

05-028

SELECTION FACTORS IN LIGHTING SYSTEMS UPGRADE PROJECT EVALUATION

Alvarez Cabal, Jose Valeriano; Martinez Huerta, Gemma; Pecharroman Clemente, David; Vigil Berrocal, Miguel Angel
Universidad de Oviedo

In the commercial documentation regarding the upgrading of industrial lighting systems it is stressed the comparison of luminous flux among lamps and electric consumption. However, these are not the only factors to take into account. Even in general lighting systems, there should be remarked aspects such as depreciation of luminous flux, visual comfort and expected lifetime. In the cases where luminaries are not upgraded, compatibility is guaranteed by additional factors. Control systems lower electricity consumption in the installation to the conditions of use and make better use of natural light, but it is not always possible to switch on the lamp or dim the light as fast and efficiently as required. In this paper discusses the criteria to be taken into consideration when considering a project of upgrading interior lighting in an industrial environment. Based on these factors and according to their importance for a specific installation, the technological alternatives to be considered will be determined.

Keywords: *Industrial lighting system; optimization; upgrading selection factors*

FACTORES DE SELECCIÓN EN LA EVALUACIÓN DE MEJORAS EN SISTEMAS DE ILUMINACIÓN INDUSTRIAL

La documentación comercial relativa a la actualización de sistemas de iluminación industrial hace hincapié en comparaciones de flujo luminoso entre lámparas y en consumos eléctricos. Pero estos no son los únicos factores a considerar. Incluso en sistemas de iluminación general deberían aparecer aspectos como la depreciación del flujo luminoso, el confort visual y vida útil esperada. En los casos en los que las luminarias deseen mantenerse aparecen factores adicionales para asegurar la compatibilidad. Los sistemas de control permiten reducir los consumos de la instalación a las condiciones de uso y aprovechar mejor la iluminación natural, pero no siempre es posible encender la lámpara u oscurecerla con la rapidez y eficacia necesaria. En la ponencia se exponen cuáles son los criterios que deben considerarse al abordar un proyecto de mejora de iluminación interior en entorno industrial. A partir de estos factores y, en función de su importancia para un instalación concreta, se podrá determinar las alternativas tecnológicas que deben ser consideradas.

Palabras clave: *iluminación industrial; factores de selección; optimización*

Correspondencia: Valeriano Alvarez Cabal valer@api.uniovi.es

1. Introducción

Las tecnologías disponibles en iluminación han sufrido una verdadera revolución en los últimos lustros. La aparición, y sobre todo, la reducción de precio, de tecnologías de estado sólido, entre otras, han supuesto una progresiva mejora en la eficacia promedio de los sistemas de iluminación.

Hay un importante potencial en la mejora de eficiencia energética y otras características en la iluminación de instalaciones industriales. El consumo de estas instalaciones suele no ser considerado, pero de acuerdo, con estudios como el realizado por la IEA supone 8,7% del consumo de energía en la industria. Aunque el porcentaje es relativamente bajo se corresponde con unas cifras de consumo y, por ende, de coste realmente grandes.

Las mejoras en la eficiencia se pueden realizar escogiendo las tecnologías más adecuadas, y también, sustituyendo en instalaciones existentes las lámparas existente por otras de mejores características (*retrofit*). Esta última opción es una tendencia creciente, aunque es necesario analizar en profundidad la viabilidad técnica y económica de este tipo de proyectos.

Suponer que la eficiencia energética es el único parámetro relevante es un error habitual. Esta ponencia pretende introducir que factores deben ser considerados

2. Objetivos y metodología

El punto de partida de este trabajo es el interés de las grandes compañías industriales en optimizar sus consumos en iluminación. Aunque en compañías de sectores primarios el gasto energético en iluminación es muy pequeño, algunas compañías están muy interesadas en la actualización de sus sistemas de iluminación. Las razones son variadas:

- Representan una alternativa de mejora que requiere una inversión relativamente pequeña
- Se relaciona fácilmente con parámetros de mejora medioambiental como la ecoeficiencia y la huella de carbono, siendo los departamentos relaciones con medio ambiente los que se convierten en motores del cambio,
- La evolución tecnológica en el sector es muy visible y despierta un interés por los nuevos tipos de lámparas disponibles.

