo de iniciativas como el Edificio net-Zero (cerca de cero energías), ciudad inteligente, red inteligente y transporte inteligente. [21]

Seguridad: A medida que más dispositivos se están convirtiendo en parte de un mundo conectado, los beneficios vienen con riesgos de seguridad. Un sistema de iluminación conectado a internet puede proporcionar un punto de entrada no autorizado a los ordenadores personales, terminales de pago de un minorista o a una base de datos sensibles de oficinas gubernamentales. Es imperativo que los fabricantes integren la seguridad en su producto y el desarrollo de software desde el primer momento del ciclo de vida, incluyendo la falta de encriptación y autenticación, el uso de protocolos de texto sin cifrar para transmitir información confidencial, como contraseñas y el uso de contraseñas por defecto en entornos de los clientes. Proteger los datos del usuario, la privacidad, garantizar la disponibilidad y la protección de los dispositivos conectados a la red contra el acceso no autorizado será fundamental para las empresas que quieren ganar y mantener la confianza de los compradores de iluminación inteligente. [17]

3.4.8. Comunicación de Luz Visible (VLC)

Es una tecnología donde la información puede ser incluida con la luz para proporcionar servicios como la ubicación interior o la comunicación a través de la conexión de dispositivos inalámbricos. VLC transmite datos por conmutación o modulación, los LED encendidos y apagados más rápido que lo que pueda percibir el ojo. Los beneficios de los compradores a través de la recepción de la información o promociones de productos dirigidas y los beneficios del minorista con el conocimiento del flujo de clientes y el interés en el producto. [17]

4. TENDENCIAS EN REGIONES Y MERCADOS

El aumento de los precios de la energía eléctrica, las preocupaciones sobre el cambio climático, y el deseo de independencia energética están causando que el mercado mundial de la iluminación cambie hacia fuentes de luz de bajo consumo. El Programa Ambiental de las Naciones Unidas (PNUMA), a través de la iniciativa 'en.lighten', estimó que el 2010 el uso de la energía en iluminación se había elevado a 2815 Teravatios-hora (TWh), que corresponde al 15% del consumo de electricidad total mundial. Así mismo, que, en ausencia de nuevas medidas, el consumo aumentaría a 3575 TWh el 2030, por lo que está instando a los gobiernos a establecer estándares mínimos para asegurar la eficiencia energética y la calidad de ahorro de energía de los productos de iluminación y eliminar tecnologías obsoletas del mercado. Ellos sugieren que la aplicación de los programas acelerados de iluminación sugeridas por el 'Programa de Energía Sostenible para Todos' (SE4ALL) de la Secretaría General de la ONU podría reducir la demanda a 2366 TWh. En la mayoría de las regiones del mundo, incluso con soporte de la política del gobierno, menos del 10% de las instalaciones de alumbrado existentes utilizan productos SSL, lo que demuestra que más I+D es esencial para acelerar su adopción. [22].

Según el informe World Energy Outlook 2012, de la IEA, proyecta que la demanda mundial de energía aumentará en más de un tercio en el período previo al 2035. Las emisiones de CO₂ relacionadas con la energía aumentarán de 31 Gt en 2011 a 37 Gt en 2035. Esta tendencia apunta a un aumento de la temperatura media mundial a largo plazo de 3,6°C, muy por encima del objetivo de 2°C del Acuerdo de Copenhague (United Nations Climate Change Conference) del 2009.

El aumento de las emisiones de CO₂ y las actuales crisis de energía y económica ponen de relieve la importancia de acelerar la acción sobre eficiencia energética. El consumo creciente de electricidad en la mayoría de las economías en desarrollo y emergentes está superando a la oferta. Medidas de eficiencia energética, específicamente en iluminación, son las

formas más rápidas y rentables para abordar estos temas, simultáneamente postergando o eliminando la necesidad de construcción de nuevas plantas de energía. Por lo que se requiere tecnologías de iluminación eficientes, reducir considerablemente los pagos por consumo de electricidad, mejorar la confiabilidad de la red y del sistema, reducir las importaciones de combustibles y de energía, aumentar la competitividad de las economías, mejorar el bienestar del usuario final y mitigar las emisiones de CO₂. [22].

