

Analysis of energy saving in industrial LED lighting: A case study

Ana Serrano-Tierz ^a, Abelardo Martínez-Iturbe ^b, Oscar Guarddon-Muñoz ^c & José Luis Santolaya-Sáenz ^d

^a Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España. anatierz@unizar.es

^b Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España. amiturbe@unizar.es

^c Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España. oguarddon@disenossantelices.com

^d Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España. jlsanto@unizar.es

Received: September 5th, 2014. Received in revised form: April 16th, 2015. Accepted: April 22th, 2015

Abstract

The present study shows the economic savings and environmental advantages of LED lighting technology for industrial applications. For this purpose a case study in which metal halide lights were replaced with LED lights has been performed. For validating the replacement of 400W metal halide by 200W LED luminaires, there have been performed lighting simulations and field measurements by lux meter. The results indicate that both luminaires are comparable, obtaining significant energy savings close to 50%. This research demonstrates that LED lighting technology offers high performance lighting solutions that optimize energy saving, while reducing maintenance costs, with a significantly lower total cost of ownership (TCO), increasing the life span of the luminaires. From the environmental point of view it means a significant reduction in CO₂ emissions and the disposal of toxic waste such as mercury.

Keywords: Industrial LED lighting; High bay LED lighting; LED Vs Metal halide, Total Cost of Ownership (TCO),

Análisis de ahorro energético en iluminación LED industrial: Un estudio de caso

Resumen

El presente estudio muestra el ahorro económico y las ventajas medioambientales que supone la iluminación industrial con tecnología LED. Se ha planteado un estudio de caso en el que luminarias de halogenuros metálicos han sido sustituidas por luminarias LED. Para validar la sustitución de luminarias con halogenuros metálicos de 400W por LED de 200W, se han efectuado las simulaciones luminotécnicas y mediciones de campo mediante luxómetro. Los resultados obtenidos indican que ambas luminarias son equiparables obteniendo un importante ahorro energético cercano al 50%. Esta investigación demuestra que la tecnología LED ofrece soluciones de iluminación de alto rendimiento que optimizan el ahorro energético reduciendo a su vez costes de mantenimiento con un coste total de propiedad significativamente menor, incrementando la esperanza de vida útil de las luminarias. Desde el punto de vista medioambiental supone una importante reducción en emisiones de CO₂ y eliminación de residuos tóxicos como el mercurio.

Palabras clave: Iluminación LED industrial; Campanas LED industriales; LED Vs Halogenuro metálico, Coste Total de Propiedad (CTP).

1. Introducción

Debido a la evolución en tecnología LED que viene produciéndose desde que en el año 1997 se desarrollase en Japón la iluminación de luz blanca basada en LED [1], el mercado mundial está demandando con mayor intensidad la transformación de las fuentes de iluminación convencional a soluciones más eficientes y duraderas basadas en sistemas de iluminación LED. Este hecho provoca que el esfuerzo en I+D+i de las empresas del sector de iluminación se haya centrado

principalmente en conseguir sistemas de iluminación con buenas prestaciones, altamente eficientes y que resulten asequibles [2]. La posibilidad de ofrecer soluciones con un alto rendimiento desde el punto de vista del ahorro energético eliminando costes de mantenimiento y ofreciendo un sistema duradero en el tiempo, ha convertido la tecnología LED en uno de los motores tecnológicos más competitivos y con mayor proyección de futuro en el sector de la iluminación. De esta manera, la eficiencia energética se concibe como una metodología para el análisis y tratamiento de los problemas del

creciente consumo [3]. Se prevé que para el año 2020 el 75% de la iluminación esté basada en LED [4]. Hay que apuntar también que esta tecnología contribuye directamente a combatir el cambio climático al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de acuerdo con la decisión adoptada por el Parlamento Europeo el 17 de junio de 2010 [5] que ha fijado como objetivo para 2020, ahorrar un 20% de su consumo de energía primaria. En este sentido, la concienciación ciudadana ante el peligro del calentamiento global, sumado a una conducta más responsable en el consumo y la reducción de residuos tóxicos y peligrosos, han favorecido que desde los estratos políticos se impulsen medidas que ayuden a preservar el medioambiente y favorezcan la implantación de tecnología más ecológica [6] que resulte eficiente gracias al ahorro en el uso de los recursos naturales y la reducción de emisiones de CO₂ [7].

La eficiencia energética constituye una pieza clave en el desarrollo de las economías en los mercados globales. El sector de la iluminación podría ahorrar un 45% de la energía eléctrica consumida gracias a la utilización profesional de la tecnología LED [8].

Se considera que la iluminación LED en aplicaciones industriales supondría un gran ahorro energético, por la potencia, superficie a iluminar y horas de uso. Por este motivo, el número de empresas que en la actualidad están sustituyendo los sistemas de iluminación tradicional por este tipo de tecnología es cada vez mayor. Hasta la aparición del LED la iluminación industrial había utilizado principalmente lámparas de halogenuros metálicos y fluorescencia. La importancia de introducir la iluminación LED en el sector industrial viene determinada por la necesidad de optimizar los costes de operación con el objeto de aumentar su competitividad. Según la Oficina de Eficiencia Energética y Energías Renovables de los Estados Unidos, el cambio a tecnología LED en iluminación podría suponer en las próximas dos décadas, un ahorro de \$250 billones en costes de energía y reduciría el consumo eléctrico en iluminación en torno al 50%, evitando la emisión de 1800 millones de toneladas métricas de emisiones de dióxido de carbono [9].

Hasta el momento, la mayor parte de las investigaciones desarrolladas en iluminación LED para la sustitución de tecnologías tradicionales, se han centrado en la iluminación urbana [10-13]. Aunque existen estudios genéricos de sustitución de fuentes de iluminación tradicionales por LED [14], sin embargo, son muy escasas las investigaciones científicas que traten el sector industrial.

Puesto que la reducción de costes en el sector industrial es uno de los principales campos de acción para aumentar la competitividad de las empresas, la presente investigación tiene por objeto evaluar el ahorro económico y las ventajas medioambientales que supone la iluminación industrial basada en tecnología LED mediante un estudio de caso en el que se ha sustituido luminarias de halogenuros metálicos por luminarias LED.