Este trabajo se basa en el interés de una compañía del sector primario en revisar el estado del arte de las tecnologías existentes en iluminación con vista a establecer que tecnologías deberían tenerse en cuenta en los proyectos de actualización y en las nuevas iluminaciones.

En primer lugar se estableció cuáles eran las razones que las distintas instalaciones tenían al comenzar los proyectos de actualización, encontrándose dos motores básicos:

- Disminución de los costes. Se incluyen los costes de la energía eléctrica consumida y del mantenimiento. Este último aspecto es muy relevante en ciertas instalaciones en las que el acceso a las luminarias es difícil y costoso.
- Evitar mantenimientos correctivos. La búsqueda de respuestas mejores o más económicas para la iluminación de zonas como temperaturas relativamente altas, alta suciedad, o sufriendo golpes y vibraciones.

Si la motivación era una disminución de costes se habla de periodos de retorno bajos. La mayor parte de los estudios realizados utilizan valores de costes de la energía eléctrica

relativamente altos (mercado del usuario doméstico o comercial) y no precios de suministro industrial (que para grandes consumidores puede alcanzar valores del orden de 40 a 50 euros el Mwh).

Con estas premisas se planteó orientar los esfuerzos en tres pasos sucesivos:

- Realizar una revisión de las tecnologías existentes y de las emergentes
- Establecer que factores deberían contemplarse en la selección de las tecnologías a evaluar para un caso concreto de iluminación industrial
- Evaluar el ciclo de vida de costes de las distintas tecnologías para diversas situaciones para seleccionar las alternativas de mejora idóneas.

Esta ponencia recoge los factores que se deben considerar al evaluar las tecnologías. Es habitual que, al presentar ofertas, se haga hincapié exclusivamente en la eficiencia o en la vida útil, sin tener en cuenta otros factores. E incluso con factores como la eficiencia es necesario tener en cuenta aspectos como la depreciación. En esta ponencia se describirán los factores principales que se deberán tener presentes al evaluar ofertas de actualización o de nuevas instalaciones de iluminación.

3. Entorno industrial

El entorno industrial es muy variado, pero se consideran una serie de características que serán tenidas en cuenta al decidir los factores relevantes:

- Se piensa en sistemas de iluminación general con luminarias colgantes
- La separación entre el plano de trabajo y la lámpara puede ser muy grande, muy superior a los dos metros en muchos casos. Como consecuencia la potencia de las lámparas individuales debe ser muy superior.
- Dada su posición, altura, dificultad de acceso, entre otros factores, la sustitución de las lámparas es más dificultosa y cara.
- Las condiciones ambientales pueden ser extremas, estando las lámparas a temperatura alta, vibraciones, humedades excesivas, etc.
- No hay requisitos de iluminación muy grandes. Si los hubiese se resolverían con iluminación localizada
- Habrá instalaciones en las que las luminarias estén encendidas de forma continua con lo que el tiempo de encendido no es tan relevante
- En ciertas instalaciones, la presencia de iluminación natural hace necesario disponer de sistemas de control del flujo luminoso
- No existen grandes requisitos en la reproducción cromática

4. Factores a considerar

Decidir que tipo de iluminación que es más adecuado para un uso específico requiere tener en consideración diversos factores. Como primera impresión se pediría que las lámparas elegidas sean

- Tan eficientes como sea posible
- Ofrecer una buena reproducción del color
- Capaces de soportar las condiciones ambientales
- Adaptables al uso de sistemas de control
- De bajo coste
- De tecnología suficientemente probada y conocida

El uso industrial es muy diverso, pero tiene algunas características específicas que lo separan de los usos comercial y residencial, entre las que destacan las siguientes:

- La separación entre el plano de trabajo y la lámpara puede ser muy grande, muy superior a los dos metros en muchos casos. Como consecuencia la potencia de las lámparas individuales debe ser muy superior.
- Dada su posición, altura, dificultad de acceso, entre otros factores, la sustitución de las lámparas es más dificultosa y cara.
- Las condiciones ambientales pueden ser extremas, estando las lámparas a temperatura alta, vibraciones, humedades excesivas, etc.