El PNUMA estima que la sustitución de toda la iluminación ineficiente en todo el mundo, hoy en día se traduciría en 1044 TWh de ahorro de electricidad al año, lo que equivale a más de \$ 120 mil millones en facturas de electricidad evitadas y más de 530 millones de toneladas de emisiones de CO₂ evitadas al año. Según dos estimaciones conservadoras del PNUMA, si todas las fuentes de luz nocturnas fueran cambiadas a lámparas LED, el consumo mundial de electricidad para la iluminación se reducirían en más de un 52% y evitaría producir 735 millones de toneladas de emisiones de CO₂. Con la orientación de expertos internacionales de iluminación en los gobiernos, el sector privado y la sociedad civil, la iniciativa 'en.lighten' PNUMA-FMAM promueve la adopción de un enfoque integrado de políticas para apoyar a los países para que puedan realizar una transición de mercado sostenible y permanente a la iluminación eficiente. Una política integrada de iluminación incluye una mezcla de: Estándares mínimos de eficiencia energética (EMEE), apoyo a las políticas y mecanismos para promover la aceptación pública y la demanda de productos de ahorro de energía, gestión ambientalmente racional para establecer límites máximos de contenido de mercurio y establecer enfoques de responsabilidad ampliada del productor y la recolección, eliminación racional y/o programas de reciclaje de lámparas gastadas, Monitoreo, Verificación y Control (MVC) para desalentar la distribución de los productos no conformes y obsoletos y garantizar la igualdad de condiciones. [22].

Muchos países ya han adoptado políticas de iluminación eficiente, pero muchos de estos desarrollos no adoptan medidas de política sistemática para acelerar las tecnologías de iluminación avanzada, a pesar de que existen alternativas eficientes y asequibles, esto puede ser atribuido a una serie de retos que se pueden clasificar en una de cuatro categorías siguientes:

- *Gobernanza y liderazgo*: voluntad política limitada o débil de los gobiernos para desarrollar políticas, normas, especificaciones técnicas, así como las políticas generales de iluminación que aceleren la transición a la iluminación eficiente;

- *Capacidades técnicas:* acceso limitado a la información, los conocimientos técnicos para ponerlos en normas técnicas, apoyo a las políticas u otros aspectos técnicos relacionados a garantizar el control de calidad y el rendimiento;
- *Financiero:* acceso y uso limitado de los enfoques que reducen el costo inicial de iluminación eficiente y limitada a las medidas complementarias, como el seguimiento, verificación y cumplimiento, o para la recolección y el reciclaje.
- *Transferencia tecnológica:* relativas a los procesos de investigación y desarrollo, la difusión de tecnologías, problemas estructurales con las importaciones y aranceles a la exportación, derechos de propiedad intelectual, acuerdos comerciales y licencias de tecnología [22].

4.1. Mercado global de iluminación: potencial

La mayoría de los miembros de la OCDE, entre ellos Australia, Canadá, la Unión Europea y los Estados Unidos, ya han establecido un enfoque por etapas para soluciones de iluminación eficiente a través de una combinación de medidas reglamentarias y políticas de apoyo. Otros países han comenzado o están en el proceso de adopción de medidas (Argentina, Brasil, China, Ecuador, Ghana, México, Rusia, Senegal y Sudáfrica, entre otros). Con el apoyo de la iniciativa 'en.lighten' PNUMA-FMAM, 27 países en desarrollo y emergentes han completado las estrategias nacionales de iluminación eficiente para lograr una eliminación gradual de las lámparas incandescentes ineficientes a finales de 2016. A pesar de este progreso alentador, casi la mitad de los países del mundo, en su mayoría países en desarrollo y economías emergentes, aún no han iniciado una eliminación gradual de las lámparas incandescentes. El escenario SE4ALL-Accelerator presenta que los países se dan cuenta de los beneficios tangibles de la iluminación de bajo consumo, el llegar a un consenso para acelerar la transición a nivel mundial y adoptar políticas de iluminación eficientes que transformen de manera sostenible el mercado a más tardar el 2017. [22]

4.1.1. Países de la OCDE (incluye Australia, Canadá, Unión Europea, Japón, Nueva Zelanda and Estados Unidos of América).

Los países de la OCDE tienen una población total de aproximadamente mil millones de personas. La iluminación eficiente en todos los sectores de uso final ahorraría aproximadamente \$ 69.5 mil millones anuales a través de una reducción de 516.1 TWh de electricidad. También se ahorraría aproximadamente \$ 34.7 mil millones en inversiones evitadas en 139 grandes centrales eléctricas de carbón (asume \$ 2000/kW). La magnitud de estos ahorros de energía representa el 38% del consumo de electricidad al año para la iluminación y

aproximadamente 69.4 GW en capacidad de generación eléctrica evitada. El carbono evitado de esta transición a la iluminación eficiente en los países de la OCDE serían 219.3 Mt anuales. Esta transición tendría beneficios adicionales, incluyendo una reducción de 20700 kg de emisiones de mercurio, una reducción de 1.23 millones de toneladas de dióxido de azufre y 0.67 millones de toneladas de óxidos de nitrógeno. [22]

