



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



# Tecnología led en luminarias viales

TESIS PRESENTADA A LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA  
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA POR

Sebastián Fernández Camacho

EN CUMPLIMIENTO PARCIAL DE LOS REQUERIMIENTOS  
PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
MAGISTER EN INGENIERÍA ELÉCTRICA.

## DIRECTOR DE TESIS

Juan Pablo Oliver ..... Universidad de la República

## TRIBUNAL

Rafael Canetti ..... Universidad de la República  
Juan Fabra ..... Universidad de la República  
Mario Vignolo ..... Universidad de la República

## DIRECTOR ACADÉMICO

Juan Pablo Oliver ..... Universidad de la República

Montevideo  
6 de mayo de 2015

*Tecnología led en luminarias viales*, Sebastián Fernández Camacho.

ISSN 1688-2806

Esta tesis fue preparada en L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X usando la clase iietesis (v1.1).

Contiene un total de 125 páginas.

Compilada el domingo 17 julio, 2016.

<http://iie.fing.edu.uy/>

# Agradecimientos

¿De qué vivis? no debe confundirse con la pregunta ¿de qué vivis económicamente?

La respuesta a la primera es nuestro motor, es lo que disfrutamos hacer, a lo que podríamos dedicar infinitas horas. Yo vivo de entender como funcionan las cosas, de arreglar, de diseñar algo y verlo funcionando.

Esa es mi motivación para abordar el tema leds como objeto de mi maestría.

Quiero agradecerle a Mariana, Facundo, Lorenzo, Jorge, Ester, Santiago, en fin toda mi familia, a mis socios y a mis compañeros de trabajos por permitirme hacer lo que quiero para vivir.

También agradezco a la ANII ya que gracias a su beca para estudios de maestría pude dedicar tiempo a trabajar en el tema y forzarme a tener una fecha límite de entrega.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

# Resumen

La tecnología led está asociada a eficiencia energética y larga vida útil. Estas dos características, la hacen especialmente atractiva para su uso en iluminación vial y de espacios públicos, donde los encargados de estas tareas deben afrontar grandes consumos de energía eléctrica y dar mantenimiento a miles de luminarias.

En este trabajo se analizan los factores que influyen en estas dos características, con el objetivo de comprender mejor una tecnología en pleno apogeo y evolución.

Se concluye que la ventaja de los leds con respecto a otras fuentes lumínicas no solo radica en su eficiencia al momento de convertir energía eléctrica en luz, sino en la libertad que otorgan para, dado un escenario, diseñar una luminaria que entregue la cantidad de luz necesaria con la distribución necesaria, logrando de esta forma un ahorro energético genuino.

Esta libertad es posible gracias a variables con las que se cuenta al momento de diseñar una luminaria: cantidad y tipo de leds, lentes, corriente, temperaturas de trabajo. Se logra en forma exitosa, llegar a un método que permite estimar el consumo y características fotométricas de una determinada combinación de estas variables.

También se desarrolla una herramienta software que implementa el método, permitiendo generar un archivo en formato estándar, con la información fotométrica y de consumo eléctrico del módulo led. Este archivo puede ser utilizado en herramientas comerciales de simulación, como el DIALux, para estimar su desempeño fotométrico, calculando iluminancia y uniformidades en un determinado escenario.

Se analiza el efecto de la distribución espectral de la radiación emitida por los leds, tanto en las mediciones fotométricas como en el proceso de visión. Se realizan experimentos que permitieron determinar que medidas de iluminancia a fuentes de luz led pueden tener errores de más de un 20 %, dependiendo de la calidad del equipo y la distribución espectral de la fuente.

Para el estudio del efecto en el proceso de visión, se recurre a la bibliografía actual y la postura de los organismos internacionales sobre el tema. Se concluye que en los próximos años, los efectos de la visión mesópica estarán cada vez mas presentes en las guías y recomendaciones generadas por estos organismos.

Por último, dado que las normas internacionales sirven para establecer estándares de calidad y formas de medición, que luego son utilizadas para evaluar el desempeño y eficiencia de las luminarias, se realiza un estudio del estado actual de las mismas para iluminación vial con tecnología led. Se selecciona un conjunto mínimo de ensayos que deben solicitarse al momento de evaluar una luminaria y se propone que el Instituto de Ingeniería Eléctrica pueda ofrecer un servicio de evaluación de

luminarias basados en esa selección.

A lo largo de esta tesis, se tuvo la oportunidad no solo de estudiar la aplicación de LEDs en la iluminación, sino que se construyeron luminarias y equipos, lo cual permite experimentar de primera mano con la flexibilidad de diseño que se cuenta y los cuidados que deben tenerse al construir luminarias LED. Estos son:

- prototipo de luminaria LED colgante para Ciudad Vieja de Montevideo.
- luminarias LED para estudiar el efecto de la luz en el crecimiento de las plantas. Estas luminarias no solo pueden variar la intensidad de la luz generada sino también la distribución espectral de la misma.
- luminarias LED para el salón de actos. Partiendo de la restricción de utilizar la ubicación actual de las luminarias, se diseñaron y fabricaron luminarias que logran disminuir el consumo aumentando en un orden de magnitud el nivel actual de luxes en el plano de trabajo.

# Tabla de contenidos

|   |            |
|---|------------|
| <b>Agradecimientos</b>  | <b>I</b>   |
| <b>Resumen</b>  | <b>III</b> |
| <b>1. Introducción</b>  | <b>1</b>   |
| 1.1. Características generales de una luminaria vial led . . . . .                                  | 3          |
| 1.2. Eficiencia energética . . . . .  | 3          |
| 1.2.1. Generar la luz necesaria y direccionarla eficientemente . . .                                | 3          |
| 1.2.2. La eficiencia energética se da por una suma de factores . . .                                | 5          |
| 1.2.3. Diseño de luminarias a medida . . . . .  | 6          |
| 1.2.4. Iluminar para nuestros ojos . . . . .  | 7          |
| 1.3. Vida útil . . . . .  | 9          |
| 1.4. Temperatura . . . . .  | 11         |
| 1.5. Normativa internacional . . . . .  | 11         |
| 1.6. Costos . . . . .   | 12         |
| 1.7. Estructura del documento . . . . .   | 12         |
| <b>2. Objetivos</b>   | <b>15</b>  |
| 2.1. Generales . . . . .  | 15         |
| 2.2. Particulares . . . . .   | 15         |
| 2.2.1. Diseño de luminarias a medida . . . . .  | 15         |
| 2.2.2. Medición de la luz . . . . .   | 15         |
| 2.2.3. Normativa internacional . . . . .  | 16         |
| <b>3. Diseño de luminarias a medida de un proyecto</b>  | <b>17</b>  |
| 3.1. Resumen . . . . .  | 17         |
| 3.2. Introducción . . . . .   | 17         |
| 3.2.1. Incidencia de la distribución de intensidades luminosas en el<br>ahorro energético . . . . . | 18         |
| 3.2.2. Diseño de una luminaria a medida de un proyecto . . . . .                                    | 20         |
| 3.2.3. Variables de diseño en luminarias led . . . . .  | 21         |
| 3.3. Estimación de desempeño de una luminaria led . . . . .   | 22         |
| 3.3.1. Procedimiento para estimar desempeño . . . . .   | 22         |
| 3.3.2. Detalles del procedimiento . . . . .   | 23         |
| 3.3.3. Implementación del procedimiento en una aplicación . . . . .                                 | 27         |

## Tabla de contenidos

|   |           |
|---|-----------|
| 3.3.4. Verificación de estimación con ensayo . . . . .                                      | 31        |
| 3.4. Conclusiones . . . . .   | 33        |
| 3.4.1. Sobre las posibilidades de diseño . . . . .  | 33        |
| 3.4.2. Sobre la herramienta . . . . .   | 33        |
| <b>4. Medición de luz</b>   | <b>37</b> |
| 4.1. Efectos de la distribución espectral en la medición de fuentes de luz led . . . . .    | 38        |
| 4.1.1. Introducción . . . . .   | 38        |
| 4.1.2. Metodología . . . . .  | 39        |
| 4.1.3. Resultados . . . . .   | 40        |
| 4.1.4. Conclusiones . . . . .   | 42        |
| 4.2. Efectos de la distribución espectral en la eficiencia . . . . .                        | 44        |
| 4.2.1. Introducción . . . . .   | 44        |
| 4.2.2. Metodología . . . . .  | 46        |
| 4.2.3. Resultados . . . . .   | 46        |
| 4.2.4. Conclusiones . . . . .   | 51        |
| <b>5. Normativa internacional</b>   | <b>53</b> |
| 5.1. Resumen . . . . .  | 53        |
| 5.2. Introducción . . . . .   | 53        |
| 5.3. Conjunto de normas IEC . . . . .   | 54        |
| 5.3.1. Normas para medir eficiencia . . . . .   | 56        |
| 5.3.2. Normas relacionadas con depreciación de flujo luminoso . . . . .                     | 58        |
| 5.4. Algunos estándares y normas norteamericanas . . . . .                                  | 58        |
| 5.4.1. Normas para medir eficiencia . . . . .   | 59        |
| 5.4.2. Normas relacionadas con depreciación de flujo luminoso . . . . .                     | 59        |
| 5.5. Conclusiones . . . . .   | 63        |
| 5.5.1. Sobre las normas IEC . . . . .   | 63        |
| 5.5.2. Sobre las normas norteamericanas . . . . .   | 65        |
| 5.5.3. Normas y ensayos más relevantes . . . . .  | 65        |
| 5.5.4. Una propuesta de servicio de evaluación de luminarias viales led en el IIE . . . . . | 65        |
| <b>6. Aplicaciones</b>  | <b>67</b> |
| 6.1. Luminaria colgante para Ciudad Vieja de Montevideo . . . . .                           | 67        |
| 6.1.1. Introducción . . . . .   | 67        |
| 6.1.2. Diseño implementado . . . . .  | 68        |
| 6.1.3. Resultados . . . . .   | 70        |
| 6.2. Luminarias para plataforma de fenotipado de plantas . . . . .                          | 71        |
| 6.2.1. Introducción . . . . .   | 71        |
| 6.2.2. Luminarias fabricadas . . . . .  | 72        |
| 6.3. Luminarias para el salón de actos . . . . .  | 74        |
| 6.3.1. Introducción . . . . .   | 74        |
| 6.3.2. Resultados esperados . . . . .   | 75        |



|  |            |
|--|------------|
| <b>7. Conclusiones</b>                                   | <b>79</b>  |
| 7.1. Trabajos a futuro . . . . .                         | 81         |
| <b>Apéndices</b>   | <b>83</b>  |
| <b>A. Aplicación para estimar desempeño de luminaria</b> | <b>83</b>  |
| A.1. Código fuente de la aplicación . . . . .            | 83         |
| A.1.1. Archivo sim_from_lies_main.py . . . . .           | 84         |
| A.1.2. Archivo sim_from_lies_script.py . . . . .         | 85         |
| A.1.3. Archivo ies_tools.py . . . . .                    | 87         |
| A.2. Acerca del estandar IES . . . . .                   | 92         |
| A.2.1. Formato . . . . .                                 | 93         |
| A.2.2. Ejemplo . . . . .                                 | 95         |
| <b>Referencias</b>                                       | <b>101</b> |
| <b>Glosario</b>  | <b>107</b> |
| <b>Índice de tablas</b>                                  | <b>109</b> |
| <b>Índice de figuras</b>                                 | <b>110</b> |

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

# Capítulo 1

## Introducción

En los años 90 los científicos japoneses Akasaki, Amano y Shuji inventaron el led azul [50, 58]. Este invento fue el que permitió la creación de los leds blancos de alto brillo revolucionando la forma en que iluminamos nuestra vida.

Sin lugar a dudas el led blanco es la fuente de luz del futuro. Si lo comparamos con otras tecnologías ya maduras (lámparas incandescentes, de descarga, fluorescente, etc.) en las que no hay demasiado margen para mejoras, el led se encuentra en plano apogeo y desarrollo, aún hay un largo camino para recorrer y mejorar su desempeño y eficiencia (ver figura 1.1 )

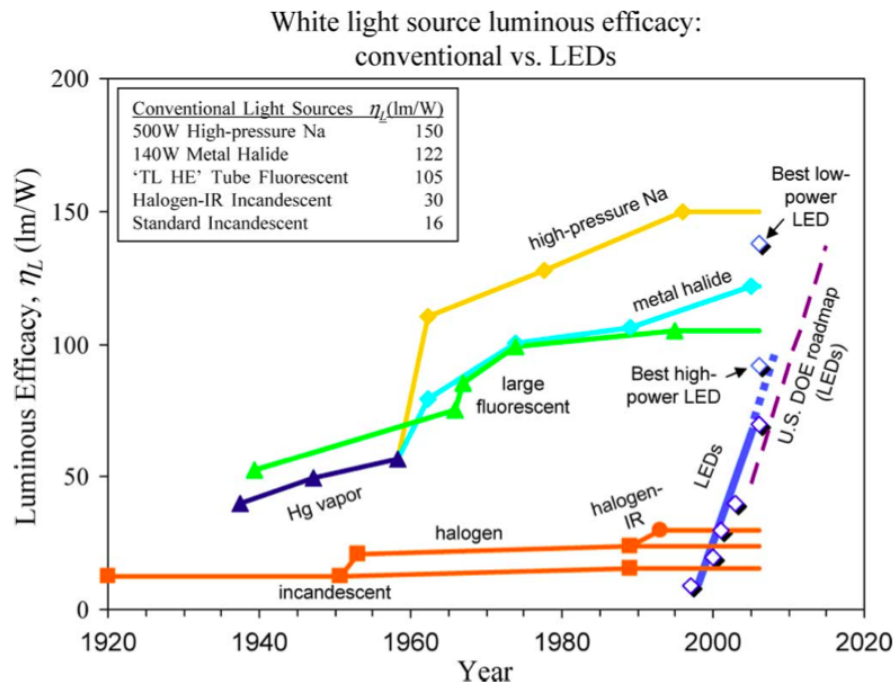


Figura 1.1: Eficiencia de led frente a otras fuentes de luz blanca. (Extraída de [43])

Pero el led no solo permite transformar energía eléctrica en luz de una forma

## Capítulo 1. Introducción

más eficiente en comparación con otras fuentes [43], sino que permite direccionarla en una forma más eficaz. Mediante la combinación adecuada de estas dos premisas: generar más luz con menos energía y colocarla donde realmente se necesita, es que puede lograrse un ahorro energético genuino y una mejor calidad de iluminación.

A medida que pasa el tiempo, una luminaria va perdiendo su capacidad de entregar luz, a este fenómeno es el que se lo denomina vida útil de una luminaria. Cuando la luminaria llega a un determinado porcentaje de la luz que entregaba inicialmente, debe de ser reemplazada. En el caso de los leds, esta depreciación de flujo luminoso con el paso del tiempo es menor comparada con otras fuentes, por lo que los tiempos de recambio serán mayores y se mantendrá una alta eficiencia por más tiempo. Además es prácticamente inmune a vibraciones ya que no cuenta con filamentos ni partes frágiles y se la pueda encender y apagar muchas veces sin que esto degrade su desempeño.

Estas características: eficiencia y vida útil, son las que se imponen en los discursos de venta, prensa e instancias de difusión. Pero muchas veces se utilizan luminarias con leds de potencia o fotometría no adecuada, como la que se muestra en la figura 1.2, redundando en ambientes con bajos niveles de iluminación [11];o se utilizan productos de mala calidad y mal diseñados que no son capaces de durar lo prometido [76].

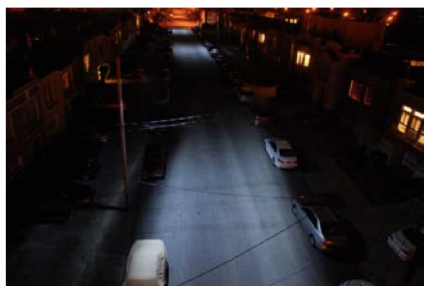


Figure 37: Overhead Photograph under LED B (38th Ave)

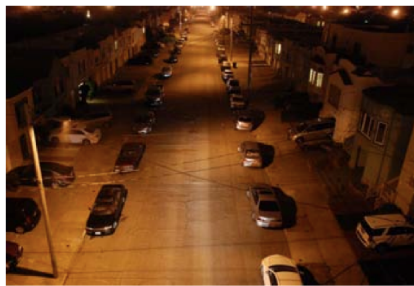


Figure 36: Base Case Overhead Photograph for LED B (38th Ave under HPS)

Figura 1.2: Luminarias led con distribución fotométrica no adecuada. (Extraído de [11])

El objetivo de esta tesis es comprender, analizar y desarrollar herramientas, que permitan un mejor aprovechamiento de la tecnología led de forma de lograr luminarias eficientes y duraderas.

El abanico de aplicaciones de la iluminación led es sumamente amplio: lámparas para uso doméstico, mercado automotriz, iluminación ornamental y artística, alumbrado público. En este último caso de uso y en particular en iluminación vial es donde se enfoca este trabajo, es allí donde las características de eficiencia y vida útil son más relevantes. A los efectos de ilustrar el problema, la ciudad de Montevideo cuenta con aproximadamente 82000 focos destinados a alumbrado público los cuales consumen más de 5760 MWh de energía eléctrica por mes [55]. En este contexto, soluciones que logran reducciones en la cantidad de horas destinadas a mantenimiento y mejoren los niveles de iluminación reduciendo el consumo tienen un gran impacto.

## 1.1. Características generales de una luminaria vial led

### 1.1. Características generales de una luminaria vial led

Antes de avanzar en el tema de estudio y objetivos, es necesario realizar una breve descripción de los elementos que componen una luminaria led. En la norma IEC 62504-2011 [29] puede encontrarse información más detallada.

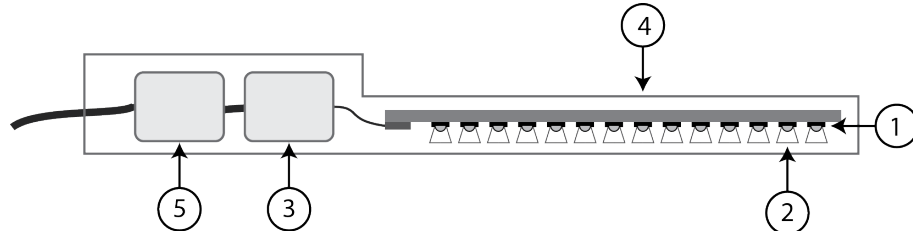


Figura 1.3: Esquema de una luminaria vial led

En la figura 1.3 puede verse un esquema de lo que compone una luminaria vial led:

1. leds blancos. Diferentes modelos varían en la eficiencia y temperatura de color de la luz emitida (cálida, neutral, fría)
2. lentes o reflectores. Estos son los encargados de modificar el patrón de emisión de luz de los leds para lograr la fotometría deseada.
3. fuente de poder. Alimenta los leds, ya sea entregando un voltaje constante o corriente constante.
4. carcasa. No solo protege los leds y la electrónica, sino que también es la encargada de disipar el calor generado por los mismos.
5. módulos de protección. Dependiendo de las características de la fuente de poder y el lugar donde se instale la luminaria, un módulo para protección contra transitorios eléctricos puede ser necesario.
6. módulos de control. Opcionalmente las luminarias pueden incorporar un módulo de control para comandarlos remotamente o modificar la cantidad de luz entregada de acuerdo a la hora del día o nivel de iluminación reinante.

## 1.2. Eficiencia energética

### 1.2.1. Generar la luz necesaria y direccionarla eficientemente

La evaluación de luminarias, desde el punto de vista de ahorro energético, no debe limitarse al análisis de cuántos lúmenes por Watt son capaces de entregar. Al momento de realizar un proyecto vial, lo que realmente importa son los niveles de iluminación que se puedan obtener en piso, por lo que la evaluación debe pasar por analizar cuántos Watts se necesitan para lograr el nivel de iluminación media (Emed) y uniformidad requerida.

## Capítulo 1. Introducción

Puede darse el caso de tener una luminaria con una gran eficiencia, pero una fotometría inadecuada para la instalación, por lo que para lograr los niveles de Emed requeridos, se necesita más potencia. Quizá una luminaria con menos eficiencia, pero con una fotometría más adecuada logra los niveles de Emed con un consumo eléctrico menor. (Ver figura 1.4)

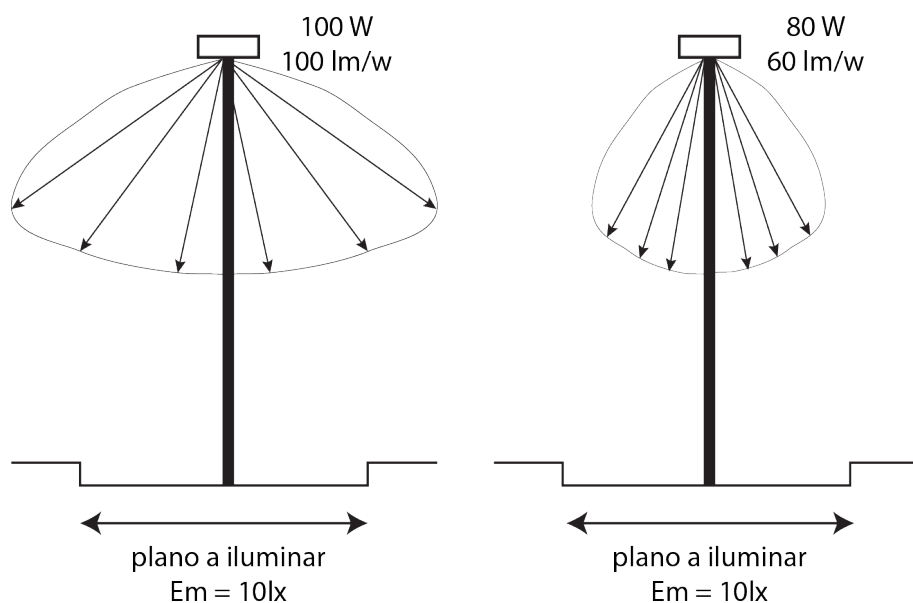


Figura 1.4: Pérdida de eficiencia por fotometría inadecuada

En una luminaria tradicional, la modificación de la distribución de luz se logra mediante un reflector, que direcciona la luz generada por una fuente puntual casi omnidireccional, hacia los puntos de interés. Ver figura 1.5(a). Este proceso genera pérdidas debido a reflexión, limita la forma de la luminaria ya que la fuente de luz es una sola y una vez que se llega al diseño de un reflector, este debe ser producido en grandes cantidades para ser rentable, debiendo de adaptar el proyecto de iluminación a las opciones de fotometría disponibles.



Figura 1.5: Distribución con: a) lámpara y reflector, b) led y lente

En cambio, en una luminaria led, la luz generada puede ser fácilmente direccionada utilizando lentes plásticos con una eficiencia de hasta un 94 % [46] (ver figura 1.5(b)). Estos lentes son de muy bajo costo de fabricación y, además de disponer

## 1.2. Eficiencia energética

en el mercado de un sinnúmero de fotometrías, es posible diseñarlos y fabricarlos a la medida del proyecto.

### 1.2.2. La eficiencia energética se da por una suma de factores

El ahorro que permiten las luminarias led, se da por una suma de factores, no solo porque la fuente de luz sea eficiente en el proceso de transformar energía eléctrica en luz.







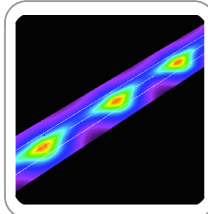
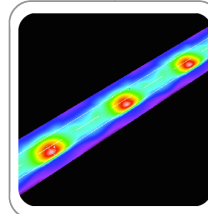
| lámpara<br>100W    | lámpara<br>70W  | Proyecto con<br>sodio alta presión  | Proyecto con<br>leds   | 24 leds<br>@700mA | 32 leds<br>@700mA |
|--------------------|-----------------|---|--|-------------------|-------------------|
| 100 W<br>10.000 lm | 70 W<br>5.300lm |    |    | 49 W<br>5.010 lm  | 65 W<br>6.680 lm  |
| 100 lm/w           | 76 lm/w         |   |  | 102 lm/w          | 102 lm/w          |
|                    |                 |   |   |                   |                   |
| 7100 lm<br>29%     | 3600 lm<br>32%  | Flujo luminaria<br>Perdidas   |  | 4350 lm<br>13%    | 5810 lm<br>13%    |
| 71 lm/w            | 51 lm/w         | Eficiencia<br>reflector/lente<br>y vidrio   |  | 89 lm/w           | 89 lm/w           |
|                    |                 |  |  |                   |                   |
| 90%                | 90%             | Eficiencia<br>equipo<br>auxiliar  |  | 95%               | 95%               |
| 64 lm/w            | 46 lm/w         | Eficiencia<br>luminaria   |  | 85lm/w            | 85lm/w            |
|                    |                 |  |  |                   |                   |
| 19 lx<br>0.38      | 9.8 lx<br>0.27  | Emed<br>Umed  |  | 14 lx<br>0.57     | 18 lx<br>0.57     |
| 0.17 lx/w          | 0.13 lx/w       | Eficiencia<br>proyecto  |  | 0.27 lx/w         | 0.27 lx/w         |

Figura 1.6: Comparación de eficiencia energética en proyecto vial utilizando lámparas de sodio y leds

En la figura 1.6 se analizan 4 alternativas para iluminar una calle barrial en Montevideo. Se comparan los desempeños y eficiencias que se logran con una luminaria Carandini [8], con lámparas de sodio de alta presión de 70W y 100W, y

## Capítulo 1. Introducción

una hipotética luminaria led, con 24 y 32 leds alimentados a 700mA.

El punto de partida, en cuanto a eficiencia, no difiere demasiado: 100 lm/w. Solo en el caso de la lámpara de sodio de 70W se da un rendimiento menor: 76 lm/w.

Estas lámparas y leds se instalan en una luminaria que además de protegerlos, modifica el patrón de emisión de luz de las fuentes, para adecuarlo al escenario donde se van a instalar. En el caso de las lámparas de sodio se utiliza un reflector y en el caso de los leds lentes. Aquí se ve la primera diferencia, mientras que en la luminaria de sodio se pierde un 30% del flujo de la lámpara, en los leds solo se pierde un 13%.

Las fuentes de luz se conectan a la red eléctrica a través de un equipo auxiliar, un balasto en caso del sodio, y una fuente de poder en caso de los leds. Si bien la diferencia de eficiencia de estas puede ser poca, del orden del 5%, aportan a aumentar la brecha entre la luminaria de sodio y la de led.

Finalmente debemos evaluar como impacta el flujo luminoso emitido en el objetivo final: iluminar la calzada logrando los valores de iluminancia media objetivo (Em mayor a 10lx), y de la forma más uniforme posible (Umed mayor a 0.3). Aquí también la luminaria led logra ventajas sobre la de sodio, ya que el uso de lentes permite un mejor control de la distribución de las intensidades luminosas, logrando direccionar más y mejor la luz hacia la calzada.

Podemos ver que con los leds se logra entre 1.5 y 2 veces más luxes por Watt, aunque se partió de de eficiencias equivalentes.

### 1.2.3. Diseño de luminarias a medida

En las luminarias tradicionales, las opciones de potencia se dan en pasos discretos: lámparas de 70W, 100W, 150W, etc. Esto hace que, como en el ejemplo anterior, en algunos casos se utilice más potencia de la necesaria y en otras de menos. En el caso de iluminación led se cuenta con más variables de ajuste, ya que modificando la cantidad de leds o la corriente que entrega la fuente de poder, es posible adecuar el desempeño de cada luminaria logrando el consumo óptimo para el nivel de iluminación deseado.

Es posible pensar en contar con una luminaria base a la que se le cambian las partes o se le ajusta la corriente de funcionamiento, para lograr iluminar escenarios tan disimiles como calles barriales, estacionamientos, exteriores de edificios, parques, fachadas, complejos de viviendas.

Esta libertad de diseño permite alcanzar de forma más eficiente el objetivo final, logrando los niveles de iluminancia requeridos con el menor consumo eléctrico posible. Pero el universo de leds y lentes es tan grande, que se hace necesario una metodología y herramientas, para lograr estimar y seleccionar la opción más apropiada para cada caso.



### 1.2.4. Iluminar para nuestros ojos

Para que se produzca el proceso de visión debe existir: 1) una fuente de luz, 2) un objeto observado que refleje la luz, 3) una persona receptora (ver Figura 1.7).

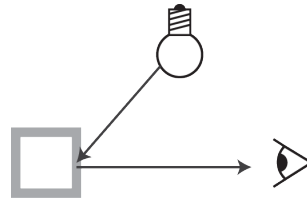


Figura 1.7: Proceso de visión.

Esto implica que en el proceso intervienen procesos fisiológicos y psicológicos. Un mismo objeto, iluminado con la misma fuente de luz, puede ser percibido con diferente grado de luminosidad por dos personas distintas. La ciencia que contempla estos procesos fisiológicos es la denominada fotometría, y se encarga de medir la radiación ponderada con la respuesta del ojo.

Las dos curvas que se ven en la figura 1.8 son utilizadas para modelar la respuesta del ojo a la radiación. Dichas curvas, aprobadas por la Comisión Internacional de la Iluminación (CIE), representan la función de eficiencia lumínica  $V(\lambda)$  para la visión fotópica, válida para niveles de luz ambiente normales a altos y  $V'(\lambda)$ , función de eficiencia para la visión escotópica, válida para niveles de luz ambiente muy bajos, equivalentes a una noche despejada sin luna.

