

Métodos para comparar la iluminación visual entre luminarias de descarga de alta intensidad (HID) y de diodos fotoemisores (LED) a fin de optimizar el rendimiento visual en entornos de iluminación débil

Resumen

Al seleccionar luminarias que suministren una iluminancia determinada, las tres unidades primarias utilizadas para describir el rendimiento de los productos son lúmenes, candelas y vatios. Los lúmenes describen el volumen total de luz producido por una fuente. La candela describe la energía suministrada por un sistema óptico a lo largo de un ángulo sólido. Los vatios describen la cantidad de energía consumida por un sistema. Aunque sean útiles para describir la potencia bruta de la luminaria, estas unidades se basan en el supuesto (erróneo) de que todas las luminarias imparten el mismo estímulo visual al observador humano.

El sistema visual humano no responde de manera uniforme al contenido espectral de las fuentes luminosas. De ahí que la respuesta visual varíe mucho en función de las fuentes luminosas. Además, la respuesta del sistema visual humano al color depende de los niveles de iluminancia. En niveles de iluminancia altos, la visión se produce principalmente en la región fotópica. En la región escotópica si los niveles son muy bajos, y en la mesópica cuando son moderadamente bajos. Cada una de estas regiones crea un cambio en la respuesta espectral. Sin embargo, las unidades normalizadas de iluminancia y fotometría no tienen en cuenta este efecto. Este hecho reviste especial importancia si se comparan fuentes luminosas con características de color deficientes en cuanto a la generación de respuesta visual (caso del sodio de alta presión) a fuentes luminosas que producen mayor estímulo visual (como sucede con los LED). Por último, independientemente de la eficacia del producto (lúmenes por vatio) o de las Pies-candela (Fc) calculadas que se suministren, las fuentes luminosas que generen la máxima eficiencia visual producirán un rendimiento visual más alto para el observador.

Introducción

Este documento describirá los mecanismos de la respuesta visual humana y los factores críticos que intervienen en el estímulo visual en lo concerniente a la distribución espectral de potencia de la fuente luminosa, específicamente en aplicaciones de baja luminosidad (<50 lux [<50 Fc]), donde el rendimiento visual queda afectado principalmente por la luminancia en superficie (la luz reflejada) dentro del intervalo mesópico de 0,01 a 3 cd/m².

Asimismo, se revisarán los métodos para la estimación empírica de la iluminancia y la luminancia equivalente entre fuentes de energía espectral dispar, a fin de mejorar plénamente la eficiencia mediante la aplicación de fuentes visualmente eficientes en lugar de fuentes visualmente ineficientes, como sucede con el sodio de alta presión.

Este documento también revisará las diferencias existentes en las características ópticas de las luminarias, así como el modo en que las diferencias en la distribución de luz realizada pueden afectar a la evaluación de productos con diagramas de haz que se describen exáctamente igual. También se aportarán estrategias para visualizar y evaluar las diferencias de rendimiento.

Antecedentes

La respuesta visual humana varía en función de los niveles de color y de iluminancia, desde luz (luminancia) reflejada muy débil hasta condiciones de iluminancia muy intensas. Para establecer un método comparativo uniforme de predicción y evaluación, las unidades de medición fundamentales para la iluminación y luminosidad de fuentes son el lumen, la candela y el lux (o Pie-candela). Estos patrones de medida se centran en la respuesta visual fotópica humana, la cual parte del supuesto de que todos los niveles de iluminancia son superiores a 50 lux (5 Fc). Este supuesto es aplicable a la mayoría de los entornos de alumbrado interior, pero no allá donde los niveles de iluminancia son bajos, o la reflectancia de la superficie es <30 %. Para aplicaciones con iluminancia reducida es necesario considerar la respuesta visual mesópica, la cual incluye mayor eficiencia visual y excepcionales características de respuesta de potencia espectral que cambian la forma en que los observadores perciben la luz.

A fin de definir ajustes de la iluminancia que reflejen la respuesta visual humana con mayor exactitud, el grupo técnico 191 (2010) de la Comisión Internacional de Alumbrado (CIE) esbozó un sistema recomendado para la fotometría mesópica basado en el rendimiento visual⁽¹⁾. Le siguió el documento TM12-12 de la Illuminating Engineering Society (IES)⁽²⁾. Una comprensión más amplia de la respuesta visual humana se publicó posteriormente en el documento IES TM24-13⁽³⁾, basado en el efecto combinado de la respuesta visual humana en niveles de iluminancia superiores a 150 lux (15 Fc) con la influencia

dinámica de la distribución espectral de potencia (DEP) de las fuentes luminosas. El resultado aplicado de esta nueva comprensión es la posibilidad de reducir el consumo energético aumentando el rendimiento visual mediante la alineación del suministro de la DEP de la fuente luminosa con la respuesta visual humana.

Factores tecnológicos de las fuentes luminosas

Cada fuente luminosa tiene una distribución espectral de potencia que la distingue de otras fuentes luminosas. La "luz blanca" no existe; tan solo existe luz que contiene dominio espectral y energía suficientes para que un observador humano perciba el color de las superficies y del entorno circundante. Aunque la luz diurna contiene un espectro de colores completo, del ultravioleta al infrarrojo, las fuentes de luz artificial suelen incluir alguna forma de espectro incompleto truncado que produce una buena imitación de la luz blanca. Las Figuras 1 y 2 presentan las distribuciones espectrales de potencia de varias fuentes luminosas comunes que se utilizan en prácticas de diseño de alto rendimiento energético. Estas distribuciones espectrales de potencia abreviadas pueden causar problemas de percepción y respuesta visuales, ya que la carencia de sus energías espectrales se relacionan con respuestas visuales humanas.

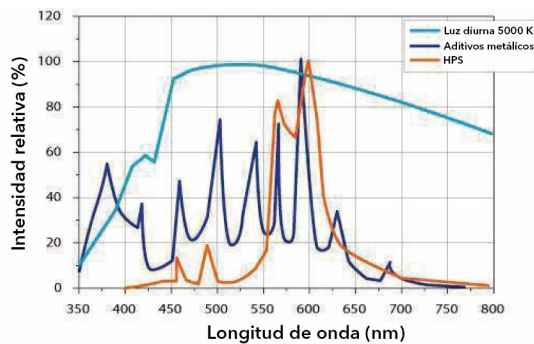


Figura 1 – Potencia espectral de lámparas HID típicas
Si se compara con la luz diurna, la potencia espectral producida por las lámparas HID (en este caso, de halogenuros metálicos y sodio de alta presión) muestra claramente una emisión espectral truncada e incompleta. Esta realidad produce diferentes resultados en el sistema visual humano, desde el tono azul de los halogenuros metálicos hasta el marcado tono blanco-amarillento del sodio de alta presión.