De entre todos los factores que se pueden considerar se propone como los más relevantes los siguientes:

Tabla 1 Factores a considerar

Eficiencia	<ul style="list-style-type: none">•Eficiencia inicial•Depreciación con el uso
Duración	<ul style="list-style-type: none">•Duración•Respuesta a los ciclos de uso•Forma de fallo
Resistencia a las condiciones ambientales	<ul style="list-style-type: none">•Resistencia a la vibración•Variación del comportamiento con la temperatura
Posibilidades de control	<ul style="list-style-type: none">•Tiempos de encendido•Regulación
coste	<ul style="list-style-type: none">•Coste total•Retrofit

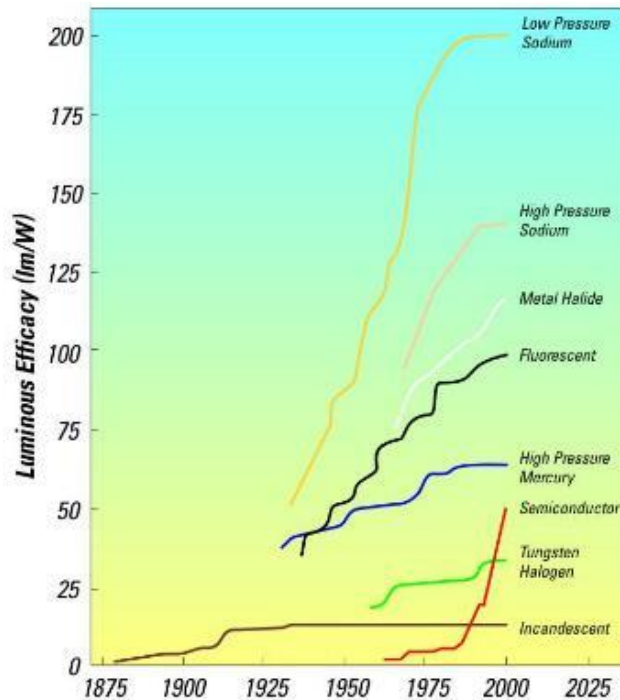
De estos factores se han excluido otros, que pueden tener relevancia en determinados casos como la respuesta cromática, la calidez de la luz producida, la disponibilidad de la tecnología (plasma y lámpara de sulfuro son tecnologías con pocos fabricantes y poco probadas).

La selección de los factores se ha realizado como primer paso para la elaboración de una herramienta de selección, siendo realizada a partir de los datos obtenidos por bibliografía y las opiniones de los expertos de una compañía multinacional.

5. Eficiencia

La eficiencia de una lámpara se define como el ratio entre la luz emitida y la energía eléctrica consumida y es medida en Lumenes por watio (lm/W). Los valores están en constante mejora por el cambio de tecnologías y por la mejora dentro de cada tecnología, como se puede observar en la siguiente figura:

Figura 1 Evolución de la eficiencia (LIA 2009)



La eficiencia en iluminación se ve afectada por la forma y los materiales de las luminarias y por los balastos o componentes electrónicos que adaptan las necesidades de la lámpara a los requisitos de la lámpara.

Al comparar tecnologías es necesario tener en cuenta dos hechos: el primero es que los datos proporcionados son calculados en condiciones específicas de laboratorio (temperatura, balasto con características superiores, etc), el Segundo es que puede haber grandes diferencias en eficiencia en lámparas con la misma tecnología pero de igual potencia (fluorescentes de 36W tienen eficiencias de 100 lm/W pero este valor se reduce enormemente en fluorescente de pequeño tamaño, el mismo fenómeno se produce en otras tecnologías).