Estas curvas expresan cuan sensible es el ojo a una determinada longitud de onda de radiación. Para  $V(\lambda)$  puede verse que el máximo se encuentra en el entorno de los 555nm. Esto quiere decir que si se ilumina un objeto con una fuente de luz con una distribución espectral centrada en los 555nm, éste se verá más luminoso que si se lo hace con una fuente de luz con la misma potencia radiante, pero con una distribución en el espectro alejada de los 555nm. Por lo que es posible ahorrar energía si se usan fuentes de luz que emiten en el entorno de máxima sensibilidad del ojo.

Las funciones de eficiencia  $V(\lambda)$  y  $V'(\lambda)$  datan de 1924 y 1951, y se considera visión fotópica si la luminancia del entorno es superior a 5 cd/m<sup>2</sup> y escotópica si es menor a 0.005 cd/m<sup>2</sup> [49]. A los efectos prácticos, debido a que la visión escotópica se da a niveles muy bajos de luminancia, la curva  $V'(\lambda)$  no era tomada en cuenta y todos los equipos y proyectos se realizaban teniendo en cuenta solo  $V(\lambda)$ . En los últimos años, esto ha estado en revisión y está en estudio como incorporar a los métodos y recomendaciones de diseño, el proceso de visión que se da en la etapa de transición entre un tipo de visión y otro.

Entre los 5 cd/m<sup>2</sup> y los 0.005 cd/m<sup>2</sup>, niveles que podemos encontrar en un entorno urbano poco iluminado, se da la visión mesópica, que es la transición de visión fotópica a escotópica. En esta zona es que se produce el corrimiento de la sensibilidad del ojo hacia los azules, pasando de  $V(\lambda)$  a  $V'(\lambda)$ .

En la figura 1.9 puede verse como una lámpara de sodio, una de las fuentes de luz tradicional en iluminación vial, concentra la mayor parte de su energía bajo

## Capítulo 1. Introducción

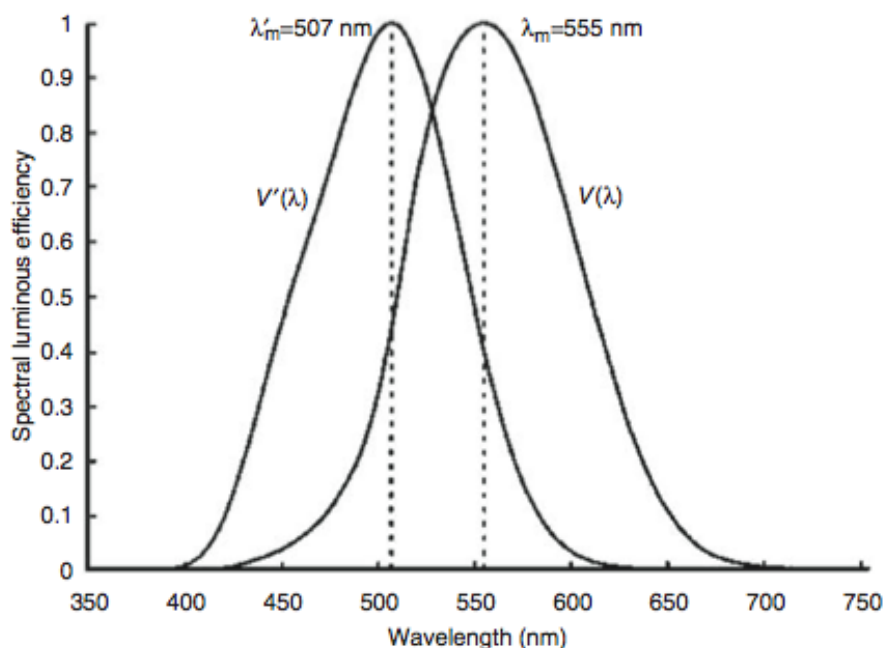


Figura 1.8: Funciones fotópicas y escotópicas de eficiencia espectral luminica  $V(\lambda)$  y  $V'(\lambda)$  (Extraído de [22])

la curva de visión fotópica  $V(\lambda)$ . También se muestra el espectro de un led, puede verse que emite parte de su potencia en longitudes de onda debajo de  $V(\lambda)$ , y parte en longitudes de onda a la que la visión es más sensible en condiciones escotópicas (curva  $V'(\lambda)$ ). A medida que la visión pasa de fotópica a escotópica, la curva de eficiencia del ojo pasará de  $V(\lambda)$  a  $V'(\lambda)$ , por lo que el sodio ira siendo cada vez menos eficiente que el led. En la competencia del sodio contra fuentes con mayor potencia en longitudes de onda bajas, como el led e inducción magnética, este argumento es muy utilizado [23] y ha dado a discusiones y pronunciamientos de las asociaciones que nuclean a los profesionales de la iluminación [38], también a proliferado el uso de términos como pupilúmenes [41,63], relación S/P, algunos de ellos sin fundamento y otros mal utilizados.

Es necesario entender el efecto del espectro de la luz sobre la percepción de luminosidad y utilizarlo para reducir el consumo y mejorar la calidad de la iluminación.

La distribución espectral con la que emiten la radiación los leds también tiene efecto sobre los valores medidos por los luxómetros. Equipos que tienen una diferencia de menos de un 7%, al medir los luxes que genera un lampara incandescente, luego pueden tener diferencias de más de un 20% al medir los luxes generados por una lámpara con leds.

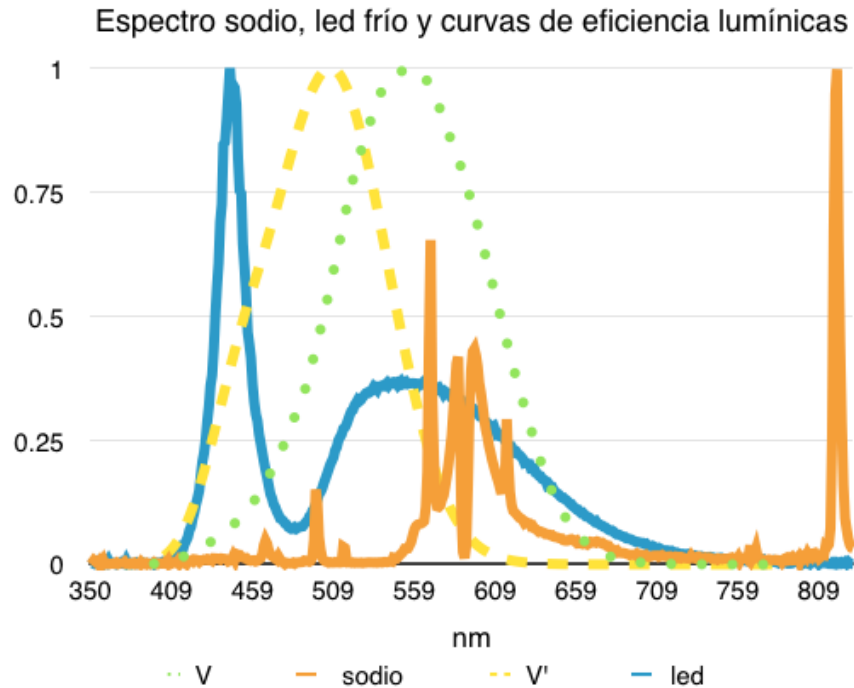


Figura 1.9: Distribución espectral de lámpara de sodio, leds y curvas  $V(\lambda)$  y  $V'(\lambda)$ . En base a medidas realizadas.

### 1.3. Vida útil

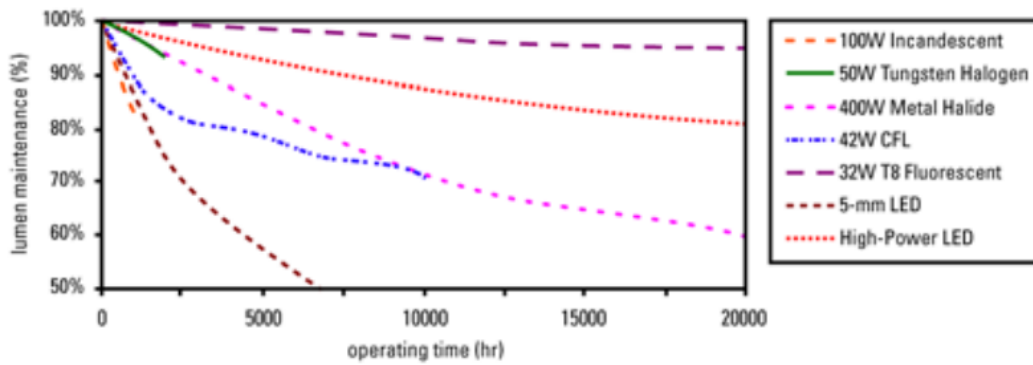
La vida útil de una fuente de luz se define como la cantidad de horas que puede operar hasta que el flujo luminoso emitido cae por debajo de cierto porcentaje del flujo inicial [2]. A esta cantidad de horas se la denomina  $L_x$ , donde  $x$  es el porcentaje del flujo inicial al que se llega luego de  $L_x$  horas.  $L_{90}$  es la cantidad de horas para llegar al 90 %,  $L_{80}$  para el 80 %, etc.

Se considera que, la depreciación de flujo luminoso es apreciable por un observador cuando disminuye a un 70 % del flujo inicial, eso da origen a que se utilice la cantidad de horas  $L_{70}$  como indicador de la vida útil de una lámpara. La figura 1.10 muestra la depreciación para diferentes tecnologías.

El  $L_{70}$  de un led puede darse más allá de las 80.000 horas (9.1 años) [15] y si bien no es práctico realizar ensayos de vida útil para esa cantidad de horas, existen métodos que permiten estimarla [34, 35]. Por ejemplo, los leds XP-G de Cree alimentados a 1.000mA y operando a una temperatura de 85°C, estiman un mantenimiento de flujo mayor al 95 % luego de 81.600 horas [15].

Pero una luminaria led está compuesta de más partes que los leds y es un error adjudicar, como se hace en luminarias tradicionales, la vida útil de la fuente de luz a toda la luminaria. Diseñar una fuente de poder, o utilizar materiales en los cerramientos y lentes, que acompañen la vida útil de los leds, no es una tarea trivial. La vida útil de los capacitores electrolíticos comunes varía entre

## Capítulo 1. Introducción



Source: Adapted from Bullough, J.D. 2003. *Lighting Answers: LED Lighting Systems*. Troy, NY. National Lighting Product Information Program, Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute.

Figura 1.10: Mantenimiento de flujo para varias fuentes de luz. (Extraída de [57])

1000hs y 10.000hs [21] y la de la fuente de corriente entre 100.000hs y 30.000hs [62] dependiendo de la temperatura de trabajo. Utilizando el ejemplo de los leds Cree XP-G, si se estima un uso de 8 horas diarias, el resto de los componentes deben mantener sus propiedades y continuar funcionando durante 28 años.

En la figura 1.11 se muestra las partes que componen una luminaria y que pueden afectar su vida útil. Cuidar cada uno de esos aspectos es importante al diseñar una luminaria led. Este trabajo se centra en los leds y su comportamiento a lo largo del tiempo, no se realizan estudios sobre la vida útil de las fuentes ni la degradación de materiales.

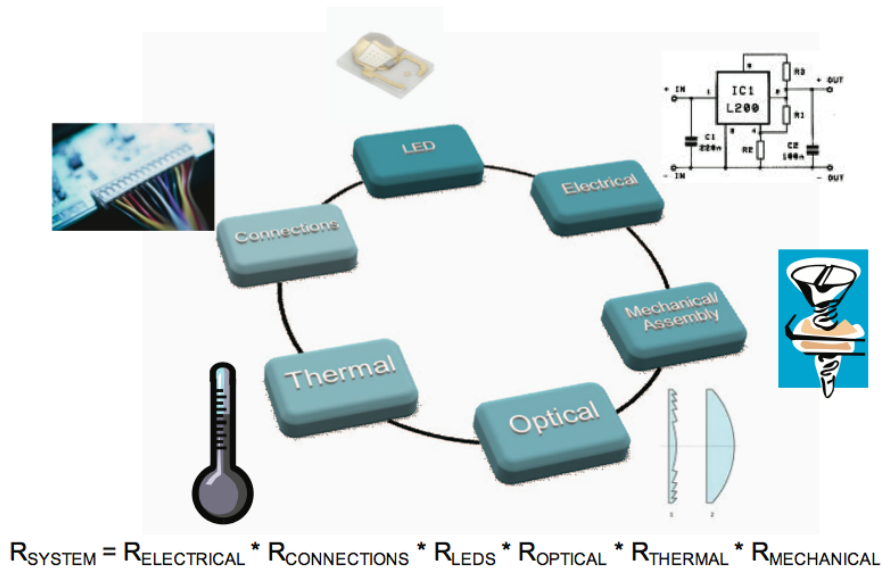


Figura 1.11: Elementos que influyen en la confiabilidad de una luminaria led. (Extraído de [60])

## 1.4. Temperatura

Hay un factor al cual las luminarias led son más sensibles que las tradicionales: la temperatura, y como muestra el cuadro en la figura 1.12 los leds convierten entre un 75 % y un 85 % de la potencia que se les entrega en calor.

|                                   | Incandescent <sup>†</sup><br>(60W) | Fluorescent <sup>†</sup><br>(Typical linear CW) | Metal Halide <sup>‡</sup> | LED*   |
|-----------------------------------|------------------------------------|---|---------------------------|--------|
| Visible Light                     | 8%                                 | 21%   | 27%                       | 15-25% |
| IR                                | 73%                                | 37%   | 17%                       | ~ 0%   |
| UV                                | 0%                                 | 0%  | 19%                       | 0%     |
| Total Radiant Energy              | 81%                                | 58%   | 63%                       | 15-25% |
| Heat<br>(Conduction + Convection) | 19%                                | 42%   | 37%                       | 75-85% |
| Total                             | 100%                               | 100%  | 100%                      | 100%   |

<sup>†</sup> IESNA Handbook    <sup>‡</sup> Osram Sylvania

\*Varies depending on LED efficacy. This range represents best currently available technology in color temperatures from warm to cool. DOE's SSL Multi-Year Program Plan (Mar 2006) calls for increasing extraction efficiency to more than 50% by 2012.

Figura 1.12: Conversión de potencia en fuente de luz blanca (Extraído de [56])

Una temperatura elevada de trabajo tiene efectos negativos sobre los leds y las fuentes de poder. Cuanto mayor es la temperatura de trabajo, menor es la eficiencia, se produce un corrimiento de la cromaticidad, y hay una disminución de la vida útil [52]. Es por eso que en cada uno de los temas de estudio el factor temperatura es tenido en cuenta.

## 1.5. Normativa internacional

Al momento de comparar parámetros de funcionamiento de una luminaria, es necesario que los datos estén medidos en las mismas condiciones, esto es posible gracias a la existencia de normas y estándares internacionales. Estas resumen buenas prácticas, recomendaciones y establecen formas y procedimientos para medir desempeño o seguridad de productos.

Las normas generadas por asociaciones y organismos de normalización constituyen insumos fundamentales al momento de hacer uso de una determinada tecnología, pero en el caso de algo nuevo como los leds, las normas van surgiendo, se modifican, se adaptan existentes, otras quedan obsoletas y esta dinámica dificulta el uso de las mismas.

Es por este motivo que se incluye un estudio de la normativa actual y se presenta un resumen de las normas y ensayos que actualmente aplican a la iluminación vial con tecnología led.

## 1.6. Costos

Todas las predicciones [25, 51] indican que los costos de las lámparas y luminarias led continuarán bajando en los próximos años y que cada vez se acercarán más al costo de las demás tecnologías. Ver figuras 1.13 y 1.14. Actualmente, de acuerdo a consultas realizadas a la Intendencia de Montevideo [42], una luminaria de sodio de 70W cuesta entre USD 150 y USD 180 en plaza, y la Intendencia de Maldonado compro en el año 2013 luminarias leds con un desempeño similar por USD 190 CIF. Ante este panorama de que los precios continuarán bajando, y a que muchas veces en la evaluación de un proyecto y su retorno de inversión, intervienen no solo los costos de la tecnología sino factores como fideicomisos y promociones fiscales [75], se optó por no incluir el tema en el estudio ya que quedaría obsoleto en poco tiempo.

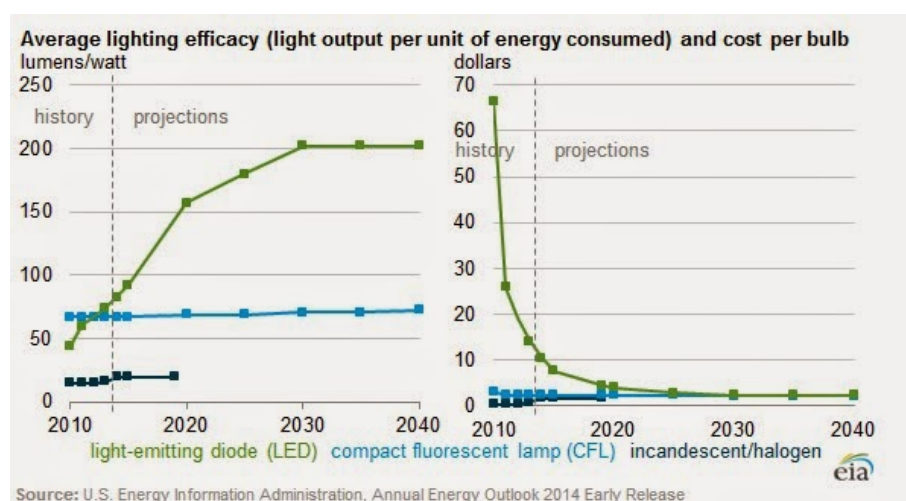


Figura 1.13: Proyecciones de evolución de eficiencia y precios de lámparas led, FLC e incandescentes. (Extraído de [25])

## 1.7. Estructura del documento

El hilo conductor de este trabajo es la eficiencia y vida útil en luminarias led de uso vial.

En este primer capítulo, se realizó una breve introducción al tema y la justificación de la elección.

El capítulo 2, presenta los objetivos generales y particulares.

El capítulo 3, aborda el tema de diseñar una luminaria a la medida de un proyecto, permitiendo mayores ahorros energéticos.

El capítulo 4, profundiza en el efecto de la distribución espectral de potencia de los leds, tanto en las mediciones fotométricas, como en la evaluación de la eficiencia de un proyecto.

## 1.7. Estructura del documento

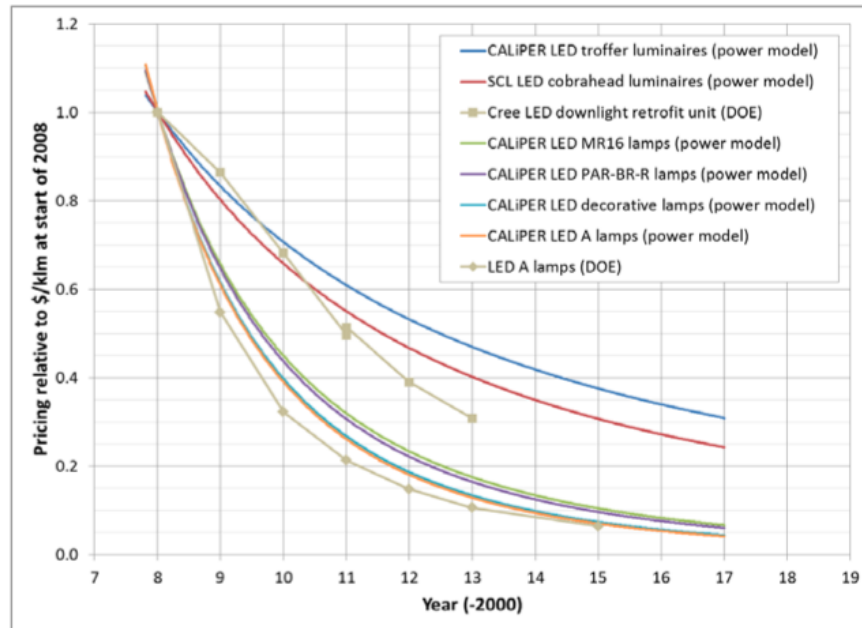


Figura 1.14: Proyecciones de evolución de precios para diferentes lámparas y luminarias led, normalizadas a precios de 2008. (Extraído de [51])

El capítulo 5, aborda el tema de normativas y métodos para caracterizar una luminaria led y predecir su vida útil.

El capítulo 6, describe una serie de diseños que se realizaron aplicando los conocimientos adquiridos durante este trabajo de maestría.

El capítulo 7, presenta las conclusiones más relevantes del estudio realizado.

En el final del documento, se incluye un glosario con los términos y siglas utilizados.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.



# Capítulo 2

## Objetivos

### 2.1. Generales

Actualmente las luminarias led han superado en rendimiento a las tecnologías habitualmente utilizadas en iluminación vial y su depreciación de flujo luminoso es menor.

El objetivo general de este trabajo es estudiar los elementos que inciden en la eficiencia energética y la depreciación de flujo de una luminaria led.

Conocerlos es necesario para poder evaluar soluciones actuales y poder diseñar nuevas luminarias viales que hagan uso de esta tecnología.

### 2.2. Particulares

#### 2.2.1. Diseño de luminarias a medida

Se busca contar con herramientas y metodologías que permitan diseñar una luminaria led vial a la medida de un determinado escenario a iluminar.

Dadas las características del escenario (ancho de calzada, altura de montaje y distancia entre luminarias) y los requerimientos fotométricos que se deben lograr (iluminancia media, uniformidades), la herramienta y el método permiten elegir la mejor combinación de los elementos que componen una luminaria para lograr el menor consumo posible en las condiciones de trabajo esperadas.

#### 2.2.2. Medición de la luz

Nuevas formas de ponderar la radiación en el proceso de visión están siendo propuesta por los organismos internacionales y asociaciones de profesionales.

Se busca comprender el alcance de estos cambios y como inciden en la medición de la eficiencia de una fuente de luz.

## Capítulo 2. Objetivos

### 2.2.3. Normativa internacional

La tecnología led es relativamente reciente y los organismos internacionales aún se encuentran generando y adaptando las normas que deben utilizarse para evaluar la eficiencia de la tecnología led.

Se busca llegar a un entendimiento de la normativa actual y a definir el conjunto de ensayos que debe realizarse a una luminaria vial para evaluar su desempeño y estimar su depreciación de flujo luminoso.

# Capítulo 3

## Diseño de luminarias a medida de un proyecto

### 3.1. Resumen

Las luminarias leds, ofrecen variables de ajuste que permiten diseñarla a la medida del proyecto, logrando de esta forma un ahorro de energía. Esta capacidad de ajuste permite ver a la luminaria como un instrumento que puede ajustarse más que como un producto terminado.

En este capítulo se identifican estas variables y como afectan al desempeño de la luminaria. Se llega a una metodología y a una herramienta, que permite estimar la fotometría de una luminaria para un determinado valor de estas variables, generando un archivo fotométrico en formato estándar, que puede ser utilizado en software de simulación de escenarios luminosos.

Las estimaciones son comparadas con mediciones realizadas a modelos fabricados durante este trabajo dando buenos resultados.

### 3.2. Introducción

Al momento de realizar un proyecto de iluminación se establecen requerimientos lumínicos y restricciones a la instalación. Los requerimientos se especifican estableciendo la iluminancia media  $E_m$  o luminancia media  $L_m$  y uniformidad media  $U_m = E_{\min}/E_m$  objetivo. Las restricciones, pueden ser que la luminaria este dada y debe definirse la cantidad y ubicación necesaria para cumplir los requerimientos, o dados los lugares donde pueden instalarse, seleccionar la luminaria más apropiada.

La restricción más habitual es la de los lugares donde pueden instalarse las luminarias, ya sea porque se esta haciendo un recambio y las columnas para la instalación ya existen, o porque definiciones estéticas o funcionales restringen los lugares posible de instalación de las luminarias. Entonces el problema consiste en encontrar o diseñar la luminaria que se ajuste a los requerimiento lumínicos del proyecto con las restricciones de posición dadas.

### Capítulo 3. Diseño de luminarias a medida de un proyecto

Las características fotométricas de una luminaria están definidas por el flujo luminoso, cuánta luz genera, y por la distribución de intensidad luminosas, en que dirección emite luz y con que intensidad. El flujo luminoso se mide en lúmenes (lm) y la intensidad en candelas (cd).

El primer paso en la selección o diseño de la luminaria apropiada, es encontrar la que tenga la distribución de intensidades indicada, ya que de esto dependerá que se ilumine toda el área de interés y que se lo haga con la uniformidad requerida.

La distribución de intensidades de una luminaria puede ser visualizada utilizando un diagrama polar como el de la figura 3.1. Usualmente se grafican las intensidades para los ángulos verticales, en los semiplanos definidos por los ángulos horizontales 0°, 90° y el ángulo horizontal donde se da la máxima intensidad. En el caso de la figura 3.1 se da en la dirección del ángulo horizontal 145° y vertical 47°.

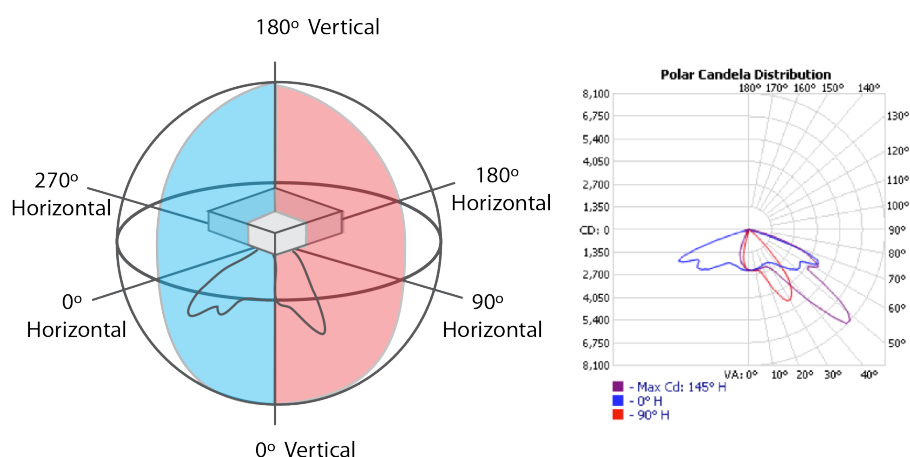


Figura 3.1: Diagrama polar de distribución de intensidades. Los datos corresponden a módulos leds fabricados y medidos durante este trabajo.

Luego que se ha seleccionado la distribución de intensidades apropiada, se verifica que el flujo luminoso permita llegar a los valores de  $E_m$  requeridos. Si la luminaria permite variar su flujo ya sea cambiando la fuente de luz por una de la potencia adecuada o porque cuenta con un mecanismo de control, es posible realizar ajustes y llegar a los valores requeridos con el mínimo consumo posible.

#### 3.2.1. Incidencia de la distribución de intensidades luminosas en el ahorro energético

Utilizar una luminaria con la distribución de intensidades luminosas adecuada es el primer paso hacia la eficiencia energética. Tomemos por ejemplo el caso de la iluminación en barrios de la ciudad de Montevideo. En este, se requiere que en calzada la  $E_m$  sea mayor a 10 lx y la  $U_m$  mayor a 0.3. Las restricciones se muestran en la figura 3.2, las luminarias están montadas a 7m de altura, a una distancia de 27m entre ellas y el ancho de calzada es de 7m.

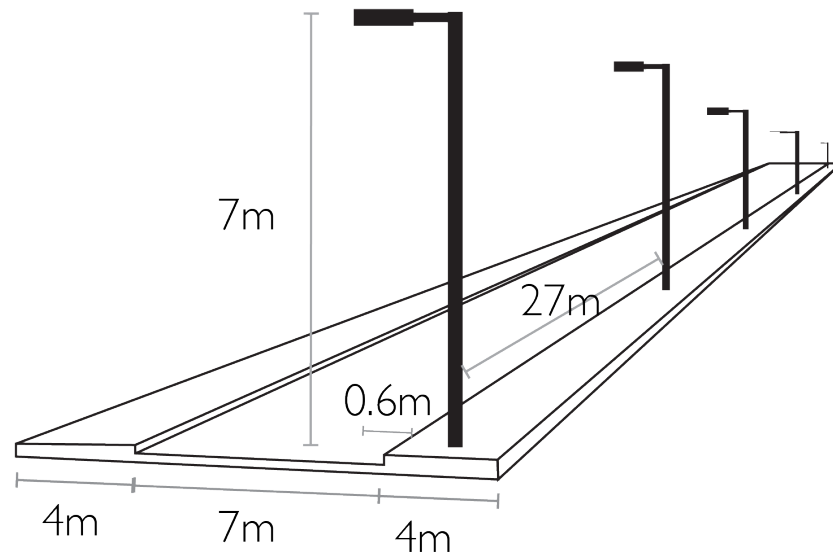


Figura 3.2: Escenario de iluminación en barrios de la Intendencia de Montevideo

Se necesita una luminaria con un haz de luz abierto hacia los lados, para cubrir la distancia entre postes, y más cerrada hacia adelante. Cualquiera de las luminarias, cuya distribución de intensidades se muestra en la figura 3.3, podría servir. Las distribuciones fotométricas corresponden a un mismo módulo led de 48W al que se le cambiaron los lentes. Además de los diagramas polares, la figura 3.3 muestra las isocurvas de iluminancias que se tendrían en piso. Estas isocurvas permiten visualizar mejor el comportamiento luminoso de la luminaria.

Utilizando el software DIALux [20] puede simularse el comportamiento de cada uno de los módulos en el escenario de iluminación barrial de la IMM. El cuadro 3.1 resume los desempeños que se lograrían. Solo a efectos ilustrativos, se incluye en el cuadro el desempeño de algunas luminarias con lámpara de sodio con mayor consumo.