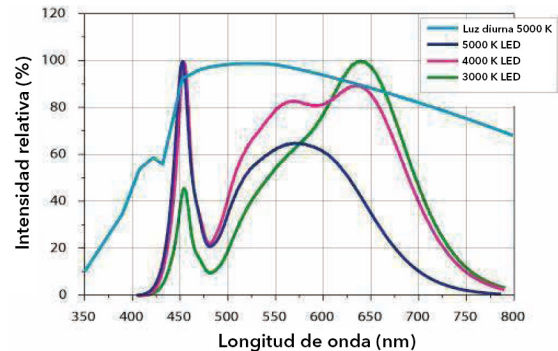


Figura 2 – Potencia espectral de fuentes LED típicas
La potencia espectral resultante de las fuentes LED también produce energía DEP incompleta. En este caso, la diferencia se percibe como luz blanca fría en el caso de los LED de 5000 K y como luz blanca cálida en los LED de 3000 K, mientras que los LED de 4000 K aparecen un tanto neutros.

El modo en que la DEP de una fuente luminosa afecta la percepción de la luz blanca solo es una parte del efecto que cada fuente luminosa ejerce en el rendimiento visual. La fisiología humana implica efectos de respuesta específicos que deben tenerse en cuenta, más allá de nuestra percepción general de la representación de luz blanca.

Factores de la respuesta visual humana

El sistema visual humano responde a la luz de dos maneras. En primer lugar, ajusta continuamente el tamaño del iris para adaptarse a la iluminancia disponible. Segundo, la retina contiene receptores que responden a las diferencias de la intensidad (contraste claro y oscuro) y al contenido cromático. La respuesta al color es irregular y oscila entre las iluminancias retinianas de bajo y de alto nivel. La respuesta a la luz de bajo nivel, denominada visión escotópica con un pico de 498 nm (verde-azul), es dominante en niveles de luminancia inferiores a 0,01 cd/m², pese a lo cual siempre está activa. La iluminancia de alto nivel, denominada visión fotópica con un pico de 555 nm (amarillo-verde), es dominante en niveles de luminancia (luz reflejada) superiores a 3 cd/m², mientras que permanece activa en niveles más bajos. La respuesta visual combinada de la visión fotópica y escotópica es dominante cuando la luminancia de la superficie (la luz reflejada por superficies) oscila entre 0,01 cd/m² y 3 cd/m², se denomina mesópica y tiene una respuesta pico de 507 nm. Partiendo de esta base, las superficies de baja reflectancia, iluminadas a los niveles bajos frecuentes en aplicaciones exteriores, crean condiciones admitidas dentro de la región de respuesta mesópica.

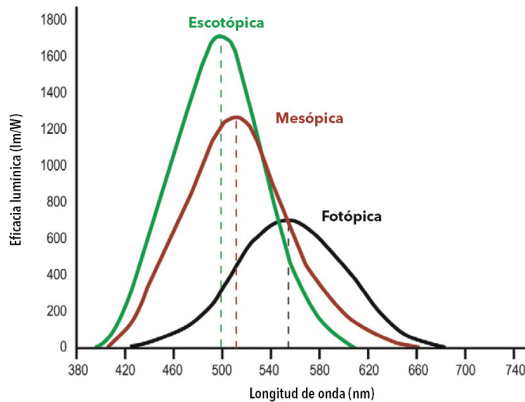


Figura 3 – Respuesta de la DEP humana a la luz

La distribución espectral de potencia del color de la luz se mide en longitudes de onda, concretamente en nanómetros (nm). La visión fotópica (línea negra) tiene un pico de 555 nm, mientras que el pico de la visión escotópica (línea verde) es de 498 nm. La respuesta mesópica es una combinación de las dos, con un pico de 507 nm.

En la Figura 3, la comparación de la respuesta visual incluye la eficacia relativa expresada en lm/W. Indica que la eficacia visual relativa es mucho mayor en la región escotópica/mesópica que en la visión fotópica. En consecuencia, la energía necesaria para generar un rendimiento visual equivalente disminuye con el descenso de los niveles de iluminancia. Se trata de un efecto natural necesario para sostener la visión humana en los niveles muy bajos de iluminancia experimentados durante la noche, con flexibilidad para tolerar las condiciones de iluminancia muy altas experimentadas a plena luz solar. En aplicaciones de baja luminosidad, el aprovechamiento de este efecto presenta una oportunidad para mejorar la eficiencia visual mediante el uso de fuentes que produzcan una DEP muy parecida a estas regiones de la respuesta visual.

Dado que la respuesta visual humana a la DEP de una fuente luminosa es alineal e irregular⁽³⁾, la eficiencia de una fuente luminosa como productora de una respuesta visual fuerte (agudeza) depende de la proximidad de la emisión DEP de una fuente luminosa a la respuesta visual humana, en los niveles de iluminancia suministrados. Si la emisión de la fuente luminosa (DEP) no se corresponde con la DEP de la respuesta visual en el nivel de iluminancia suministrado, el rendimiento visual disminuirá. Cuanto mayor sea la discrepancia, tanto menor será el rendimiento visual obtenido.

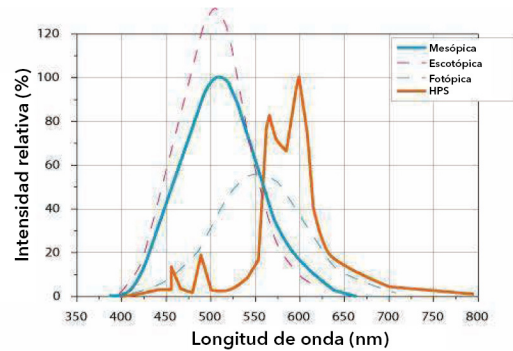


Figura 4 – Comparación del HPS con la respuesta mesópica

En aplicaciones de baja luminosidad (por debajo del dominio fotópico), la DEP del sodio de alta presión presenta una discrepancia sustancial con la respuesta visual mesópica, y un error todavía mayor en la región escotópica. El resultado es una agudeza visual deficiente, que adopta la forma de una percepción real de la luz solo parcial y que necesita un aumento sustancial de los niveles de iluminancia para activar la respuesta escotópica.

La única estrategia disponible para superar la pérdida de rendimiento visual por discrepancia de la DEP entre la respuesta visual y la emisión de la fuente luminosa consiste en aumentar los niveles de iluminancia reales, a fin de compensarla. Por ejemplo, debido a la discrepancia de la DEP del sodio de alta presión (Figura 4), se necesita un aumento sustancial del nivel de iluminación para lograr un rendimiento visual equivalente. Un enfoque más productivo es el uso de fuentes luminosas que coincidan más con la respuesta visual y la soporten mejor. La Figura 5 muestra la correspondencia de las fuentes de LED con la respuesta visual mesópica.