2. Metodología del estudio

2.1. Comparación de tecnologías y criterios de análisis

El método de evaluación de la iluminación LED respecto a los sistemas tradicionales consiste en la comparación de

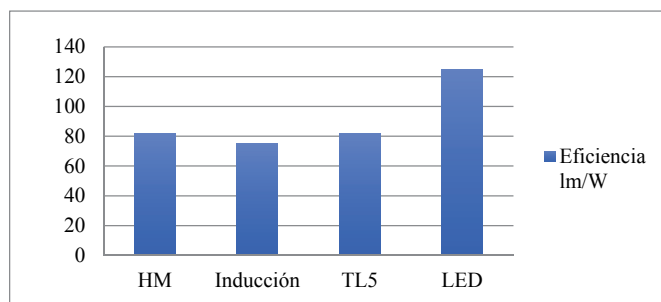


Figura 1. Comparación de la eficiencia (lm/W) de cuatro tecnologías comercialmente disponibles: HM, Inducción, TL5, LED.

Fuente: Elaboración propia.

parámetros técnicos relevantes como: a) La eficiencia b) La luminosidad c) La vida útil de la luminaria y d) La dependencia con la temperatura. Con este objetivo se ha procedido a comparar varios tipos de lámparas comerciales de halogenuros metálicos (400W HPI plus Philips), fluorescencia con tubos TL5 (4x80W Master TL5 HO 80W/840 1SL Philips), fluorescencia por inducción (250W Icteron Sylvania-Osram) y LED (200W Luxeon Rebel ES Philips). Se han descartado las lámparas de vapor de sodio por su bajo índice de reproducción cromática (CRI) que limita su uso a iluminación de exteriores.

2.1.1. Comparativa de la eficiencia

La Fig. 1 muestra la eficiencia (lm/W) de cuatro tecnologías disponibles en el mercado. Los valores de la figura muestran una diferencia significativa de más del 50% entre la eficiencia lumínica del LED respecto al resto de tecnologías analizadas. Actualmente tan solo algunos tipos de lámparas de vapor de sodio pueden alcanzar eficiencias equiparables al LED, aunque su aplicación principal es la iluminación vial.

2.1.2. Comparativa de luminosidad incluyendo luminarias

Es necesario distinguir entre los lúmenes emitidos por una lámpara (bombilla) y los que realmente se disponen cuando esta misma lámpara está dentro de una luminaria. Esta diferencia resulta importante para poder efectuar un análisis correcto de la eficiencia luminosa obtenida finalmente. La distribución radial de la luz en las lámparas de halogenuro metálico y fluorescencia, precisa de reflectores para redirigir el flujo luminoso hacia los puntos de interés. En función del tipo de luminaria, eficiencia del reflector y las condiciones de operación del LED, se ha definido un coeficiente de eficiencia lumínica LOR (light output ratio). Este coeficiente puede variar ampliamente en las lámparas con distribución radial desde un 60-75% del flujo luminoso mientras que en el LED, por su distribución direccional, el aprovechamiento es óptimo con LOR próximo a 1. Los lúmenes iniciales obtenidos de la luminaria se calculan multiplicando los lúmenes iniciales de la lámpara por el coeficiente LOR de la luminaria $L_{luminaria} = L_{lámpara} * LOR$, siendo los lúmenes de la

lámpara dependientes del tiempo.

Además del coeficiente de eficiencia lumínica de la luminaria, se ha analizado en la Fig. 2 la evolución del flujo luminoso en función del tiempo, a partir de las gráficas de depreciación lumínica de las lámparas proporcionadas por los fabricantes. La Fig. 2 muestra que todas las tecnologías experimentan una depreciación de la luminosidad con el tiempo. La tecnología de halogenuros metálicos (HM) es la que experimenta un decaimiento más acentuado y menor duración. Tanto en la fluorescencia TL5 como en la inducción, se produce un fuerte decaimiento inicial que posteriormente reduce su pendiente de caída. Al llegar a las 20kh se produce el fin de vida del TL5. En el caso de 200W LED y 4xTL5 80W partiendo de una luminosidad similar se observa que la mayor pendiente inicial de caída en el TL5 origina que el flujo luminoso se reduzca antes que en el LED, cuya pendiente es menor. Las dos tecnologías más duraderas son la inducción y el LED. La gran desventaja de la inducción es que no mejora la eficiencia de la fluorescencia TL5, solo

se obtiene una mejora en la duración al prescindir de cátodos para su encendido. En comparación con el resto de tecnologías analizadas, el LED se comporta de un modo uniforme con mejor eficiencia, menor decaimiento y mayor duración.

La Tabla 1 complementa la información de la Fig. 2 del siguiente modo:

- Tipos de lámparas y potencia utilizadas en el estudio.
- Lúmenes iniciales de la lámpara ($L_{\text{lámpara}}$).
- Coeficientes típicos de eficiencia lumínica en la luminaria (LOR).
- Lúmenes iniciales de la luminaria ($L_{\text{luminaria}}$).
- Lúmenes a las 5.000h de uso de la luminaria.
- Lúmenes a las 10.000h de uso de la luminaria.
- 80% de la luminosidad inicial en la luminaria como referencia para el tiempo de servicio.
- Tiempo de servicio calculado para una depreciación luminosa del 80% de la inicial.