En los tres casos los módulos led superan los requerimientos, por lo que puede bajarse el consumo y seguir cumpliendo con  $E_m > 10$  lx. La base de la luminaria esta compuesta por 32 leds alimentados a 530mA, por lo que podría reducirse la corriente o disminuir la cantidad de leds.

El ejemplo planteado permite ilustrar la importancia de poder modificar la distribución de intensidades para lograr direccionar efectivamente la luz generada adecuándolo al escenario. A la luminaria 5 podrían quitarse 8 leds y su consumo y flujo luminoso bajaría un 25 %, logrando bajar su consumo a 36W y  $E_m$  a 13.5 lx, por encima de los 10 lx.

## Capítulo 3. Diseño de luminarias a medida de un proyecto

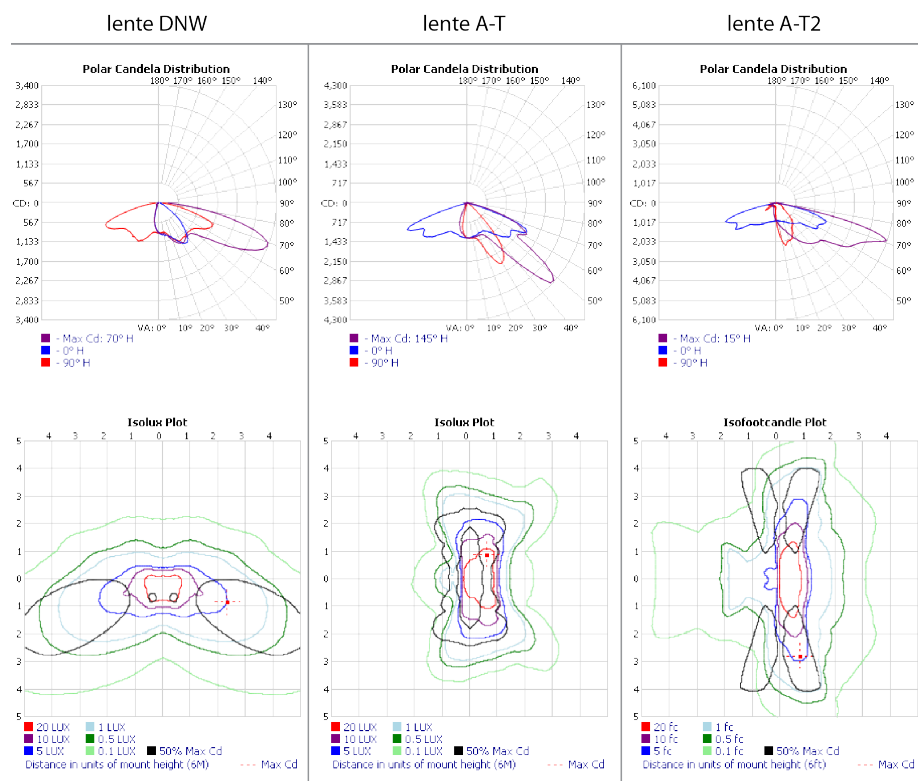


Figura 3.3: Distribución fotométrica de los lentes DNW, A-T, A-T2.

Tabla 3.1: Desempeño de diferentes luminarias en escenario de iluminación barrial de la IMM

| # | Fuente de luz                               | $E_m$        | $U_m$       |
|---|---|--------------|-------------|
|   | Requerimientos                              | >10 lx       | >0.3        |
| 1 | Luminaria Strand con lámpara sodio 70W      | 8 lx         | <b>0.31</b> |
| 2 | Luminaria Montevideo con lámpara sodio 70W  | 9.8 lx       | 0.27        |
| 3 | Luminaria Montevideo con lámpara sodio 100W | <b>16 lx</b> | 0.27        |
| 4 | Módulo led (48W) y lente DNW                | <b>13 lx</b> | <b>0.48</b> |
| 5 | Módulo led (48W) y lente A-T                | <b>18 lx</b> | <b>0.52</b> |
| 6 | Módulo led (48W) y lente A-T2               | <b>23 lx</b> | <b>0.39</b> |

### 3.2.2. Diseño de una luminaria a medida de un proyecto

Modificar la distribución de intensidades en una luminaria tradicional implica cambiar el reflector, por lo que para poder ajustarse a varios escenarios, una empresa debería de contar con varios moldes para los cascos reflectores, realizar lotes de producción grandes y contar con stock para lograr precios competitivos. El ajuste de intensidades se logra cambiando la potencia de la lámpara instalada,

seleccionando una de las opciones estándar: 70W, 100W, 150W, 250W o mediante equipos de control en la cabecera de línea [53].

En cambio en luminarias con led, se parte de un módulo base con leds al que se le agregan lentes para modificar la distribución de intensidades. Estos pueden elegirse de un amplio catálogo de opciones a un muy bajo costo, encontrándose lentes desde USD 0.3 c/u en [www.octopart.com](http://www.octopart.com), o diseñarse a medida [9, 78] y fabricarlo. Empresas de lentes como Ledil [45] ofrecen fabricar diseños suministrados por el cliente en lotes de 2000 piezas, al mismo costo que lentes estándares disponibles en su catálogo.

Una vez que se tiene la distribución fotométrica que cumple con los requerimientos de uniformidad, el siguiente paso que permite incrementar el ahorro energético es variar la cantidad de leds y corriente de alimentación para lograr ajustar el consumo y flujo luminoso a los requerimientos.

Esta libertad de poder realizar una luminaria a medida de un proyecto, logrando un ahorro de energía, es una de las mayores ventajas de las luminarias led.

Algunos trabajos [54, 68, 77] analizan los factores que intervienen en el diseño de una luminaria led. En la búsqueda de antecedentes, la única publicación encontrada que plantea una metodología de diseño y una herramienta, lo hace exclusivamente desde un punto de vista fotométrico [4]. Llega a un procedimiento que permite dado uno de cinco escenarios de iluminación de calles, elegir el mejor lente para un determinado led. No incluye en el método como varía el desempeño de la luminaria al variar la corriente, o temperatura de trabajo del led, ni tampoco realiza estimaciones de la potencia total.

El método y herramienta desarrollada en este capítulo, permite estimar el desempeño de diferentes combinaciones que prioricen consumo (variando la corriente y cantidad de leds), costo (variando la cantidad y modelo de leds) o eficiencia (variando el modelo de leds), de forma de poder seleccionar la solución que mejor se adapte a los requerimientos del proyecto. Además, la herramienta genera un archivo fotométrico en formato estándar de la luminaria diseñada, esto permite simular su funcionamiento con herramientas tipo DIALUX.

En cierta forma el método propuesto podría utilizarse en forma conjunta con [4]. Pude llegarse a una opción óptima de lente y flujo luminoso requerido utilizando [4], y luego mediante la herramienta propuesta jugar con las variables de diseño y realizar simulaciones en los escenarios para cada una de las opciones.

### 3.2.3. Variables de diseño en luminarias led

Las variables de diseño que otorga una luminaria de led son:

1. Lentes: la distribución de intensidades luminosas puede modificarse arbitrariamente mediante el uso de lentes. Además de la posibilidad de fabricar a medida los lentes, los fabricantes disponen de un gran catálogo, por ejemplo para el modelo XP-G de Cree, el fabricante Ledil cuenta con 317 opciones de lentes. También es posible combinar modelos en una misma luminaria, para lograr que se ajusten a los requerimientos.

## Capítulo 3. Diseño de luminarias a medida de un proyecto

2. Modelo de leds: es posible encontrar diferentes modelos de leds con el mismo encapsulado, lo cual permite intercambiarlos sin modificar el circuito impreso sobre el que se los monta. Los leds XP-E, XP-G, XP-G2 y XM-L de la empresa Cree comparten el mismo footprint pero permiten seleccionar componentes que van de un rendimiento de 80lm/W a 170lm/W, corrientes máximas de 1A a 3A y precios en [www.octopart.com](http://www.octopart.com) desde USD 0.5 a USD 1.5 [12, 13, 16, 17]
3. Cantidad de leds: reduciendo o aumentando la cantidad de leds puedo variar el flujo total de la luminaria, sin modificar en forma apreciable la uniformidad y calidad de la iluminación en el caso de iluminación vial.
4. Corriente de alimentación: el flujo luminoso emitido por los leds esta directamente relacionado a la corriente que los alimenta. Además de poder seleccionar fuentes de poder con diferentes valores de corriente, algunas cuenta con la posibilidad de variar la potencia entregada mediante programación [59] o una resistencia externa [61]. Una luminaria base podría tener una llave de selección de intensidades y ajustarse en el sitio que se instala.

Dada la gran cantidad de combinaciones, es necesario un método y herramientas, que permitan estimar el desempeño fotométrico y energético de una determinada configuración, sin tener que fabricar cada una de ellas para luego medirlas y poder realizar una simulación en un software tipo DIALux.

### 3.3. Estimación de desempeño de una luminaria led

#### 3.3.1. Procedimiento para estimar desempeño

El procedimiento propuesto toma como punto de partida una determinada selección de valores de las variables y genera una estimación de la fotometría y potencia consumida para esa configuración. Se trabaja bajo el supuesto de que se está ante una configuración en la que todos los leds están en serie, y se alimentan con una fuente de poder que impone una corriente constante (ver figura 3.4).

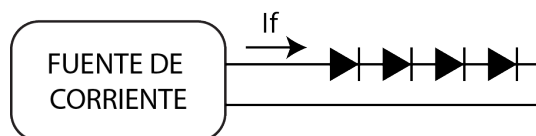


Figura 3.4: Leds en serie con fuente de corriente constante.

Los datos del diseño son:

- modelo de lente
- modelo de led
- cantidad de leds



### 3.3. Estimación de desempeño de una luminaria led

- corriente de alimentación de los leds ( $I_f$ )
- temperatura de encapsulado ( $T_s$ ) a la que se estima operarán los leds (ver figura 3.5)

Para el led y el lente seleccionado se necesitan los siguientes datos técnicos, que pueden conseguirse ya sea mediante ensayo o datos que proporciona el fabricante:

- para el lente seleccionado:
  - matriz con la distribución de intensidades luminosas
  - flujo luminoso del led utilizado en la distribución de intensidades
- para el led seleccionado:
  - curva de flujo luminoso ( $\Phi$ ) vs corriente ( $I_f$ )
  - curva de corriente ( $I_f$ ) vs voltaje ( $V_f$ )
  - curva de variación de flujo luminoso ( $\Phi$ ) con la temperatura de juntura del led ( $T_j$ )
  - resistencia térmica entre juntura y encapsulado del led ( $R_{thj-sp}$ )
  - variación de  $V_f$  con la temperatura

El procedimiento propuesto consiste en realizar los siguientes pasos de cálculo:

1. potencia en un led
2. temperatura de juntura de led  $T_j$  (ver figura 3.5).
3. flujo luminoso del led
4. distribución de intensidades luminosas del lente con el led seleccionado
5. potencia total
6. distribución de intensidades total

#### 3.3.2. Detalles del procedimiento

Para facilitar la comprensión del procedimiento, se lo explica aplicándolo a un ejemplo en el que se debe estimar la distribución de intensidades y potencia para 64 leds Cree XP-G (código de fabricante XPGWHT 01 0000 00FC2), alimentados a  $I_f=530\text{mA}$ , con una temperatura de trabajo estimada  $T_s=79^\circ\text{C}$  y lentes Ledil Strada 2x2 DNW (ver figura 3.6).

### Capítulo 3. Diseño de luminarias a medida de un proyecto

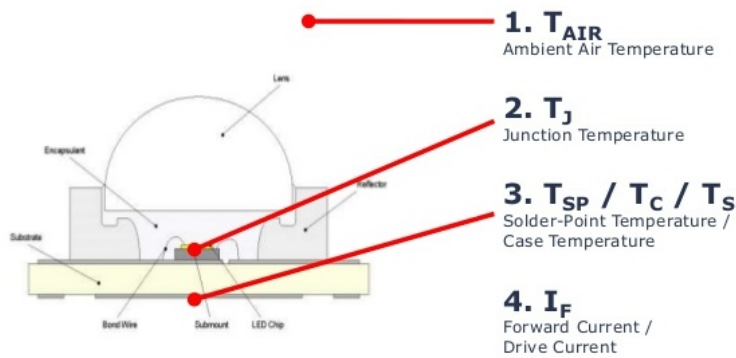


Figura 3.5: Puntos de medición de  $T_j$  y  $T_s$

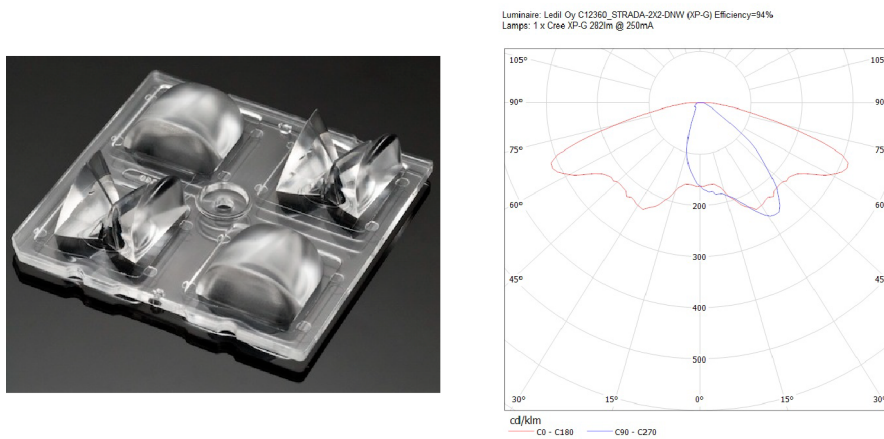


Figura 3.6: Lente Ledil STRADA-2X2-DNW. (Extraído de [45])

- pasos 1 y 2: potencia y  $T_j$  en un led a la corriente y temperatura de trabajo  $T_s$

Como se muestra en la figura 3.5 no es posible medir directamente la temperatura de juntura  $T_j$ , pero es posible determinarla conociendo la temperatura de soldadura  $T_s$  en el exterior del led, la resistencia térmica entre la juntura y el punto de soldadura  $R_{thj-sp}$  expresada en  $^{\circ}C/W$  y la potencia de funcionamiento del led.

$$T_j = T_s + R_{thj-sp} \cdot P_{led}$$

Para determinar la potencia en el led  $P_{led}$ , hay que calcular  $V_f$  a partir de la gráfica  $I_f$  vs  $V_f$  (ver figura 3.7) y corregirlo según la variación con la temperatura  $T_j$ .

Este es un proceso iterativo ya que para determinar  $V_f$  se necesita  $T_j$ , que a su vez necesita  $V_f$  ( $P_{led} = V_f \cdot I_f$ ).

Datos para el caso del ejemplo:

### 3.3. Estimación de desempeño de una luminaria led

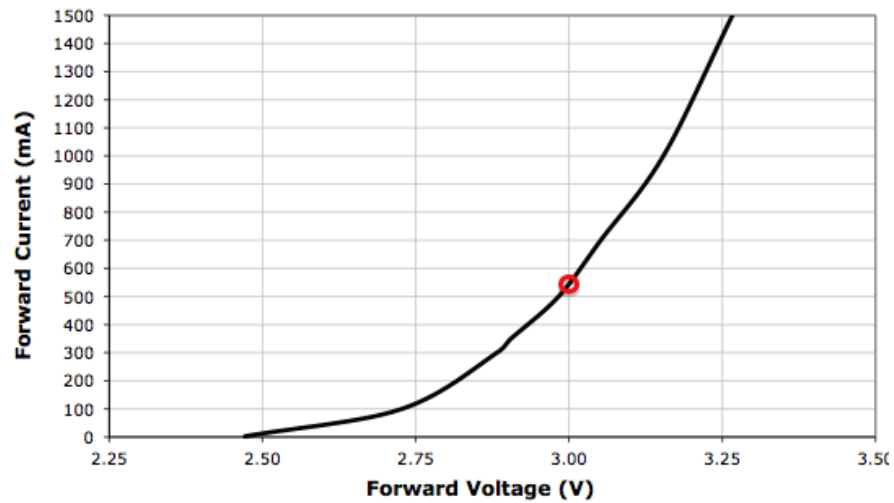


Figura 3.7: Corriente contra voltaje de led Cree XP-G a  $T_j=25^\circ\text{C}$ . (Extraído de [13])

- $T_s = 79^\circ\text{C}$
- $V_f(I_f=530\text{mA}, T_j=25^\circ\text{C}) = 3\text{V}$  (de figura 3.7)
- $R_{thj-sp} = 4^\circ\text{C/W}$
- variación de  $V_f$  con temperatura =  $-2.1\text{ mV}/^\circ\text{C}$

Partiendo de  $P_{led} = 3\text{V} * 0.53\text{A}$ , luego de iterar se llega a que:

- $T_j = 85^\circ\text{C}$
- $V_f(I_f=540\text{mA}, T_j=25^\circ\text{C}) = 2.9\text{V}$
- $P_{led} = 1.54\text{W}$

#### ▪ paso 3: flujo luminoso del led

La hoja de datos de un modelo de led incluye tablas con el flujo típico para una corriente  $I_f$  y temperatura  $T_j$  determinada. El cuadro en la figura 3.8 muestra los datos para el modelo XP-G de Cree y contiene el flujo medido a  $350\text{mA}$  y  $T_j=25^\circ\text{C}$ . Un modelo de led, por ejemplo XP-G puede tener variantes en la temperatura de color (cool white, outdoor white, neutral white) y a su vez dentro de cada una puede haber grupo de acuerdo a la eficiencia.

El flujo luminoso depende de  $I_f$  y  $T_j$ , ver figuras 3.9.

Datos para el caso del ejemplo:

- $\Phi(I_f=350, T_j=25^\circ\text{C}) = 122\text{ lm}$  (código XPGWHT 01 0000 00FC2 en figura 3.8)
- $\Phi(I_f=530\text{mA})/\Phi(I_f=350) = 1.45$  (de figura 3.9)
- $\Phi(T_j=85^\circ\text{C})/\Phi(T_j=25^\circ\text{C}) = 0.87$  (de figura 3.9)

### Capítulo 3. Diseño de luminarias a medida de un proyecto

| Color         | CCT Range |        | Base Order Codes<br>Min. Luminous Flux<br>@ 350 mA |           | Calculated Minimum<br>Luminous Flux (lm)* |       |       | Order Code           |
|---------------|-----------|--------|--|-----------|---|-------|-------|----------------------|
|               | Min.      | Max.   | Group  | Flux (lm) | 700 mA                                    | 1.0 A | 1.5 A |                      |
| Cool White    | 5000 K    | 8300 K | R3   | 122       | 228                                       | 305   | 406   | XPGWHT-L1-0000-00F51 |
|               |           |        | R4   | 130       | 243                                       | 325   | 433   | XPGWHT-L1-0000-00G51 |
|               |           |        | R5   | 139       | 260                                       | 348   | 463   | XPGWHT-L1-0000-00H51 |
| Outdoor White | 3200 K    | 5300 K | R2   | 114       | 213                                       | 285   | 380   | XPGWHT-01-0000-00EC2 |
|               |           |        | R3   | 122       | 228                                       | 305   | 406   | XPGWHT-01-0000-00FC2 |
|               |           |        | R4   | 130       | 243                                       | 325   | 433   | XPGWHT-01-0000-00GC2 |
| Neutral White | 3700 K    | 5300 K | Q5   | 107       | 200                                       | 268   | 356   | XPGWHT-L1-0000-00DE4 |
|               |           |        | R2   | 114       | 213                                       | 285   | 380   | XPGWHT-L1-0000-00EE4 |
|               |           |        | R3   | 122       | 228                                       | 305   | 406   | XPGWHT-L1-0000-00FE4 |

Figura 3.8: Flujo luminoso de led Cree XP-G a Tj=25°C. (Extraído de [13])

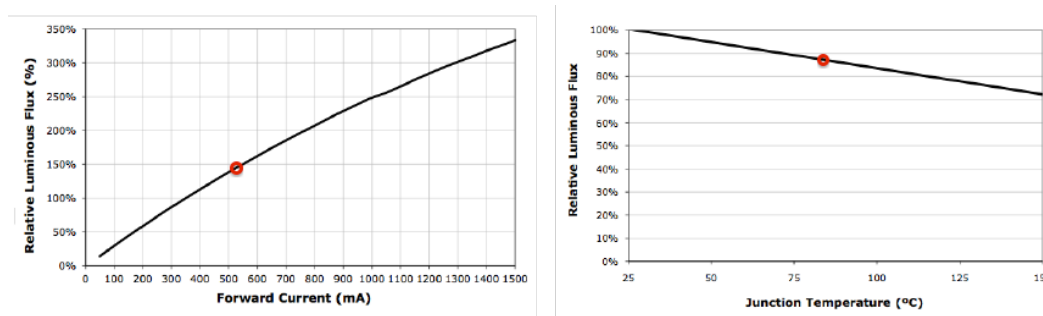


Figura 3.9: Variación de flujo con If y Tj para de led Cree XP-G. (Extraído de [13])

Por lo que el flujo del led, corregido para la If y Tj de trabajo será  $\Phi(I_f=350, T_j=25^\circ\text{C}) = 154 \text{ lm}$

- paso 4: distribución de intensidades para el led

El fabricante del lente, proporciona una matriz con las intensidades para cada ángulo horizontal ( $C$ ) y vertical ( $\gamma$ ). Estas intensidades corresponden a un ensayo con un led con un flujo luminoso dado  $\Phi_{\text{ensayo}}$ .

Al cambiar el led, las intensidades varían proporcionalmente según la relación de flujos, por lo que debe calcularse una nueva matriz de intensidades.

$$I_{\text{nueva}}(C, \gamma) = I_{\text{nueva}}(C, \gamma) \cdot \frac{\Phi_{\text{nuevo}}}{\Phi_{\text{ensayo}}}$$

Es importante elegir los datos del lente que correspondan al modelo de led a utilizar en la luminaria. Un mismo lente puede comportarse de forma diferente con otra marca o modelo de led.

- paso 5: potencia total

La potencia total  $P_{\text{total}}$  del módulo led será  $P_{\text{led}}$  por el número de leds. En el caso del ejemplo  $P_{\text{total}} = 1.54\text{W} * 64 = 99.6\text{W}$
- paso 6: distribución de intensidades total

En el caso de iluminación vial, la distancia entre lentes es despreciable com-

### 3.3. Estimación de desempeño de una luminaria led

parada con la distancia al punto a iluminar, ver figura 3.10, por lo que el efecto de agregar leds con lentes es multiplicar la intensidad por la cantidad agregada. En ángulos verticales cercanos a los 90° esto no es tan directo pues existe apantallamiento entre lentes, pero como las intensidades (debido al tipo de aplicación) son bajas, el error no es significativo.

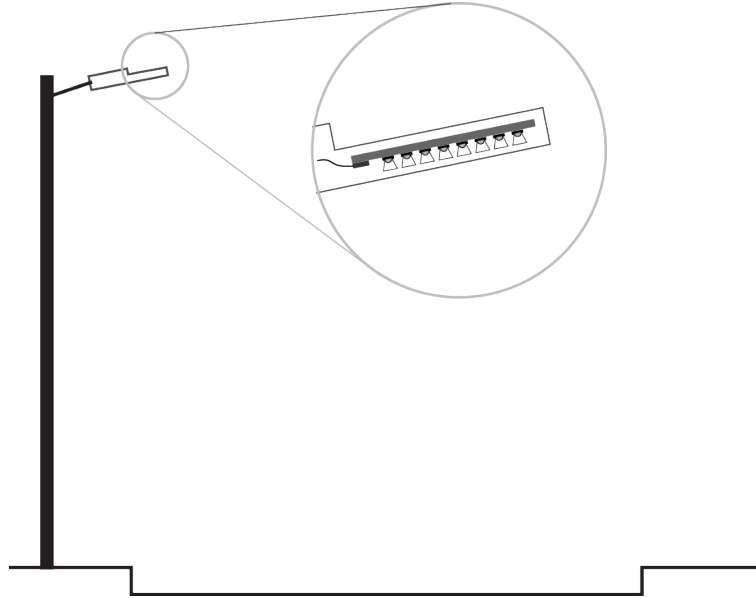


Figura 3.10: Distancia entre lentes vs. distancia a plano a iluminar.

En caso de combinar leds con rotaciones entre ellos, se rotan las matrices antes de sumarlas.

#### 3.3.3. Implementación del procedimiento en una aplicación

El procedimiento anteriormente detallado, se implementó en una aplicación en Python donde se especifican los parámetros del diseño y datos del led a utilizar, recibe un archivo con la distribución de intensidades del lente y genera un archivo con la distribución de intensidades de la luminaria (ver figura 3.11)

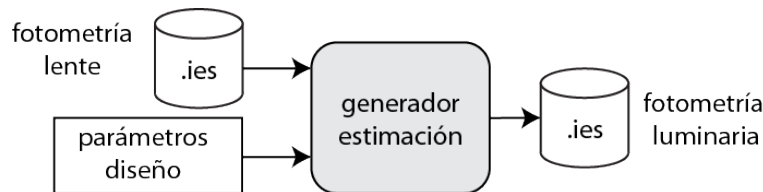


Figura 3.11: Entradas y salida de la aplicación

Para los datos fotométricos del lente y de la luminaria estimada, se utilizando archivos .IES definidos en el estándar LM-63-2002 [36]. Estos archivos son utilizados por programas de simulación lumínica de escenarios como por ejemplo DIALux.

### Capítulo 3. Diseño de luminarias a medida de un proyecto

Los datos de distribución de intensidades luminosas del lente y flujo luminoso del led utilizado para caracterizarlo, se obtienen del archivo .IES de entrada, el resto de los parámetros deben ser especificados en la propia aplicación Python.

#### Estructura de la aplicación

La aplicación se estructura en tres archivos Python (figura A.1):

- `sim_from_lies_main.py` : archivo donde se especifican los parámetros de funcionamiento y cantidad de leds, nombre del archivo .IES conteniendo la fotometría del lente a utilizar. Esta información es especificada en variables en el comienzo del archivo, las cuales luego con procesadas para invocar `sim_from_lies_script`
- `sim_from_lies_script`: archivo donde se calculan las características de la nueva luminaria (tamaño de superficie que emite la luz, matriz de intensidades, potencia y metadata de nuevo archivo IES)
- `ies_tools.py`: archivo conteniendo las funciones `parse_ies` y `write_ies`. La primera es la encargada de diseccionar el archivo .IES con la información del lente, a una estructura de tablas y variables en Python.

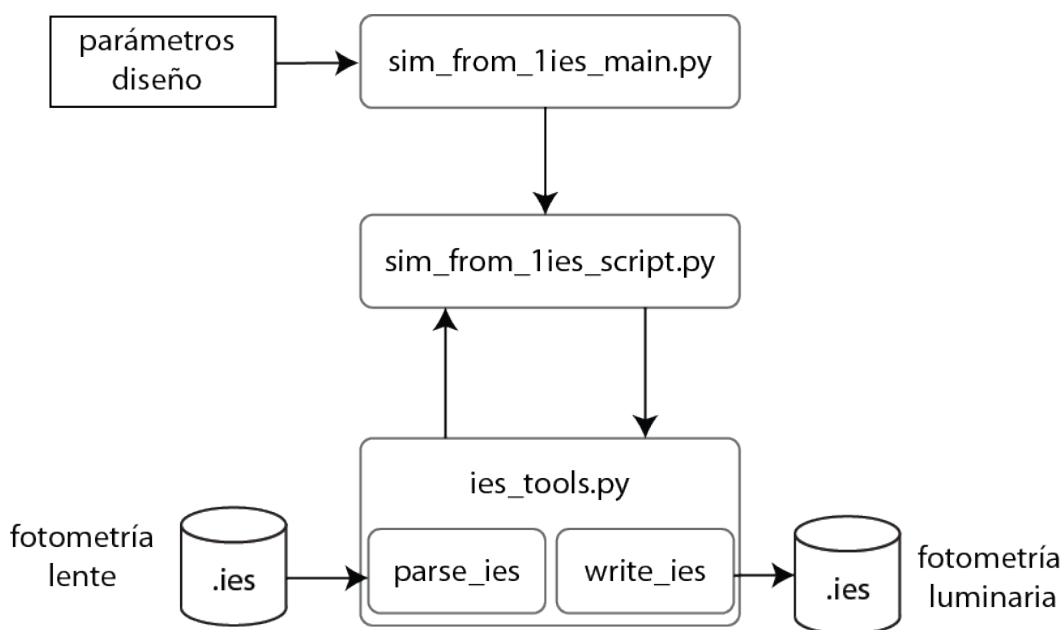


Figura 3.12: Estructura de la aplicación

En los apéndice se encuentra el código fuente de la aplicación y valores para un caso de ejemplo. A continuación se detallan algunos de los trozos de código más relevantes.

#### Especificación de parámetros

Al comienzo del archivo `sim_from_lies_main.py` se especifica el nombre y ubicación del archivo .IES que contiene la fotometría del lente a utilizar.