4.1.2. América Latina y el Caribe

La región América Latina y del Caribe, tiene aproximadamente 600 millones de personas, la iluminación eficiente en todos los sectores de uso final ahorraría aproximadamente \$ 7.1 mil millones en facturación anual a través de una reducción de 65.6 TWh de electricidad. También se ahorraría aproximadamente \$ 4.4 mil millones en inversiones evitadas en 18 grandes centrales térmicas de carbón (se asume \$ 2000/kW). La magnitud de estos ahorros de energía representa el 37% del consumo de electricidad al año para iluminación de la región y aproximadamente 8.8 GW en capacidad de generación eléctrica evitada. El ahorro de carbono de esta transición a la iluminación eficiente en la América Latina y el Caribe serían 15 Mt anuales. Esta transición tendría más beneficios en la región, incluyendo una reducción de 400 kg de emisiones de mercurio, una reducción de 0.02 millones de toneladas de dióxido de azufre y 0.01 millones de toneladas de óxidos de nitrógeno.

4.1.3. Perú

Según el Viceministerio de Energía, la iluminación es responsable de cerca del 15% del consumo anual de electricidad en el país. La sustitución de lámparas por tecnologías más eficientes ayudará a mitigar el cambio climático y un ahorro financiero considerable. El MINEM está implementando un proyecto bajo un Convenio suscrito por el Gobierno del Perú y el PNUMA-GEF: 'Transformación del Mercado de Iluminación en el Perú'. La duración será 48 meses, el objetivo del proyecto es optimizar y reducir el consumo de energía y por ende las emisiones de gases de efecto invernadero mediante la transformación acelerada del mercado de la iluminación en el Perú a través de una mayor promoción e implementación de la utilización de lámparas de bajo consumo y la eliminación gradual de las importaciones y ventas de lámparas incandescentes. Así mismo, la meta es eliminar las barreras a la iluminación eficiente mediante la creación de un entorno institucional, legal, financiero y técnico en Perú, que esté a favor de la eficiencia energética en iluminación a través de la promoción de nuevas tecnologías de alto rendimiento y ambientalmente sostenible, tales como las lámparas LED y las CFL, y la eliminación de los focos incandescentes ineficientes

[23], [24]. Una barrera es la falta de información completa, se necesita actualizar y ampliar la información sobre el suministro y demanda de productos de iluminación, incluyendo un análisis de estudios y estadísticas existentes, estimaciones de ventas anuales y el parque instalado de lámparas, así como preferencias del consumidor (uso de lámparas incandescentes, preferencia por tipo y modelo de iluminación, conocimiento y percepciones) [24]. Funcionarios del gobierno, representantes de laboratorios, universidades, servicios públicos, organizaciones de la sociedad civil, fabricantes de

sistemas de iluminación y de la industria del reciclaje iniciaron el 2015 la elaboración de la 'Estrategia de Iluminación Eficiente Nacional del Perú' [24].

4.2. Impacto en el mercado de la iluminación de estado sólido

La adopción global de LED, que se muestra en la Figura 6, especialistas del sector estiman que la penetración de la base SSL instalada global crecerá rápidamente de menos de 5% en 2014 a más del 30% el 2020.

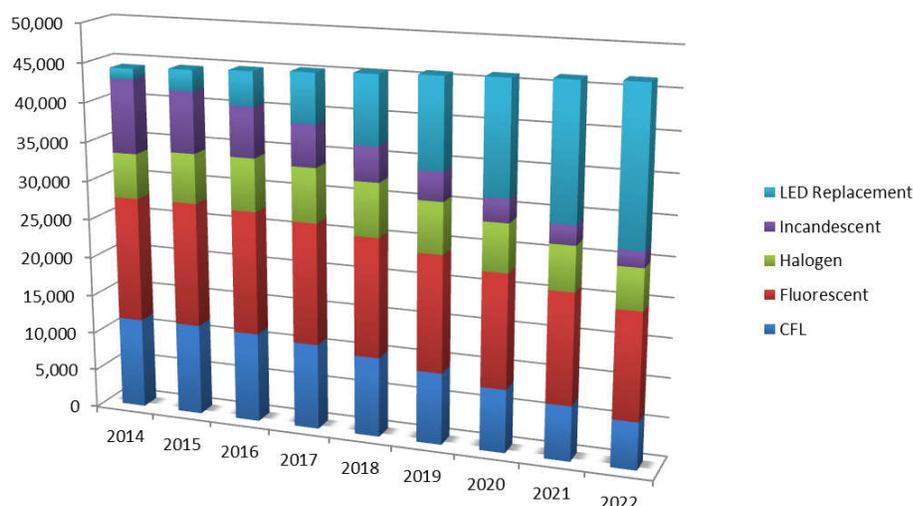


Figura 6. Evolución de las lámparas instaladas a nivel mundial.