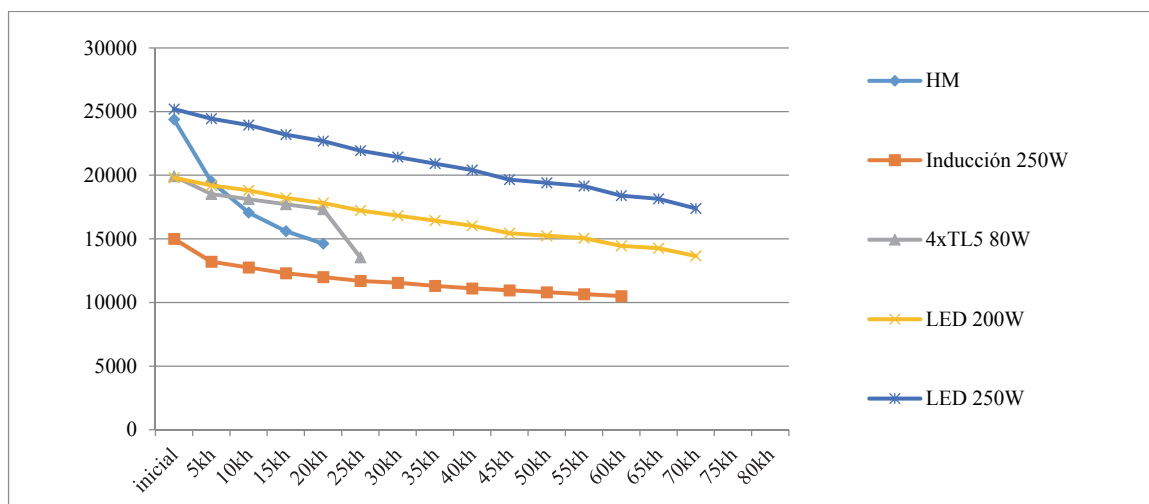


Figura 2. Gráfica comparativa de depreciación lumínica (lm) entre luminarias.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1.

Depreciación lumínica entre luminarias con lámparas de diferentes tecnologías.

| Tipo de lámpara | Lúmenes iniciales lámpara ($L_{\text{lámpara}}$) | Coef. típico de eficiencia luminaria (LOR) | Lúmenes iniciales luminaria ($L_{\text{luminaria}}$) | Lúmenes a las 5000h luminaria | Lúmenes a las 10000h luminaria | Lúmenes al 80% luminaria | Tiempo de depreciación lúmenes al 80% |
|-----------------|--|---|---|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------|---|
| MH 400W | 32500 | 0,75 | 24375 | 19500 | 17062 | 19500 | 5000 h |
| Inducción 250W | 20000 | 0,75 | 15000 | 13200 | 12750 | 12000 | 20000 h |
| TL5 4x80W | 26200(4x6550) | 0,76 | 19912 | 18518 | 18119 | 15930 | 22000 h |
| LED 200W@ 0,7A | 22400 | 0,89 | 19800 | 19206 | 18810 | 15840 | 45000 h |
| LED 250W @ 0,7A | 28000 | 0,90 | 25200 | 24444 | 23940 | 20160 | 45000 h |

Fuente: Elaboración propia.

Los valores que aparecen en la Tabla 1 para los tipos de lámpara MH 400W y LED 200W hacen referencia al estudio de caso planteado.

2.1.3. Comparativa de la influencia de la temperatura entre luminarias

Las lámparas de halogenuros metálicos alcanzan altas temperaturas de más de 250°C. Esto provoca un alto

calentamiento del ambiente de trabajo, lo cual puede llegar a ser un problema. Un aumento de la temperatura ambiente aumentará la tensión y la potencia en la lámpara. También aumentará el grado de envejecimiento y corrosión de los componentes y puede llegar a producir un fallo prematuro de la lámpara.

Las lámparas de inducción o fluorescentes T5 utilizan amalgamas y gas con mercurio que son fuertemente dependientes de la temperatura ambiente, ya que alcanzan su máximo flujo luminoso en torno a los 35°C. Temperaturas superiores a 50°C provocan un descenso acusado de la luminosidad por la reabsorción ultra violeta en el mercurio. Con temperaturas bajas, se reduce drásticamente la luz emitida, siendo la mínima temperatura de trabajo -5°C a baja frecuencia y -10°C a alta frecuencia.

Las luminarias LED empleadas en los ensayos se han diseñado de forma que disipen el calor emitido por los LED al ambiente, manteniendo temperaturas de operación seguras de la unión semiconductora $T_j < 85^\circ\text{C}$, con objeto de evitar el decaimiento lumínico por exceso de temperatura y reducir el envejecimiento del LED. Un diseño térmico eficiente garantizará una temperatura adecuada en las condiciones ambientales especificadas.

El uso del LED a bajas temperaturas favorece su eficiencia y duración, en ese caso la fuente de alimentación debe diseñarse para operar en dichas condiciones.

2.2. Cálculos luminotécnicos

Con objeto de efectuar la simulación luminotécnica se ha utilizado el programa Dialux 4.12.0.1 de libre disposición [15] al que se le ha incorporado los modelos proporcionados por los fabricantes. De esta forma se han confrontado los

resultados obtenidos con dos tipos de lámparas: a) Halogenuros metálicos de 400W y b) LED de 200W.

a) Halogenuros metálicos de 400W

A continuación se detallan los datos técnicos de la luminaria con bombilla de halogenuros metálicos HPI Philips de 400W.

Fabricante: Philips.

Modelo: HPK888 P-MB 1xHPI-P400W-BUS R-L reflector MB.

Flujo luminoso de la lámpara a las 5000h: $32500 \times 0.8 = 26000$ lm.

Ratio de eficiencia lumínica: (Light output ratio) LOR= 0.77.

Flujo luminoso inicial de la luminaria: 20020 lm.

Consumo total: 428W.

Condiciones de simulación:

Luminaria centrada y suspendida a 6m de altura en un techo de 10m.

Distancia a paredes: 7,5m.

Grado de reflexión: GR techo 70% GR pared 50% GR suelo 20%.

Factor de mantenimiento: 0,8.

En la Tabla 2 y Fig. 3 se muestran los resultados de la simulación de la luminaria descrita de halogenuros metálicos.

Tabla 2.
Resultados simulación 400W HM.

| E_m (lx) | E_{min} (lx) | E_{max} (lx) | E_{min}/E_m | E_{min}/E_{max} |
|------------|----------------|----------------|---------------|-------------------|
| 73 | 5,96 | 327 | 0,081 | 0,018 |

Fuente: Elaboración propia.