En el caso de los balastos, su influencia se produce a través de dos efectos. El primero es la variación en la cantidad de luz realmente emitida por la lámpara en relación con la configuración utilizada en las pruebas realizadas por el fabricante. Para tener en cuenta este valor se introduce el factor de balasto que relaciona ambos. En la actualidad el factor de balasto suele tomar valores altos llegando a superar la unidad. La mejora en la calidad y prestaciones de los balastos ha sido muy grande en los últimos años. El segundo efecto es el propio consume eléctrico del balasto o sistema equivalente.

Además del valor inicial de la eficiencia es necesario considerar la depreciación. La luz emitida por las lámparas va disminuyendo con el uso. La importancia de la depreciación depende de la tecnología pudiendo llegar a valores del 40% o más.

En la mayor parte de los casos, el consume eléctrico de la lámpara permanece constante disminuyendo la emisión luminosa. En las lámparas de sodio de baja presión, se mantiene constante la emisión luminosa incrementándose el consumo, lo que supone una bajada en la eficiencia.

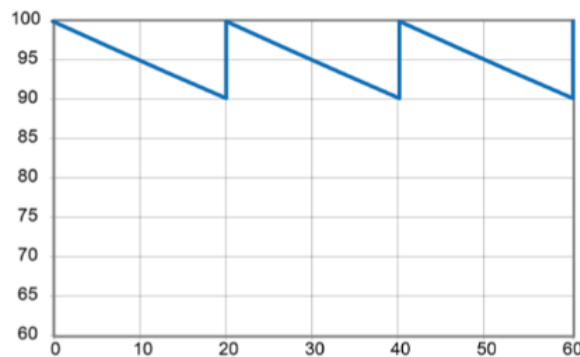
Si se quiere asegurar un nivel mínimo de iluminación en toda la vida útil de la lámpara, la depreciación debe ser tenida en cuenta. Si la tecnología tiene una depreciación importante

(como las lámparas de descarga de halogenuros metálicos) se debe incrementar la potencia y cantidad de lámparas para que, aun afectadas por la depreciación, cubran el nivel de iluminación deseado.

Los fabricantes ofrecen muy habitualmente datos de eficiencia inicial, en otras ocasiones dad eficiencias promedio. Lo deseable sería disponer de una curva que relacione la depreciación relacionada con el tiempo de uso. Así será posible tener en cuenta este efecto para elegir el momento más adecuado para la sustitución de las lámparas.

La depreciación puede ser lineal (como en los fluorescentes, LEDs, etc) o ser alta al principio y luego ser lineal (descarga de halogenuros metálicos). Por ejemplo, en los fluorescentes la depreciación es lineal (CIE 2005) La siguiente figura muestra tres ciclos de reemplazo de fluorescentes que se realizan a las 20.000 horas donde un 90% de la emisión luminosa inicial se mantiene. En el eje vertical se muestra la luminancia relativa en tanto por ciento y en el eje horizontal el número de horas de funcionamiento expresadas en miles.

Figura 2 Ejemplo de depreciación de fluorescente



La depreciación depende de la tecnología de la lámpara y de los materiales y forma e construcción. Los valores pueden ir desde un 1 o 2% en fluorescentes cada 1000 horas de uso hasta un 25% en las primeras 2.000 horas de uso en las antiguas lámparas de halogenuros metálicas de matriz cerámica.

Las lámparas de Estado Sólido (LED, principalmente) deben ser tratadas de forma diferente ya que su tiempo de vida se determina en función de la depreciación. Se considera que una lámpara LED llega al fin de su vida útil cuando el flujo luminoso es el 70% del original.

Hay otros factores que pueden afectar a la depreciación con la posición de la lámpara en la luminaria, las condiciones ambientales, frecuencia de encendido, etc. Por ejemplo, la eficiencia de los fluorescentes varía en función de la temperatura, tal y como se ven en la siguiente figura, afectándoles especialmente las bajas temperatura.