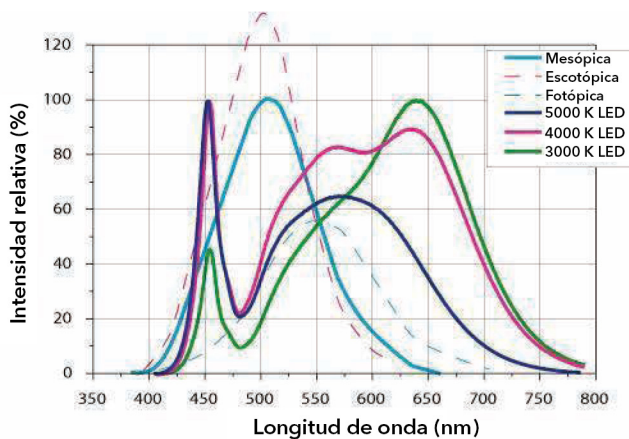


Figura 5 – Comparación de LED con la respuesta mesópica

Las fuentes luminosas de LED mejoran la correspondencia entre la visión mesópica y la producción de DEP de las fuentes luminosas. Pese a no lograr una correspondencia perfecta, lo cierto es que estas fuentes mejoran sustancialmente los resultados del sodio de alta presión.

La optimización del rendimiento visual en la región de la respuesta mesópica empieza por la selección de fuentes luminosas con un suministro de DEP muy ajustado a esa región. Además de esta respuesta fisiológica, el efecto Purkinje⁽⁴⁾, o adaptación a la oscuridad, indica que los observadores responden positivamente a la luz azul-verdosa en niveles de iluminancia muy bajos, y a los tonos amarillo-verdosos en entornos de iluminancia alta. Aunque, en general, la visión mesópica es la que más influye en condiciones de baja luminosidad, y la visión fotópica es la más activa en espacios muy iluminados, las dos suelen darse en entornos iluminados, creando una percepción alineal de la luz entre espacios muy iluminados y espacios poco iluminados.

Establecimiento del rendimiento visual equivalente

Para cuantificar las diferencias del rendimiento entre fuentes luminosas para la iluminancia mesópica, debe idearse un método que considere el rendimiento luminoso mesópico de un producto dentro de los cálculos de iluminancia normalizados que se basen en resultados fotópicos. Dicho método es necesario para comprender el rendimiento de una fuente luminosa que produce un resultado determinado, en aplicaciones a nivel mesópico. Sin él, la discrepancia de la potencia espectral producida por una fuente (por ejemplo, el sodio de alta presión) no puede evaluarse con exactitud respecto a otras fuentes más adecuadas. Además, en niveles de baja luminosidad, es imprescindible considerar la disponibilidad de luz visible para el ojo humano, en cuanto a la luminancia reflejada,

en lugar de tan solo la iluminancia bruta proyectada sobre superficies receptoras.

Para evaluar el efecto de un sistema de iluminación sobre la percepción visual en condiciones de baja luminosidad, es necesario corregir la información fotópica normal. En este caso, la luminancia (luz reflejada) es el valor más decisivo, ya que tiene en cuenta las propiedades reflectantes de la superficie receptora en niveles de la región mesópica (<3 cd/m²). A tal fin, la norma TM12-12 de la IES contiene instrucciones detalladas y cálculos para determinar los factores de luminancia efectiva (FLE). Dichos factores se definen mediante la fórmula siguiente:

$$FLE = \text{Luminancia mesópica} \div \text{Luminancia fotópica}$$

Téngase en cuenta que el FLE se basa en la luminancia mínima de un escenario, la cual toma en consideración la adaptación del observador a la luz que reflejan las superficies de la zona iluminada.

Antes de aplicar un FLE, es preciso determinar del siguiente modo la luminancia procedente de una superficie receptora determinada:

$$\text{Luminancia (cd/m}^2\text{)} = (\rho \text{ (reflectancia de la superficie)} \div \pi) \times E \text{ (iluminancia de proyecto en lux)}$$

Por ejemplo, con una luminancia de proyecto de 28 lux, proyectada sobre una superficie de hormigón que tenga una reflectancia del 15 %, se obtiene el valor de luminancia de:

Utilización de lux para la iluminancia en el cálculo de la luminancia de superficies:

$$(0,15 \div 3,14) \times 28 = 1,338 \text{ (cd/m}^2\text{)}$$

Partiendo de los valores de luminancia resultantes, el FLE (Tabla 2) puede determinarse sobre la base de la relación E/F de un producto específico (Tabla 1).

Tabla 1.0 – Relaciones E/F aproximadas para diversas fuentes

Valores correspondientes a varios productos de muestra. Si se desea utilizar valores reales en la aplicación, debe obtenerse información de la relación E/F correspondiente al producto específico considerado, bien mediante cálculo de los datos de la DEP real (obtenidos con un medidor de la iluminancia) o tomándola de datos de pruebas de laboratorio independientes facilitados por el fabricante de la luminaria.

Fuente	Relación E/F
HPS (2100 K)	0,6
PSMH (4300 K)	1,5
3000 K LED	1,4
4000 K LED	1,7
5000 K LED	2,0

Tabla 2.0 – Resumen de multiplicadores del FLE para diversas relaciones E/F

Estos multiplicadores se han extraído de la norma TM12-12, que contiene datos de mayor fidelidad, y de procedimientos de cálculo para el establecimiento de cada valor. Los datos facilitados en esta tabla y aplicados según la norma TM12-12 dependen de la obtención de información exacta sobre las relaciones E/F de los productos en evaluación. Téngase en cuenta que el valor mínimo de la luminancia del proyecto es el mínimo establecido para el proyecto, que deberá aplicarse a todos los cálculos dentro de la aplicación, independientemente del resultado real de la luminancia punto por punto.

Relación E/F	Valor mínimo de luminancia del proyecto en cd/m ²					
	0,3	0,5	0,7	1	2	3
0,60	0,9095	0,9304	0,9428	0,9550	0,9762	0,9872
1,40	1,0834	1,0647	1,0534	1,0422	1,0226	1,0121
1,50	1,1033	1,0802	1,0663	1,0524	1,028	1,0151
1,70	1,1422	1,1106	1,0914	1,0724	1,0387	1,0208
2,00	1,1984	1,1545	1,1279	1,1013	1,0543	1,0293

La aplicación del FLE al valor de luminancia obtenido de los valores de iluminancia fotópica normal calculados permite comprender el efecto visual real resultante en la región mesópica para el observador.