### 3.3. Estimación de desempeño de una luminaria led

```
## ===== Parametros =====
##### IES de led, lente o modulo a utilizar como base
base_ies_file = 'C13237&C13232_HB-2X2-WW-XPG.ies'
```

Luego se define la metadata que se incluirá en el archivo .IES de la luminaria simulada.

```
##### IES label a incluir en archivo generado
ies_label_out = {}
# --- campos obligatorios
# Test report number. May be internal reference in Lab.
ies_label_out["TEST"] = 'ledil-alum '
# Photometric testing laboratory
ies_label_out["TESTLAB"] = 'IIE-Lab'
# When this file was issued
ies_label_out["ISSUEDATE"] = time.strftime("%d/%m/%Y")
# fabricante de la luminaria (Fabricante en Dialux)
ies_label_out["MANUFACT"] = 'iie'
# ---- campos opcionales
# Luminaire catalog number
ies_label_out["LUMCAT"] = 'luminaria-DNW'
# Luminaire description (ejemplo, lente),
# script agregar corriente y cant. (luminaria en Dialux)
ies_label_out["LUMINAIRE"] = 'STRADA-2X2-DNW'
# Lamp catalog number
ies_label_out["LAMPCAT"] = '1'
# Lamp description (marca, modelo de led, CCT)
# Script agrega corriente y cant. (tipo lamp en Dialux)
ies_label_out["LAMP"] = 'CreeXPG-3000K'
# Other information
ies_label_out["OTHER"] = 'informacion adicional'
```

Finalmente se especifica la cantidad de lentes, leds por lente, corriente de trabajo, flujo luminoso de los leds para esa corriente y factor de depreciación debido a la temperatura de funcionamiento.

```
##### para ajustar valores de fotometria y potencia
# cantidad de lentes: puede ser una matriz,
# por eso se indica como width y length
w_qty = 2
l_qty = 4
# cantidad de leds que tiene el lente
leds_per_unit = 4
# lumenes emitidos por el led, estimados con datos
# del fabricante para nueva corriente
new_lamp_lumen = 100*1.8*leds_per_unit # led Lm=100 @350, 180%@700mA
```

### Capítulo 3. Diseño de luminarias a medida de un proyecto

```
# factor de correccion de lumenes de acuerdo a temperatura estimada de trabajo
lumen_temp_correction_factor = 0.87    # 87% a 85grados C
# corriente que se utilizara (A)
new>If = 0.7
# Vf para esa corriente de trabajo y temperatura
new>Vf = 3.05    # 3.05v a 0.7A
```

Con toda esta información, se invoca el script 'sim\_from\_lies\_script'.

Primeramente se analiza la información fotométrica del lente a utilizar y se carga en estructura internas de datos de Python.

```
## ===== IES ajuste label and info =====
base_ies= ies_tools.parse_ies(base_ies_file)
```

Se calcula el flujo luminoso total de los leds, afectado por la cantidad y depreciación debido a la temperatura.

```
# lumenes de la lampara en funcion de: lumenes de un elemento a usar
# ajustado por temp y cantidad
new_lamp_lumen_temp_adjusted= new_lamp_lumen * lumen_temp_correction_factor
total_qty = w_qty * l_qty
out_ies["IESInfo"]["LUMEN_PER_LAMP"]=new_lamp_lumen_temp_adjusted
```

```
# factor de correccion para las candelas por utilizar led con otro flujo
# y temperatura
lumen_lamp_in = base_ies["IESInfo"]["LUMEN_PER_LAMP"]
candela_correction_factor = new_lamp_lumen_temp_adjusted / lumen_lamp_in
```

El archivo .IES del lente contiene la matriz de intensidades luminosas para un led con un determinado flujo luminoso. El aumentar la cantidad de lentes, conservando una distribución en el mismo plano, y utilizar leds con mayor flujo luminoso, afecta las intensidades manteniendo la distribución.

```
## ===== IES ajuste candelas =====
candelas_in=base_ies["CANDELA_VALUES"]
candelas_new = candelas_in * candela_correction_factor * total_qty
out_ies["CANDELA_VALUES"]=candelas_new
```

Otra información que se actualiza es el tamaño de área que emite luz y la potencia de la luminaria.

```
# potencia de la luminaria teniendo en cuenta cantidad de modulos,
# leds por modulo e If y Vf de cada led
out_ies["IESPower"]["INPUT_WATTS"]= new>If * new>Vf * total_qty * leds_per_unit / 0.9
```

```
# tamano
out_ies["IESInfo"]["WIDTH"]= base_ies["IESInfo"]["WIDTH"]*w_qty
out_ies["IESInfo"]["LENGTH"]= base_ies["IESInfo"]["LENGTH"]*l_qty
```



### 3.3. Estimación de desempeño de una luminaria led

#### 3.3.4. Verificación de estimación con ensayo

Para verificar la estimación realizada, se construyeron modulo con dos modelos de led y se realizaron mediciones con diferentes corrientes y lentes.

- Led Cree XP-G y lente Ledil Strada 2x2 DNW

La figura 3.13, muestra los leds y lentes utilizados en el ejemplo anterior, montados sobre una estructura de aluminio, para poder relevar la distribución fotométrica en el goniofotómetro del Instituto de Ingeniería Eléctrica.



Figura 3.13: Leds Cree XP-G con lentes Ledil Strada 2x2 DNW montados para medición en goniofotómetro

El cuadro 3.2 resume los resultados de la medición y los estimados. Se agrega una estimación para  $I_f = 700\text{mA}$ , además de la de  $I_f = 530\text{mA}$  realizada en el ejemplo. El flujo se obtuvo integrando los valores de distribución de intensidades, y los valores de  $E_m$ ,  $E_{min}$ ,  $E_{max}$  y  $U_m$  fueron obtenidos simulando el escenario de la figura 3.14.

Como era de prever, la estimación da valores de flujo por encima de los medidos debido a que no toma en cuenta el apantallamiento que ocurre entre los lentes. Esto también puede verse en el error que se produce en las mediciones de  $E_{min}$  ya que estos valores se dan en zonas alejadas de las luminarias, donde el aporte de intensidades correspondiente a ángulos verticales cercanos a  $90^\circ$  es mayor. Pero la estimación para el resto de los casos es buena.

- Led Cree XP-G2 y varios lentes

Se fabricó un módulo con 16 leds Cree XP-G2 (código de fabricante XPG BWT 01 0000 00FC2) (ver figura 3.15)

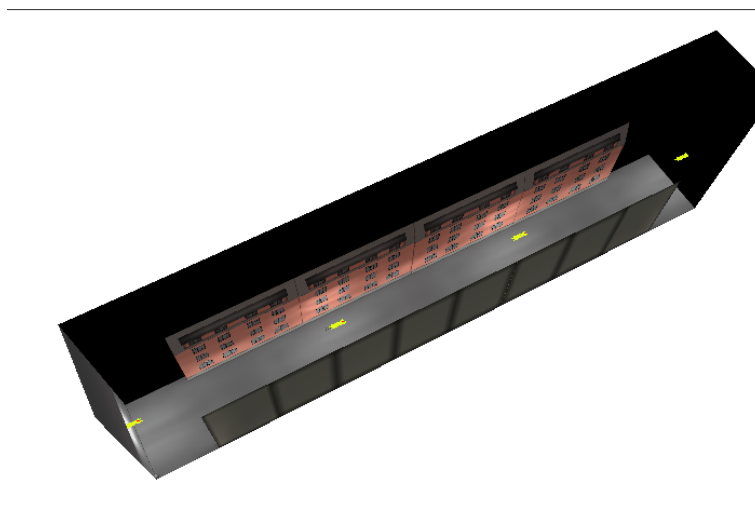


Figura 3.14: Escenario simulado utilizando DIALux

Tabla 3.2: Comparación entre resultados medidos y estimados para led XPG y lente Strada 2x2 DNW

| Origen de los datos Led   | Potencia | Flujo    | Em    | Emin   | Emax  | Um     |
|---------------------------|----------|----------|-------|--------|-------|--------|
| Est. If=530mA, Tj=85°C    | 99.6 W   | 8900 lm  | 12 lx | 9 lx   | 23 lx | 0.69   |
| Med. If= 530mA, Tj=72°C   | 101.7 W  | 8494 lm  | 12 lx | 7.5 lx | 23 lx | 0.61   |
| Error relativo            | -2 %     | 4.8 %    | 0 %   | 20 %   | 0 %   | 13 %   |
| Est. If=700mA, Tj=85°C    | 141 W    | 10800 lm | 16 lx | 11 lx  | 29 lx | 0.69   |
| Med. If= 700mA, Tj=88.4°C | 134.1 W  | 10175 lm | 15 lx | 8.7 lx | 28 lx | 0.59   |
| Error relativo            | 5 %      | 6.1 %    | 6.5 % | 20 %   | 3.5 % | 16.9 % |

Con este se realizaron comparaciones de estimaciones para If=600mA con los lentes que se muestran en la figura 3.16.

El cuadro 3.3 resume los resultados de la medición y los estimados con la aplicación. El flujo se obtuvo integrando los valores de distribución de intensidades.

Nuevamente en el lente con mayores valores de intensidad en ángulos verticales cercanos a 90° es donde se produce la mayor sobre estimación de flujo. Pero los valores de intensidad estimados para ángulos menores, que son los que realmente pesan en las predicciones para escenarios de iluminación vial, se ajustan a la realidad.

Por ejemplo en la simulación DIALux de la iluminación junto a una parada de bus, como la de la figura 3.17, los valores de iluminancia media y máxima prácticamente coinciden utilizando los datos de la estimación y los de la medición, las diferencias se presentan en los valores de iluminancia mínimos.



Figura 3.15: Leds Cree XP-G2 montados para medición en goniofotómetro

Ver figura 3.18

## 3.4. Conclusiones

### 3.4.1. Sobre las posibilidades de diseño

Desde el punto de vista del diseño, una luminaria led permite controlar una mayor cantidad de variables si se las compara con otras tecnologías: corriente, cantidad de leds, lentes, distribución y orientación de módulos. Esta libertad permite para un mismo proyecto lograr ahorros importantes.

Fue posible desarrollar una aplicación que permite estimar en forma confiable el desempeño de una combinación de leds, lentes y corriente de alimentación para su uso en iluminación vial donde la distancia al plano de trabajo es mucho mayor que la distancia entre leds en la luminaria.

Esta herramienta permitiría a un fabricante contar con un diseño base de luminaria y módulos que puede agregar y cambiar para adecuarla a diferentes escenarios de iluminación.

### 3.4.2. Sobre la herramienta

La herramienta puede automatizarse de forma de generar para un mismo lente, estimaciones de fotometría para distintas combinaciones de corriente, temperatura

### Capítulo 3. Diseño de luminarias a medida de un proyecto

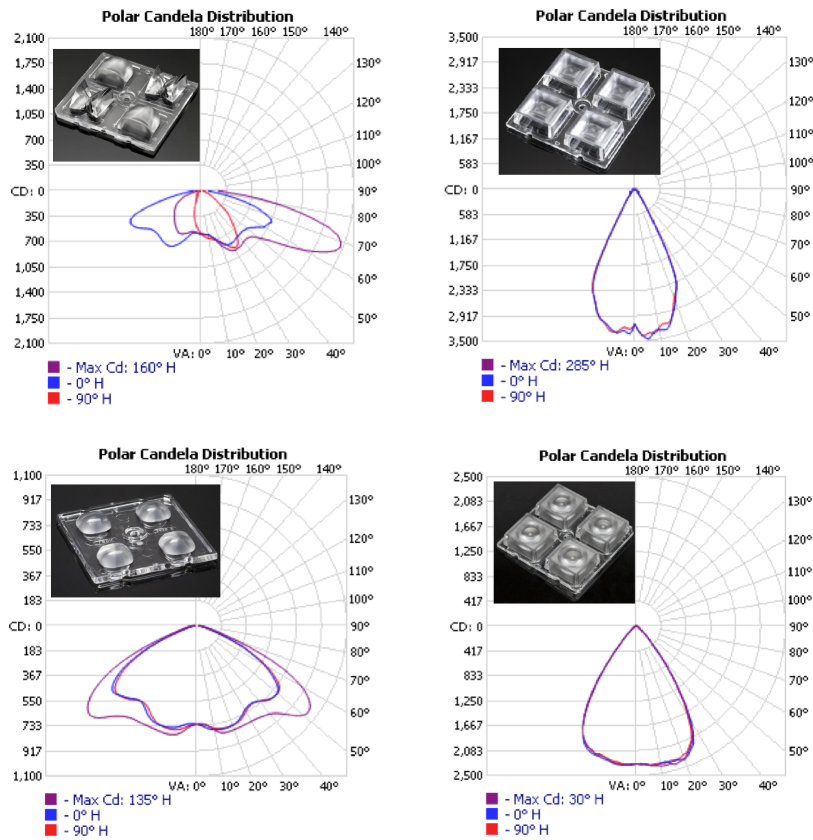


Figura 3.16: Distribución de intensidades luminosas de lentes utilizados con leds Cree XP-G2.

de funcionamiento, cantidad y modelo de leds. Esto permite luego evaluar las soluciones y elegir en función del objetivo a lograr: mayor eficiencia (más leds funcionando a menor corriente, diferentes modelos de led), menor costo (más leds a mayor corriente), límite de temperatura de juntura ( potencia máxima para carcasa, corriente máxima y  $R_{thj-s}$  de ese modelo).

Si se logra modelar las curvas de la hoja de datos de:  $I_f$  vs  $V_f$ , flujo luminoso en función de temperatura  $T_j$  y flujo luminoso en función de  $I_f$ , sería posible plantear el problema de elegir la solución óptima para consumo, eficiencia o costo como un problema de minimización con restricciones.

Al momento de leer una hoja datos de leds, debe tenerse en cuenta la temperatura  $T_j$  a la que se presentan los datos. En la mayoría de los casos los datos de rendimiento se presentan para  $T_j=25^\circ\text{C}$ , cuando en una aplicación real el led trabajará a una temperatura mayor por lo cual el rendimiento esperado podrá bajar hasta casi un 20 %.

### 3.4. Conclusiones

Tabla 3.3: Comparación entre resultados medidos y estimados para led XPG2 y diferentes lentes

| Origen de los datos Led                            | Potencia           | Flujo   |
|--|--------------------|---------|
| Medición con lente DNW, $T_j=54.5^\circ\text{C}$   | 28.4 W             | 2690 lm |
| Estimado con lente DNW, $T_j=60^\circ\text{C}$     | 27.8 W             | 3117 lm |
| Error relativo                                     |                    | 15.8 %  |
| Medición con lente HB-W, $T_s=51.3^\circ\text{C}$  | 28.5 W             | 2823 lm |
| Estimado con lente HB-W, $T_j=60^\circ\text{C}$    | 27.8 W             | 3043 lm |
| Error relativo                                     |                    | 7.8 %   |
| Medición con lente HB-WW, $T_s=51.7^\circ\text{C}$ | 28.4 W             | 2850 lm |
| Estimado con lente HB-WW, $T_j=60^\circ\text{C}$   | 27.8 W             | 2922 lm |
| Error relativo                                     |                    | 2.5 %   |
| Medición con lente CY, $T_s=53.4^\circ\text{C}$    | 28.4 W             | 2940 lm |
| Estimado con lente CY, $T_j=60^\circ\text{C}$      | 27.8 W <td 3075 lm |         |
| Error relativo                                     |                    | 4.6 %   |

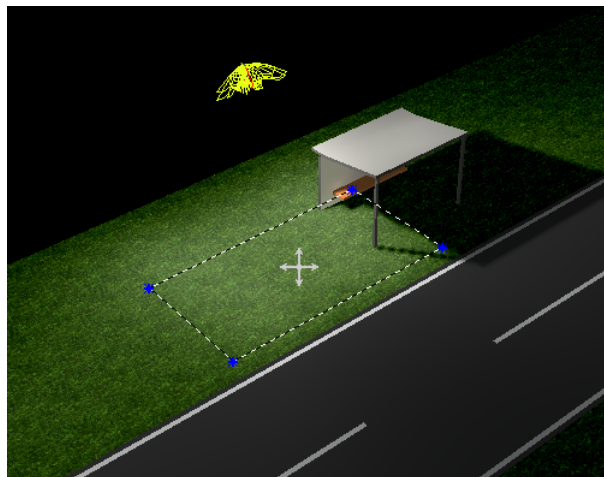


Figura 3.17: Escenario parada de omnibus

led Cree XP-G2 + lente Strada 2x2 DNW

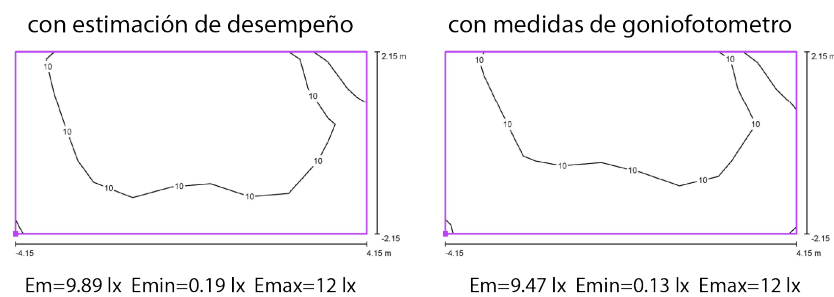


Figura 3.18: Dialux en escenario parada de omnibus de luminaria estimada vs medida.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

# Capítulo 4

## Medición de luz

Como se plantea en la sección 1.2.2 de la introducción, la fotometría es la ciencia de medir la radiación ponderada por la curva de visión del ojo.

En este capítulo se presentan 2 temas. El primero relacionado con errores que se producen en la medición de magnitudes fotométricas, al aproximar, los equipos, la curva de respuesta del ojo. El segundo presenta un tema actual, y es como cambia la percepción y la medición de la luz, a medida que las condiciones lumínicas del entorno cambian.

Antes de avanzar en los temas es necesario plantear como es que se realiza la ponderación de la radiación con la curva de sensibilidad del ojo y que forma tiene el espectro de radiación de diferentes fuentes luminosas.

La irradiancia es el flujo de radiación sobre la superficie de un objeto y se mide en  $W/m^2$ , pero en proyectos de iluminación, lo que se mide es la iluminancia ( $E$ ) sobre el objeto cuyas unidades son lúmenes/ $m^2$  ( $lm/m^2 = lux$ ) y consiste en la irradiancia ponderada por la curva de sensibilidad del ojo.

Esta ponderación se basa en las formulas de eficiencia luminosa establecida por CIE, la cuales permiten dada la distribución de potencia radiante  $P(\lambda)$  de una fuente en  $W/m$ , calcular cual es el flujo luminoso  $\Phi$  de dicha fuente en  $lm$  [7]. Según se este ante condiciones de visión fotópica o escotópica es la función  $V(\lambda)$  o  $V'(\lambda)$  que debe utilizarse.

$$\Phi_{fot} = 683lm/W \int_0^{\infty} V(\lambda)P(\lambda)d\lambda$$

$$\Phi_{esc} = 1700lm/W \int_0^{\infty} V'(\lambda)P(\lambda)d\lambda$$

Como se ve en la figura 4.1, fuentes de luz de diferente tecnología o temperatura de color pueden tener diferentes distribuciones espectrales de potencia, estas diferencias tienen consecuencias en la eficiencia lumínica de la fuente, y como se verá más adelante pueden llevar a errores en las mediciones fotométricas.

## Capítulo 4. Medición de luz

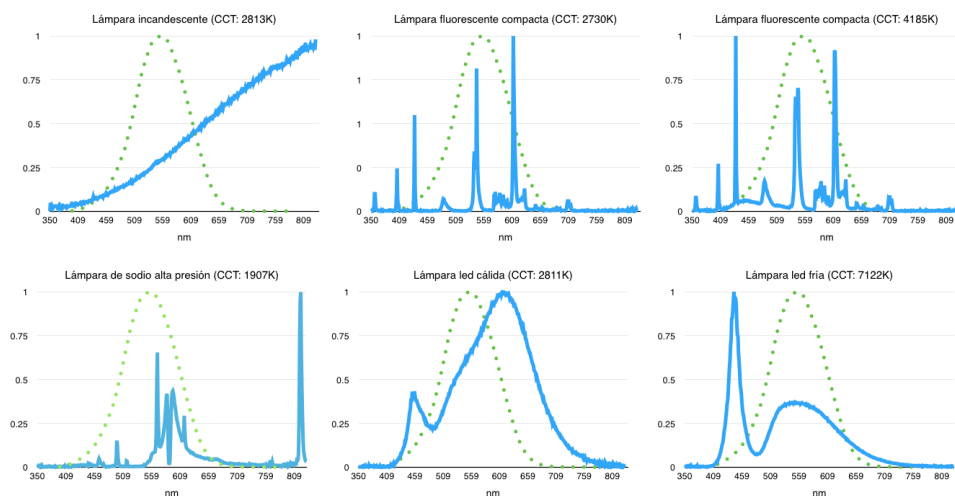


Figura 4.1: Distribución espectral de diferentes fuentes de luz con V superpuesta. (En base a medidas realizadas)

### 4.1. Efectos de la distribución espectral en la medición de fuentes de luz led

#### 4.1.1. Introducción

Para poder determinar y comparar la eficiencia de una fuente de luz es necesario medir su flujo luminoso o la iluminancia que se logra en el plano de interés para un consumo eléctrico dado. Para esto deben utilizarse equipos de medición de magnitudes fotométricas como puede ser un luxómetro o un radiómetro de iluminancia. La principal diferencia entre estos equipos es la forma en la que aproximan la función de eficiencia espectral  $V(\lambda)$  y la calidad de esta aproximación puede dar errores en la medida dependiendo de la distribución espectral de potencia de la fuente de luz.

En un luxómetro (Figura 4.2) un filtro óptico colocado antes del sensor de radiación es el encargado de aproximar la respuesta  $V(\lambda)$ , luego se realiza una corrección espectral y se muestra el valor medido en luxes. Dependiendo del equipo, el factor de corrección espectral puede ser único o puede seleccionarse de acuerdo a la fuente de luz a medir. En un colorímetro se utilizan tres filtros y tres sensores, ajustados para aproximar las curvas CIE de color.

En un radiómetro, la luz recibida es descompuesta en el interior del equipo y un conjunto de fotosensores miden la potencia en una longitud de onda determinada. Esto permite tener una medición por bandas en el espectro y luego aproximar la respuesta  $V(\lambda)$  mediante procesamiento por software. Este tipo de equipo son los más caros pero también los más precisos.



#### 4.1. Efectos de la distribución espectral en la medición de fuentes de luz led

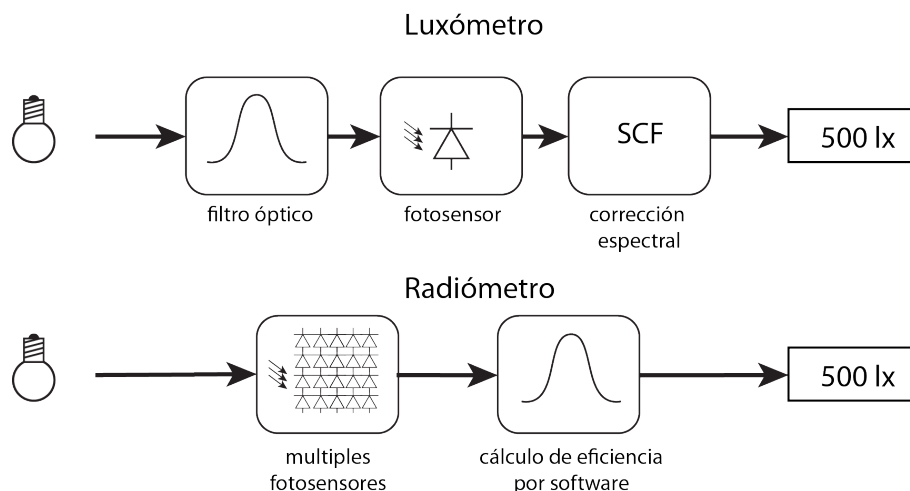


Figura 4.2: Aproximación  $V(\lambda)$  en un luxómetro y un radiómetro

#### 4.1.2. Metodología

Para verificar este fenómeno y cuantificar el error que se puede tener al medir fuentes de luz led, además de investigar reportes de fabricantes o casos de estudio, se realizaron un conjunto de medidas a diferentes fuentes de luz utilizando un espectroradiómetro como equipo de referencia y diferentes luxómetros. Ver cuadro 4.1.

Tabla 4.1: Equipos de medición utilizados

| Equipo                                  | Rango de precio           |
|---|---------------------------|
| espectroradiómetro Ocean Optics USB2000 | más de USD 4000           |
| colorímetro Minolta CL-200A             | entre USD 3000 y USD 4000 |
| luxómetro LMT Pocket Lux 2              | entre USD 3000 y USD 4000 |
| colorímetro Minolta Chroma Meter xy-1   | entre USD 2000 y USD 3000 |
| luxómetro Amprobe LM-200LED             | menos de USD 100          |
| luxómetro YFE YX-1065                   | menos de USD 50           |
| luxómetro Nicety LX802                  | menos de USD 50           |

Para las fuentes de luz se seleccionó, una lámpara incandescente, una fluorescente compacta, una luminaria con leds blancos cálidos y azules que permite controlar los niveles de cada grupo, de forma de lograr luz led con diferente temperatura de color y una lámpara con leds fríos. Ver cuadro 4.2.

El primer experimento consistió en medir la iluminancia de las diferentes fuentes de luz en un mismo punto con los diferentes equipos y comparar el error relativo en la medida. Antes de comenzar, se calibró en sitio el espectroradiómetro, lo cual nos permitió tener una medida confiable para usar como referencia. El error relativo se calculó como:

## Capítulo 4. Medición de luz

Tabla 4.2: Fuentes de luz utilizadas

| Tipo                               | Temperatura de color |
|------------------------------------|----------------------|
| incandescente                      | 2628K                |
| fluorescente compacta cálida       | 2730K                |
| leds blancos y azules controlables | 2811K a 7500K        |
| leds blancos fríos                 | 7200K                |

$$error = (E_{lux} - E_{OO})/E_{OO}$$

Siendo  $E_{lux}$  la iluminancia medida por el luxómetro o colorímetro y  $E_{OO}$  la del espectroradiómetro.

Luego se realizó para uno de los luxómetros una medida del error al variar la intensidad de la fuente de luz.

### 4.1.3. Resultados

La figura 4.3 muestra la distribución espectral para algunas de las fuentes utilizadas. Las gráficas permiten ver como temperaturas de color similares 2628K (incandescente), 2730K (fluorescente compacta), 2811K (led cálido) pueden tener distribuciones espectrales sumamente diferentes. Lo mismo ocurre con los espectros de las luces led de 7200K y 7500K, a pesar de corresponder a una luz fría, la distribución espectral en las longitudes de onda bajas y medias-altas (510nm a 610nm) difieren claramente.

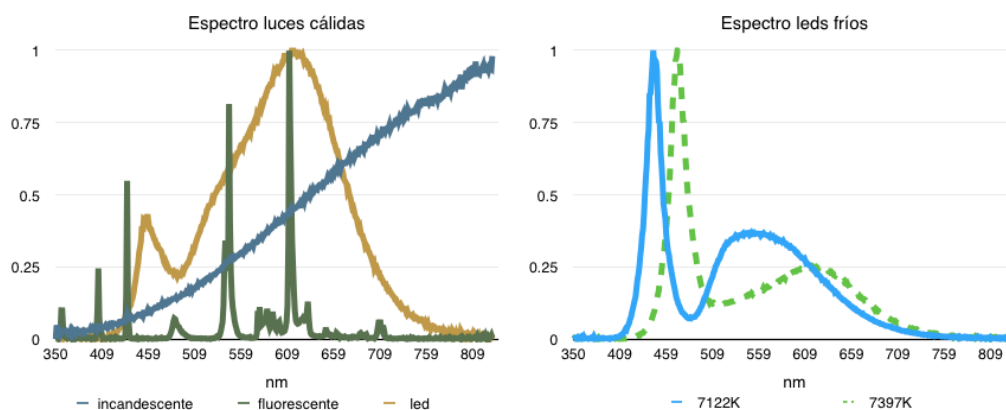


Figura 4.3: Distribución espectral normalizada de las fuente de luz utilizadas. (En base a medidas realizadas)

Se realizó un análisis de las medidas de la fuente incandescente, ver figura

#### 4.1. Efectos de la distribución espectral en la medición de fuentes de luz led

4.4 ya que dado que los equipos se calibran contra una fuente de este tipo, es de esperar que el error sea muy bajo. Este análisis sirvió para descartar los equipos Minolta CL-200A y Nicety LX802 ya que ambos presentaban un error mayor al 13%. En el caso del equipo Minolta puede deberse a un error al operar el equipo ya que permite seleccionar diferentes factores de corrección y el caso del Nicety puede deberse a que fue fabricado hace mucho tiempo y no este calibrado.

En la misma figura 4.4 puede verse el error que se comete al medir una fuente Fluorescente Compacta, superando el 30% en el caso de los equipos Minolta y Amprobe y el 20% en el caso del LMT. Esta medición ya pone en evidencia que la distribución espectral influye en la medida.

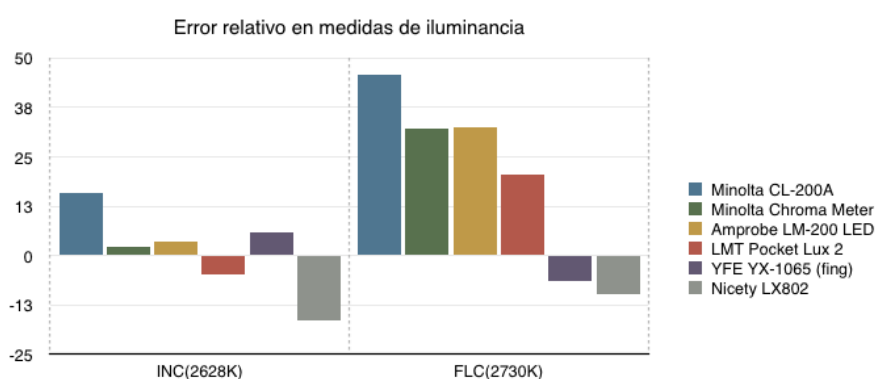


Figura 4.4: Comparativa de error relativo de todos los luxómetros para incandescente y fluorescente compacta

La figura 4.5 muestra el error relativo relevado para las fuentes leds y la lámpara incandescente.