6. Duración

La duración de una lámpara se considera como el tiempo de uso hasta que la lámpara falla o presenta condiciones no adecuadas para el uso. Se calcula como un promedio. IESNA considera que la duración se calcula de acuerdo con el momento en que un 50% de las lámparas están aún operativas.

Para algunas tecnologías, como los LED, la duración se calcula a partir del momento en que el flujo luminoso de la lámpara es el 70% del inicial. Es una práctica habitual mostrar en los catálogos una duración garantiza que tiene un margen del 50% sobre la duración estimada a partir de pruebas.

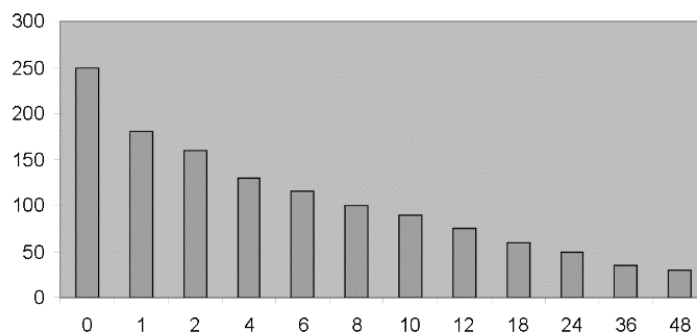
Las nuevas tecnologías han alargado la duración hasta alcanzar las 100.000 horas. Realizar pruebas de laboratorio de esta duración no es posible, por lo que las duraciones son

estimadas a partir de datos recogidos en pruebas más cortas. La necesidad de estimar las duraciones introduce cierto grado de error en el cálculo de las duraciones de tecnologías como inducción o LED. Por esta razón, es poco habitual encontrarse con duraciones garantizadas de más de 50.000 horas.

La extensión en la duración es una de las ventajas fundamentales de las nuevas tecnologías (inducción, LED).

La duración de la lámpara puede depender de factores como la frecuencia de encendidos o la temperatura de funcionamiento. Un ejemplo muy claro es el acortamiento de la vida de una lámpara fluorescente al aumentar la frecuencia de uso. El desgaste del electrodo que se produce en cada encendido reduce la vida útil de la lámpara. En la siguiente figura se puede observar la relevancia de este efecto al variar el número de encendidos promedio cada 24 horas, estando situados en el eje horizontal el número de encendidos por día y en el eje vertical el porcentaje en tanto por ciento sobre la vida útil estimada en los ensayos:

Figura 3 Efecto del número de encendidos diarios en la vida útil de un fluorescente (Fuente: CIE)



Otro factor a considerar es la forma en que se presenta el fallo. El fallo puede ser total cuando la lámpara deja de funcionar pudiendo dejar bruscamente una zona en oscuridad, o puede ser una depreciación en el flujo luminoso hasta hacerlo inferior al valor mínimo exigido. El segundo tipo de fallo es preferible pues es progresivo, pudiendo detectarse la necesidad del cambio y no produciendo problemas de seguridad. El primer tipo de fallo es típico de las lámparas de incandescencia. Los fluorescentes presentan avisos de mal funcionamiento, pero su fallo es igualmente total. En cambio, las lámparas LED presentan una depreciación continua y los fallos totales son muy raros.

7. Resistencia a las condiciones ambientales

El funcionamiento de las lámparas se puede ver afectado por las condiciones ambientales. Por ejemplo, la temperatura puede afectar a su vida útil, al flujo luminoso, a la velocidad con el que este se reduce, a la forma de fallo, etc.