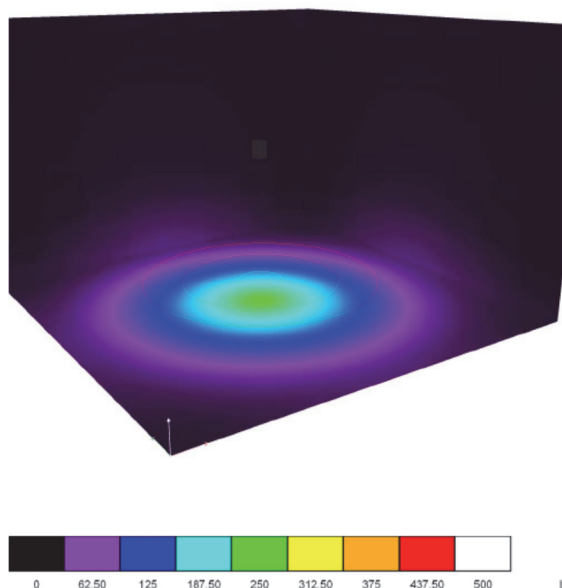
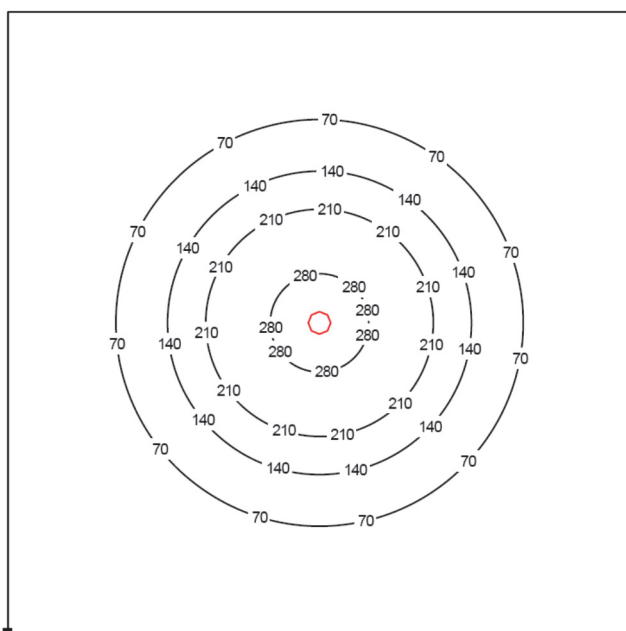


Figura 3: a) Izda. Gráfica de distribución lumínica (lux) de 400W halogenuros metálicos mediante isolíneas en el plano del suelo (15x15m).

b) Dcha. Gráfica de distribución lumínica (lux) de 400W halogenuros metálicos mediante gradación de colores (0-500 lux).

Fuente: Elaboración propia.

La Fig. 3, derecha, muestra una representación tridimensional de la escena a iluminar (anchura, profundidad, altura, 15m*15m*10m). El suelo muestra en escala de colores la iluminación media (lux) obtenida sobre el mismo. La Fig. 3, izquierda, muestra una distribución de líneas isolux sobre el plano del suelo. La Tabla 2 muestra el valor medio de la iluminación, los valores extremos, la relación máximo/medio y mínimo /máximo.

b) Luminaria con LED 200W

La simulación se realiza con una luminaria que posee chips LED Philips Lumileds SMD Rebel ES 200W.

Fabricante: DSLED.

Modelo: CL14200 5000k reflector 120°.

Flujo luminoso de la lámpara: 22400 lm.

Ratio de eficiencia lumínica: (Light output ratio) LOR= 0.884.

Flujo luminoso inicial de la luminaria: 19800 lm.

Consumo total: 220W.

Condiciones de simulación idénticas al caso anterior.

En la Tabla 3 y la Fig. 4 se muestran los resultados de la simulación de una luminaria con LED de 200W.

Tabla 3.

Resultados simulación 200W LED.

| E_m (lx) | E_{min} (lx) | E_{max} (lx) | E_{min}/E_m | E_{min}/E_{max} |
|------------|----------------|----------------|---------------|-------------------|
| 73 | 4,37 | 593 | 0,060 | 0,007 |

Fuente: Elaboración propia.

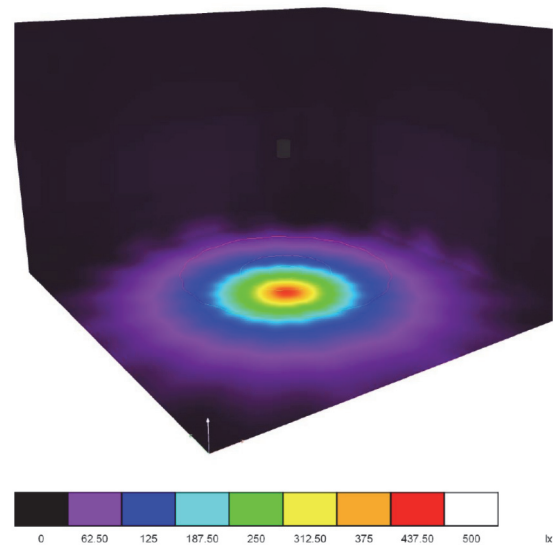
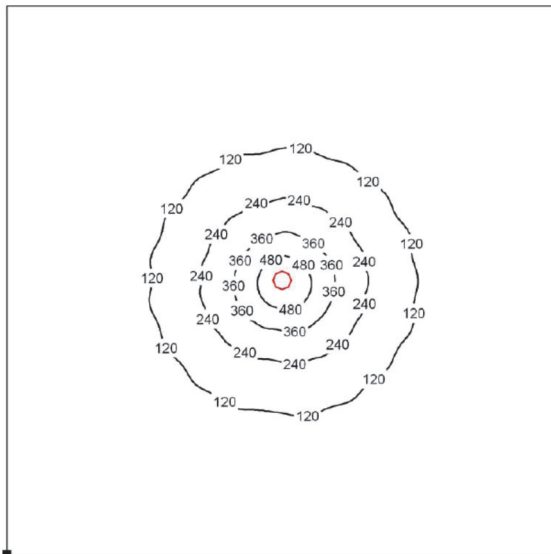


Figura 4: a) Izda. Gráfica de distribución luminica (lux) de 200W LED mediante isolíneas en el plano del suelo (15x15m).

b) Dcha. Gráfica de distribución luminica (lux) de 200W LED mediante gradación de colores (0-500 lux).