El equipo LMT presenta el mejor desempeño para todos los espectros, estando casi siempre por debajo del 7%.

El equipo Amprobe LM-200 LED, según el fabricante, además de calibrarse para una lámpara incandescente incluye correcciones para medición de luz led de espectro blanco día lo cual es coherente con el bajo error en la medida de leds con CCT de 4024K, 5020K y 6000K. Para espectros en los extremos de la CCT este error aumenta, pero aún así se mantiene por debajo del 10%.

El equipo Minolta presenta una mayor variación, pero se mantiene dentro del 10% de error.

En el equipo YFE es donde podemos notar más el efecto de la variación del espectro en la medida, llegando a errores de casi 20%.

En la figura 4.6 puede verse como para los luxómetros más económicos (YFE, Nicety), las variaciones en el espectro producen mayores cambios, pasando de errores negativos a positivos en la medida que la potencia relativa en las longitudes de onda correspondiente a los azules aumenta. En una nota técnica [69] de la empresa PRO-LiTE se analiza el porcentaje de error en la aproximación de la curva  $V(\lambda)$  entre dos luxómetros comerciales, llegando a diferencias entre los equipos de hasta un 100% para ciertas longitudes de onda.

## Capítulo 4. Medición de luz

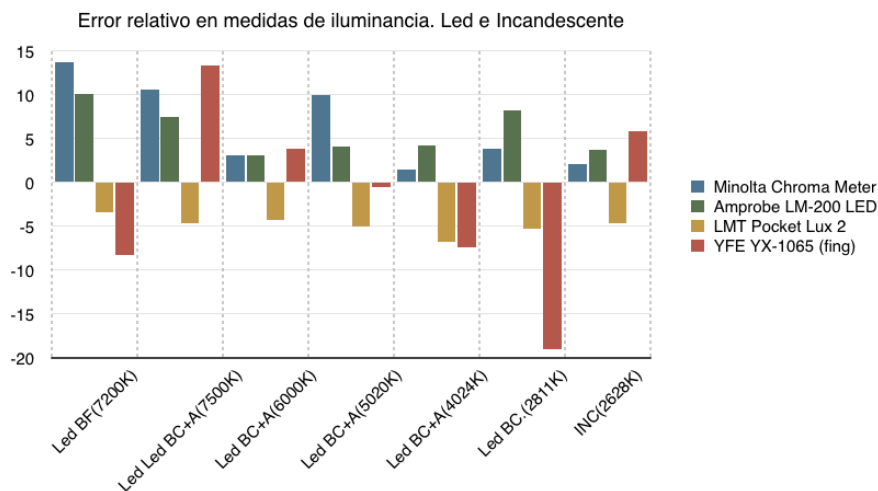


Figura 4.5: Comparativa de error relativo de los luxómetros con menor error en medida de fuente incandescente

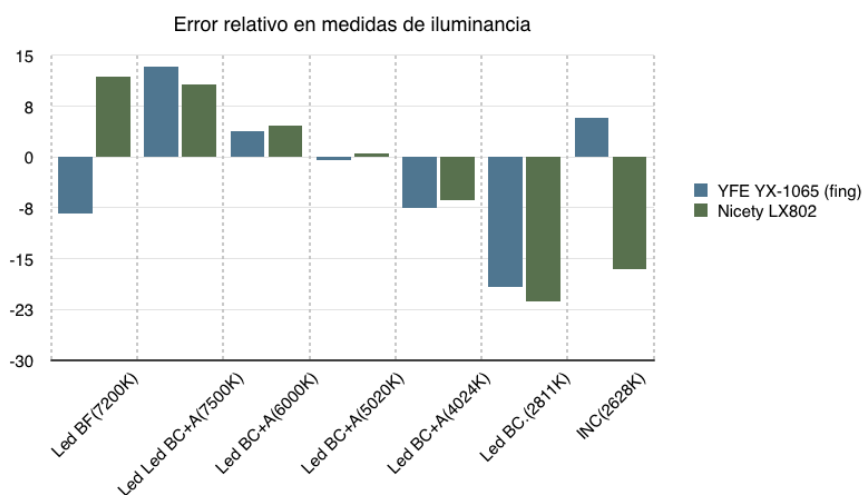


Figura 4.6: Comparativa de error relativo en los luxómetros más económicos

Las medidas anteriores se realizaron a un flujo constante para cada una de las fuentes de luz. Pero como puede verse en el cuadro 4.3, el error también varía con el nivel de iluminancia medido.

### 4.1.4. Conclusiones

Luxómetros y colorímetros pueden funcionar bien con fuentes de luz de espectro continuo, pero en la medida en que aumentan los picos en el espectro como en las lámparas fluorescentes compactas o en los leds blancos fríos, los errores pueden ser mayores.

#### 4.1. Efectos de la distribución espectral en la medición de fuentes de luz led

Tabla 4.3: Error al variar la intensidad de la fuente de luz led cálida.

| Ocean Optics (lx) | LMT (lx) | E.relATIVO (%) |
|-------------------|----------|----------------|
| 2912.8            | 2992     | 2.7            |
| 2946.9            | 2989     | 1.4            |
| 4437.8            | 4479     | 0.9            |
| 6632.1            | 6602     | -0.5           |
| 8643.4            | 8481     | -1.9           |
| 10632             | 10382    | -2.4           |
| 12529             | 12107    | -3.4           |
| 14281             | 13739    | -3.8           |
| 16069             | 15321    | -4.7           |
| 17675             | 16796    | -5.0           |
| 19374             | 18248    | -5.8           |

La calidad del filtro que aproxima la respuesta  $V(\lambda)$  influye en la medida, por ejemplo un filtro con mucho error en la zona de los 400nm a 450nm no presentará mucho error con respecto a otro equipo al medir una fuente incandescente ya que la potencia en esa región es baja. Pero el mismo equipo al ser utilizado para medir una lámpara fluorescente compacta o un led frío, probablemente presente mayor error debido a la concentración de potencia de las fuentes en esas longitudes de onda.

Es posible encontrar luxómetros por debajo de USD 100, como el Amprobe LM-200LED, con ajustes de fábrica para medición de fuentes led que permiten realizar medidas en forma igualmente confiables que equipos de más de USD 1000 si se los usa dentro de los parámetros indicados por el fabricante.

Al momento de calibrar un equipo, la generación de tablas con factores de corrección a aplicar a luxómetros o colorímetros debe hacerse no solo para diferentes intensidades, sino también para el tipo de lámpara que se va a medir. En algunos casos esto puede llegar a no ser suficiente, ya se vio que 2 lámparas led con similar temperatura de color pero diferentes distribuciones espectrales presentaban diferencias en la medida. Incluso en algunos casos como instalaciones en los que se mezclan tipos lámparas, la alternativa de contar con factores de corrección para diferentes fuentes puede no ser de utilidad.

Ante la variedad de distribuciones espectrales que pueden presentarse en la tecnología led, la forma confiable de realizar medidas en campo es mediante de uso de radiómetros de iluminancia como el Minolta CL-500A o el Gigahertz Optik BTS256-E.

## 4.2. Efectos de la distribución espectral en la eficiencia

### 4.2.1. Introducción

El objetivo de este capítulo es el de comprender cual es el origen de los términos pupil lumen, relación S/P, visión mesópica y comprender como la distribución espectral influye en la eficiencia.

A comienzos de los 90, Berman, S. publicó un trabajo [5] donde cuestionaba el uso de la curva de eficiencia fotópica para evaluar la luminosidad percibida en una habitación. En el estudio llevado a cabo expuso a un grupo de individuos a fuentes de luz con diferente distribución espectral y notó que al iluminar la habitación con fuentes de luz con mayor potencia en las partes bajas del espectro, estos percibían el ambiente más luminoso, aunque las medidas de los instrumentos indicaban lo contrario.

Luego en 1991 publica un trabajo [6] en el que plantea que en niveles de iluminación de oficina, donde estaba llevando a cabo los experimentos, se estaba subestimando la participación de la visión escotópica y esa era la razón por la cual fuentes con más componentes de azul en el espectro lograban ambientes más luminosos. En ese trabajo introduce el término pupil lumen que representa los lúmenes “reales” que percibe el ojo y se calculan como:

$$pupillumenes = lumenes * (S/P)^{0,78}$$

Donde la relación S/P es algo característico de la fuente y se calcula como el cociente entre el flujo medido para visión escotópica ( $\Phi_{esc}$ ) y el flujo para visión fotópica ( $\Phi_{fot}$ ).

Fuentes de luz, que tienen mayor potencia en las longitudes de onda donde  $V'(\lambda)$  tiene su máximo, como los leds, tienen una mayor relación S/P que otras que concentran la potencia donde  $V(\lambda)$  es máxima, como por ejemplo el sodio. Ver figura 4.7.

En el cuadro 4.4, se ve como al corregir el cálculo de lx basandose en los pupil lúmenes, fuentes que darían los misma medida con un luxómetro, pasan a tener una diferencia un 270 %.

Tabla 4.4: Luxes de fuentes con diferente relación S/P, calculados para visión fotópica y pupil lumenes.

| Fuente de luz      | lx ( $V(\lambda)$ ) | S/P  | lx (pupil lumenes) |
|--------------------|---------------------|------|--------------------|
| Sodio alta presión | 1000                | 0.53 | 609                |
| Led CCT:5200K      | 1000                | 1.65 | 1478               |
| Led CCT:7200K      | 1000                | 1.94 | 1677               |

En la competencia por destronar al Sodio de Alta presión como la tecnología preferida para iluminar espacios públicos, algunos fabricantes de luminarias de tecnología led e inducción magnética han apelado a utilizar la unidad de pupil

## 4.2. Efectos de la distribución espectral en la eficiencia

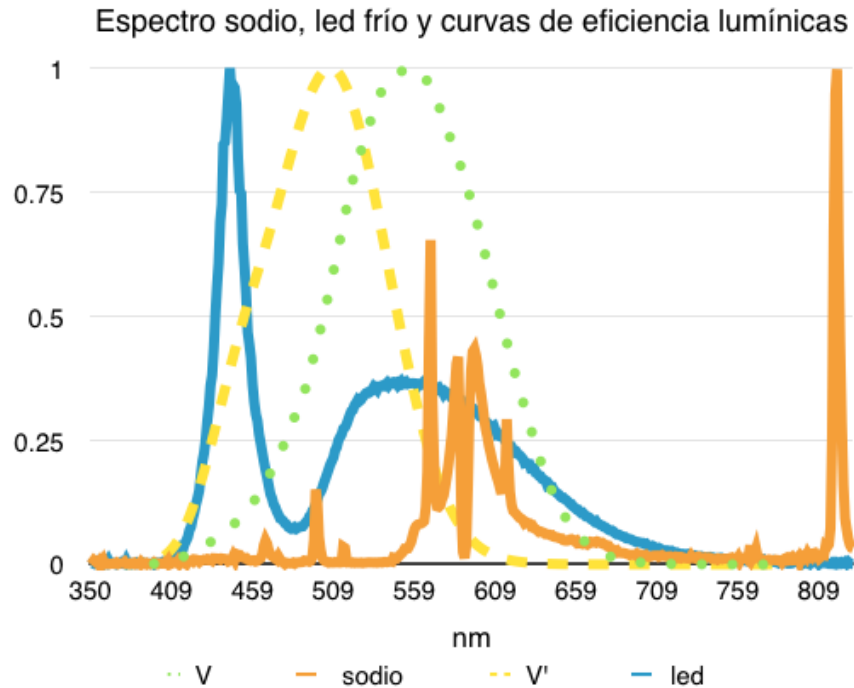


Figura 4.7: Curvas de eficiencia  $V(\lambda)$  y  $V'(\lambda)$  y espectros de luz led y sodio. (En base a medidas realizadas)

lumen y utilizar el factor S/P para corregir las medidas de forma de favorecerse [1, 63].

En la práctica, el calcular los lúmenes utilizando ese factor de pupil lumenes, es como si se ponderara el flujo radiante de la fuente con un nuevo  $V_{pupil}(\lambda)$ , que esta entre  $V(\lambda)$  y  $V'(\lambda)$ , un poco más cercano a este último.

$$\Phi_{pupil} = \int_0^{\infty} V_{pupil}(\lambda) P(\lambda) d\lambda$$

Tal era la confusión, que en los años 2009 y 2010 la Illuminating Engineering Society (IES) emitió comunicados aclarando su posición sobre el tema [37, 38], reafirmando que todas sus guías y recomendaciones se basan en unidades fotométricas que usan  $V(\lambda)$ .

El problema que tiene esta forma de calcular los lúmenes realmente percibidos, es que no toma en cuenta que la curva de eficiencia pasa progresivamente de  $V(\lambda)$  a  $V'(\lambda)$ , dependiendo de la luminancia percibida por el observador. No es un factor constante a aplicar solo teniendo en cuenta la relación S/P de la fuente sino que depende fuertemente de las condiciones de luminancia del entorno.

Pero más allá de los problemas de aplicación de los conceptos, la academia y la industria estaban de acuerdo en que el efecto de la visión mesópica, que es la que se da en la transición de la visión fotópica a escotópica, estaba presente. A medida que las condiciones de luminancia se acercaban a la región de los 0.005 cd/m<sup>2</sup> a

## Capítulo 4. Medición de luz

5cd/m<sup>2</sup>, escenarios iluminados con fuentes con mayor potencia en la región de los azules, se percibían como más luminosos (Figura 4.8).

A fines del año 2010 la CIE generó el reporte CIE 191:2010 “Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance”, este método avalado por un comité técnico que analizó todos los estudios y publicaciones sobre el tema es la postura más reciente sobre la eficiencia en condiciones de visión mesópica. El tener un documento de consenso posibilita tener un punto de partida para generar nuevas guías que permiten proyectar la iluminación vial teniendo en cuenta este factor y aprovechándolo para lograr ahorros energéticos.



Figura 4.8: En condiciones de baja luminosidad, fuentes de luz frías son percibidas como más brillantes. Extraído de [48]

### 4.2.2. Metodología

Con el fin de poder calcular el ahorro que puede lograrse al utilizar una fuente de luz con determinada distribución espectral de potencia, se realiza una búsqueda y estudio de la documentación existente sobre el tema.

La búsqueda y análisis se centra en reportes y recomendaciones generados por los órganos referentes en iluminación IESNA y CIE, normas IEC, casos de estudio publicados y recomendaciones de fabricantes.

### 4.2.3. Resultados

Los resultados se ordenan en 3 partes:

- Fotometría en condiciones de visión mesópica: se expone como debe ponderarse la radiación en el intervalo de visión mesópica de acuerdo al reporte técnico CIE 191:2010 [10].
- Efecto de la relación S/P en la eficiencia: resultados de cuánto aumenta la percepción de luminosidad con iluminación led, que ahorro puede lograrse.
- Proyectar utilizando visión mesópica: se resume el procedimiento sugerido por la IESNA en el documento IES TM-12-12 [39].



## 4.2. Efectos de la distribución espectral en la eficiencia

### Fotometría en condiciones de visión mesópica

El reporte técnico CIE 191:2010 [10] define la función de eficiencia espectral  $V_{mes}(\lambda, m)$  a utilizar cuando se esta en condiciones de visión mesópica. Esta se calcula en función de  $V(\lambda)$  y  $V'(\lambda)$  y un coeficiente  $m$  entre 0 y 1.

$$V_{mes,m}(\lambda) = 1/M(m)(m.V(\lambda) + (1 - m).V'(\lambda))$$

El termino  $M(m)$  es un factor de normalización para que el máximo de  $V_{mes}(\lambda)$  sea siempre uno. El valor de  $m$  depende de la Luminancia mesópica ( $L_{mes}$ ) para el campo de visión del observador. Si  $L_{mes} > 5.0 \text{cd/m}^2$  entonces  $m=1$  ( $L_{mes} = L_{fot}$ ) y si  $L_{mes} < 0.005 \text{cd/m}^2$  entonces  $m=0$  ( $L_{mes} = L_{esc}$ ). Ver figura 4.9

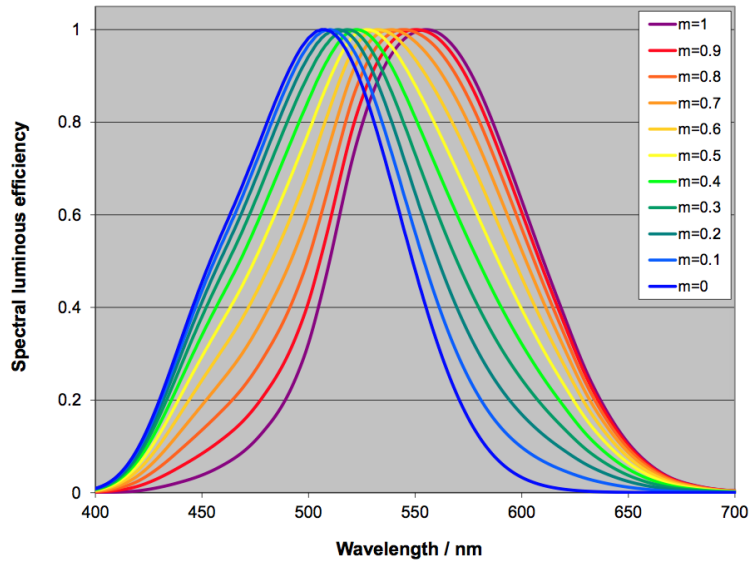


Figura 4.9: VMes Función de eficiencia mesópica  $V_{mes,m}(\lambda)$  (Extraído de [24])

Luego si conocemos la distribución de radiación  $L_e(\lambda)$  del objeto observado, sin ser afectada por la respuesta del ojo expresada en  $W/(m^2 \cdot sr \cdot m)$  y la  $V_{mes}$ , es posible calcular la Luminancia mesópica como:

$$L_{mes} = 683/V_{mes}(555) \int_0^{\infty} V_{mes}(\lambda) L_e(\lambda) d\lambda$$

Pero como puede verse, estamos ante el problema del huevo y la gallina, para calcular  $L_{mes}$  es necesario conocer  $V_{mes}$ , para lo cual se necesita el coeficiente  $m$ , que depende de  $L_{mes}$ .

El reporte propone un método iterativo para llegar al valor de  $m$ , partiendo de  $m_0=0.5$  y los valores de luminancia fotópica ( $L_{fot}$ ) y escotópica ( $L_{esc}$ ), que si pueden medirse inequívocamente.

En el paso  $n$  se calcula  $L_{mes,n}$  como:

$$L_{mes,n} = \frac{m_{(n-1)} \cdot L_{fot} + (1 - m_{(n-1)}) \cdot L_{esc} \cdot (683/1699)}{m_{(n-1)} + (1 - m_{(n-1)}) \cdot (683/1699)}$$

## Capítulo 4. Medición de luz

Luego se calcula el  $m_n$  que correspondería a ese  $L_{mes,n}$  mediante:

$$m_n = 0,767 + 0,3334 * \log_{10}(L_{mes,n})$$

Estos pasos se repiten hasta que se converja a un valor  $m$ .

Pero como indican algunos reportes [24, 71] el método propuesto por la CIE 191:2010 se basa en las luminancias  $L_{fot}$  y  $L_{esc}$ , medida en el campo de visión de interés del individuo. Pero esta no especifica cual es este, ni el tamaño, forma ni posición.

Diferentes aplicaciones pueden tener campos de visión diferentes, por ejemplo un conductor que concentra su atención en un punto relativamente lejano en la carretera no tendrá el mismo campo de visión que un peatón. Las figuras 4.10 y 4.11 presentadas en el reporte [67] muestran como la luminancia promedio puede variar hasta un 29 % dependiendo del campo de visión utilizado.



Image and calculations: Aalto University, Lighting Unit

Figura 4.10: Campo de visión (Extraído de [67])

Actualmente el comité técnico JCT 1 de la CIE se encuentra trabajando en una guía para implementar el método de fotometría mesópica y determinar el campo de adaptación para aplicaciones exteriores como por ejemplo iluminación vial. El documento [24] presenta los avances hasta el momento, pero también plantea varias interrogantes y deja ver que el proceso de generar guías y estandarización de la medida en condición de visión mesópica no es sencillo.

**Efecto de la relación S/P en la eficiencia** Como se vió anteriormente, la relación S/P es algo característico de cada fuente de luz y se calcula como:

$$S/P = \frac{\Phi_{esc}}{\Phi_{fot}}$$

## 4.2. Efectos de la distribución espectral en la eficiencia

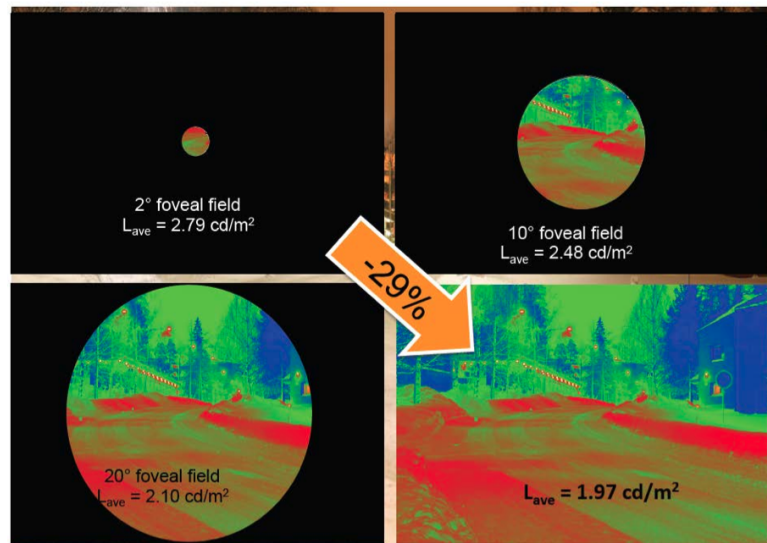


Image and calculations: Aalto University, Lighting Unit

Figura 4.11: Luminancia promedio para diferentes campos de visión (Extraído de [67])

El cuadro 4.5 obtenida de IES TM-12-12 [39] y CIE 191:2010 resume la relación S/P para algunas fuentes de luz.

Tabla 4.5: S/P característico de algunas fuentes de luz.

| Fuente de luz            | relación S/P |
|--------------------------|--------------|
| Sodio de baja presión    | 0.25         |
| Sodio de alta presión    | 0.6          |
| Mercurio de alta presión | 1.05         |
| Led cálido               | 1.15         |
| Haluros metálicos cálida | 1.75         |
| Led frío                 | 2.15         |

Si medimos la luminancia fotópica de un objeto, que no modifica la distribución espectral de la fuente, por ejemplo algo que no es de ningún color particular sino de un tono de gris, como puede ser una calle o carretera de asfalto, y conocemos la relación S/P de la fuente de luz que ilumina, se puede calcular la luminancia escotópica a partir de luminancia fotópica:

$$L_{esc} = L_{fot} \cdot S/P$$

Sustituyendo esto en las ecuaciones del método iterativo para calcular luminancia se tiene:

## Capítulo 4. Medición de luz

$$L_{mes,n} = \frac{(m_{(n-1)} + (1 - m_{(n-1)}) \cdot S/P \cdot K) \cdot L_{fot}}{m_{(n-1)} + (1 - m_{(n-1)}) \cdot K}$$

$$K = 689/1699$$

Esta ecuación permite ver que para condiciones de visión mesópica ( $m < 1$ ), fuentes con  $S/P > 1$  incrementarían la luminancia percibida, mientras que escenario iluminado con fuentes con  $S/P < 1$ , serán vistos como menos luminosos.

El cuadro en la figura 4.12 muestra las diferencias relativas entre  $L_{mes}$  y  $L_{fot}$  para diferentes condiciones de luminancia fotópica y fuentes con diferentes  $S/P$ .

|                  | S/P  | Photopic luminance $cd \cdot m^{-2}$ |       |       |       |       |      |      |      |      |     |
|------------------|------|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|-----|
|                  |      | 0,01                                 | 0,03  | 0,1   | 0,3   | 0,5   | 1    | 1,5  | 2    | 3    | 5   |
| LPS ~            | 0,25 | -75 %                                | -52 % | -29 % | -18 % | -14 % | -9 % | -6 % | -5 % | -2 % | 0 % |
|                  | 0,45 | -55 %                                | -34 % | -21 % | -13 % | -10 % | -6 % | -4 % | -3 % | -2 % | 0 % |
| HPS ~            | 0,65 | -31 %                                | -20 % | -13 % | -8 %  | -6 %  | -4 % | -3 % | -2 % | -1 % | 0 % |
|                  | 0,85 | -12 %                                | -8 %  | -5 %  | -3 %  | -3 %  | -2 % | -1 % | -1 % | 0 %  | 0 % |
|                  | 1,05 | 4 %                                  | 3 %   | 2 %   | 1 %   | 1 %   | 1 %  | 0 %  | 0 %  | 0 %  | 0 % |
| MH warm white ~  | 1,25 | 18 %                                 | 13 %  | 8 %   | 5 %   | 4 %   | 3 %  | 2 %  | 1 %  | 1 %  | 0 % |
|                  | 1,45 | 32 %                                 | 22 %  | 15 %  | 9 %   | 7 %   | 5 %  | 3 %  | 3 %  | 1 %  | 0 % |
|                  | 1,65 | 45 %                                 | 32 %  | 21 %  | 13 %  | 10 %  | 7 %  | 5 %  | 4 %  | 2 %  | 0 % |
|                  | 1,85 | 57 %                                 | 40 %  | 27 %  | 17 %  | 13 %  | 9 %  | 6 %  | 5 %  | 3 %  | 0 % |
| LED cool white ~ | 2,05 | 69 %                                 | 49 %  | 32 %  | 21 %  | 16 %  | 11 % | 8 %  | 6 %  | 3 %  | 0 % |
|                  | 2,25 | 80 %                                 | 57 %  | 38 %  | 24 %  | 19 %  | 12 % | 9 %  | 7 %  | 4 %  | 0 % |
| MH daylight ~    | 2,45 | 91 %                                 | 65 %  | 43 %  | 28 %  | 22 %  | 14 % | 10 % | 8 %  | 4 %  | 0 % |
|                  | 2,65 | 101 %                                | 73 %  | 49 %  | 31 %  | 24 %  | 16 % | 12 % | 9 %  | 5 %  | 0 % |

Figura 4.12: Comparación entre luminancia mesópica y fotópica para diferentes fuentes de luz. (Extraído de [49])

La guía de diseño elaborada por la IES para iluminación de carreteras RP-8-00 [32] establece que la luminancia promedio para caminos locales debe estar entre 0.3 y 0.6  $cd/m^2$ , dependiendo de la cantidad de peatones, y para el caso de rutas más importantes (Major Road) debe estar entre 0.6 y 1.2  $cd/m^2$ .

Analizando esos casos en el cuadro de la figura 4.12, se ve que si se utiliza una fuente de luz led fría en lugar de sodio de alta presión en caminos locales, es posible lograr los mismos niveles, en términos de luminancia mesópica, con un ahorro de entre 29 % (la luminancia de los leds rinde un 21 % más y la del sodio un 8 % menos) a 16 % (luminancia de led rinde 12 % más y sodio 4 % menos).

### Proyectar utilizando visión mesópica

Todos los cálculos y conversiones para contemplar el efecto de la visión mesópica, se basan en medidas de luminancia, que implican tener un campo de adaptación de la visión definido para poder realizar las medidas. Este puede variar dependiendo de: tipo de actividad que este realizando (manejando, caminando, etc.), existencia de fuentes que puedan deslumbrar en el campo de visión, uniformidad en la iluminancia del camino, etc.

La CIE aún no cuenta con una definición sobre cual debe ser el campo de adaptación, mientras que las IES definió en la TM-12-12 que a los efectos de los métodos de aplicación sugeridos en el documento, se considera campo de visión al punto al que esta mirando el individuo. De todas formas, la IES en su Lighting Handbook no recomienda realizar los cálculos para visión mesópica en lugares

## 4.2. Efectos de la distribución espectral en la eficiencia

donde la velocidad límite es mayor a 40 km/h, e indica que esta limitante puede modificarse en el futuro dependiendo del resultado de los estudios en curso.

Otro tema a tener en consideración es que generalmente, y más en Uruguay, se suele proyectar utilizando la iluminancia en la calle o carretera en lugar de la luminancia. Para hacer uso de los cálculos en condiciones mesópicas es necesario convertir el requerimiento de iluminancia a luminancia, asumiendo que el terreno no afecta la relación S/P de la fuente, para esto debe ser gris o de color pastel, ser una superficie difusa y se debe conocer la reflectancia  $\rho$ .

Bajo esa premisa de superficie gris o pastel y no especular, la luminancia a partir de la iluminancia puede calcularse como:

$$L = \frac{\rho * E}{\pi}$$

El procedimiento sugerido en IES TM-12-12 es:

1. Obtener el factor S/P de la luminaria
2. Determinar la iluminancia objetivo que se quiere lograr  $E_{obj}$
3. Determinar la reflectancia  $\rho$  del lugar que se iluminará
4. Determinar los requerimientos de Luminancia  $L_{obj} = E_{obj} * \rho \ \backslash \ \pi$
5. Calcular la iluminancia fotópica que se lograría con la luminaria  $E_{fot}$
6. Determinar la luminancia fotópica en el lugar  $L_{fot} = E_{fot} * \rho \ \backslash \ \pi$
7. Determinar el coeficiente ELF a aplicar utilizando  $L_{fot}$  y S/P
8. Convertir a luminancia efectiva  $L_{efectiva} = L_{fot} * ELF$
9. Iterar los pasos 5 a 8 cambiando la luminaria o su flujo hasta lograr que  $L_{efectiva}$  iguale o supere a  $L_{obj}$

EL coeficiente ELF al que se hace referencia en el paso 7, es la relación entre la luminancia mesópica y la fotópica, para una  $L_{fot}$  y relación S/P dada. Este puede obtenerse de la tabla 4.6, incluida en los anexos del documento IES TM-12-12, o calcularla utilizando el método iterativo y la ecuación de cálculo  $L_{mes,n}$  de la parte anterior, que usa el coeficiente S/P

El contar con equipos que puedan medir directamente la luminancia mesópica como los propuestos por [70, 71] permitiría una verificación de los valores proyectados en campo y medir en cada caso la luminancia efectiva, pudiendo ajustar el flujo de la luminaria si esta lo permitiera.