Estimaciones presentadas por el DOE (Tabla 3) muestran que el 2014, las lámparas LED representaron de 31% a 41% las ventas totales del sector iluminación y

que al 2022 esta participación de mercado se duplicará. [17]

TABLA 3. Participación de mercado mundial de LED, medido como un porcentaje del total de ingresos

Source	Scope	2014	2016	2018	2020	2022
IHS	Lamps	31%	42%	52%	61%	67%
Strategies Unlimited	Lamps	41%	56%	68%	76%	80%
Strategies Unlimited	Luminaires	33%	44%	53%	61%	69%
LED Inside	Lamps & Luminaires	26%	34%	54%	-	-

4.3. Estado de tecnología SSL, LED, OLED

En la mayoría de las regiones del mundo, incluso aquellas con apoyo de la política del gobierno, menos del 10% de las instalaciones de alumbrado existentes, utilizan productos SSL. Analistas estiman que el 2014, las lámparas basadas en LED comprendieron sólo el 5% de las unidades vendidas y alcanzó el 3% de penetración de la base instalada. Estiman un gran crecimiento en este mercado para el 2020, las LED comprenderían el 42% de las unidades vendidas y representarán el 33% de la base instalada. Estas proyecciones de crecimiento presentan retos importantes para la industria, incluyen mejora de

la eficiencia, la continua reducción de precios, ampliación de fabricación y la integración de nuevo valor y características que puedan acelerar la adopción. [17]

4.3.1. Estado de Tecnología SSL en Estados Unidos

El Programa de Iluminación de Estado Sólido (SSL) del Departamento de Energía (DOE) fue creado en respuesta a la Sección 912, de la Política Energética del 2005, para 'Apoyar la investigación, desarrollo, demostración y actividades comerciales de aplicaciones

relacionadas con las tecnologías de iluminación avanzada de estado sólido, basadas en Diodos Emisores de Luz blanca (LED)'. Ha desarrollado una estrategia global de investigación y desarrollo (I+D) para apoyar avances en la tecnología SSL y maximizar el ahorro de energía. El objetivo específico del Programa de I+D es: Para el 2025, desarrollar tecnologías avanzadas de iluminación de estado sólido (investigación de la tecnología principal, desarrollo de productos, fabricación y tecnologías aplicadas) que, en comparación con las tecnologías de iluminación convencionales, sean mucho más eficientes energéticamente, más duraderas y costo competitivo apuntando una eficiencia del producto del sistema del 50% con iluminación que reproduce cercanamente la parte visible del espectro de la luz solar. I+D se actualizará anualmente para reflejar el progreso

continuo hacia los objetivos y las prioridades cambiantes que tendrán el mayor impacto en el logro de metas del programa.

Actualmente, la iluminación instalada en Estados Unidos ha estado dominada por fluorescentes lineales y la iluminación HID, los cuales tienen altas horas de funcionamiento, alta salida de luz por lámpara y un gran número de instalaciones. Sin embargo, la disminución de precios y los incrementos de eficiencia en iluminación LED prevé casi eliminar el uso de fuentes de HID y reducir la base instalada de lámparas fluorescentes lineales a un tercio de su cuota actual (Figura 6). En 2030, la iluminación LED se prevé dar cuenta de la mayoría de las instalaciones, lo que equivale al 88% del total de lumen-hora que se producen para la iluminación general.

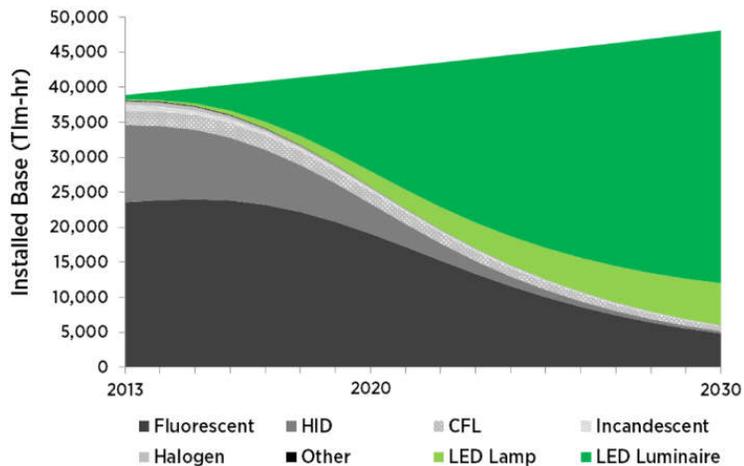


Figura 6. Proyecciones de iluminación en Estados Unidos 2013 2030

La Tabla 4 proporciona la cuota de mercado del 2014, 2020, 2030 y estimaciones de las entregas de iluminación LED en términos de lúmenes-horas para nueve aplicaciones de iluminación comunes. Actualmente, los LED tienen una penetración en el mercado mucho más grande en el sector iluminación exterior que el sector iluminación interior, aunque la diferencia disminuye con el tiempo. El mayor nivel de penetración en el mercado de la iluminación LED en el año 2014 se encuentra en vías y carreteras 21%. La

iluminación LED prevé alcanzar una cuota de mercado del 84% en este submercado el 2020 y casi el 100% el 2030. Los estacionamientos tienen la cuota de mercado más baja del mercado iluminación exterior de 8%, es aún mayor que la del submercado de iluminación interior.