En un ejemplo de aplicación con una iluminancia media de 28 lux, proyectada sobre una superficie pavimentada con una reflectancia del 15 %, el valor de luminancia resultante es 1,338 cd/m². Suponiendo una fuente luminosa con una relación E/F (escotópica/fotópica) de 1,0, este valor sigue siendo 1,338 cd/m². No obstante, si las fuentes

tienen relaciones E/F diferentes, su valor FLE resultante aplicado revela un rendimiento visual relativo más exacto al observador. Para ello, antes debe establecerse una luminancia de proyecto mínima. Esta puede establecerse partiendo de un nivel de lux mínimo previsto y de una determinada reflectancia de la superficie. Por ejemplo, en un nivel mínimo de 15 lux, el valor de luminancia mínimo puede establecerse del modo siguiente:

$$(0,15 \div 3,14) \times 15 = 0,717 \text{ (cd/m}^2\text{)}$$

El uso de este valor de luminancia mínimo permite determinar el FLE con los datos de la Tabla 2.0. En el ejemplo siguiente, una fuente de sodio de alta presión, con una relación E/F de 0,6 y un FLE de 0,9428 (luminancia mínima de 0,7 cd/m²), produce una luminancia visual efectiva que se percibiría como 1,261 cd/m², según se muestra a continuación:

Utilización de lux para la iluminancia en el cálculo de la luminancia del FLE:

$$(0,15 \div 3,14) \times 28 \times 0,9428 = \text{FLE } 1,261 \text{ (cd/m}^2\text{)}$$

A efectos comparativos, un LED de 5000 K con una relación E/F de 2,0, que produce un FLE de 1,1279, suministra una luminancia percibida equivalente de 1,509. Esto supone una mejora de la luminancia percibida visualmente del 20 % respecto al producto de HPS calculado con el mismo nivel de iluminancia fotópica de 28 lux. La comparación de múltiples fuentes luminosas y de su impacto en el rendimiento visual puede efectuarse mediante múltiples cálculos que incluyan datos fotométricos adecuados y factores de pérdida del flujo luminoso, como se muestra en la Tabla 3.0.

Tabla 3.0 – Energía equivalente y rendimiento visual efectivo mediante la corrección del factor de luminancia efectiva (FLE) Comparación de luminarias montadas a 6 m (20 pies) del suelo con un factor de pérdida del flujo luminoso (FPFL) de 0,75 y una luminancia con FLE mínimo supuesto de 0,7 cd/m²

Esta tabla presenta la diferencia de la percepción visual mesópica basada en la luminancia FLE, utilizando las relaciones E/F indicadas en la Tabla 1.0 y los factores FLE de la Tabla 2.0.

Fuente	Relación E/F de la fuente	FLE (TM12)	Lúmenes de salida del equipo	W del sistema	Eficacia (Lm/W)	Dif. energía	Iluminancia directamente debajo de la luminaria (lux)	Luminancia FLE calculada (cd/m ²)	Dif.
HPS 100 W Ref. KPCL1075MT	0,60	0,9428	6441	130	50	Ref.	28,78	1,30	Base
PSMH 100 W Ref. KPCH1075MT	1,50	1,0633	6408	129	50	-0 %	28,28	1,44	+11 %
3,000 K LED Ref. MLLED3WD5BU	1,40	1,0534	3839	38	101	-68 %	28,13	1,42	+9 %
4,000 K LED Ref. MLLED3ND5BU	1,70	1,0914	3998	38	105	-68 %	27,53	1,44	+11 %
5,000 K LED Ref. MLLED3CD5BU	2,00	1,1279	4258	38	112	-68 %	27,75	1,50	+15 %

Las comparaciones de la Tabla 3.0 muestran que es posible reducir el consumo energético y aumentar al mismo tiempo la luminancia utilizable. Los cambios de la CCT y de la potencia espectral de las fuentes luminosas mejoran la eficiencia visual. En los ejemplos que se muestran, donde el rendimiento lumínico del HPS (6441) parece indicar una sustancial diferencia por encima del LED de 5000 K (4258), la diferencia real obtenida, debido a la comparación de la luminancia del FLE, es la contraria, porque el producto LED blanco genera una mejora de luminancia percibida del 15 %. El LED blanco neutro (4000 K) produce la misma luminancia efectiva que el halogenuro metálico con impulso de arranque (PSMH) de 100 W, pero consume un 68 % menos de energía.

En aplicaciones donde la visión fotópica tiene un papel más importante, las recomendaciones contenidas en la norma TM-24-13 de la IES se aplican a los niveles de iluminancia generados por el sistema de iluminación. Mientras que la norma TM12-12 se basa en la DEP de fuentes luminosas dentro de la región mesópica y se centra en la luminancia emitida (reflejada) por las superficies como objetivo determinante de la equivalencia, la TM24-13 se basa en la relación E/F para establecer un factor de eficiencia visual equivalente (EVE) que se aplica a la iluminancia prevista. Los resultados son similares, pero con diferencias. La norma TM-24-13 también considera los efectos espectrales en la acomodación ocular (la respuesta del iris a la luminosidad) que mejoran aún más la evaluación del rendimiento de las fuentes luminosas. A continuación se ofrece un resumen de las mismas fuentes comparadas en la Tabla 3.0, pero utilizando los factores EVE de la norma TM-24, en lugar de los factores FLE:

Tabla 4.0 – Resumen de los multiplicadores EVE de la norma TM24 para diversas relaciones E/F

Estos multiplicadores se han extraído de la norma TM24-13 de la IES para las relaciones E/F de los ejemplos de fuentes utilizados en el presente estudio.

Relación E/F	Factor EVE
0,60	1,97
1,40	1,00
1,50	0,95
1,70	0,86
2,00	0,75

Utilización de lux para la iluminancia en el cálculo de la iluminancia comparable corregida mediante factores EVE:

$$\text{Iluminancia} \div \text{Factor EVE} = \text{Iluminancia EVE calculada}$$

El propósito de las recomendaciones de la norma TM24-13 es la aplicación de factores correctores para reducir la potencia aplicada de la luminaria y lograr un resultado visual deseado, mediante el ajuste de la CCT de las fuentes luminosas utilizadas. A los efectos comparativos mostrados en la Tabla 5.0, el factor EVE se aplica a la inversa para producir una comparación compatible con los resultados de la Tabla 3.0, utilizando las mismas luminarias del ejemplo y los mismos multiplicadores del FLE.