### 4.2.4. Conclusiones

Si bien aún se están realizando estudios para determinar cual es el campo de adaptación visual al medir la luminancia, lo cual es necesario para medir con precisión el comportamiento visual en la región de visión mesópica, la evidencia

## Capítulo 4. Medición de luz

Tabla 4.6: ELF para algunos S/P y luminancias fotópicas

| S/P  | 0.01 cd/m <sup>2</sup> | 0.03 cd/m <sup>2</sup> | 0.1 cd/m <sup>2</sup> | 0.3 cd/m <sup>2</sup> | 1.00 cd/m <sup>2</sup> | 3.00 cd/m <sup>2</sup> |
|------|------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| 0.25 | 0.25                   | 0.48                   | 0.7                   | 0.82                  | 0.91                   | 0.97                   |
| 0.5  | 0.5                    | 0.69                   | 0.81                  | 0.88                  | 0.94                   | 0.98                   |
| 0.75 | 0.78                   | 0.85                   | 0.91                  | 0.94                  | 0.97                   | 0.99                   |
| 1.0  | 1.0                    | 1.0                    | 1.0                   | 1.0                   | 1.0                    | 1.0                    |
| 1.25 | 1.18                   | 1.12                   | 1.08                  | 1.05                  | 1.02                   | 1.0                    |
| 1.5  | 1.35                   | 1.17                   | 1.16                  | 1.10                  | 1.05                   | 1.01                   |
| 1.75 | 1.5                    | 1.35                   | 1.23                  | 1.15                  | 1.07                   | 1.02                   |
| 2.00 | 1.65                   | 1.46                   | 1.3                   | 1.19                  | 1.1                    | 1.02                   |
| 2.25 | 1.79                   | 1.56                   | 1.37                  | 1.24                  | 1.12                   | 1.03                   |
| 2.5  | 1.93                   | 1.66                   | 1.44                  | 1.28                  | 1.14                   | 1.04                   |

indica que escenarios iluminados con fuentes de luz con mayor S/P son percibidos como más luminosos.

En caso de estar ante una luminancia mayor a 5 cd/m<sup>2</sup>, la medida de luminancia efectiva coincide con la fotópica para cualquier fuente de luz, y para valores menores de luminancia, la iluminación con led frío permite lograr valores de luminancia efectiva mayores que las que se logran con sodio. Esto refuerza la hipótesis de uso del led por sobre el sodio en iluminación de exterior, ya que si ambos tienen un desempeño igual en condiciones de visión fotópica, en condiciones de menor luminosidad la calidad del servicio prestado a la población siempre mejorará en lugar de empeorar.

Si bien restan resultados de estudios, que permitan mejorar el sistema de medición en condiciones de visión mesópica, el memorando técnico IES TM-12-12 presenta un método concreto para proyectar utilizando el CIE 191:2010. Para poder aplicarlo, los fabricantes de luminarias deben incluir en la información técnica de sus productos la relación S/P, además de los datos habituales de flujo y distribución de intensidades.

Dado que la luminancia efectiva depende mucho de el entorno (reflectividad de terreno, luminosidad del entorno, fuentes de luz que deslumbren) y el tipo de actividad que realiza el observador, el contar con un equipo que permitiera medir en campo la luminosidad efectiva, permitiría seleccionar en cada caso el tipo de luminaria a utilizar. En el caso de luminarias con tecnología led, el ajuste de intensidad puede realizarse en forma muy sencilla, lo que permitiría contar con una sola luminaria para diferentes tipos de calles que se ajuste al momento de ser instalada, logrando de esta forma un ahorro extra de energía sin perder calidad de servicio.

# Capítulo 5

## Normativa internacional

### 5.1. Resumen

En este capítulo se presenta un resumen de las normas IEC que actualmente aplican a luminarias viales con tecnología led y se profundiza en los apartados relacionadas con eficiencia y depreciación de flujo luminoso.

También se analizan métodos de medición y ensayo, relacionadas con eficiencia y estimación de pérdida de flujo luminoso, que forman parte de la normativa norteamericana y se han convertido en estándares de facto a nivel mundial.

Se propone la implementación de un servicio de evaluación de luminarias led, basado en un conjunto acotado de normas, que el Instituto de Ingeniería Eléctrica puede realizar utilizando la infraestructura actual. Este servicio puede ser útil para compradores al momento de comparar ofertas de luminarias y estimar su comportamiento luminoso a futuro.

### 5.2. Introducción

A medida que la tecnología led se afianza y se hace más popular, cada vez aparecen más opciones en el mercado. Algunas anunciando desempeños demasiado buenos para ser reales (150 a 200 lm/w) [44] y otras de dudosa calidad.

El cometido de las normas y estándares es establecer reglas claras y universales de criterios de seguridad, definiciones técnicas, métodos de ensayo y medida y valores límites. Es necesario que diseñadores y compradores las conozcan de forma de poder exigir y comparar productos en igualdad de condiciones y tener certeza sobre los datos técnicos reportados.

Actualmente existen dos grandes corrientes de normas, la norteamericana que se nutre de documentos generados por organismos, laboratorio y asociaciones de dicho país (ANSI, NEMA, UL, IES) y la europea que se nutre mayormente de las normas generadas por la IEC. Uruguay, tiene una tradición de adopción de normas IEC, y durante el año 2013 y 2014, funcionó un comité de normas técnicas en UNIT, para adoptar algunas de estas normas referentes a iluminación con estado sólido. Por esta razón en este estudio se aborda principalmente la corriente de normativa

## Capítulo 5. Normativa internacional

europea, aunque se menciona y analizan algunos estándares norteamericanos que complementan puntos no totalmente cubiertos por las normas IEC.

El objetivo de este capítulo no es realizar un análisis exhaustivo de las normas IEC, sino documentar el estado actual de la normativa aplicable a iluminación vial con led, y profundizar en las que influyen en la eficiencia energética y la depreciación de flujo luminoso.

Las normas IEC adoptadas por el comité UNIT se citan como UNIT-IEC y número de la norma, mientras que normas IEC aún no adoptadas por UNIT se citan como IEC y número de la norma.

La organización del capítulo es la siguiente:

- sección 5.3 - Conjunto de normas IEC: se presentan las normas ordenadas según su aplicación y alcance y se analizan las relevantes para eficiencia y depreciación de flujo luminoso.
- sección 5.4 - Algunos estándares y normas americanas: se presentan algunos estándares que pueden complementar los ensayos y normas IEC y otros que se han transformado en el estándares de facto.
- sección 5.5 - Conclusiones: se presentan conclusiones sobre el tema y una propuesta de servicio.

### 5.3. Conjunto de normas IEC

Cada norma IEC cubre un aspecto (seguridad, requerimientos generales, requerimientos particulares, requerimientos de desempeño) que puede aplicar a toda la luminaria o a una parte de esta. A su vez hay normas que referencian a otras para secciones y procedimientos que ya fueron especificados.

En la figura 5.1 se muestran las posibles combinaciones de módulos leds y fuentes de poder que contemplan las normas IEC:

1. lámpara led con balasto
2. fuente de poder o balasto para módulos led y modulo led
3. modulo led con balasto

Las luminarias viales generalmente se conectan directamente a la red eléctrica, sin casquillo, por lo que el primer tipo no aplica. La topología más común es la segunda, módulo led y fuente de poder separada montados dentro de una luminaria. Un ejemplo del tercer caso no pudo ser encontrado para luminarias viales, no queda claro y no se encontraron notas aclaratorias de si una luminaria led puede ser considerada como un módulo led con balasto.

Cada una de las partes que identifica la normativa IEC puede ser de tipo:

- incorporado (built-in): diseñado para constituir una parte no reemplazable de una luminaria.



### 5.3. Conjunto de normas IEC

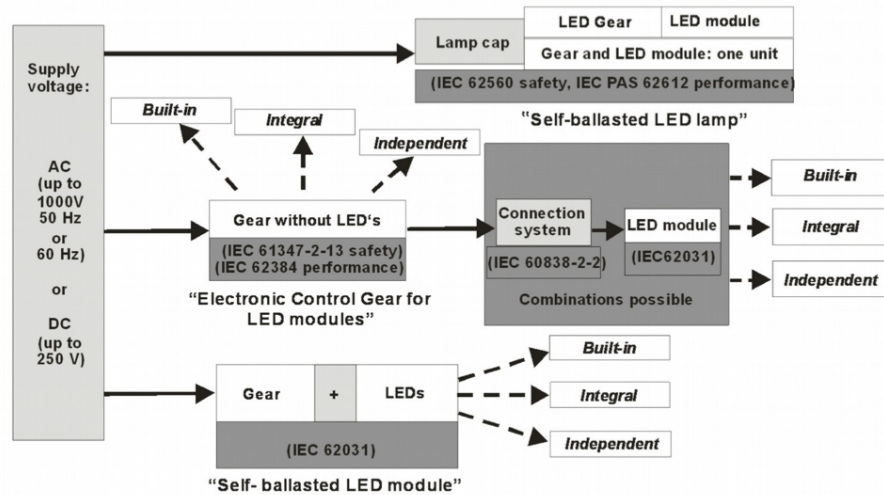


Figura 5.1: Organización de normas IEC en cuanto a módulos led y fuentes de poder (Extraído de [29])

- para incorporar (integral): diseñado generalmente para constituir una parte reemplazable montada en una luminaria, una caja, una envoltura o similar y no previsto para montarse en el exterior de la luminaria, etc. sin precauciones especiales.
- independiente (independent): diseñado de forma que pueda montarse o colocarse separadamente de la luminaria, de una caja adicional, de una envoltura o similar. El módulo LED independiente proporciona todas las protecciones necesarias en lo relativo a la seguridad de acuerdo con su clasificación y marcado.

En la figura 5.2 se muestran algunos ejemplos de tipo independiente y para incorporar, de fuentes de poder y módulos led sin balasto.

En el cuadro 5.1 se resumen las normas de seguridad, desempeño y requerimientos generales y particulares que aplican a cada producto. Entre paréntesis se listan normas a las que hace referencia la norma en cuestión que aplica directamente al producto. Por ejemplo la IEC 60598-2-3 establece los requerimientos de seguridad para luminarias de calle y carretera y en algunas secciones indican que aplica lo establecido en la norma IEC 60598-1 que contiene los requerimientos de seguridad aplicable a todo tipo de luminarias.

Además de la normativa a las partes, también existe normativa que aplica a la luminaria como sistema:

- normativa de desempeño de luminarias IEC/PAS 62722-1 [30]
- normativa de desempeño de luminarias led UNIT-IEC/PAS 62722-2-1 [74]
- normativa de seguridad para luminarias en calles y carreteras IEC 60598-2-3 [28]

## Capítulo 5. Normativa internacional



Figura 5.2: Modules led y fuentes independientes y para incorporar. (Extraído de catálogos Philips y MeanWell)

- normativa de seguridad fotobiológica IEC 62471 [72]

En caso de que se agregue una protección contra sobretensiones se debe indicar para que escenario de la norma C62.41.2 esta dimensionada [31] y se debe exigir que cumpla con la norma de desempeño [27]

La especificación técnica IEC/TS 62504 incluye los términos y definiciones que aplican a leds y módulos leds.

### 5.3.1. Normas para medir eficiencia

Para evaluar la eficiencia de una luminaria led se necesita conocer la potencia consumida, el flujo luminoso, y la distribución de intensidad luminosa si se quiere estimar la cantidad de luxes por Watt para un escenario dado.

Estos datos deberían poder conseguirse si la luminaria cumple con la norma de desempeño para luminarias UNIT-IEC/PAS 62722-2-1:2011 [74]. Esta establece la información que debe proporcionar un fabricante, y la forma en que deben realizarse los ensayos para corroborarla, así como criterios para indicar si la información suministrada corresponde con los resultados ensayados.

En varios apartados de la norma se considera que el tipo de medida o ensayo que se debe realizar a la luminaria, es igual al que se hace para un módulo led. En esos casos en lugar de redactar el método o condiciones nuevamente, se indica que se aplican las disposiciones de determinada sección de la norma para módulos led UNIT-IEC 62717 [73]. Si bien el tipo de medida puede ser el mismo, aplicar las disposiciones de tensión y temperatura de ensayo puede no tener una correspondencia directa, quedando a interpretación del laboratorio qué hacer en algunos casos.

### 5.3. Conjunto de normas IEC

Tabla 5.1: Resumen de normas IEC que aplican a luminarias led viales.

| Producto                                   | Seguridad   | Desempeño   | Otros                                     |
|--|---|---|---|
| Luminaria vial led                         | IEC 60598-2-3<br>(UNIT-IEC 60598-1)<br>(IEC 62262)<br>UNIT-IEC 62031<br>(IEC 61347-1) | IEC/PAS 62722-1<br>UNIT-IEC/PAS 62722-2-1<br>(UNIT-IEC/PAS 62717) | IEC 62471                                 |
| Módulo led                                 | UNIT-IEC 62031<br>(IEC 61347-1)   | UNIT-IEC/PAS 62717<br>(IEC/TR 61341)<br>(CIE 121, IEC/TR 61341 )  |   |
| Fuente de poder                            | IEC 61347-2-13  | IEC 62384   | IEC 61547<br>IEC 61000-3-<br>IEC 61000-3- |
| Módulo protección<br>Contra sobretensiones |   | IEC 61643-11  |   |

Por ejemplo el apartado A.3 de la norma para luminarias que refiere a “Características fotométricas” indica que “Se aplican las disposiciones del apartado A.3 de la Norma IEC/PAS 62717 a la luminaria LED”. En ese apartado se especifica que la tensión de ensayo debe ser la nominal y en caso de un rango las medidas deben hacerse al valor de entrada más adverso para la temperatura del módulo. Esto puede ser lógico por ejemplo en el caso de módulos para integrar, que admiten una corriente de hasta 1050mA [66], y donde es claro que el valor más adverso es ese máximo, pero en luminarias donde se indica un rango de 120V a 277V [65], no es claro cual sería el valor más adverso, y si tiene sentido evaluar el flujo luminoso o potencia consumida cuando funcionará a una tensión nominal de 230V.

Lo mismo sucede para la sección 7 “Potencia total de entrada” donde se indica “La potencia total de entrada debe medirse en la alimentación de la luminaria, o en caso de que ésta presente un dispositivo de control aparte, en la alimentación del dispositivo de control. Las disposiciones de la Cláusula 7 de la Norma IEC/PAS 62717 se aplican a la luminaria LED.” La cláusula 7 de la Norma IEC/PAS 62717 establece “Las medidas se llevan a cabo bajo las condiciones más adversas. Para las condiciones, ver Anexo A.” que indica “La tensión, corriente o potencia del ensayo debe ser la tensión, corriente o potencia nominal respectivamente (para tolerancias, ver Cláusula A.1). En el caso de un rango, las medidas deben llevarse a cabo al valor de entrada correspondiente al efecto más adverso sobre la temperatura del módulo. A.2.2”

El apartado 8.1 Flujo luminoso no esta totalmente definido aún. Nuevamente la norma de desempeño de luminaria cita a la normativa de módulos led IEC/PAS 62717 que establece: “El flujo luminoso se mide de acuerdo con el Anexo A.”. Dicho anexo solamente indica “El flujo luminoso inicial y mantenido debe ser

## Capítulo 5. Normativa internacional

medido después de la estabilización del módulo LED.” junto a las notas:

- “NOTA 1: Se hace referencia al documento CIE 84. IES LM-79-08, así como al Anexo B de la Norma JIS C 8155:2010 que contienen información valiosa sobre la medición del flujo luminoso.”
- “NOTA 2: Un método para la medición del flujo luminoso de módulos LED está bajo consideración”

Como se verá más adelante la normativa americana es más clara en estos aspectos.

### 5.3.2. Normas relacionadas con depreciación de flujo luminoso

La vida útil de una luminaria se define como la cantidad de tiempo que es capaz de mantener un flujo luminoso mayor a un porcentaje dado del flujo luminoso original en más del 50 % de las unidades ensayadas. Habitualmente se define para el 70 % del flujo luminoso inicial, denominando a ese tiempo como  $L_{70}$ . [73]

La información concerniente a la vida de una luminaria puede ser encontrado en el apartado 10 de la norma UNIT-IEC/PAS 62722-2-1. En ésta se plantea que los tiempos de ensayo requeridos para medir la vida útil como  $L_{70}$  son demasiado largos. En lugar de ello opta por asignar un código de mantenimiento de flujo luminoso que puede valer 7, 8 o 9. Estos números indican si el flujo de la luminaria es superior al 70 %, 80 % o 90 % del inicial luego 6000 horas (250 días) o 25 % de las horas de vida declaradas por el fabricante.

Si bien esta medición de flujo luminoso a la 6000 horas y posterior codificación puede servir para desechar luminarias con un desempeño pobre, en la práctica no otorga ninguna predicción de que puede suceder más allá de ese tiempo, ni como se proyectar la depreciación a futuro. En la figura 5.3 se muestra un caso hipotético en el que 2 luminarias tendrían código 9 pero su funcionamiento a futuro difiere enormemente.

Existen métodos de proyección de depreciación de flujos aprobados por la industria [34,35] que permiten estimar que para modelos de led habitualmente utilizados en luminarias viales (por ejemplo Cree XP-G2), el flujo luego de 20000 horas es mayor al 90 % [15]. Esto quiere decir que todas las luminarias con un buen diseño térmico, que aseguren que los leds no trabajarán a temperaturas demasiado elevadas que puedan acelerar la depreciación, tendrán un código 9.

## 5.4. Algunos estándares y normas norteamericanas

En esta sección se plantean las normas que se usan en el mercado norteamericano para determinar la eficiencia y depreciación de flujo luminoso en tecnología led.

En la normativa IEC, que es la que adopta Europa, los ensayos para determinar eficiencia y depreciación se encuentran en una misma norma, la UNIT-IEC/PAS 62722-2-1. En el mercado norteamericano, la normativa se separó en

## 5.4. Algunos estándares y normas norteamericanas

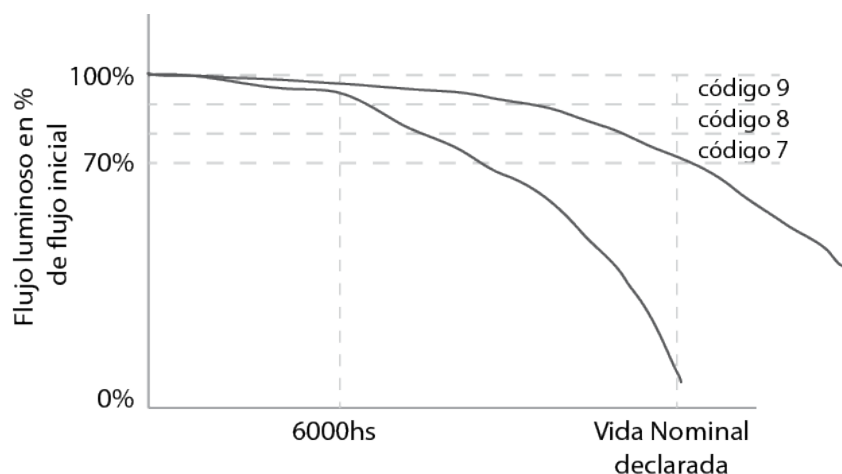


Figura 5.3: Caso hipotético de depreciación de flujo de 2 luminarias con mismo código fotométrico

varios estándares lo que les ha permitido ir actualizándolas más rápidamente y creando documentos específicos para cada caso.

### 5.4.1. Normas para medir eficiencia

El método IES LM-79-08 Electrical and Photometric Measurements of Solid-State Lighting Products [33] es el utilizado en el mercado norteamericano y puede considerarse que es casi un estándar de facto a nivel mundial.

Una primera diferencia con las normas IEC es que acota sin ambigüedades su alcance y lo hace para un caso concreto: el método aplica a luminarias con tecnología LED, es decir dispositivos con control y disipador de calor incorporado, que solo requieren conectarse a la alimentación AC o DC. No se aplica a Leds individuales ni módulos LED [33]

Define métodos y condiciones para medir: flujo luminoso, potencia eléctrica, distribución de intensidad luminosa y cromaticidad para productos con leds a ser utilizados en iluminación. Se establece que la temperatura de medición es de 25°C y la tensión es la normal de uso. Bajo estas condiciones se mide la potencia.

Para la medición de flujo total, admite el uso de esfera integradora o goniofotómetro y para cada uno de estos casos el documento especifica como deben llevarse a cabo las mediciones.

### 5.4.2. Normas relacionadas con depreciación de flujo luminoso

En la normativa norteamericana, la estimación de la depreciación de flujo se realiza utilizando el método LM-80 [34] que especifica como realizar un ensayo de mantenimiento de flujo luminoso en un intervalo de tiempo dado, y la recomendación TM-21-11 [35] que especifica un método de como extrapolar el resultado de dicho ensayo.

## Capítulo 5. Normativa internacional

El método aplica solo a los leds, no a luminarias ni módulos leds y en general es un ensayo que realizan los fabricantes de los mismos y los proveen a sus usuarios. Básicamente consiste en tomar medidas cada 1.000 horas por un mínimo de 6.000 horas, se recomiendan 10.000 horas, a una corriente dada y tres temperaturas de empaque ( $T_s$ ): 55°C, 85°C y una elegida por el fabricante.

El reporte incluye el número de muestras que se utilizaron en el ensayo, corriente, temperatura y depreciación de flujo de cada muestra. En la figura 5.4 se muestran los resultados de un ensayo de 6.000 horas a 350mA y  $T_s=125^\circ\text{C}$  para leds Cree XP-G2, puede verse que la depreciación media luego de 6.000 horas es 0.1 %.

### DATA SET 11: 125°C; 350 mA

|   |  |
|---|--|
| <b>LED Package Series</b>                     | XLamp XP-G2 White LEDs (Series: XPGBWT)<br>This LM-80 report is applicable to the following order codes:<br>XPGBWT-xx-xxxx-xxxxx |
| <b>Tested Model Number</b>                    | XPGBWT-L1-0000-00CE7   |
| <b>Drive Current [<math>I_f</math>]</b>       | 350 mA   |
| <b>Testing Initiation Date</b>                | June 5, 2013   |
| <b>Case Temperature [<math>T_c</math>]</b>    | 125°C  |
| <b>Ambient Temperature [<math>T_a</math>]</b> | 125°C  |
| <b>Failures observed</b>                      | None   |

| Lamp #   | Initial (0 hrs) |           |           |             | Lumen Maintenance (%) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |  |  |  |
|----------|-----------------|-----------|-----------|-------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|--|--|
|          | LF (lm)         | $V_f$ (V) | Calc. CCT | ANSI Target | 168                   | 1008  | 1512  | 2016  | 2520  | 3024  | 3528  | 4032  | 4536  | 5040  | 5544  | 6048  | 6552  |  |  |  |
| 1        | 142.5           | 2.95      | 2997      | 3000        | 98.9                  | 99.0  | 98.9  | 98.9  | 99.6  | 99.4  | 99.6  | 98.7  | 99.0  | 99.6  | 98.8  | 99.9  | 99.0  |  |  |  |
| 2        | 128.5           | 2.92      | 2956      | 3000        | 99.1                  | 99.1  | 99.4  | 99.6  | 99.8  | 99.5  | 99.2  | 99.5  | 99.7  | 100.2 | 99.2  | 100.1 | 99.1  |  |  |  |
| 3        | 127.4           | 2.90      | 2920      | 3000        | 99.0                  | 99.2  | 99.4  | 100.2 | 100.3 | 100.2 | 99.7  | 100.2 | 99.9  | 100.5 | 99.6  | 100.4 | 99.5  |  |  |  |
| 4        | 132.9           | 2.89      | 3084      | 3000        | 99.3                  | 99.9  | 99.9  | 100.8 | 101.0 | 100.7 | 100.0 | 100.5 | 100.9 | 101.3 | 100.0 | 101.2 | 100.3 |  |  |  |
| 5        | 136.4           | 2.95      | 2931      | 3000        | 99.3                  | 99.2  | 99.3  | 100.3 | 100.6 | 100.5 | 100.0 | 100.7 | 100.5 | 101.1 | 100.2 | 101.0 | 100.1 |  |  |  |
| 6        | 132.4           | 2.95      | 2975      | 3000        | 99.1                  | 99.0  | 99.2  | 100.4 | 100.6 | 100.3 | 99.4  | 99.0  | 99.2  | 100.4 | 99.5  | 100.9 | 101.1 |  |  |  |
| 7        | 139.2           | 2.95      | 3001      | 3000        | 98.9                  | 98.9  | 98.8  | 99.0  | 99.3  | 99.1  | 98.9  | 99.1  | 99.0  | 99.6  | 98.9  | 99.6  | 98.8  |  |  |  |
| 8        | 142.0           | 2.98      | 3090      | 3000        | 99.7                  | 99.6  | 99.7  | 101.2 | 101.1 | 100.3 | 100.0 | 101.4 | 100.9 | 100.9 | 99.8  | 101.4 | 99.8  |  |  |  |
| 9        | 146.7           | 3.00      | 3126      | 3000        | 99.4                  | 99.5  | 99.8  | 100.9 | 100.1 | 101.1 | 99.8  | 101.1 | 100.6 | 100.9 | 99.7  | 100.9 | 100.8 |  |  |  |
| 10       | 137.1           | 2.95      | 3047      | 3000        | 99.5                  | 99.1  | 99.1  | 99.8  | 99.9  | 99.6  | 99.0  | 99.9  | 99.4  | 99.8  | 99.4  | 100.0 | 98.7  |  |  |  |
| 11       | 138.9           | 2.95      | 3087      | 3000        | 99.3                  | 99.5  | 99.4  | 99.9  | 99.4  | 100.1 | 99.2  | 100.4 | 99.7  | 100.2 | 99.6  | 100.5 | 100.1 |  |  |  |
| 12       | 135.4           | 2.95      | 3066      | 3000        | 99.3                  | 99.3  | 99.1  | 101.1 | 100.2 | 100.6 | 99.1  | 100.9 | 99.9  | 100.7 | 99.4  | 100.8 | 99.7  |  |  |  |
| 13       | 143.8           | 2.96      | 3071      | 3000        | 99.2                  | 99.4  | 99.7  | 100.2 | 99.7  | 100.3 | 99.6  | 100.6 | 100.2 | 100.8 | 99.9  | 100.7 | 100.5 |  |  |  |
| 14       | 143.5           | 2.95      | 3086      | 3000        | 99.1                  | 99.2  | 99.7  | 100.0 | 99.5  | 100.3 | 99.4  | 100.2 | 100.0 | 100.7 | 99.7  | 100.7 | 100.3 |  |  |  |
| 15       | 142.1           | 2.98      | 3120      | 3000        | 99.3                  | 99.2  | 99.1  | 100.4 | 99.5  | 100.4 | 99.4  | 100.4 | 100.1 | 100.6 | 99.3  | 100.8 | 100.4 |  |  |  |
| 16       | 142.5           | 2.99      | 3112      | 3000        | 99.3                  | 99.4  | 100.0 | 100.0 | 99.2  | 100.4 | 99.6  | 100.5 | 100.2 | 100.9 | 100.0 | 100.9 | 100.6 |  |  |  |
| 17       | 129.8           | 2.93      | 2967      | 3000        | 99.0                  | 98.8  | 99.7  | 100.6 | 100.1 | 99.2  | 98.9  | 98.5  | 99.3  | 99.6  | 98.8  | 100.6 | 99.3  |  |  |  |
| 18       | 143.1           | 2.95      | 3042      | 3000        | 99.4                  | 99.1  | 99.5  | 99.3  | 99.5  | 99.5  | 99.5  | 99.3  | 100.4 | 100.0 | 99.1  | 99.5  | 99.5  |  |  |  |
| 19       | 127.4           | 2.92      | 2944      | 3000        | 99.2                  | 99.2  | 100.1 | 99.6  | 100.5 | 99.5  | 99.7  | 99.3  | 99.6  | 99.9  | 99.9  | 100.2 | 100.2 |  |  |  |
| 20       | 129.6           | 2.88      | 2925      | 3000        | 99.1                  | 99.5  | 100.4 | 101.2 | 100.4 | 99.4  | 99.1  | 99.2  | 100.5 | 100.2 | 99.6  | 100.6 | 99.3  |  |  |  |
| 21       | 127.9           | 2.90      | 2957      | 3000        | 100.1                 | 100.4 | 100.5 | 100.1 | 100.0 | 100.3 | 99.5  | 99.7  | 99.8  | 100.3 | 99.9  | 100.3 | 100.1 |  |  |  |
| 22       | 130.9           | 2.89      | 3149      | 3000        | 99.5                  | 99.2  | 100.5 | 100.5 | 100.4 | 99.5  | 99.5  | 99.4  | 100.7 | 100.3 | 99.5  | 100.7 | 99.9  |  |  |  |
| 23       | 133.2           | 2.89      | 3093      | 3000        | 99.5                  | 100.1 | 100.5 | 100.1 | 101.3 | 100.3 | 100.7 | 99.8  | 100.8 | 101.1 | 100.6 | 101.0 | 101.0 |  |  |  |
| 24       | 135.2           | 2.95      | 2964      | 3000        | 98.8                  | 98.9  | 100.1 | 98.9  | 99.6  | 98.9  | 99.1  | 98.9  | 99.3  | 99.2  | 98.9  | 99.1  | 99.4  |  |  |  |
| 25       | 133.1           | 2.95      | 2971      | 3000        | 99.3                  | 99.4  | 100.2 | 100.0 | 100.2 | 99.4  | 99.5  | 99.1  | 100.7 | 100.7 | 99.7  | 100.6 | 100.1 |  |  |  |
| n        | 25.0            | 2.95      | 2971      | 3000        | 99.3                  | 99.4  | 100.2 | 100.0 | 100.2 | 99.4  | 99.5  | 99.1  | 100.7 | 100.7 | 99.7  | 100.6 | 100.1 |  |  |  |
| Mean     | 136.1           | 2.94      |           |             | 99.3                  | 99.3  | 99.7  | 100.1 | 100.1 | 100.0 | 99.5  | 99.8  | 100.0 | 100.4 | 99.6  | 100.5 | 99.9  |  |  |  |
| Median   | 135.4           | 2.95      |           |             | 99.3                  | 99.2  | 99.7  | 100.1 | 100.1 | 100.2 | 99.5  | 99.8  | 100.0 | 100.4 | 99.6  | 100.6 | 100.4 |  |  |  |
| $\sigma$ | 6.0             | 0.03      |           |             | 0.26                  | 0.38  | 0.51  | 0.65  | 0.65  | 0.57  | 0.42  | 0.80  | 0.58  | 0.55  | 0.44  | 0.55  | 0.66  |  |  |  |
| Min.     | 127.4           | 2.88      |           |             | 98.8                  | 98.8  | 98.8  | 98.9  | 98.9  | 98.9  | 98.9  | 98.5  | 99.0  | 99.2  | 98.8  | 99.1  | 98.7  |  |  |  |
| Max.     | 146.7           | 3.00      |           |             | 100.1                 | 100.4 | 100.5 | 101.2 | 101.3 | 101.1 | 100.7 | 101.4 | 100.9 | 101.3 | 100.6 | 101.4 | 101.1 |  |  |  |