El submercado de iluminación direccional tiene la mayor cuota de mercado de los mercados de iluminación interior de 6%, liderados en parte por el éxito temprano de pequeñas lámparas de repuesto direccionales.

TABLA 4. Participación de Mercado de LED estimada en EEUU (lumen-hour)

Application ¹	2014	2020	2030
General Service	4%	55%	>99%
Directional	6%	26%	74%
Decorative	1%	31%	94%
Linear Fixture	4%	44%	83%
Low/High Bay	3%	36%	73%
Total Indoor	3%	42%	81%
Street/Roadway	21%	83%	99%
Parking Lot	12%	74%	99%
Garage	8%	67%	>99%
Building Exterior	11%	71%	99%
Total Outdoor	14%	75%	99%
Total All	6%	48%	84%

Las proyecciones muestran que la iluminación LED logrará casi la mitad de toda la iluminación entregada en 2020 y 84% en 2030. [17]

4.3.2. Estado de Tecnología SSL en Europa

El consumo per cápita de energía de iluminación en Europa es menos de la mitad que América del Norte, pero todavía hay un ahorro sustancial que deben alcanzarse a través de la introducción de SSL. Dentro del mercado europeo, la participación de lámparas incandescentes ha caído de 59% en 2009 al 12% en 2013 (medido en ventas de unidades). Sin embargo, éstos han sido sustituidos en su mayoría por las bombillas de halógeno, de modo que la cuota de mercado total de las lámparas incandescentes apenas ha cambiado, lo que reduce de 80% a 79%. Aunque las ventas de lámparas LED aumentaron de 0,6% a 4,8% entre 2009 y 2013, esto se debió principalmente a la sustitución de las lámparas fluorescentes compactas, cuya cuota de mercado cayó de 18% a 15%. Como resultado, la eficacia media de las ventas de lámparas domésticas ha aumentado sólo modestamente, de 16 lm/W a 18,3 lm/W. En comparación con los líderes mundiales, como Corea del Sur (44 lm/W) y Australia (27,5 lm/W). [17]

4.3.3. Estado de Tecnología SSL en Asia

PNUMA estima que, en ausencia de nuevas políticas, el 57% de la demanda de energía para iluminación el 2030 vendría de Asia. Por lo tanto, la evolución de Asia será crítica con respecto a la reducción de la demanda mundial de electricidad.

Japón ha adoptado tempranamente la iluminación LED, animado por el alto costo de la electricidad, menor disponibilidad de electricidad a partir de generadores de energía nuclear y los rápidos avances tecnológicos de los fabricantes japoneses de LED. El 2013, las

lámparas LED representaron más del 30% de las ventas de unidades de CFL omnidireccionales, que contribuyen con el 24%. En términos de ingresos por ventas de lámparas y luminarias, el porcentaje de LED alcanzado el 2014 fue 72% y se espera que aumente a 79% el 2015. En marzo de 2015, la Asociación de Fabricantes de Iluminación de Japón presentó su 'Visión 2020 para la iluminación de negocios' que proyecta que el 100% de las entregas y el 50% de la base instalada de 950 millones de luminarias serán basados en LED para el año 2020. [17].

China es ahora el mayor mercado de SSL. El 2014 las ventas de lámparas y luminarias LED alcanzó 750 millones de unidades, lo que equivale al 16,5% de todos los productos de iluminación que se venden y la China Solid State Lighting Alianza espera que las ventas de unidades se eleven al 31% en 2015. En términos de la base instalada de casi 10 mil millones de lámparas, la penetración LED aumentó de 2,4% el 2013 a 10% el 2014. La meta nacional para el 2020 es aumentar la penetración de SSL a 70%, el ahorro de 340 TWh, equivalente al 80 % de la meta de ahorro PNUMA mundial de 420 TWh. El rápido crecimiento de la industria SSL en China ha sido asistido por el amplio apoyo de los gobiernos nacionales y regionales, incluidas las subvenciones para la adquisición de equipos de fabricación y productos de iluminación, el desarrollo de parques industriales y el establecimiento de programas de normalización. Más del 50% de los productos SSL producidos en China se exportan y está buscando diversificar en los mercados europeos y norteamericanos e incluir el sudeste de Asia, Brasil, India, Rusia y Sudáfrica a través de la promoción vigorosa. [17].