Fuente: Elaboración propia.

La Fig. 4, derecha, muestra una representación tridimensional de la escena a iluminar (anchura, profundidad, altura, 15m*15m*10m). El suelo muestra en escala de colores la iluminación media (lux) obtenida sobre el mismo. La Fig. 4, izquierda, muestra una distribución de líneas isolux sobre el plano del suelo. La Tabla 3 muestra el valor medio de la iluminación, los valores extremos, la relación máximo/medio y mínimo /máximo.

Comparando los resultados de simulación a) y b) se observa que la distribución luminica está más concentrada en la luminaria LED, consiguiendo un nivel de iluminación en el centro de casi el doble que en la de halogenuros metálicos. Esto se debe a la mayor direccionalidad del flujo en el LED respecto a las bombillas de halogenuros metálicos que emiten con un ángulo de 360° y necesitan que el flujo luminoso sea redireccionado con reflectores específicos. Así mismo, se observa que el nivel de iluminancia media E_m es idéntico en ambas simulaciones, lo cual permite equiparar ambas soluciones.

2.3. Estudio de caso

El objetivo de este apartado es cuantificar el ahorro económico que supone cambiar un sistema de iluminación existente con tecnología HM por otro de tecnología LED. En primer lugar se muestra cómo las prestaciones luminosas de una luminaria con lámpara de HM de 400W son equiparables a las de una luminaria con lámpara LED de 200W. Posteriormente, se analiza la incidencia que tiene la sustitución del sistema de alumbrado en el ahorro energético y en los costes.

2.3.1. Equivalencia entre luminarias

Para analizar la sustitución de una luminaria de halogenuros metálicos de 400W por una de 200W LED, es equivalente en términos lumínicos, se han probado ambas sobre la misma escena. La escena consiste en una habitación de las siguientes dimensiones: anchura, profundidad, altura,

15m*15m*10m. La luminaria está centrada en la habitación y colocada a una altura de 6m. Se han tomado mediciones de la luminosidad mediante un luxómetro marca Cablematic LX-1010BS. Las medidas en la luminaria de 400W se han efectuado cuando esta tiene 5000 horas de uso. Las mediciones se han realizado sobre el plano del suelo. La primera de ellas directamente en su eje vertical y en puntos

pertenecientes a ejes ortogonales intersectando con circunferencias concéntricas de 1 a 5 metros de diámetro con un paso de 1m. La iluminancia media de cada zona (E_m) se ha calculado promediando las cuatro mediciones situadas en los puntos del círculo descritos anteriormente.

Los resultados se recogen en la Tabla 4. En esta tabla también se han incluido los resultados de simulación.

Tabla 4.

Medidas en simulación y experimentales de la iluminancia media obtenida en el plano del suelo con luminaria HM de 400W y LED de 200W.

| Luminaria | E_m max(lux) | E_m R=1m | E_m R=2m | E_m R=3m | E_m R=4m | E_m R=5m |
|-----------------|----------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 400W HM | 317 | 275 | 235 | 180 | 110 | 68 |
| 400W simulación | 327 | 292 | 251 | 195 | 120 | 72 |
| 200W LED | 605 | 450 | 285 | 185 | 110 | 70 |
| 200W simulación | 593 | 430 | 275 | 176 | 107 | 67 |

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4 se observa que los valores de iluminancia media de la luminaria de halogenuros metálicos son ligeramente inferiores al modelo simulado, mientras que en el caso de la luminaria LED son superiores. Las causas de esta ligera desviación promedio del 5% se atribuyen a la tolerancia usual en la fabricación de componentes y bombillas. No se ha tenido en cuenta que el número de encendidos en la lámpara de halogenuros metálicos puede afectar a su vida útil y prestaciones lumínicas. Esto es un aspecto a favor de la tecnología LED que no está afectada por el número de encendidos.

Los resultados de simulación son similares a las mediciones reales, por lo que se validan los modelos de simulación utilizados. En la Tabla 4 se observa que para radios iguales o superiores a 2m, los valores de la iluminancia media son del mismo orden. En la Tabla 1 se observa que los lúmenes totales a las 5000h son equiparables. La iluminancia media de ambas luminarias será por tanto equiparable.

Dependiendo del tipo de luminaria analizada, tipo de reflector y envejecimiento de la misma, se obtendrán diferentes distribuciones e iluminancias medias. En este caso se comprueba mediante las mediciones efectuadas (Tabla 4), que es posible sustituir una luminaria de halogenuros metálicos de 400W con una utilización media de 5000h de uso, por una luminaria LED de 200W obteniendo un importante ahorro energético cercano al 50%. También se obtendrá una mayor duración de las luminarias LED por su lento envejecimiento en comparación con las de halogenuros metálicos que sufren una rápida degradación. Según datos del fabricante, la vida útil de la luminaria LED supera las 50.000h por lo que la inversión se amortizaría con un periodo de retorno en función de las horas de utilización y posteriormente se obtendría un beneficio hasta el fin de vida de la misma.

2.3.2. Ahorro energético

La diferencia de consumo entre las luminarias anteriormente descritas de halogenuros metálicos y LED es de 208W, se obtiene por tanto, un 48,6% de ahorro en el consumo energético. Es posible que en función de la fuente de alimentación y balasto utilizados, varíe ligeramente la eficiencia de la luminaria y por lo tanto la tasa de ahorro.

Tabla 5.

Cálculo del ahorro energético obtenido en la sustitución de MH400W por LED200W.

| | P(W) | Hora s/ día | kWh/ día | Días laborables | Hora s/ año | kWh/ año |
|-------------------|------|-------------|----------|-----------------|-------------|----------|
| MH400W | 428 | 24 | 10,27 | 220 | 5280 | 2259,8 |
| LED200W | 220 | 24 | 5,28 | 220 | 5280 | 1161,6 |
| Ahorro energético | 208 | | 4,99 | | | 1098,2 |

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 5 se muestra el ahorro energético por luminaria obtenido para una instalación con 5280h. de funcionamiento anual. Este ahorro es cercano al 50%.