Figura 5.4: Extracto de reporte LM-80 para led XP-G2. (Extraído de [18])

La recomendación TM-21 toma como insumos los resultados del ensayo LM-80 y ajusta una curva exponencial mediante el método de mínimos cuadrados para

#### 5.4. Algunos estándares y normas norteamericanas

estimar la depreciación a futuro. Para el ajuste se desprecia la primera medida pues esta comprobado que el flujo de los leds aumenta en las primeras horas de vida y luego comienza a decaer [35] y se utilizan los datos de las últimas horas de acuerdo a como se detalla en [35]. Ver figura 5.5

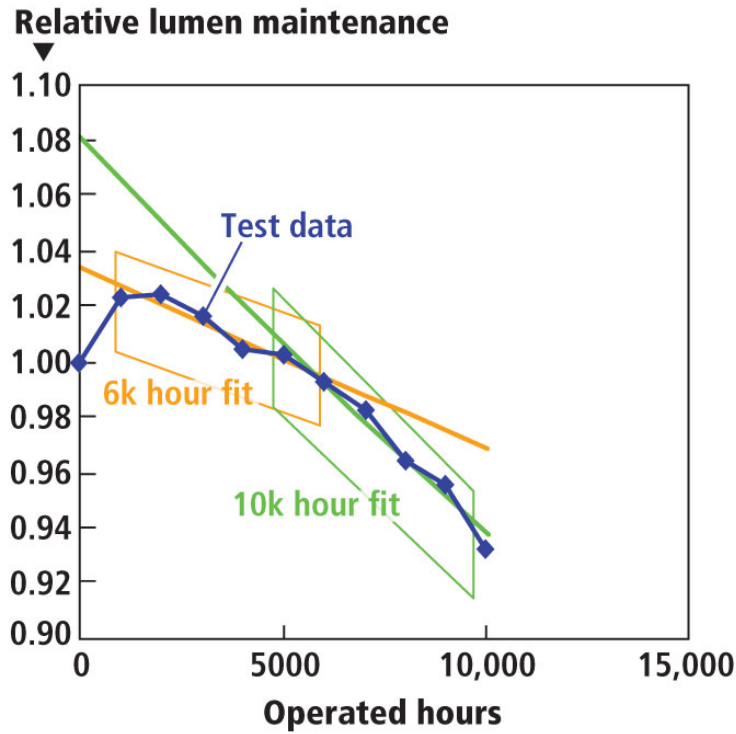


Figura 5.5: Ajuste de curva de depreciación con datos LM-80 (Extraído de [64])

$$\Phi(t) = B.exp(-\alpha.t)$$

Donde:

- t es el tiempo en horas
- $\Phi(t)$  el flujo luminoso normalizado en un instante t
- B constante obtenida al ajustar la curva a los datos
- $\alpha$  constante obtenida al ajustar la curva a los datos

Mediante esta ecuación se puede predecir en que momento se llegará a un determinado porcentaje de depreciación, por ejemplo  $L_{70}$ :

$$L_{70} = \frac{\ln(B/0,7)}{\alpha}$$

El comité formado por empresas fabricantes de leds y laboratorios que trabajo en la elaboración de este método, determinó una cota para el tiempo de la estimación. Analizando datos estadísticos se llegó a que el número de muestras ideal es

## Capítulo 5. Normativa internacional

de 20 unidades, más no aportaban mayor certidumbre a la estimación, y que no se podía asegurar nada más allá de 6 veces el tiempo máximo del que se tienen datos. Esto quiere decir que si se tiene datos LM-80 para un ensayo de 6000 horas, no se puede proyectar la depreciación más allá de las 36000 horas. En la figura 5.6 se ve la proyección para un caso extraído de los anexos de [35].

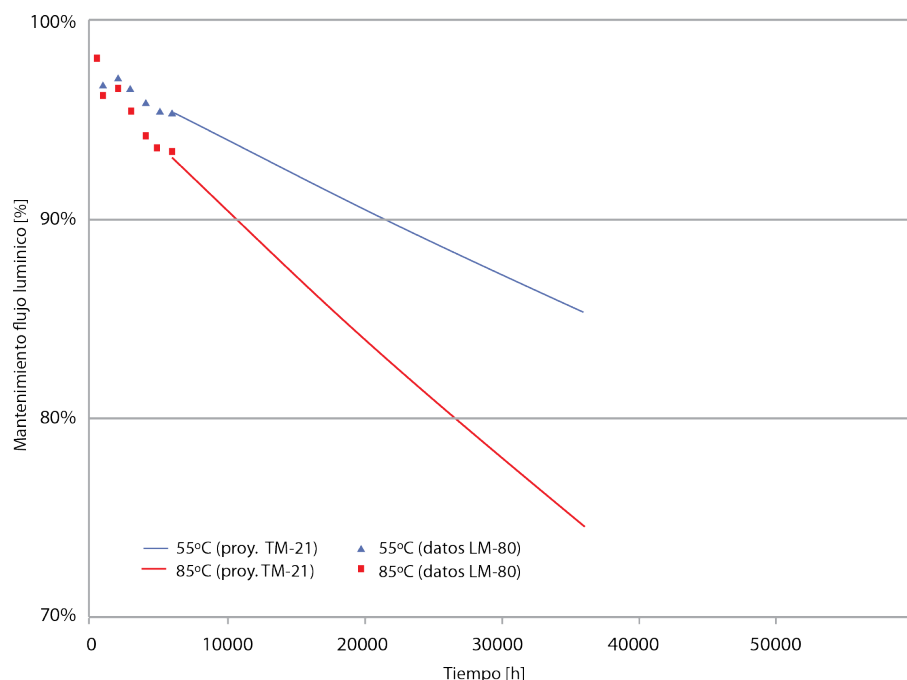


Figura 5.6: Proyección de mantenimiento de flujo lumínico utilizando 6000 horas de datos LM-80. (Extraído de [35])

Si por ejemplo el  $L_{70}$  proyectado da 50.000 horas y se cuenta con datos de solo 6000 horas de ensayo, se indica  $L_{70} > 36.000$ . Si la proyección se hiciera con 10.000 horas, si se puede indicar  $L_{70} = 50000$ . El cuadro de la figura 5.7 muestra algunas proyecciones TM-21 para diferentes condiciones de ensayo LM-80 de leds Cree XP-G2.

El método TM-21 también prevé poder ajustar la proyección de depreciación de flujo con la temperatura de funcionamiento del led  $T_s$  si ésta no coincide con alguna de las 3 utilizadas en el ensayo LM-80. La fórmula para hacerlo y el procedimiento se encuentra en la sección 6 de [35].

Como se planteó anteriormente en este trabajo y puede verse en la figura 5.6, la temperatura real de trabajo influye directamente en la forma en que se dará la depreciación de flujo luminoso. Es por eso que al momento de evaluar una luminaria, no basta con contar los los datos LM-80 de como se comporta el led utilizado, es necesario para poder realizar una buena proyección utilizando el método TM-21 conocer la corriente y temperatura de trabajo.

La norma ANSI/UL 1598 “In-situ Temperature Measurement Test (ISTMT)” [3] define un método para medir la temperatura de trabajo de los leds en condiciones lo más cercanas a la realidad posible. La luminaria se instala en la posición



## 5.5. Conclusiones

### Test Summary

| Data Set | Case Temp. [T <sub>c</sub> ] | Ambient Temp. [T <sub>a</sub> ] | Drive Current [I <sub>v</sub> ] | Average Lumen Maintenance at 6,000 hours | Average Chromaticity Shift ( $\Delta u'v'$ ) at 6,000 hours | Reported TM-21 Lifetimes   |
|----------|------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--|---|--|
| 9        | 85°C                         | 85°C                            | 500 mA                          | 98.0%                                    | 0.0012  | L90(6k) > 36,300 hrs<br>L80(6k) > 36,300 hrs<br>L70(6k) > 36,300 hrs |
| 10       | 105°C                        | 105°C                           | 500 mA                          | 98.3%                                    | 0.0010  | L90(9k) > 51,400 hrs<br>L80(9k) > 51,400 hrs<br>L70(9k) > 51,400 hrs |
| 8        | 105°C                        | 105°C                           | 700 mA                          | 96.8%                                    | 0.0010  | L90(9k) = 27,000 hrs<br>L80(9k) > 51,400 hrs<br>L70(9k) > 51,400 hrs |
| 3        | 55°C                         | 55°C                            | 1000 mA                         | 97.0%                                    | 0.0010  | L90(9k) > 54,400 hrs<br>L80(9k) > 54,400 hrs<br>L70(9k) > 54,400 hrs |
| 4        | 85°C                         | 85°C                            | 1000 mA                         | 96.6%                                    | 0.0010  | L90(9k) > 51,400 hrs<br>L80(9k) > 51,400 hrs<br>L70(9k) > 51,400 hrs |
| 5        | 105°C                        | 105°C                           | 1000 mA                         | 96.8%                                    | 0.0011  | L90(6k) = 24,500 hrs<br>L80(6k) > 36,300 hrs<br>L70(6k) > 36,300 hrs |
| 6        | 55°C                         | 55°C                            | 1500 mA                         | 98.1%                                    | 0.0009  | L90(6k) = 28,800 hrs<br>L80(6k) > 36,300 hrs<br>L70(6k) > 36,300 hrs |
| 7        | 85°C                         | 85°C                            | 1500 mA                         | 96.5%                                    | 0.0012  | L90(6k) = 24,500 hrs<br>L80(6k) > 36,300 hrs<br>L70(6k) > 36,300 hrs |

Figura 5.7: Proyección TM-21 para diferentes leds Cree XP-G2. (Extraído de [15])

y lugar para el que fue diseñada (ver figura 5.8) y se le instalan termocuplas en el led más caliente y la fuente de poder, ver figura 5.9

El resultado del ensayo es un reporte informando las temperaturas registradas a una temperatura ambiente de 25°C y la corriente que circula por los leds. La norma establece que si se espera que la luminaria sea utilizada a otra temperatura ambiente, la diferencia con los 25°C se suma o resta a la de los leds. Por ejemplo si se proyecta un uso en Montevideo donde la temperatura media anual es de 17.5°C [19], al dato de temperatura medido en el led se le restan 7.5°C para usarlo en la proyección TM-21.

## 5.5. Conclusiones

### 5.5.1. Sobre las normas IEC

Luego de estudiar las normas IEC se concluye que su estructura de capas puede dejar dudas o permitir interpretaciones diferentes de algunos aspectos. Esto se ve por ejemplo en los casos de apartados de la norma que aplica a luminarias y cita apartados de la norma que aplica a módulos led, algunas condiciones que aplican en un caso no son relevantes en el otro.

El estado actual las normas IEC que aplica a las mediciones necesarias para determinar la eficiencia de una luminaria no es definitivo. La nota 2 del apartado de

Capítulo 5. Normativa internacional

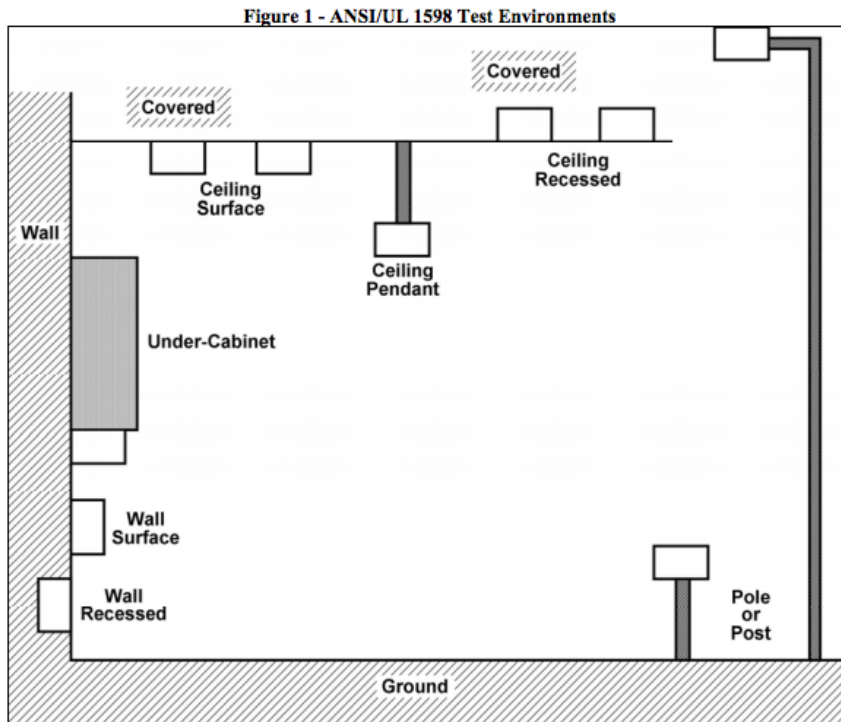


Figura 5.8: Escenarios para In-situ Temperature Measurement Test (ISTMT). (Extraído de [3])

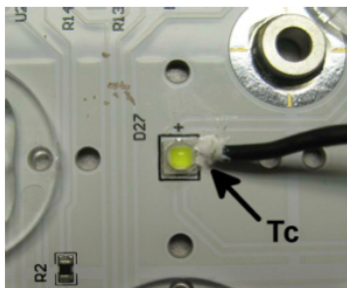


Fig 1: LED Thermocouple #1



Fig 2: Driver/PS Thermocouple #2

Figura 5.9: Termocuplas en ensayo In-situ Temperature Measurement Test (ISTMT). (Extraído de [40])

medición de flujo luminoso indica: “Un método para la medición del flujo luminoso de módulos LED está bajo consideración”

El código de depreciación fotométrica que asigna la norma UNIT-IEC/PAS 62722-2-1 no es de utilidad dado que actualmente la depreciación de flujo de los leds es tan baja que todas obtendrán código 9 y no se sabe como será le evolución a futuro.

### 5.5.2. Sobre las normas norteamericanas

Las normativas y estándares americanos son más prácticos, cada documento que define un procedimiento también define las condiciones en que debe realizarse. Esto evita confusiones y ambigüedades al interpretar los datos reportados.

### 5.5.3. Normas y ensayos más relevantes

Pero al final del día las normas y estándares deben de poder servir para facilitar el trabajo de comparación y evaluación de productos. La siguiente es una propuesta de una lista acotada y fácil de conseguir de reportes de ensayos o documentos que debería pedir un comprador para evaluar una luminaria desde el punto de vista de su desempeño actual y futuro:

- reporte de ensayo IES LM-79-08: permite conocer el flujo luminoso, potencia eléctrica, distribución de intensidad luminosa y cromaticidad.
- archivo con distribución de intensidades luminosas en formato estándar según IES LM-63-02 [36]
- datos de depreciación de flujo de leds instalados obtenidos mediante método IES LM-80-08
- reporte de ensayo ANSI/UL 1598:2004: permite conocer la temperatura de trabajo de los leds y fuente
- proyección de depreciación de flujo luminoso mediante método TM-21 utilizando los datos LM-80-08 y valores de temperatura y corriente reportados en el ensayo ANSI/UL 1598:2004
- reporte de ensayo de estanqueidad IP realizado según norma IEC 60598-1: para asegurarse que no se perderá flujo luminoso debido a ingreso de agua o polvo en el recinto que contiene los leds debería de exigirse grado IP65.
- opcionalmente podría solicitar un reporte de ensayo a impactos según norma IEC 62262 para conocer el grado IK de la misma. En caso de luminarias con protección de vidrio, la norma IEC 60598-2-3 establece que luminarias montadas a más de 5m de altura deben tener al menos un grado IK8.

### 5.5.4. Una propuesta de servicio de evaluación de luminarias viales led en el IIE

Muchas veces los compradores no cuentan con la capacidad técnica para analizar los datos y compararlos. El Instituto de Ingeniería Eléctrica cuenta con los equipos para realizar los ensayos listados anteriormente, por lo que podría ofrecer un servicio de análisis de luminarias led, similar al que ofrece Cree con su servicio TEMPO24 [14].

Si se incorpora un radiómetro, también podría reportarse la distribución espectral de potencia y la relación S/P de la luminaria.

## Capítulo 5. Normativa internacional

Tabla 5.2: Información a incluir en reporte de análisis de luminaria led realizado en el IIE

| Ítem   | que se informa                    |
|--|-----------------------------------|
| Flujo luminoso total   | flujo de la luminaria en lm       |
| Temperatura de color (CCT)   | temperatura de color en K         |
| Coordenadas Cx y Cy  | coordenadas de color              |
| Distribución de intensidad luminosa  | matriz de intensidades            |
| Potencia eléctrica de la luminaria   | W consumidos de la red eléctrica  |
| Eficiencia   | lm/W                              |
| Factor de potencia y distorsión armónica                                   |                                   |
| Corriente de alimentación de los leds                                      | mA que llega a cada serie de leds |
| Potencia entregada por la fuente   | W entregados a los leds           |
| Eficiencia de la fuente  | Pot. leds / Pot. luminaria        |
| Fotos con cámara termográfica  | puntos más caliente               |
| Ts y Tj de led   | Temperatura de led más caliente   |
| Tp en fuente   | Temperatura de trabajo de fuente  |
| Estimación de depreciación de flujo basado en Método TM-21 con datos LM-80 | L90, L70, L80                     |
| Grado IP   | grado de estanqueidad             |
| Grado IK   | grado de resistencia a impactos   |

# Capítulo 6

## Aplicaciones

Esta tesis incluyó un fuerte trabajo experimental. Una parte del mismo, orientado a ensayos y medidas de laboratorio, ya fue descrita en capítulos anteriores. Otra parte del trabajo experimental consistió en la aplicación directa de los conocimientos adquiridos a diferentes proyectos concretos.

En este capítulo se realiza una descripción para tres de ellos: 1) una luminaria vial para la ciudad vieja, 2) luminarias para el estudio de crecimiento de plantas con diferentes niveles y espectro de radiación y 3) luminarias para el salón de actos de la Facultad de Ingeniería.

Estos trabajos me permitieron abordar el tema no solo desde un punto de vista académico y teórico, sino también práctico y comercial. Cada uno de ellos sirvió para ahondar o confirmar temas estudiados durante esta tesis.

### 6.1. Luminaria colgante para Ciudad Vieja de Montevideo

#### 6.1.1. Introducción

En noviembre de 2012, la Unidad Técnica de Alumbrado Público (UTAP) de la Intendencia de Montevideo (IM) firmó un convenio con la Escuela Universitaria Centro de Diseño (EUCD) de la Facultad de Arquitectura y el Instituto de Ingeniería Eléctrica (IIE) de la Facultad de Ingeniería para el diseño de una luminaria con tecnología led.

Esta debía de poder ser instalada en forma colgante en la Ciudad Vieja y debía cumplir con los requerimientos estéticos y de iluminación solicitados por la Intendencia.

La EUCD estuvo a cargo del diseño de la carcasa y el IIE del diseño eléctrico y fotométrico de la misma. Para esto se necesita una herramienta que permita evaluar el desempeño de diferentes opciones de leds, lentes y fuentes de corriente.

Como antecedente de esta herramienta, existe un desarrollo realizado por el Ing. Nicolás Rivero que permite, a partir de datos de fotometría relevados con el

## Capítulo 6. Aplicaciones

goniofotómetro del IIE, estimar la iluminancia y uniformidad para un escenario de iluminación vial, con la luminaria montada sobre un poste a un lado del camino.

La necesidad de poder tomar decisiones de diseño sin tener que pasar por el proceso de comprar un led, lente, y relevar su fotometría, para luego poder evaluar su desempeño en el escenario, fue lo que me llevó a desarrollar el método y la herramienta de esta tesis. Esta permitió analizar alternativas de lentes, cantidad y modelo de leds, y corriente de alimentación, solo a partir de datos de los fabricantes. También el disponer de los datos en un formato de archivo estándar, permitió utilizar programas de terceros para la simulación y visualización de la fotometría.

### 6.1.2. Diseño implementado

Uno de los requerimientos especificados por la IM, es que además de iluminar el piso, se debían de iluminar los primeros 2.5m de fachadas. Los niveles requeridos fueron:

- piso: Iluminancia media ( $E_m$ )  $>18lx$ , Uniformidad media ( $U_m$ )  $>0.25$
- fachadas: Iluminancia media ( $E_m$ )  $>8lx$ , Uniformidad media ( $U_m$ )  $>0.25$

Las luminarias debían de instalarse a 7m de altura y a una distancia entre ellas de 33m. En la figura 6.1 puede verse una simulación del escenario a iluminar.



Figura 6.1: Simulación de escenario de Ciudad Vieja

Se requerían dos temperaturas de color, leds fríos para iluminar las calles con circulación de buses y leds cálidos para el resto.

## 6.1. Luminaria colgante para Ciudad Vieja de Montevideo

Se realizó un esquema para determinar en que dirección y ángulos debían de concentrarse las mayores intensidades luminosas. Estas serían las que apuntan a los lugares más alejados, ya que la intensidad disminuye con el cuadrado de la distancia.

La figura 6.2 muestra una vista frontal, mirando a lo largo de la calle, y una lateral, mirando de una acera a la otra. Con este esquema se realizó una búsqueda de lentes disponibles en los catálogos de varios fabricantes, encontrando que el lente STRADA-2x2-DNW de Ledil era el que mejor se ajustaba a los requerimientos.

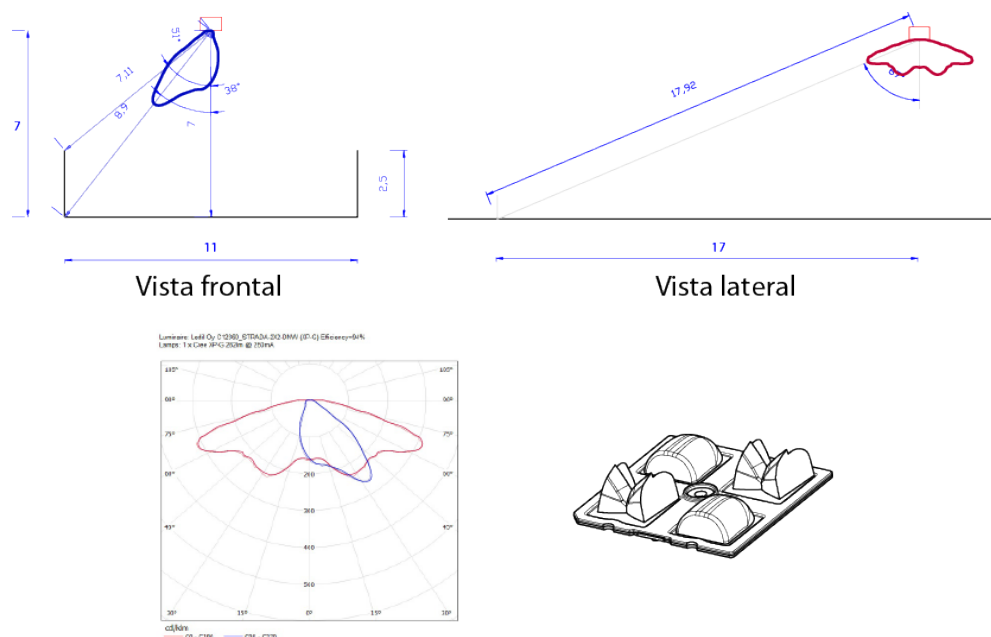


Figura 6.2: Esquema de distancias y ángulos relevantes para selección de lentes. Se muestra superpuesta la dist. de intensidades luminosas para el lente STRADA-2x2-DNW (Extraído de [47])

El lente STRADA 2x2 DNW es asimétrico, direcciona la luz hacia los lados y hacia el frente. Como la luminaria se instala en el centro de la calle, y debe arrojar luz hacia los cuatro lados, se utilizó una combinación de los lentes. La mitad apuntan hacia una fachada y la otra mitad, girados 180° apuntan a la otra.

Los leds elegidos fueron Cree XP-G de 3000K y 5000K, cálidos y fríos respectivamente.

Se diseñaron y fabricaron circuitos impresos de aluminio, para maximizar la transferencia térmica hacia el disipador. Para el soldado, se utilizó un hornillo eléctrico con una termocupla para implementar la curva de soldado sugerida por el fabricante de los leds. Ver figura 6.3

Finalmente, todo el diseño, junto a la fuente de corriente Philips Xitanium, fue montado en una estructura realizada con perfilera de aluminio y se relevó su fotometría en el laboratorio del IIE. Ver foto 6.4

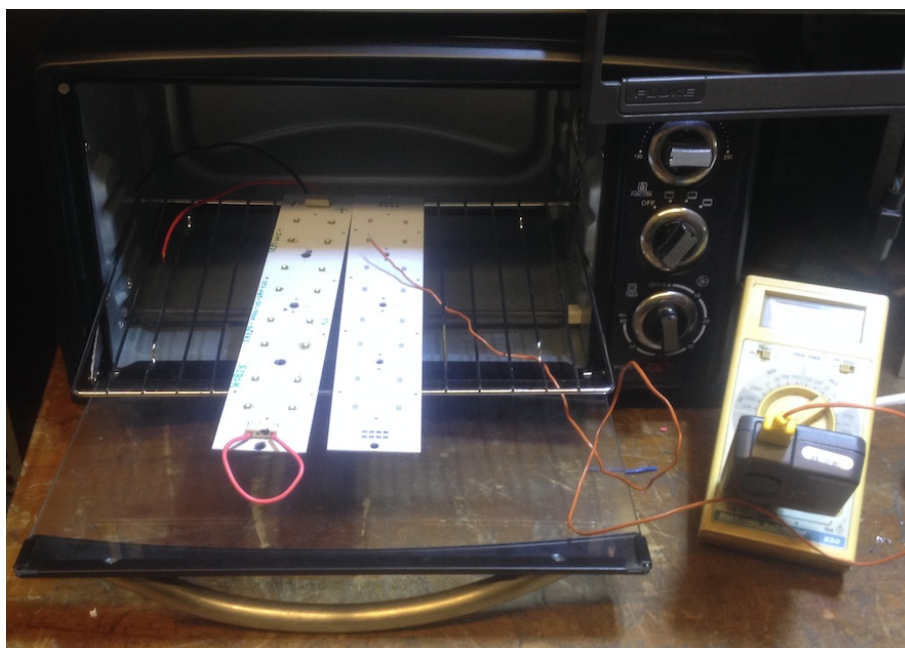


Figura 6.3: Proceso de soldado de leds en horno

### 6.1.3. Resultados

Si bien la carcasa no llegó a construirse, debido a los costos de producción de una pieza única de ese tamaño, pudieron ensamblarse y probarse exitosamente los elementos que se alojan en su interior.

Al momento de realizar el diseño y las estimaciones, se optó por una opción que utilizara 64 leds Cree XP-G alimentados a 700mA, con un consumo total de 139W. Si bien eramos conscientes que faltaría un poco para llegar a los valores requeridos de iluminancia, sabíamos que en un futuro próximo, la nueva línea de leds XP-G2 estaría disponible al mismo costo que los XP-G y se lograría el objetivo final. Al momento de realizar las compras los leds Cree XP-G2 eran 3 veces más caros y se optó por no incluirlos. En la tabla 6.1 se resumen las estimaciones de fotometría realizadas con DIALux.