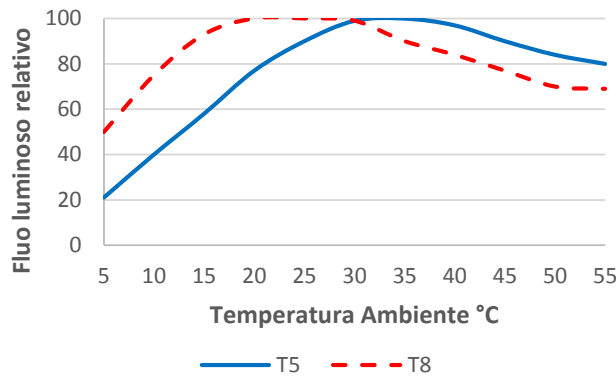
Los principales factores que deben ser tenidos en cuenta en entornos industriales son la temperatura y las vibraciones. Estos factores son poco relevantes en edificación residencial o comercial (salvo excepciones) pero los edificios industriales pueden presentar condiciones muy variables de temperatura y fuertes vibraciones.

Las vibraciones pueden causar fallos en las lámparas de descarga (siendo un ejemplo muy claro los fluorescentes), y desajustes en los acoples de los balastos. Las tecnologías que carecen de ellos como inducción y LED ofrecen una muy buena resistencia a la vibración.

Los edificios industriales contienen entorno en los que las temperaturas pueden ser más altas o bajas. La temperatura de funcionamiento puede afectar a la eficacia y duración de las

lámparas. Cada tecnología tiene una respuesta distinta. Mientras que los fluorescentes bajan mucho su eficacia en condiciones de baja temperatura, como se puede ver en la siguiente figura. En cambio, las lámparas LED ven muy reducida su vida útil en entornos de alta temperatura.

Figura4. Relación entre flujo luminoso y temperatura para fluorescentes T5y T8 (Fuente Lithonia)



Una alta temperatura de funcionamiento también afecta a los balastos, reduciendo su vida útil. Son dispositivos electrónicos muy sensibles al sobrecalentamiento.

Existente lámparas fluorescentes y LED adaptadas condiciones de temperatura más alto, pero una tecnología como inducción se adapta perfectamente a condiciones extremas.

8. Posibilidades de Control

Los sistemas de control permiten adaptar la intensidad de la luz a la necesidad actual. Para poder actuar se necesita: por un lado capacidad para encenderse en muy corto espacios de tiempo (tiempo de encendido) y por otro la capacidad de variar el flujo luminoso (*dimming*). Un corto tiempo de encendido permite utilizar sensores de presencia, por ejemplo. La capacidad de variar el flujo luminoso permite, por ejemplo, adaptarlo a la iluminación natural presente en el plano de trabajo.

El tiempo de encendido se define como el tiempo que va entre que se activa la lámpara y el momento en que alcanza su flujo luminoso máximo. También es relevante el tiempo de re-encendido. Las tecnologías de descarga (salvo fluorescentes) tienen tiempos de encendido más altos. El caso más extreme son las lámparas de vapor de mercurio que pueden tardar 2 minutos en encenderse completamente.

El control del flujo luminoso permite adaptarlo a las condiciones ambientales. Hay tecnologías donde dicho control es complicado como el fluorescente, otras como los LEDs en los que es posible dependiendo de cómo se construya la lámpara y otras tecnologías en las que la adaptación es sencilla como la inducción.

9. Coste económico

El coste considerado debe incluir: el propio coste de la lámpara, el coste de la luminaria, el coste del mantenimiento (incluyendo el reemplazo de las lámparas) y el coste de la energía eléctrica.

En un entorno industrial, el coste de sustituir la lámpara puede ser muy grande, dado que puede estar situado a una altura y con unos obstáculos que hagan complicado el acceso. Este aspecto tiene una importancia mayor. En cambio el coste de la energía eléctrica puede

ser más reducido al disponer de tarifas eléctricas con un coste por kwh inferior al del usuario conectado a baja tensión.

En el cálculo del coste económico del ciclo, aparecen todos los factores antes indicados. La forma en que se realiza el mantenimiento es también relevante. Se puede realizar una sustitución periódica en el momento evitando fallos puntuales. Aunque no se aproveche la totalidad de la vida útil, el coste del mantenimiento puede reducirse al usar equipos de elevación y personal de forma más eficaz.