Tabla 5.0 – Energía equivalente y rendimiento visual efectivo mediante la corrección de la eficiencia visual equivalente (EVE) Comparación de luminarias montadas a 6 m (20 pies) del suelo con un factor de pérdida del flujo luminoso (FPFL) de 0,75

Esta comparación de fuentes luminosas presenta la diferencia del rendimiento visual basada en la iluminancia EVE, utilizando las relaciones E/F indicadas en la Tabla 1.0 y los factores EVE de la Tabla 4.0. Obsérvese que los resultados EVE se refieren a la iluminancia, que es muy diferente de la luminancia utilizada en los cálculos de luminancia de la Tabla 3.0.

Fuente	Relación E/F de la fuente	EVE (TM24)	Lúmenes de salida del equipo	W del sistema	Eficacia (Lm/W)	Dif. energía	Iluminancia directamente debajo de la luminaria (lux)	Iluminancia EVE calculada (lux)	Dif.
HPS 100 W Ref. KPCL1075MT	0,60	1,97	6441	130	50	Ref.	28,78	14,61	Base
PSMH 100 W Ref. KPCH1075MT	1,50	1,00	6408	129	50	-0 %	28,28	28,28	+94 %
3,000 K LED Ref. MLLED3WD5BU	1,40	0,95	3839	38	101	-68 %	28,13	29,61	+102 %
4,000 K LED Ref. MLLED3ND5BU	1,70	0,86	3998	38	105	-68 %	27,53	32,01	+119 %
5,000 K LED Ref. MLLED3CD5BU	2,00	0,75	4258	38	112	-68 %	27,75	37,00	+153 %

Estos resultados muestran claramente que las fuentes de luz blanca producen la percepción de una mayor iluminancia efectiva, superior a los resultados obtenidos en la luminancia corregida del FLE. Esta comparación presenta los resultados de la aplicación de multiplicadores para incluir factores de rendimiento visual, basados en la relación E/F de la fuente luminosa, a fin de predecir con mayor exactitud la percepción visual de la iluminancia y la luminancia. Lo anterior se refiere tanto a las aplicaciones fotópicas (TM24) como a las mesópicas (TM12). En ambos casos, las fuentes luminosas con espectros más completos y CCT superiores generan percepciones y rendimientos visuales sustancialmente más altos. También en ambos casos, los productos LED generan mejoras del rendimiento visual efectivo con un ahorro energético sustancial respecto a las fuentes HID, e incluso respecto a las fuentes de halogenuro metálico (MH).

En la aplicación práctica, la percepción y el rendimiento visuales incluyen una combinación de factores de rendimiento visual mesópico y fotópico que dependen de los niveles de iluminancia, las propiedades reflectantes de las superficies, el trabajo a destajo requerido y la tecnología de iluminación aplicada. De ahí la necesidad de considerar tanto los factores visuales fotópicos como los mesópicos al comparar fuentes luminosas con distribuciones espectrales de potencia dispares (CCT y contenido espectral incluidos). Ninguno de los dos representa una respuesta única en la predicción del rendimiento visual.

En la observación directa sobre el terreno, el aspecto de las fuentes luminosas y las zonas muy iluminadas probablemente acusarán los efectos presentados en la Tabla 5.0, donde las fuentes luminosas con valores de CCT más altos aparecerán sustancialmente más iluminadas que las fuentes con distribuciones espectrales truncadas y valores de CCT bajos, como es el caso del HPS. Esto puede dar lugar a situaciones donde las luminarias con un producto de rendimiento lumínico bruto más bajo generan mejoras sustanciales en cuanto a la luminosidad visual. Al observar superficies de baja luminancia, debido a una iluminancia reducida o a sus limitadas cualidades reflectantes, la diferencia entre las fuentes con CCT más altas y las de valores de CCT bajos también favorecerá a las fuentes con CCT más altas o con potencia espectral más completa, como se aprecia en la Tabla 3.0.

Dinámica y efectos fotométricos

Mientras que los resultados de la Tabla 3.0 indican con claridad las diferencias en la luminancia percibida visualmente entre fuentes basadas en tecnología de fuentes luminosas, los resultados reales sobre el terreno presentarán diferencias visuales aún mayores debido a las diferencias fotométricas entre sistemas ópticos alimentados por LED y los que utilizan lámparas convencionales.

El efecto del iris que responde a la iluminancia, o a la luminancia directa dentro del entorno visual, es un problema complejo. El resplandor o la luminosidad procedente de fuentes luminosas visibles puede hacer que se cierre el iris, reduciendo con ello la iluminancia y la visibilidad en el campo visual, concretamente en zonas de sombra o en espacios con iluminación indirecta.

La selección de la distribución espectral de potencia de la fuente luminosa, combinada con el control de la luminosidad y el resplandor mediante la limitación de la distribución en gran ángulo, son consideraciones imprescindibles para el diseño de sistemas de iluminación. Este factor adquiere aún más peso cuando los niveles de iluminancia son muy bajos, como sucede con los utilizados en diseños de iluminación exterior. Dado que la visión mesópica incluye generalmente la plena dilatación del iris para aceptar toda la luz disponible, el impacto del resplandor, causante del cierre del iris, combinado con la creación por la fuente de una energía luminosa suficiente para desplazar la respuesta visual hacia la región fotópica, crea un efecto cegador que borra la visión mediante una reducción sustancial de la percepción de la luminosidad en el entorno iluminado^(1, 5).

La estrategia más eficaz para aplicaciones de baja luminosidad consiste en buscar diseños con el campo iluminado más uniforme posible, utilizando para ello ópticas que limiten la emisión luminosa en gran ángulo vertical. También se recomienda mantener una relación entre media y mínima de 3:1 o menos⁽⁶⁾ para producir la mínima reacción adaptativa y de velado posible en condiciones visuales mesópicas.