Según datos publicados por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE), el sector industrial consume el 31% de la energía en España [16]. Con referencia al consumo eléctrico en iluminación industrial, este representa el 15% del mismo [17]. La implementación de la iluminación LED en industria podría reducir el consumo eléctrico de las empresas en torno a un 7,5%.

Teniendo en cuenta que en el periodo 2003-2013 el precio de la energía eléctrica en España se ha incrementado un 77,39% y que el precio de la energía en Europa duplica al de USA [17], se considera prioritario aplicar acciones que supongan un ahorro energético que mejore la competitividad del sector industrial español.

2.3.3. Ahorro económico

El ahorro económico de la inversión se calcula a partir de los factores que se muestran en la Tabla 6. Estos factores son: El ahorro energético, el ahorro en bombillas y el ahorro en mantenimiento. El principal factor de ahorro es el energético, aunque los costes de mantenimiento y reposición de bombillas pueden ser elevados en función del tipo de instalación; especialmente en aquellas de difícil acceso por su ubicación.

Los cálculos de la Tabla 6 utilizan el ahorro energético obtenido en la Tabla 5, valorado con un coste de 0,14 €/kWh más impuestos y una estimación de los costes de bombillas y mantenimiento en función del periodo de reposición definido por su vida útil.

Tabla 6.
Cálculo del ahorro anual promedio de la sustitución de MH400W por LED200W.

| Ahorro | Año1 | Promedio 10 años (IPC 5%) |
|----------------------------|----------|---------------------------|
| Ahorro anual energético | 195,53 € | 245,94 € |
| Ahorro anual en bombillas | 22,70 € | 28,56 € |
| Ahorro anual mantenimiento | 47,24 € | 59,42 € |
| Ahorro anual total | 265,47 € | 333,91 € |

Fuente: Elaboración propia.

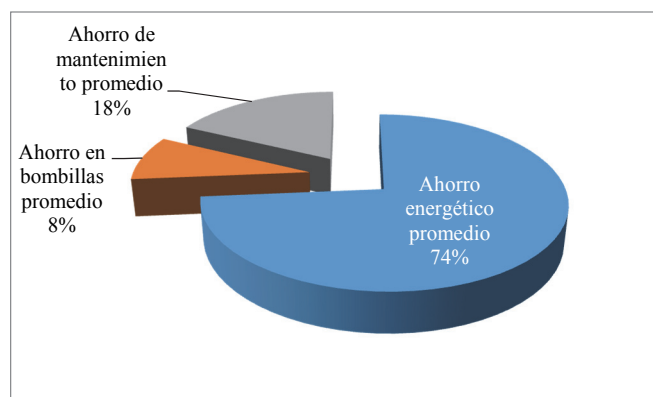


Figura 5. Distribución porcentual del ahorro total promedio obtenido.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7.
Parámetros de la inversión de LED200W.

| Parámetros de la inversión | |
|--------------------------------------|------------|
| Coste de la inversión LED200W | 570 € |
| Vida útil LED200W | 50.000 h |
| Ahorro total anual promedio | 333,91 € |
| Periodo de retorno de la inversión | 1,71 años |
| Beneficio de la inversión en 10 años | 2.592,03 € |

Fuente: Elaboración propia.

Tal y como se muestra en la Fig. 5 se aprecia la distribución porcentual de cada tipo de ahorro respecto al total obtenido.

En la Tabla 7 se calcula el periodo de retorno de la inversión en LED200W tomando el ahorro anual promedio obtenido en la Tabla 6. El beneficio total de la inversión tiene en consideración la vida útil de la luminaria para su cálculo.

Un análisis en detalle del ahorro a largo plazo de una instalación, requiere la cuantificación del Coste Total de Propiedad (TCO= Total Cost of Ownership). Este indicador define el coste total asociado a la compra y mantenimiento del producto durante el periodo de utilización. El cálculo del mismo depende de diversos factores directos e indirectos tales como [18]:

- Coste total de compra de la luminaria y bombillas durante los años de funcionamiento de la instalación.
- Coste total de mantenimiento, limpieza, sustitución de equipos y plataformas elevadoras.

Tabla 8.
Cálculo del TCO para LED200W y HM400W.

| Coste acumulado durante la vida de servicio (10 años) | LED 200W | HM 400W |
|---|----------|---------|
| Coste acumulado de compra de luminaria | 601,92 | 227,04 |
| Coste acumulado de consumo energético | 2601,24 | 5297,05 |
| Coste acumulado de bombillas | 0 | 285,52 |
| Coste acumulado de mantenimiento | 321,49 | 915,67 |
| Coste total de propiedad (TCO) | 3524,65 | 6725,28 |

Fuente: Elaboración propia.

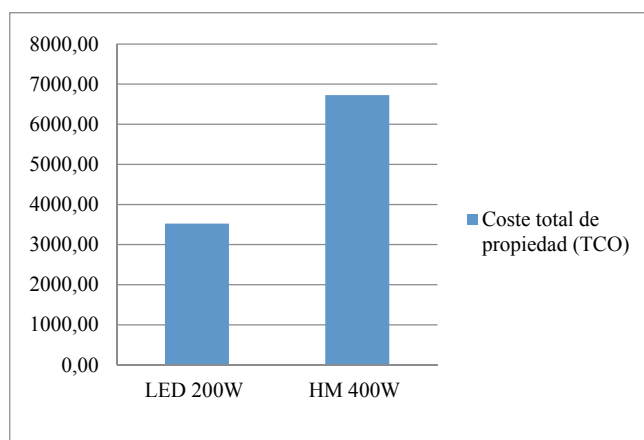


Figura 6. Comparación del coste total de propiedad para LED200W y HM400W.
Fuente: Elaboración propia.