El caso de la mejora de sistemas ya existentes es particularmente interesante. Muchas tecnologías se adaptan como mejoras de otras anteriormente disponibles. Los fluorescentes compactos aparecen para reemplazar a las incandescentes. Y las LED se disponen en un principio con los mismo sockets. Dentro de las lámparas de descarga, las sucesivas mejoras de las lámparas de halogenuros metálicos aparecen con potencias pensadas para sustituir a lámparas ya existentes de tecnologías obsoletas. En la actualidad, surgen lámparas de inducción y LED como opciones de mejora para las lámparas de descarga. En el caso de los fluorescentes surgen los tubos LED que se adaptan a las luminarias existentes.

En este tipo de sustituciones lámpara a lámpara manteniendo la luminaria es necesario tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Los tamaños tanto de las lámparas como de los balastos deben adaptarse. Así mismo, la luminaria debe ser capaz de soportar el peso de la nueva lámpara
- Puede ser necesario una adaptación de la luminaria, como, por ejemplo la retirada de los balastos al sustituir los fluorescentes por tubos LED.
- Las formas de las luminarios no están pensadas para aprovechar las características de las nuevas lámparas, por lo que el resultado puede ser menos eficaz que la sustitución de la totalidad de la luminaria

10. Conclusiones

En el diseño de instalaciones de iluminación general en entornos industriales es necesario considerar diversos factores en la selección de las tecnologías. Para cada instalación es necesario evaluar la importancia relativa de los factores para cada caso concreto.






Las naves industriales suelen tener una planta rectangular con una altura considerable si se compara con los usos doméstico y comercial. Suelen estar construidas en materiales opacos y están dotadas de sistemas de iluminación general de luz difusa. La altura es un parámetro importante puesto que la potencia de cada luminaria individual crece al aumentar la altura sobre el plano del trabajo. Esto representa un problema para tecnologías como el fluorescente, limitada en cuanto a su potencia individual o para los LED, por la dificultad que supone evacuar una creciente cantidad de calor. Se considerará una altura inferior a 6 metros. El número de encendidos y apagados es bajo, y no suelen disponer de sistemas de control de iluminación. Las exigencias en cuanto a gama cromática no son grandes salvo excepciones (control de calidad, labores delicadas). Valores de CRI superiores a 70 son suficientes, por lo que no discrimina entre las tecnologías más habituales.

Las condiciones de uso pueden ser bastante exigentes. Muchos procesos industriales requieren calentamientos y las temperaturas del entorno de trabajo son más altas que la temperatura ambiente. En otras instalaciones pueden ser condiciones de baja temperatura, de alta humedad, etc. A diferencia de los entornos doméstico y comercial, la resistencia a condiciones ambientales adversas es muy relevante en la selección de las tecnologías. Altas temperaturas ambientales hacen más complicado el uso de LEDs, por ejemplo. Pero en cambio, si las luminarias deben ir montadas en estructuras sometidas a vibración, seleccionar los LEDs sería una clara opción a considerar. De una forma a otra, las condiciones ambientales es un factor muy relevante.

El factor económico es extremadamente relevante en la selección. Se considera de forma más consecuente todo el ciclo de vida de coste incluyendo los costes de instalación, los consumos eléctricos y los costes de mantenimiento.

La siguiente tabla refleja la importancia relativa de cada uno de los factores:

Tabla 2 Relevancia de los factores

Eficiencia	
Vida útil	
Resistencia ambiental	
Control	
Coste	

Para cada instalación en particular debe ajustarse la importancia relativa de cada uno de los componentes. Aparte de estos factores hay otros no considerados como el confort visual y la reproducción cromática, la disponibilidad de las tecnologías, etc que podrán ser relevantes para casos concretos.

Referencias

- CIE97, 2005. Guide on the maintenance of indoor electric lighting systems, Vienna: CIE97.
- ECBCS, 2010. Guidebook on energy efficient Electric Lighting for Building, Espoo: IEA -Aalto University.
- Lithonia Lighting, 2004. Source Selection Guide HID and Fluorescent
- LIA 2009, Lamp History, Lighting Industry Association