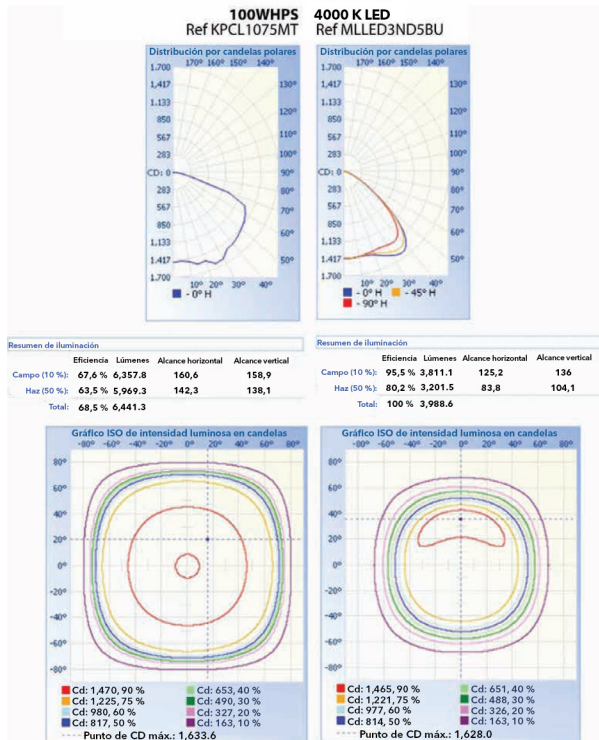


Figura 6 – Comparación del rendimiento óptico HID a LED de la luminaria

Un factor importante en la selección de luminarias con diferentes tecnologías de fuente (véase la Figura 5) y el efecto de las mismas en los esquemas de distribución óptica. Las definiciones fotométricas establecen el ángulo de haz como el ángulo en el cual la energía emitida alcanza el 50 % de la luminancia máxima en candelas, y la radiancia de campo como el 10 % del máximo. En general, cuanto más luz distribuya un producto dentro de su diagrama de haz, tanto mayor será su eficacia en la producción de iluminación efectiva sobre las superficies receptoras. Una mayor distribución de energía en los ángulos de campo circundantes aumenta la posibilidad de resplandores objetables y desperdicia energía al iluminar superficies circundantes por encima y fuera de la zona receptora designada.

En la comparación de la Figura 6, ambos productos comparten el mismo pico de ~1630 candelas, si bien la dispersión de 146 x 138° (NEMA 7x7) de la luminaria HID es más amplia que la de 84 x 104° (NEMA 6x7) del producto LED. El producto LED distribuye un 80,2 % de su energía dentro de su haz (50 % del pico de cd), en tanto que el producto HID distribuye un 63,5 % dentro de su haz. En la aplicación sobre el terreno, es posible que el producto de HPS parezca abarcar una zona mayor que el de LED, porque

emite más energía en grandes ángulos fuera de la distribución principal del haz. El producto de HPS produce un criterio de separación* de 1,58, mientras que en el producto de LED es de 1,68. En consecuencia, el producto de LED puede aplicarse con una separación de luminaria más amplia, y la misma iluminancia horizontal a nivel de la tarea. El producto de HID genera menos uniformidad, así como iluminancia vertical más alta, percibida como un aumento en el aspecto de la luminosidad, que también puede ocasionar resplandor.

Las tecnologías de HID tienden a producir una mayor iluminancia de campo circundante incontrolada. Los productos de LED con esquemas de distribución óptica similares producen un esquema de haz más uniforme con menos iluminancia de campo periférico incontrolada. Debido a esta diferencia, puede ser necesario seleccionar un producto de LED con un diagrama de haz más amplio que el de una luminaria de HID, para producir un aspecto de luminosidad similar en el entorno aplicado. La posible necesidad de esta solución para generar luminancia o iluminancia de tarea efectiva depende de los objetivos fijados para el entorno propiamente dicho.

Debido a estos factores y a otras sutiles diferencias que surgen al comparar el rendimiento aplicado de la luminaria cuando se utilizan tecnologías de fuente luminosa dispares, es necesario recurrir a un programa informático de simulación que utilice datos reales de pruebas fotométricas de luminarias para generar una evaluación exacta de los niveles de iluminancia y luminancia obtenidos. No obstante, es importante observar que la mayoría de los programas informáticos de proyecto generan resultados calculados que se basan en la iluminancia fotópica, porque esto es lo que producen los datos fotométricos. Después, será preciso calibrar estos resultados para incluir variables del FLE en la luminancia resultante, mediante los métodos indicados en las Tablas 2 y 3, a fin de establecer el rendimiento del sistema y los valores de luminancia efectivos.

*El **criterio de separación** es una característica de la luminaria obtenida de la distribución del componente directo en el plano de trabajo. Los criterios de separación de una luminaria son un cálculo de la relación separación-altura de montaje necesaria para que una luminaria produzca iluminancia uniforme en un plano de trabajo desde un sistema de luminarias.

En la Figura 7, ambas luminarias producen el mismo rendimiento de ~4000 lúmenes. (El LED nº 2 se toma de la Figura 5.) Obsérvese que ambos productos comparten una dispersión similar en los ángulos verticales y horizontales (NEMA 7x6; la inversión de los ángulos horizontales y verticales está incrustada en los archivos fotométricos y no tiene nada que ver con esta comparación.) El LED 1 distribuye un 79,2 % de su energía dentro de su haz (50 % del pico de cd), en tanto que el LED 2 distribuye un poco más del 80,2 %. Sin embargo, el LED 1 genera más energía directamente debajo de la luminaria, con un pico de 1758 candelas a 20°, mientras que el LED 2 produce un pico de 1628 a 35°. El resultado sobre el terreno es que el LED 1 produce más luz bajo cada luminaria, mientras que el LED 2 genera una luz más uniforme distribuida sobre la zona iluminada con menos puntos calientes cuando se combina con otras luminarias integradas en un diseño de cuadrícula. Esto se refleja en el criterio de separación, que en el LED 1 es de 1,40 y en el LED 2 de 1,68, lo cual indica que produce mayor uniformidad en distancias de separación de luminarias más amplias.

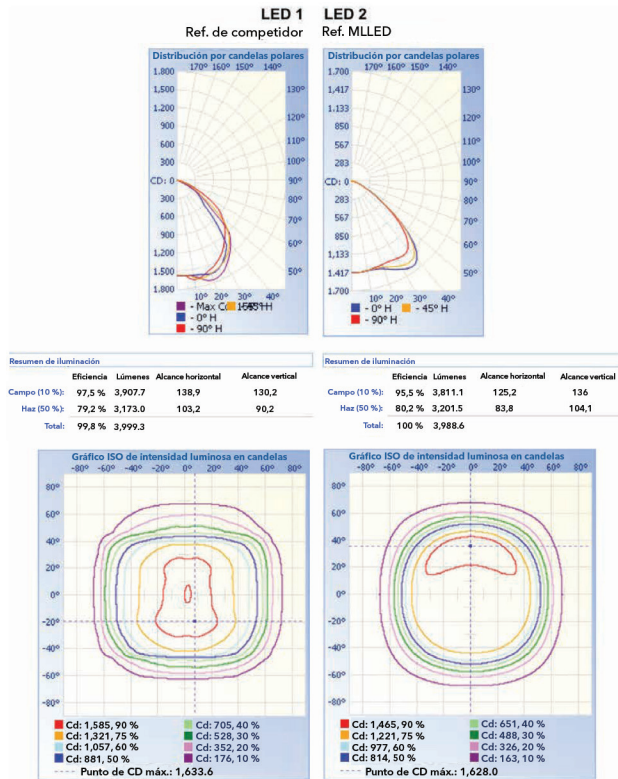


Figura 7 – Comparación del rendimiento óptico LED a LED de la luminaria

Independientemente de los términos descriptivos del rendimiento de la luminaria, los enfoques del diseño óptico producirán diferencias entre luminarias que compartan la misma tecnología de fuente luminosa. De ahí la imposibilidad de suponer que cualquier luminaria, sin tener en cuenta la tecnología de fuente luminosa empleada, es idéntica a otra, basándose en generalizaciones del ángulo de haz o del tipo de haz NEMA. Por esta razón, el único enfoque fiable para evaluar y seleccionar luminarias destinadas a una aplicación específica es recopilar datos fotométricos del producto, incorporados mediante simulación informática a la zona de aplicación prevista.