Aunque la población de la India es similar a la de China, la base de la iluminación instalada es de sólo 2 mil

millones de unidades. Esto es probable que aumente sustancialmente en los próximos quince años y el gobierno está dispuesto a satisfacer la demanda de lámparas de bajo consumo. En el pasado, se ha hecho hincapié en la promoción de las lámparas fluorescentes compactas, la atención se ha desplazado a los productos LED [17].

5. BARRERAS PARA LA ADOPCIÓN DE ILUMINACIÓN EFICIENTE

El informe de la IEA 'Light's Labour's Lost' [6] describe las principales barreras para la incorporación de la iluminación eficiente en los países de la OCDE:

La falta de información/conciencia de los clientes y la falta de tiempo para tomar decisiones informadas acerca de la iluminación puede llevar a los consumidores a perder las oportunidades para reducir los costos de energía y ahorrar dinero. La falta de confianza en las nuevas tecnologías de iluminación debido a la introducción en el mercado de nuevos productos de iluminación de baja calidad, que se produjeron en los últimos años pasados. Los altos costos de los equipos de lámparas de eficiencia energética en comparación con las lámparas convencionales, en particular para LED. Incentivos inadecuados a través del diseño y de la cadena de suministro donde las decisiones de iluminación a menudo se toman por quién no es el usuario final y con frecuencia no tiene ningún incentivo para seleccionar la mayoría de las opciones de eficiencia energética. Percepción de aspectos de salud y ambientales, relativos al contenido de mercurio de algunas lámparas fluorescentes compactas (en realidad, el contenido de mercurio de las lámparas fluorescentes compactas se ha reducido en un 90% y los niveles actuales no se consideran que son peligrosos para la salud humana). [8].

5.1. Barreras para la adopción de SSL

A pesar de los beneficios en energía, economía, rendimiento y funcionalidad adicional que se puede lograr con SSL, existen barreras para la adopción, entre otras:

Costo inicial: La principal barrera es el mayor costo inicial. Ha disminuido rápidamente en los últimos años, sin embargo, siguen siendo más caras que las otras fuentes basadas en el costo inicial. La adopción de los productos basados en LED en muchas aplicaciones comerciales e industriales se ha acelerado debido al periodo de recuperación que alcanza el nivel de uno a dos años, pero la iluminación vendida a nivel del consumidor tenderá a depender menos de consideraciones de Costo Total de Propiedad (TCO) y más en el costo inicial. Parte de la razón de esto es que

el consumidor residencial promedio utiliza la iluminación por períodos de tiempo más cortos y no tiene en cuenta los costes de mantenimiento para instalar o sustituir las luces. Uno de los riesgos de la continua caída de precios es que la calidad del producto podría convertirse en una preocupación, la gestión térmica de materiales, tales como disipadores de calor de aluminio, están siendo reducido o eliminado para ahorrar costes, la eficiencia, la vida, útil y el cambio de color de las lámparas LED pueden ser afectados. Es importante que la unidad de menor costo inicial no cause deficiencias en el desempeño o la vida útil o se reducirá la confianza del consumidor en la tecnología LED, reducción de la adopción y limitación del ahorro de energía total. [17].

Confiabilidad: Además de una alta eficiencia energética, los LED tienen la promesa de extremadamente largos tiempos de vida que pueden durar mucho más allá de 50000 horas de funcionamiento, mucho más que la mayoría de las fuentes de luz convencionales. Para los productos con una vida útil de muchos años, incluso décadas, las fallas pueden ser muy lentas en aparecer en la operación normal. Por lo tanto, la detección de estas fallas en el laboratorio o fábrica es muy difícil. Las lámparas LED normalmente no fallan catastróficamente (es decir, dejar de emitir luz), pero en cambio disminuye lentamente la salida de luz con el tiempo. El conocimiento de los mecanismos de degradación ha avanzado, pero no se ha completado. El producto final comprende diversos componentes y subsistemas que también pueden fallar independientemente del paquete de LED. El sobrecalentamiento causado por un mal diseño de la luminaria también puede reducir la vida de un paquete de LED, el ingreso de humedad puede ser un mecanismo importante de fracaso y determinante de la vida para una luminaria exterior. [17].