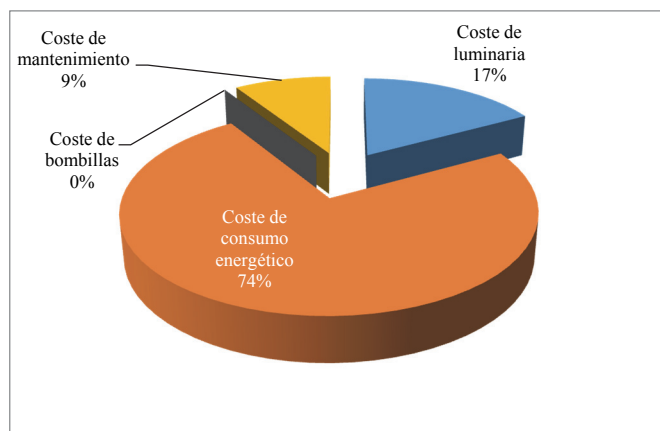


Figura 7. Distribución porcentual del coste total de propiedad para LED200W.
Fuente: Elaboración propia.

- Consumo energético y potencia contratada.
- Impuestos por huella de carbono y reciclado.

Además del ahorro energético, otro factor destacable es la gran reducción del Coste Total de Propiedad en comparación con las tecnologías de iluminación tradicionales que pueden producir retornos de la inversión inferiores a dos años [19].

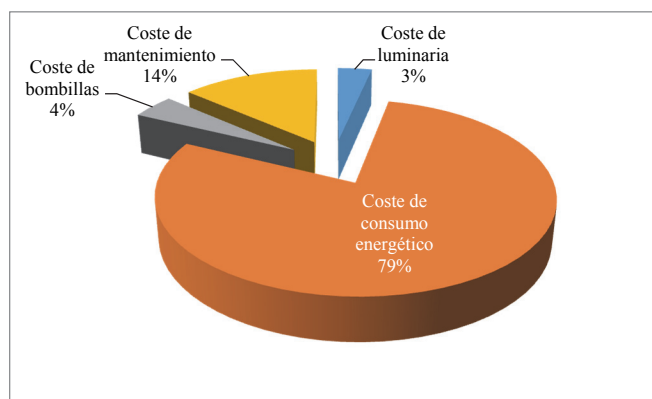


Figura 8. Distribución porcentual del coste total de propiedad para HM400W.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 8 se calcula el TCO de una luminaria LED200W y otra HM400W estimando los costes referidos a 10 años de servicio y 5.280h. de funcionamiento anual.

La diferencia en el coste total de propiedad para LED200W y MH400W que se muestra en la Fig. 6 supone un 47,6% de ahorro en la instalación.

Comparando los porcentajes de coste que aparecen en las Figs. 7 y 8 entre el LED200W y HM400W se aprecia que salvo en el coste de la luminaria, en el resto, el LED200W tiene un menor coste, tanto de consumo energético como de mantenimiento.

2.3.4. Ventajas medioambientales

La sustitución de una luminaria de 400W de halogenuros metálicos por otra de 200W LED supone un ahorro energético aproximado de 208W, que expresado a niveles de reducción de las emisiones de CO₂ son 85,28 g de CO₂ por cada hora de funcionamiento al tomar como referencia la media europea de 0,41kg de CO₂/kWh [17].

Otro aspecto importante es la no emisión de residuos tóxicos peligrosos (RTP) como el mercurio. Por ejemplo cada bombilla Philips MASTER HPI Plus 400W/645 BU-P E40 ISL contiene 67,2 mg.

3. Conclusiones

El reciente desarrollo de tecnología LED para aplicaciones de alta potencia en iluminación industrial ofrece la posibilidad de optimizar los costes de iluminación reduciendo en torno a un 50% el consumo energético.

En el estudio de caso realizado se comprueba que la sustitución de una luminaria de 400W de halogenuros metálicos por otra de 200W LED produce una iluminancia media equiparable.

El ahorro a largo plazo en coste total de propiedad (TCO) que proporciona el cambio a tecnología LED gracias a su larga vida útil hace posible a las empresas ser más competitivas consiguiendo importantes beneficios en la reducción de costes fijos de la instalación. En el caso de una instalación con servicio continuo de 24h el periodo de

amortización es inferior a dos años.

Desde el punto de vista medioambiental, la tecnología de iluminación LED contribuye en la reducción de las emisiones de CO₂ y en la eliminación de residuos tóxicos como es el mercurio.