Problemas de la medición sobre el terreno

Todas las pruebas y los informes fotométricos, incluidos los niveles de rendimiento expresados en Pies-candela o lux, se basan en la iluminancia fotópica. Asimismo, todos los fotómetros utilizados en mediciones sobre el terreno se calibran para adaptarse a la curva de respuesta visual fotópica de los humanos (se muestra en la Figura 3), que no concuerda con la respuesta visual mesópica. Las mediciones obtenidas no reflejan con exactitud la iluminancia mesópica por dos razones: 1) la respuesta visual mesópica es más sensible y crea una luminosidad percibida más alta que se muestra en las lecturas de fotómetro fotópicas; y 2) los fotómetros calibrados para la medición fotópica no reflejan fielmente ninguna fuente luminosa con energía espectral diseñada para mejorar la respuesta visual mesópica. De ahí que cualquier sistema de iluminación optimizado para la visión mesópica produzca mediciones sobre el terreno desiguales con fotómetros calibrados para la respuesta fotópica. Desgraciadamente, excepto en los laboratorios, escasean los fotómetros comercializados específicamente para medir la iluminancia mesópica.

El enfoque necesario para obtener respuestas de iluminancia visual más exactas es la aplicación de multiplicadores de la relación escotópica/fotópica (E/F) a lecturas obtenidas con fotómetros fotópicos normales. En el mercado hay fotómetros modernos que generan las dos variables necesarias, la iluminancia fotópica y la relación E/F (que es una función de la potencia espectral de la fuente luminosa empleada).

Por lo tanto, estos dos valores podrán utilizarse para establecer el rendimiento de un sistema de iluminación en la región mesópica. A continuación, esta relación podrá aplicarse como multiplicador al valor fotópico medido que se haya obtenido, a fin de lograr una indicación más exacta del rendimiento mesópico. Los sistemas de iluminación que generan la máxima ventaja en la visión mesópica producen relaciones E/F altas.

Tabla 6.0 – Aplicación de la relación E/F a resultados del medidor fotópico

Multiplicando las lecturas del medidor fotópico por la relación E/F captada por la misma fuente luminosa se obtiene la iluminancia mesópica que recibe una superficie. Obsérvese que solo se obtiene un indicador de posibles diferencias de rendimiento de las fuentes luminosas basadas en generalidades de la temperatura de color correlacionada (CCT). Evaluaciones más exactas de las lecturas medidas deberían incluir la aplicación de los factores FLE y EVE descritos en las Tablas 3.0 y 5.0, en lo concerniente a la iluminancia, así como la luminancia y los niveles esbozados.

Fuente	Lux fotópicos (lectura del medidor)	Relación E/F (Tabla 2.0)	Lux mesópicos calculados
Sodio de alta presión (HPS)	14,0	0,6	8,4
Halogenuros metálicos (4300 K)	14,0	1,5	21,0
3000 K LED	14,0	1,4	19,6
4000 K LED	14,0	1,7	23,8
5000 K LED	14,0	2,0	28,0

Además de las discrepancias de calibración entre la visión mesópica y la fotópica, las fuentes luminosas de LED producen distribuciones espectrales de potencia que difieren de las tecnologías de lámparas convencionales (como se aprecia en la Figura 3). Estas diferencias no afectan a la mayoría de los fotómetros digitales de calidad, que utilizan receptores semiconductores de silicio y calibraciones electrónicas.

No obstante, los fotómetros baratos, los antiguos que utilizan células fotoeléctricas de selenio con mediciones analógicas, y los que emplean algoritmos electrónicos obsoletos creados antes de la introducción de la tecnología LED, producen resultados de medición nada fiables y a menudo sumamente inexactos.

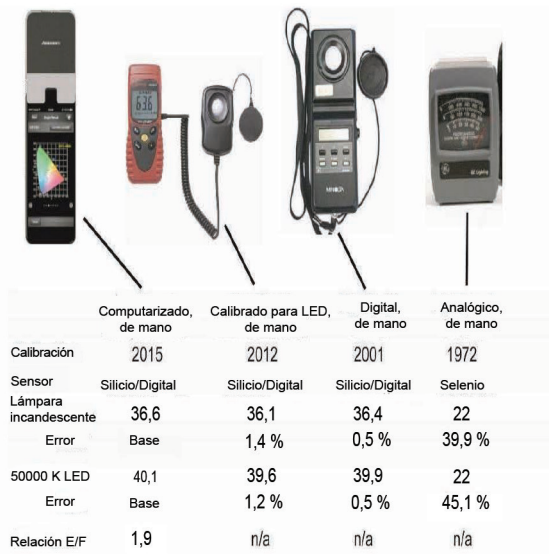


Figura 8 – Comparación de fotómetros de iluminancia y exactitud fotópica

Esta comparación de fotómetros comerciales corrientes muestra la repercusión de las diferencias tecnológicas en la fiabilidad de las mediciones y en los resultados basados en fuentes luminosas. El fotómetro computerizado utiliza programas informáticos para interpretar la información espectral obtenida de su elemento de célula fotoeléctrica. traducida a fin de producir una amplia gama de resultados que incluyen iluminancia, CCT y relación E/F. Es posible que los fotómetros de mano baratos ofrezcan una exactitud razonable, pero no recopilan los datos espectrales (la DEP) para calcular respuestas visuales más allá de visiones fotópicas básicas.

Por estas razones, la iluminación mesópica necesita una consideración especial no aplicable a las aplicaciones de iluminancia fotópica normales. Por desgracia, las normas que expresan los requisitos de la iluminancia máxima,

mínima y media se basan generalmente en valores fotópicos, independientemente de los niveles de iluminancia previstos. Esto significa que la verificación de los resultados obtenidos sobre el terreno se medirá con fotómetros normales ajustados para la visión fotópica, que no reflejará las consideraciones del diseño mesópico. La aceptación o el rechazo de la iluminancia mesópica durante las inspecciones del cumplimiento normativo dependerá de las particularidades de cada caso. De lo contrario, el resultado puede ser iluminación excesiva y energía desperdiciada.