Estabilidad de color: El mantenimiento de lúmenes ha dominado las discusiones acerca de la vida útil de paquetes LED, pero el cambio de color es otro atributo de rendimiento importante que puede causar en una lámpara o luminaria LED fallar en su aplicación y desalentar su uso. La estabilidad de color no se debe confundir con la consistencia del color. La estabilidad del color se refiere a la capacidad de un producto para mantener el punto de color constante durante su vida útil, mientras que la consistencia del color se refiere a la variación de producto a producto dentro de un tipo de lámpara o luminaria. Un alto grado de estabilidad de color es importante para fuentes de luz en museo o una tienda minorista, pero menos importante para el alumbrado público. La estabilidad del color también es importante cuando se utilizan múltiples lámparas o luminarias para iluminar una pared donde los objetos se están evaluando en base al color, tal como en un

hospital o en una fábrica. Hay varios factores que afectan a la estabilidad del color de lámparas y luminarias LED. Temperatura del ambiente, corriente de accionamiento y el diseño del sistema de gestión térmica de la lámpara o luminaria, que a su vez puede afectar sus características de salida. Este comportamiento puede producirse incluso en ausencia de altas temperaturas ambientales. Del mismo modo, otros materiales en el camino óptico, como los plásticos, pegamentos, o resinas, pueden decolorarse con el tiempo. Las fluctuaciones de temperatura, que no están incluidos en los procedimientos de las pruebas estandarizadas, también pueden exacerbar los mecanismos de degradación de algunos productos LED. Actualmente no hay disponible metodología estándar para proyectar al futuro la estabilidad del color utilizando procedimientos de prueba estándar. dejando a cada fabricante desarrollar sus propias metodologías de prueba y métodos de modelización predictiva. [17].

Compatibilidad: La oportunidad de mercado más grande a corto plazo para la iluminación basada en LED es replicar el diseño de la forma de las lámparas existentes, pero las diferencias en la forma en que la luz se genera pueden conducir a una serie de problemas de compatibilidad. La incompatibilidad puede derivar de diferencias en la apariencia física, las dimensiones y distribución de la luz. Esto puede resultar en productos LED que no lleguen a encajar en artefactos de iluminación existentes o patrones de distribución de luz que no replican el producto que están reemplazando. Incompatibilidad también puede deberse a diferencias en las características de rendimiento, tales como la producción de luz, temperatura de color y la calidad del color. La temperatura de color del producto de reemplazo también puede diferir de las lámparas adyacentes de cualquiera de las tecnologías de iluminación convencionales o LED, especialmente si el consumidor, sin comprender la descripción en el envase, selecciona el producto equivocado. Para los productos de reemplazo de fluorescentes lineales existe un mayor nivel de complejidad. Los tubos fluorescentes lineales LED de reemplazo también sean compatibles con el balasto del fluorescente existente, tener su propia fuente de alimentación basada en LED, o debe ser conectado directamente a la red eléctrica. Cada método tiene sus pros y sus contras, pero esta opción puede ser confusa para el consumidor. Las diferentes opciones requieren diferentes niveles de coste de instalación y complejidad y puede resultar en un rendimiento variable de iluminación. [17]

6. CONCLUSIONES

- Actualmente el mercado está dominado por las tecnologías de iluminación convencionales, las cuales están siendo desplazadas por la tecnología

de iluminación SSL. La tecnología de las lámparas incandescentes es la dominante en el sector residencial, no obstante, son las de menor eficiencia. Las lámparas fluorescentes lineales son las dominantes en el sector no residencial (edificios de oficinas, comerciales, industrias, por debajo de 5 metros de altura). Las lámparas de sodio (HPS y LPS) son las dominantes en iluminación de vías.

- El modelo de mercado de la iluminación asume que la adopción de la tecnología de iluminación SSL es impulsada principalmente por mejoras proyectadas en la eficiencia, disminución del precio de los productos, así como las nuevas funcionalidades de valor añadido y la difusión de la tecnología aplicada, que permiten una recuperación de la inversión en plazos razonables.
- Estas nuevas funcionalidades de valor añadido proporcionan valor, además del ahorro de energía, en beneficios para la productividad, la salud, la gestión de energía e inteligencia de edificaciones, simplificación de integración de sistemas, un mayor control del uso de la energía y comunicación.
- Al final del análisis, la tecnología SSL se anticipa a predominar en cada uno de los submercados examinados, que comprende el 84% de todas las ventas de Lumen-hora. Así mismo la penetración de los LED en el mercado se proyecta para impulsar una reducción del 40% en el consumo de energía.
- La mayoría de los países de la OCDE ya han establecido un enfoque por etapas para soluciones de iluminación eficiente a través de una combinación de medidas reglamentarias y políticas de apoyo. Otros países han comenzado o están en el proceso de adopción de medidas (Argentina, Brasil, China, Ecuador, Ghana, México, Rusia, Senegal y Sudáfrica, entre otros).
- Las proyecciones presentan incertidumbres, no obstante, los resultados muestran una visión hacia la transición a la tecnología de iluminación SSL, que comprende LED, OLED y la gestión de los respectivos sistemas de iluminación.
- No obstante, la existencia de tecnologías de mayor eficiencia y características lumínicas, existen barreras para su adopción, principalmente: falta de información y sensibilidad, falta de confianza, mayor costo inicial, incentivos inadecuados, temores percibidos relacionados a la salud y el ambiente. Así mismo, a pesar de los muchos beneficios y funcionalidad adicional que se puede lograr, hay una serie de barreras para la adopción de productos SSL, estos comprenden principalmente costos iniciales, confiabilidad, estabilidad de color y compatibilidad, que pueden limitar la adopción.
- Gran parte de la investigación está en una etapa temprana por lo que es de suma importancia

apoyar la investigación adicional para comprender particularmente los impactos fisiológicos humanos de la iluminación, tanto positivos como negativos, para maximizar los beneficios de la iluminación.