Referencias

- [1] Taguchi, T., Present status of energy saving technologies and future prospect in white LED lighting. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 3 (1), pp. 21-26, 2008. DOI: 10.1002/tee.20228.
- [2] Faranda, R., Guzzetti, S., Lazaroiu, C. and Leva, S., LEDs lighting: Two case studies. UPB Sci. Bull. Ser. C. 73 (1), pp. 199-210, 2011.
- [3] Carrillo, G., Andrade, J., Barragán, A. and Astudillo, A., Impact of electrical energy efficiency programs, case study: Food processing companies in Cuenca, Ecuador. DYNA, 81 (184), pp. 41-48, 2014. DOI: 10.15446/dyna.v81n184.40821
- [4] Philips., Convierta la oficina en un lugar agradable Soluciones LED, para crear lugares de trabajo estimulantes y ecológicos [En línea]. [Fecha de consulta, 9 de enero de 2014]. Disponible en: http://www.lighting.philips.es/connect/tools_literature/assets/pdfs/LEDs%20en%20oficinas.pdf
- [5] Parlamento Europeo, Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, [en línea]. [fecha de consulta: 9 de enero de 2014]. Disponible en: <http://www.boe.es/doue/2009/140/L00136-00148.pdf>
- [6] European Commission., Recast of the RoHS Directive [Online]. [Date of reference: april 2nd of 2014]. Available at: http://ec.europa.eu/environment/waste/rohs_eee/
- [7] Ministerio de Industria, Energía y Turismo, Gobierno de España., Plan de Acción de Ahorro y Eficiencia Energética 2011-2020. [En línea]. [fecha de consulta: 15 de enero de 2014]. Disponible en: <http://www.idae.es/index.php/id.663/mod.pags/mem.detalle>
- [8] Ministerio de Industria, Energía y Turismo, Gobierno de España., El sector de la iluminación podría ahorrar un 45% de la energía eléctrica consumida, con una utilización profesional de la nueva tecnología leds. [En línea]. [fecha de consulta: 15 de enero de 2014]. Disponible en: <http://www.idae.es/index.php/id.99/mod.noticias/mem.detalle>
- [9] ENERGY.GOV. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy., Why SSL. [Online]. [Date of reference: January 15th of 2014]. Available at: <http://energy.gov/eere/ssl/why-ssl>
- [10] Orzáez, M.J.H. y de Andrés-Díaz, J.R., Análisis comparativo y justificativo para el cambio a leds en instalaciones con lámparas de halogenuro metálico: Un paso más hacia la eficiencia energética en iluminación urbana. DYNA, 89 (2), pp. 165-171, 2014.
- [11] Nuttall, D.R., Shuttleworth, R. and Routledge, G., Design of a LED street lighting system. Power Electronics, Machines and Drives, 2008. PEMD 2008. 4th IET Conference, York, UK, Institution of Engineering and Technology, 2008, pp. 436-440. DOI: 10.1049/cp:20080559
- [12] Long, X., Liao, R. and Zhou, J., Development of street lighting system-based novel high-brightness LED modules. IET Optoelectronics, 3 (1), pp. 40-46, 2009. DOI: 10.1049/iet-opt:20070076
- [13] Ylinen, A.M., Tähkämö, L., Puolakka, M. and Halonen, L., Road lighting quality, Energy Efficiency, and Mesopic Design-LED Street Lighting Case Study. Leukos, 8 (1), pp. 9-24, 2011. DOI: 10.1582/LEUKOS.2011.08.01.001
- [14] Cheng, Y.K. and Cheng, K.W.E., General study for using LED to replace traditional lighting devices. In: Power Electronics Systems and Applications. ICPEA '06. 2nd International Conference on IEEE, Hong Kong, Hong Kong Polytechnic University, 2006, pp. 173-177. DOI: 10.1109/PESA.2006.343093
- [15] DIAL. DIALux. Versión actual: edificios completos, Luz diurna, planificación de espacios, planificación de viales - más fácil y potente. [En línea]. [Fecha de consulta, 15 de enero de 2014]. Disponible en: www.dial.de/DIAL/es/dialux/download.html
- [16] Ministerio de Industria, Energía y Turismo, Gobierno de España., Industria. Sector Industria y el consumo de Energía. [En línea]. [Fecha de consulta, 3 de marzo de 2014]. Disponible en:

- <http://www.idae.es/index.php/idpag.20/re/menu.337/mod.pags/mem.detalle>
- [17] Oficina Verde. Universidad de Zaragoza. Energía en la industria. Jornadas de eficiencia energética y mercados energéticos. [En línea]. [Fecha de consulta, 17 de febrero de 2014]. Disponible en: <http://oficinaverde.unizar.es/sites/oficinaverde.unizar.es/files/users/ofiverde/Ahorro%20de%20energ%C3%ADa%20en%20la%20industria%20%5BModo%20de%20compatibilidad%5D.pdf>
- [18] PHILIPS. Calculadora Total Cost of Ownership. [En línea]. [Fecha de consulta, 15 de enero de 2014]. Disponible en: <http://www.philips-tco.com/tco/?l=es>
- [19] Schratz, M., Gupta, C., Struhs, T.J. and Gray, K., Reducing energy and maintenance costs while improving light quality and reliability with led lighting technology. Pulp and Paper Industry Technical Conference (PPIC), Conference Record of 2013 Annual IEEE, United States, IEEE, 2013, pp. 43-49. DOI: 10.1109/PPIC.2013.6656043

A. Serrano-Tierz, es Dra. por la Universidad de Zaragoza, España y miembro activo del Instituto Universitario de Investigación en Ingeniería de Aragón, España, es Profesora Universidad de Zaragoza. Desarrolla su actividad investigadora en el campo de la aplicación de metodologías aplicadas al diseño de producto. Colabora desde hace más de 10 años con empresas del sector de la iluminación y posee 37 registros de diseño industrial en este campo.

ORCID: orcid.org/0000-0002-5169-7042

A. Martínez-Iturbe, es Catedrático de Tecnología Electrónica de la Universidad de Zaragoza, España y miembro del Grupo de Electrónica de Potencia y Microelectrónica del Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón. Ha participado en: 38 proyectos de financiación pública y 29 contratos de investigación. Tiene 21 publicaciones, 9 patentes, ha participado en 111 congresos y ha dirigido 7 Tesis doctorales. Ha sido Director de Área del Instituto Tecnológico de Aragón, España, Secretario del Departamento de Ingeniería Eléctrica Electrónica e Informática y Subdirector de la Escuela de Ingenieros de Zaragoza. Su área de investigación está dentro de la Electrónica de Potencia y los Accionamientos Eléctricos.

ORCID: orcid.org/0000-0002-8797-0813

O. Guarddon, es Ing. Industrial con mención en electrónica por la Universidad de Zaragoza, España y desempeña su actividad profesional dirigiendo el Departamento de I+D+i de la empresa de iluminación Diseños Santelices. Su perfil investigador se centra en el diseño de iluminación LED para aplicaciones técnicas y decorativas. Ha colaborado en distintos proyectos de investigación con la Universidad de Zaragoza.

J.L. Santolaya-Sáenz, es Dr. Ing. Industrial por la Universidad de Zaragoza, España. Desarrolla su actividad docente como Profesor en el Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación de la Universidad de Zaragoza, España. Su labor investigadora la desarrolla en el grupo GediX, grupo emergente de investigación dedicado al estudio y aplicación de metodologías innovadoras en el diseño de producto. Colabora actualmente con otros grupos de investigación de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza en proyectos de diseño de prototipos e instalaciones experimentales.

ORCID: orcid.org/0000-0001-7041-483X



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MEDELLÍN

FACULTAD DE MINAS

Área Curricular de Ingeniería
Eléctrica e Ingeniería de Control

Oferta de Posgrados

Maestría en Ingeniería - Ingeniería Eléctrica

Mayor información:

E-mail: ingelcontro_med@unal.edu.co

Teléfono: (57-4) 425 52 64