Maximización de la eficiencia del sistema y del rendimiento visual

Para maximizar el uso y el rendimiento energéticos debe hacerse lo siguiente:

- (1) Conocer en qué punto del intervalo de rendimiento visual (mesópico o fotópico) se sitúa la iluminancia prevista.
- (2) Escoger fuentes con la máxima relación E/F disponible para que la aplicación aproveche la ventaja de un alto factor de luminancia efectiva (FLE) y/o de una alta eficiencia visual equivalente (EVE).
- (3) Escoger luminarias y fuentes con la máxima eficacia disponible.
- (4) Seleccionar la fotométrica de luminarias adecuada para alcanzar los máximos niveles posibles de uniformidad en todo el campo visual con la mínima posibilidad de resplandor.

Trabajo futuro requerido

Desgraciadamente, los códigos y normas que ignoran el efecto producido por los niveles de iluminancia o por las DEP en la percepción visual perjudican el rendimiento en entornos de baja luminosidad, donde la visión mesópica es un factor más decisivo. Esta ceguera de las normas no aísla a las fuentes decididamente insuficientes para la visión mesópica, como sucede con el sodio de alta presión. Esta desconexión da lugar a supuestos erróneos, aumentos del consumo energético y confusiones en la percepción de la luz observada en la aplicación.

Normas como los métodos recomendados de la Illuminating Engineering Society (IES) y la sección 7 del método recomendado 540 de la Industry Applications Society (API), junto con las reglamentaciones locales y regionales, no diferencian entre el rendimiento visual fotópico y el mesópico. El resultado es una desconexión métrica que induce a los diseñadores a seleccionar fuentes luminosas inadecuadas para el rendimiento visual (HPS), en tanto que la medición de los sistemas de iluminación aplicados se realiza con instrumentos que no sirven para la aplicación efectuada cuando se abordan entornos de baja luminosidad.

Para remediar esta situación es preciso enmendar las futuras versiones de códigos, reglamentaciones, métodos recomendados y normas de aplicación destinadas a la prescripción de valores de iluminancia y luminancia para aplicaciones de baja luminosidad inferiores a 50 lux (<5 Fc). Con la inclusión de la iluminancia mesópica, los valores de luminancia previstos y la composición de la DEP, las ventajas esbozadas en el presente estudio pueden aprovecharse por completo mediante la reducción del consumo energético en la aplicación de sistemas de iluminación y la generación de rendimientos visuales de gran calidad.

Conclusión

Los diseños y las aplicaciones que conceden una importancia decisiva a los factores del rendimiento humano, con todos los factores del rendimiento visual en la aplicación, mejoran sustancialmente el uso energético y el rendimiento visual humano, además de reducir los costes de explotación de los sistemas. La aplicación de fuentes luminosas más próximas a las respuestas visuales humanas en niveles de iluminancia bajos, sumada a la mayor eficiencia de las fuentes de LED, maximiza la eficiencia del resultado final obtenido. Además de brindar una oportunidad para aplicar estas mejoras de nuestra comprensión del tema con menores costes de explotación, la tecnología de los LED también ofrece opciones de CCT (color) que permiten adaptarse a emisiones controladas de luz azul, técnicas ópticas mejoradas para generar gran uniformidad y control de los efectos de luminosidad visual.

Referencias

- 1.) CIE. 2010. *Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance*. CIE Technical Report 191:2010. Vienna, Austria: Commission International de l'Eclairage.
- 2.) IES 2012. *Spectral Effects of Lighting on Visual Performance at Mesopic Lighting Levels*. IES TM-12-12. New York, NY: Illuminating Engineering Society of North America.
- 3.) IES 2013. *An Optional Method for Adjusting the Recommended Illuminance for Visually Demanding Tasks within IES Illuminance Categories P through Y Based on Light Source Spectrum*. IES TM-24-13. New York, NY: Illuminating Engineering Society of North America.
- 4.) Purkinje JE (1825). *Neue Beiträge zur Kenntniss des Sehens in Subjectiver Hinsicht*. Reimer : Berlin. pp. 109–110.
- 5.) 2004 Puel, et al. *Mesopic contrast sensitivity in the presence or absence of glare in a large driver population*. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* (2004) 242:755–761
- 6.) ASSIST 2011. *Recommendations for Evaluating Street and Roadway Luminaires*. Alliance of Solid State Illumination and Technologies. Troy NY.

**Estados Unidos
(Oficina central)**
Appleton™ Grp LLC
9377 W. Higgins Road
Rosemont, IL 60018
Estados Unidos
Tel. +1 800 621 1506

Canadá
EGS Electrical Group Canada Ltd.
99 Union Street
Elmira ON, N3B 3L7
Canadá
Tel. +1 888 765 2226

Europa
ATX SAS
Espace Industriel Nord
35, rue André Durouchez,
CS 98017
80084 Amiens Cedex 2, Francia
Tel. +33 3 2254 1390

Latinoamérica
EGS Comercializadora Mexico
S de RL de CV
Calle 10 N°145 Piso 3
Col. San Pedro de los Pinos
Del. Álvaro Obregon
Ciudad de México. 01180
Tel. +52 55 5809 5049

Oficina de ventas en Australia
Bayswater, Victoria
Tel. +61 3 9721 0348

Asia Pacífico
EGS Private Ltd.
Block 4008, Ang Mo Kio Ave 10,
#04-16 TechPlace 1,
Singapur 569625
Tel.: +65 6556 1100

El logotipo de Emerson es una marca comercial y marca de servicio de Emerson Electric Co. El logotipo Appleton™ es una marca comercial registrada de Appleton Grp LLC. © 2018 Emerson Electric Co. Todos los derechos reservados. Todas las demás marcas pertenecen a sus respectivos propietarios.

Oficina de ventas de Corea
Seúl
Tel. +82 2 3483 1555

**Oficina de ventas de Oriente
Próximo**
Dammam, Arabia Saudí
Tel. +966 13 510 3702

El contenido de esta publicación se presenta únicamente con fines informativos y, aunque se han realizado todos los esfuerzos posibles para asegurar su exactitud, no constituye una garantía, expresa o implícita, respecto a los productos o servicios descritos aquí, ni respecto a su uso o aplicación. Todas las ventas se rigen por nuestros términos y condiciones, que están disponibles si se solicitan. Nos reservamos el derecho de modificar o mejorar los diseños o las especificaciones de nuestros productos en cualquier momento y sin previo aviso.

Oficina de ventas de China
Shanghái
Tel. +86 21 3338 7000

Oficina de ventas de Chile
Las Condes
Tel. +56 2928 4819

Oficina de ventas de India
Chennai
Tel. +91 44 3919 7300