- Para contribuir con la adopción de sistemas de iluminación eficientes, es pertinente que se tomen en consideración las experiencias de otros países y recomendaciones de los expertos y en la medida de la realidad de cada país adecuarlas e implementarlas, como liderazgo (voluntad política), capacidad técnica (competencias para garantizar la calidad y el rendimiento), financiero (facilitar acceso a fondos, consideración de costos iniciales y de operación y mantenimiento) y transferencia tecnológica (procesos de investigación y desarrollo). Para tal fin las iniciativas de la Secretaria General de las Naciones Unidas están apoyando e impulsando las medidas que los países adopten.
- Así mismo, eliminación progresiva de productos de iluminación ineficientes tan pronto como sea técnicamente y económicamente posible. Adoptar iluminación de calidad, fiabilidad y estándares mínimos de eficiencia energética (MEPS) para los productos de iluminación nuevos y existentes. Apoyar el desarrollo, uso y actualización periódica de las normas internacionales de pruebas y los protocolos de medición. Exigir y promover un mejor diseño y gestión de sistemas de iluminación al asegurar que los códigos de construcción promuevan el uso de la luz natural e incluyan estándares mínimos de eficiencia energética (MEPS) y se incluya información y formación dirigidas a arquitectos, constructores, propietarios y gestores.

REFERENCIAS

- [1] International Energy Agency (IEA) 2015 Secure Sustainable Together, Lighting
- [2] Ministerio de Energía y Minas (MINEM) Perú 2014 Plan Energético Nacional 2014-2025
- [3] US DOE Energy Efficient & Renewable Energy, Navigant Consulting Inc. 2014 Energy Saving Forecast of Solid-State Lighting in General Illumination Applications
- [4] International Energy Agency (IEA) 2010 Guidebook On Energy Efficient Electric Lighting For Buildings – Annex 45
- [5] Clean Energy Solutions Center, 2015 Impact of 'Phase-Out' Regulations on Lighting Markets
- [6] International Energy Agency (IEA) 2006 Light's Labour's Lost Policies For Energy-Efficient Lighting
- [7] Waide P 2010 Phase out of incandescent lamps Implications for international supply and demand for regulatory compliant lamps International Energy Agency (IEA)
- [8] International Energy Agency (IEA - ETSAP) 2012 Lighting
- [9] ENDESA 2015 Sistemas de Iluminación
- [10] JOSFEL 1994 Manual de iluminación
- [11] Cole M 2014 The Lighting Revolution: If We Were Experts Before, We're Novices Now IEEE
- [12] Macias H 2012 Illumination Benefits using LED high brightness bulb compare to traditional illumination systems
- [13] IEEE 2014 Carbon Trust, How to Implement LED lighting
- [14] CELMA 2009 Guide for the application of the Commission Regulation (EC) No. 245/2009 on Tertiary lighting sector products
- [15] CELMA 2007 Guide for the application of Directive 2000/55/EC on energy efficiency requirements for ballasts for fluorescent lighting
- [16] Davis U 2013 Residential Lighting The California Lighting Technology Center
- [17] Bardsley Consulting, SB Consulting, SSLS Inc, LED Lighting Advisors and Navigant Consulting Inc 2015 R&D Plan – Solid State Lighting US DOE Solid State Lighting Program
- [18] US DOE Energy Efficient & Renewable Energy 2013 Energy Efficiency of LEDs
- [19] U.S. Energy International Agency (EIA) 2015 Electric Power Monthly with Data for October 2015
- [20] Biery E 2014 Creating Value Through Controls LUTRON
- [21] Poplawski M 2014 Energy Efficient & Renewable Energy US DOE
- [22] Global Efficient Lighting Forum 2014 Policy Options to Accelerate the Global Transition to Advanced Lighting
- [23] GEF UNEP 'en.lighten' 2015 Perú Initiates Transition to Efficient Lighting Workshop Kicks-Off the National Efficient Lighting Strategy
- [24] PNUPA Ministerio de Energía y Minas (MINEM - Perú) 2015 Transformación del mercado de la iluminación en el Perú