Tabla 6.1: Valores de fotometría para luminaria colgante de Ciudad Vieja.

| Fuente de luz    | Em     | Um    |
|------------------|--------|-------|
| Req. en piso     | >18 lx | >0.25 |
| 64 leds XP-G     | 15 lx  | 0.59  |
| 64 leds XP-G2    | 19 lx  | 0.66  |
| Req. en fachadas | >8 lx  | >0.25 |
| 64 leds XP-G     | 5.2 lx | 0.66  |
| 64 leds XP-G2    | 7.3 lx | 0.72  |



## 6.2. Luminarias para plataforma de fenotipado de plantas



Figura 6.4: Módulos leds listos para medición en gonifotómetro.

Además de los resultados numéricos favorables y el desarrollo de la herramienta software para generar archivos fotométricos, se adquirió práctica en el soldado de componentes superficiales utilizando hornos y control de temperatura. Este conocimiento fue compartido y utilizado en proyectos de investigación y de estudiantes en el IIE.

## 6.2. Luminarias para plataforma de fenotipado de plantas

### 6.2.1. Introducción

En el año 2014 se llevó adelante el proyecto “Desarrollo de una plataforma de fenotipado como base para la mejora de la tolerancia a estrés ambiental de cultivos y ajustes de modelos de simulación”. Este proyecto fue presentado a la convocatoria Línea 4 - Convocatoria 2012 del INIA y seleccionado para su financiación. Participan la Facultad de Agronomía, la Facultad de Arquitectura y la Facultad

## Capítulo 6. Aplicaciones

de Ingeniería.

El mismo consistió en la construcción de un recinto con temperatura, humedad y radiación lumínica controlada y un sistema de escaneo 3D para el estudio del crecimiento de plantas ante diferentes condiciones ambientales.

El rol del Instituto de Ingeniería Eléctrica (IIE) de la Facultad de Ingeniería, fue el de diseñar un sistema que permitiera medir, visualizar y generar radiación en el espectro de los 400nm a 700nm. La radiación generada debía de poder controlarse desde un PC, no solo modificando el nivel general, sino también la distribución espectral de la potencia emitida. La figura 6.5 muestra un diagrama de bloques del sistema implementado.

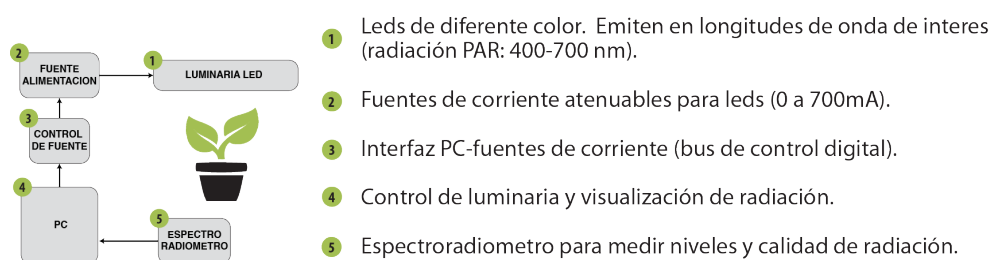


Figura 6.5: Sistema de medición y generación de radiación con luminarias led para plataforma de fenotipado

Durante este proyecto pude tomar contacto con el diseño de luminarias teniendo en cuenta la distribución espectral de potencia, y como esta puede afectar los procesos biológicos. Las luminarias desarrolladas y equipos adquiridos, permitieron hacer los experimentos de evaluación de error en la medida de luz, con diferentes luxómetros que se presenta en el capítulo 4.

El control de las luminarias es posible mediante el uso de fuentes de poder con bus DALI [26]. Este es un bus de control de protocolo abierto, que permite interrogar y comandar fuentes de luz. Si bien había tenido oportunidad de trabajar con dicho bus en mi actuación profesional, siempre lo había hecho como integrador de productos. En esta oportunidad desarrollé drivers de bajo nivel y aplicaciones de control. Esto me ha permitido no solo tener un mejor conocimiento del tema, sino también dirigir grupos de estudiantes que realizan aplicaciones de control utilizando este protocolo.

### 6.2.2. Luminarias fabricadas

Se fabricaron 2 luminarias, una con leds blancos y azules y otra con leds de diferentes color. A continuación se resumen las características más relevantes de cada una de ellas.

- Luminaria blanca y azul

La radiación ubicada en la región de los azules, tiene efecto sobre la fotosíntesis, la apertura de estomas y estimula la síntesis de clorofila y carotenos.

Para estimular en mayor o menor medida estos procesos, se construyó una fuente de luz que pude variar la cantidad de radiación en esta región. Esta

## 6.2. Luminarias para plataforma de fenotipado de plantas

luminaria esta compuesta por un conjunto de leds blancos cálidos que concentran su potencia fuera de la región y otro de leds azules. De esta forma, controlando la emisión de cada uno de los grupos, se logra un espectro con más o menos radiación relativa en las longitudes de onda de interés. En la figura 6.6 puede verse una representación de esto.

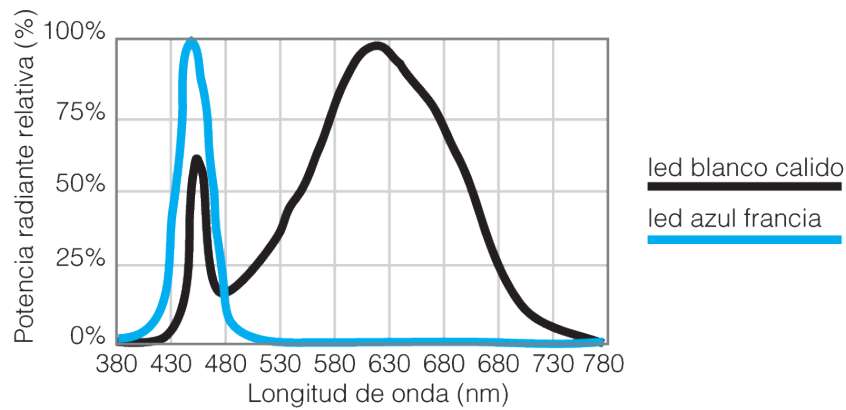


Figura 6.6: Representación de espectro de luminaria con leds blancos y azules.

La luminaria esta compuesta por 240 leds blancos y 92 azules distribuidos en un área de 45x90 cm. La potencia eléctrica máxima es de 600W, por lo que además de contar con disipadores, se debieron agregar ventiladores para mantener baja la temperatura de los leds.

Para maximizar la potencia radiante que llega a las plantas, se utilizaron lentes con un haz de luz cerrado, llegando a medir a 30 cm de la luminaria 77240 lx.

### ■ Luminaria con leds de colores

Para poder controlar el espectro en bandas, se construyó una luminaria con leds monocromáticos. En la figura 6.7 se puede ver una representación del aporte de cada uno de los leds.

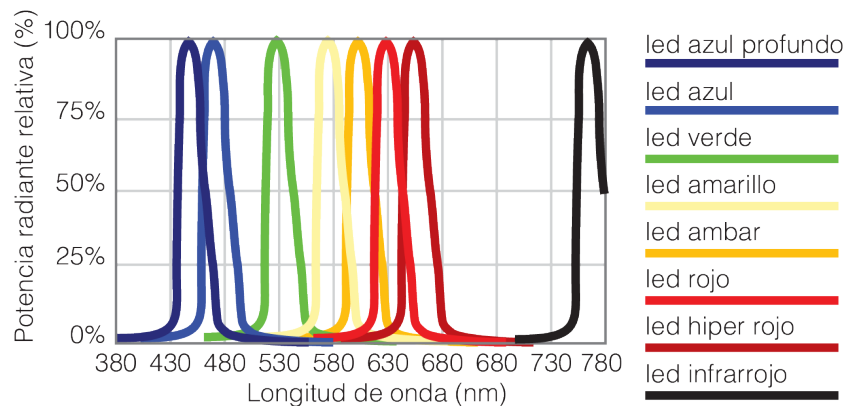


Figura 6.7: Representación de espectro de luminaria con leds de color.

## Capítulo 6. Aplicaciones

La luminaria se compone de 7 grupos de leds de diferente color con lentes. En este caso la potencia eléctrica máxima es de 800W y se llegan a medir 51661lx a 30cm de distancia.



Figura 6.8: Fotos de las luminarias construidas para cámara de fenotipado

El sistema se encuentra instalado y en uso en la Facultad de Agronomía. Actualmente se están evaluando que funcionalidades deben agregarse, para construir una segunda versión de las mismas.

### 6.3. Luminarias para el salón de actos

#### 6.3.1. Introducción

Con este proyecto pude comprobar la flexibilidad de diseño que otorgan los leds, y como pueden ser utilizados como una herramienta para pensar una luminaria que se adapte a las restricciones del proyecto, en lugar de adaptar el proyecto a la luminaria.

La Facultad de Ingeniería, dentro de su plan de eficiencia energética y fortalecimiento a la enseñanza, esta embarcada en renovar la iluminación del salón de actos utilizando tecnología led. Para ello una empresa local realizó una propuesta que utiliza luminarias led con diferente temperatura de color (4100K y 5500K) y afecta el diseño estético del salón, ya que no respeta la ubicación actual de los puntos de luz, agregando una línea de luminarias en el eje del salón.

### 6.3. Luminarias para el salón de actos

Utilizando la herramienta de estimación de fotometría, pude diseñar módulos con una combinación de lentes y leds, que se instalan en los lugares actuales de las luminarias y logran un mayor nivel de iluminación con una menor potencia consumida. La propuesta fue presentada a Decanato y Plan de Obras y aceptada.

En el diseño se utilizan fuentes de poder con control DALI, por lo que además de ganar en calidad y cantidad de iluminación, las luminarias podrán controlarse mediante la selección de escenas de iluminación. Una botonera permitirá elegir que el salón se adecue a dar clases, utilizar el proyector, realizar una obra en el escenario apagando las luces sobre butacas, etc. Todo con la posibilidad extra de graduar la intensidad desde la misma botonera.

Actualmente los módulos están ensamblados, ver figura 6.9 y se está a la espera de herrajes para poder montarlos.



Figura 6.9: Fotos de los módulos construidos para iluminar el salón de actos de la Facultad de Ingeniería.

Un grupo de estudiantes de la asignatura de Sistemas Embebidos dictada por el IIE, será el encargado de diseñar e implementar el controlador DALI de las luces.

Se puede ver al salón de actos como un ejemplo de aplicación de conocimientos que la Facultad posee.

#### 6.3.2. Resultados esperados

Actualmente el salón de actos se ilumina con 10 lámparas fluorescentes compactas de 80W, sin reflector, 6 sobre las butacas y 4 sobre el escenario. Como puede verse en la figura 6.10, los niveles de iluminación son realmente bajos, entre 29 lx y 65 lx en las butacas y entre 30lx y 76lx en el escenario.

## Capítulo 6. Aplicaciones

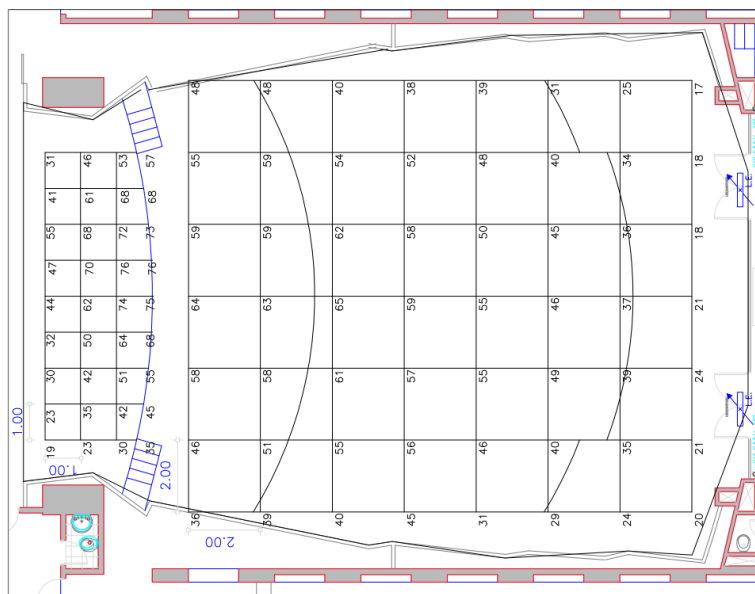


Figura 6.10: Niveles actuales de iluminancia relevados en el salón de actos.

La tabla 6.2 resume los niveles de iluminancia media y uniformidades actuales, y los estimados utilizando DIALux del proyecto de la empresa local y el realizado a medida por el IIE.

Tabla 6.2: Iluminancias y uniformidades actuales y estimadas en el salón de actos.

| proyecto de iluminación  | Em  | Um    | Potencia |
|--------------------------|-----|-------|----------|
| <b>Área de butacas</b>   |     |       |          |
| iluminación actual       | 44  | 0.39  | 480 W    |
| empresa local            | 189 | 0.198 | 578 W    |
| IIE                      | 299 | 0.72  | 773 W    |
| <b>Área de escenario</b> |     |       |          |
| iluminación actual       | 52  | 0.37  | 320 W    |
| empresa local            | 180 | 0.311 | 132 W    |
| IIE                      | 483 | 0.73  | 260 W    |

El haber realizado el diseño a medida de las luminarias, no solo permite preservar la estética del techo, evitando agregar elementos no contemplados en el proyecto arquitectónico original, sino que también permitió lograr mayores niveles de uniformidad, lo cual redundará en una mejor calidad de la iluminación.

En la comparación entre la iluminación actual del escenario y la propuesta en mi diseño, se aprecia que además de reducir el consumo en un 20%, se logra un aumento de un orden de magnitud en la iluminancia máxima que puede lograrse.

Con respecto a la otra propuesta de leds, el diseño realizado consume más

### 6.3. Luminarias para el salón de actos

potencia, pero proporcionalmente da más luz y con más uniformidad. Además no debe perderse de vista que las luces pueden dimerizarse, por lo que pueden utilizarse normalmente a un parte de su potencia, logrando los mismos niveles, contando con espacio para aumentar la iluminación si esto es necesario.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.



# Capítulo 7

## Conclusiones

A lo largo de esta tesis, se tuvo la oportunidad no solo de estudiar la aplicación de leds en la iluminación, sino que se construyeron luminarias y equipos, lo cual permitió experimentar de primera mano la flexibilidad de diseño que permiten y los cuidados que deben tenerse al construir luminarias led.

Como se planteó en el ejemplo de la introducción, en el que se compara la eficiencia al iluminar con sodio y con leds una calle barrial de Montevideo, el ahorro se produce por una serie de factores y decisiones de ingeniería, y no por diferencias en la eficiencia de las fuentes de luz, que es similar en ambos casos.

Las variables que influyen en este ahorro son: la emisión de luz hacia el área de interés, las menores pérdidas de flujo luminoso que se producen al usar lentes en lugar de un reflector, la mayor eficiencia de la fuente de poder, el mayor control del flujo luminoso (permitiendo direccionar la luz a donde se la necesita) y la posibilidad de elegir en pasos más finos la potencia consumida (ajustando la corriente y cantidad de leds).

Se logró en forma exitosa, llegar a un método que permite estimar el consumo y características fotométricas de una determinada combinación de estas variables.

También se desarrolló una herramienta software que implementa el método, permitiendo generar un archivo en formato estándar, con la información fotométrica y de consumo eléctrico del módulo led. Este archivo puede ser utilizado en herramientas comerciales de simulación, como el DIALux, para estimar su desempeño fotométrico, calculando iluminancia y uniformidades en un determinado escenario.

Como se muestra en la figura 7.1, las luminarias led son extremadamente modulares. Cada una de estas partes puede ser comprada o incluso fabricada a nivel local, como puede ser el caso de la carcasa (4), módulo led (1) o lentes (2).

A pesar de su uso tan disímil (iluminación de calles, iluminación del salón de actos, iluminación para crecimiento de plantas), las luminarias presentadas en el capítulo 6 comparten muchos elementos en común.

Todas utilizan variaciones de fuentes de poder de una misma marca y modelo; comparten el circuito impreso, al que se le soldaron leds con igual empaque pero diferente eficiencia o temperatura de color, de acuerdo a los requerimientos del proyecto; los lentes a pesar de generar distribuciones de luz específicas para cada aplicación, se acoplan de la misma forma al circuito impreso; algunas utilizan

## Capítulo 7. Conclusiones

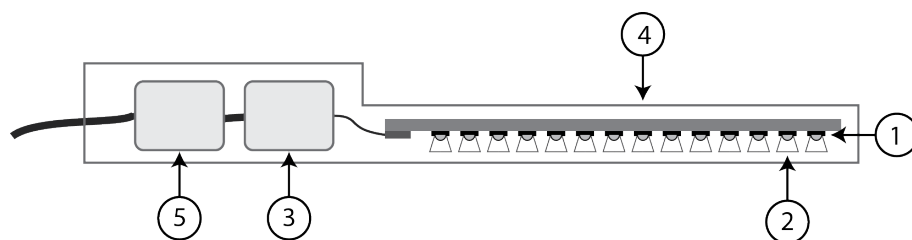


Figura 7.1: Esquema de una luminaria led

carcasas que se deben fabricar en el exterior y otras disipadores conseguidos en empresas locales.

Este abordaje modular al problema, permite pensar en un nuevo tipo de empresa, que da soluciones de iluminación, eligiendo, ajustando y ensamblando, la mejor combinación de las partes para un proyecto dado.

Otra de las conclusiones de la tesis es que se debe de tener en cuenta la distribución espectral de las fuente de luz. No solo porque puede llevar a errores de más de un 20 %, en la medida de iluminancia de fuentes de luz led, sino porque influye en los procesos de visión.

Del estudio de la normativa y documentación, se concluye que en los próximos años veremos cambios en la forma de proyectar y evaluar la iluminación. De 2010 a esta parte la Comisión Internacional de la Iluminación (CIE) y la Sociedad de Ingeniería de la Iluminación de Norteamérica (IESNA) han incorporado el efecto de la visión mesópica en sus guías y recomendaciones, y tienen comisiones técnicas trabajando en el tema.

La consecuencia de incorporar la visión mesópica en la medición de magnitudes fotométricas, es que en condiciones de luminancia como las que se dan en escenarios viales, las luces led, debido a su distribución espectral de potencia, aumentan su eficiencia, mientras que el sodio disminuye. Esta es otra de las razones para elegir el led por sobre el sodio al momento de iluminar.

Métodos y equipos para cuantificar el efecto de la visión mesópica aún están en discusión, la mayor dificultad se presenta porque el fenómeno depende del tipo de actividad que realiza el individuo y de la luminancia del entorno. Pero una vez que se cuente con métodos y herramienta para medir en campo la luminancia efectiva, será posible pensar en luminarias led a las que puedan ajustarse su flujo, variando la corriente de los leds, de acuerdo al lugar en que se instalan, manteniendo los niveles fotométricos objetivos y logrando un ahorro extra de energía.

La conclusión, luego de haber estudiado y trabajado con leds por más de 6 años, es que el peor enemigo para su vida útil son ellos mismos. Si bien de generación en generación los leds van mejorando, entre un 70 % y 80 % de la potencia entregada a un led se transforma en calor, y la vida útil de los leds disminuye drásticamente con la temperatura. Es por ello que si bien no se incluyó un capítulo específico en la tesis sobre diseño térmico, sí se estudio y trabajo en tema para poder fabricar las luminarias de las aplicaciones.

Actualmente hay métodos confiables, con sustento basado en años de datos acumulados, que permiten estimar la vida útil de los leds a una determinada tem-

## 7.1. Trabajos a futuro

peratura y corriente de trabajo. Pero es un error asignar a toda una luminaria la vida útil de los leds. En luminarias tradicionales puede hacerse, pues la lámpara es el elemento más frágil y que sufre más desgaste. Pero en los leds, que en las condiciones de trabajo que podemos encontrar en una luminaria vial, pueden mantener más de un 95 % de su flujo lumínico inicial, luego de 81.600 horas (18 años a 12 horas/día), sería un error. Es muy probable que la fuente de poder o algún elemento mecánico sufra un desperfecto antes.

Finalmente quisiera hacer una reflexión sobre el tema normativa y estándares. Como toda nueva tecnología masiva, el mercado se ve inundado rápidamente por productos y promesas de desempeños con poco sustento o difíciles de creer. Es el rol de las normas y regulaciones, imponer las calidades mínimas de un producto e indicar qué información deben brindar al usuario, y la de los estándares establecer reglas claras de juego de cómo y de qué manera deben llevarse a cabo mediciones y ensayos. UNIT y la URSEA han avanzado en esta línea y en breve se contará con una norma de etiquetado basado en estándares IEC. Pero creo que usuarios y compradores de luminarias led viales, necesitan más información sobre los productos al momento de comprar, y por ser un tema nuevo y no tener experiencia, les resulta difícil evaluar propuestas y conocer cuales con las normas más relevantes a aplicar. En esta línea de razonamiento es que se proponen algunos trabajos a futuro.

## 7.1. Trabajos a futuro

En esta sección se presentarán algunas líneas y ejemplos concretos de trabajo a futuro. Los mismos se basan en las aplicaciones realizadas, carencias detectadas o estudios y trabajos que quedaron fuera de este documento.

Se construyeron en forma exitosa, en el marco de un convenio financiado por el INIA, dos luminarias led que permiten generar radiación variando la intensidad y distribución espectral de potencia. Estas luminarias están siendo utilizadas por la Facultad de Agronomía en una cámara de fenotipado, la cual permite estudiar el efecto de la temperatura, humedad y cantidad y tipo de radiación en el crecimiento de las plantas.

Este proyecto abre una línea de trabajo basado en la generación de luz con diferentes distribuciones espectrales de potencia.

Dentro del campo de la agronomía, puede pensarse en luminarias que modifiquen la intensidad y tipo de radiación emitida de acuerdo a la especie y etapa de crecimiento en que se encuentra la planta. Esto puede aplicarse en viveros para acelerar el crecimiento de plantas y hacerlo de forma eficiente, ya que se transforma energía eléctrica en radiación solo en las longitudes de onda de interés y en los niveles necesarios. Si bien existen algunos productos en el mercado, aplicando ingeniería pueden llegarse a soluciones a medida que logren ahorros extra y mayores tasas de crecimiento.

También es de interés para la agronomía, contar con una fuente de luz que simule los niveles de radiación en el rango de 400 a 800 nm (radiación PAR) para cualquier día del año en Uruguay. Se podría trabajar en forma conjunta con el La-

## Capítulo 7. Conclusiones

laboratorio de Energía Solar del Instituto de Física para realizar un relevamiento del mapa solar, pero a nivel espectral, y luego mediante leds de color y equipamiento extra lograr esta simulación.

Otra aplicación que se discutió con el grupo de AntelSat, es la de contar con una fuente de luz que emita en la longitud de onda de máxima sensibilidad de los paneles solares, y lograr de esta forma realizar ensayos de carga. Actualmente están limitados por las horas de sol y tiene problemas con el uso de focos halógenos ya que si bien logran flujos luminosos altos, generan demasiado calor. Se hicieron pruebas preliminares y el uso de leds con lentes que direccionen toda la radiación generada hacia los paneles solares, permite llegar a niveles de carga similares a los que logran con la exposición al sol. Incluso la posibilidad de controlar la intensidad luminosa de los leds en forma continua, permitiría simular el efecto de la rotación del satélite, variando el flujo luminoso que llega a cada una de las caras.

El desarrollo de luminarias modulares que puedan ajustarse a las condiciones del proyecto, de forma de lograr una mejor calidad de iluminación y ahorro energético, es una línea de trabajo interesante en la que me encuentro trabajando para una empresa local.

Estimo que mejoras a la herramienta de estimación de desempeño, incluyendo métodos de minimización con restricción, pueden arrojar resultados interesantes que podrían dar lugar a alguna publicación.

Los cambios que se están produciendo en los métodos de medición de luz, al incorporar la visión mesópica, plantean un tema de estudio interesante. El desarrollo de equipos y métodos de medición, que contemplen las recomendaciones que se publicarán a fines de este año, podría dar lugar a proyectos o trabajos que podrían realizarse en conjunto con el grupo de Fotometría del IIE.

Cada vez más instituciones necesitan poder evaluar y comparar luminarias led al momento de realizar una compra. Con poco esfuerzo y equipamiento extra, el laboratorio de Fotometría del IIE podría ofrecer un servicio de reporte especializado en luminarias led para uso vial. En el capítulo 5 se realiza una propuesta de normativa a adoptar e ítems a reportar que podría tomarse como punto de partida.

Quedaron fuera de este estudio métodos y herramientas para la estimación del comportamiento térmico de una carcasa o disipador con determinada potencia de leds. Si bien parece un tema ya resuelto, durante el estudio de esta tesis, se encontró abundante literatura y nuevas propuestas para la estimación del desempeño térmico de disipadores.

# Apéndice A

## Aplicación para estimar desempeño de luminaria

En el capítulo 3 se presentó un procedimiento para estimar el desempeño de una luminaria a partir de los datos de los fabricantes de leds y lentes. En el presente apéndice, se lista el código de una aplicación desarrollada en Python, la cual permite realizar en forma sencilla y automatizable este procedimiento.

Para los datos fotométricos del lente y de la luminaria estimada, se utilizando archivos .IES definidos en el estándar LM-63-2002 [36]. Estos archivos son utilizados por programas de simulación lumínica de escenarios como por ejemplo DIALux.

Los datos de distribución de intensidades luminosas del lente y flujo luminoso del led utilizado para caracterizarlo, se obtienen del archivo .IES de entrada, el resto de los parámetros deben ser especificados en la propia aplicación Python.

### A.1. Código fuente de la aplicación

La aplicación se estructura en tres archivos Python (figura A.1):

- `sim_from_1ies_main.py` : archivo donde se especifican los parámetros de funcionamiento y cantidad de leds, nombre del archivo .IES conteniendo la fotometría del lente a utilizar. Esta información es especificada en variables en el comienzo del archivo, las cuales luego con procesadas para invocar `sim_from_1ies_script`
- `sim_from_1ies_script`: archivo donde se calculan las características de la nueva luminaria (tamaño de superficie que emite la luz, matriz de intensidades, potencia y metadata de nuevo archivo IES)
- `ies_tools.py`: archivo conteniendo las funciones `parse_ies` y `write_ies`. La primera es la encargada de analizar el archivo .IES con la información del lente, y cargar a información a una estructura de tablas y variables en Python.

## Apéndice A. Aplicación para estimar desempeño de luminaria

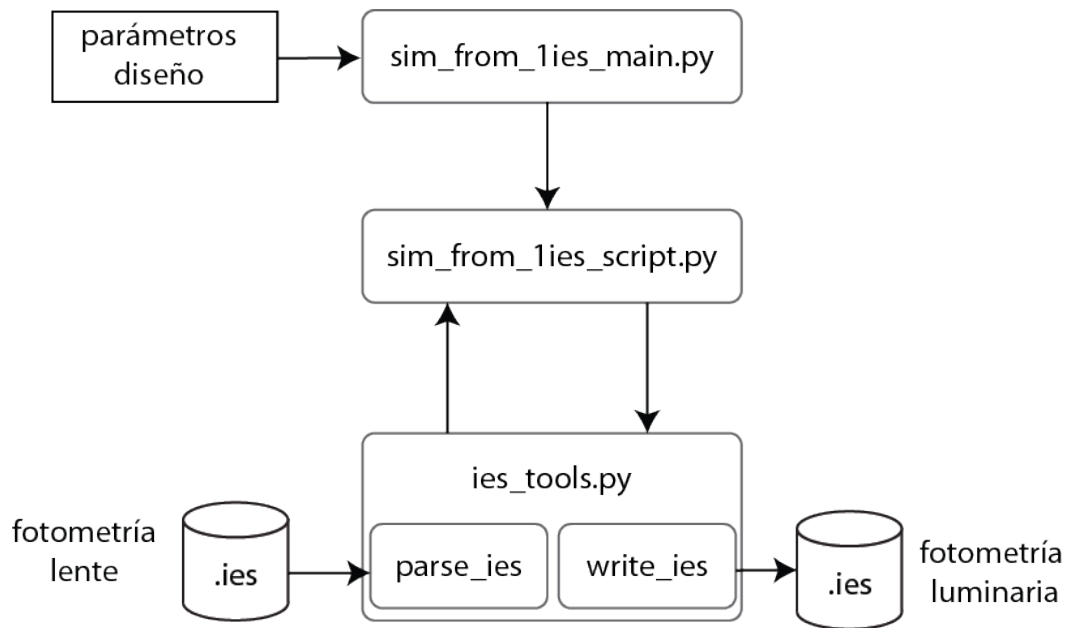


Figura A.1: Estructura de la aplicación

### A.1.1. Archivo sim\_from\_1ies\_main.py

```
#!/usr/bin/env python

# Script que permite simular fotometría resultante de utilizar mas de un modulo base
# con otra corriente de alimentacion
# El script no realiza correcciones de angulo ni tilt

import re,sys
sys.path.append('/users/sebfer/Copy/maestria/work/photometric_stuff/ies_tools')
import time
from sim_from_1ies_script import *

## ===== Parametros =====
##### IES de led, lente o modulo a utilizar como base
base_ies_file = 'C13237&C13232_HB-2X2-WW-XPG.ies'

##### IES label a incluir en archivo generado
ies_label_out = {}
# --- campos obligatorios
# Test report number. May be internal reference in Lab.
ies_label_out["TEST"] = 'ledil-alum '
# Photometric testing laboratory
ies_label_out["TESTLAB"] = 'IIE-Lab'
# When this file was issued
```

## A.1. Código fuente de la aplicación

```
ies_label_out["ISSUEDATE"]= time.strftime("%d/%m/%Y")
    # fabricante de la luminaria (Fabricante en Dialux)
ies_label_out["MANUFACT"] = 'iie'
    # ---- campos opcionales
    # Luminaire catalog number
ies_label_out["LUMCAT"]    =    'luminaria-DNW'
    # Luminaire description (ejemplo, lente),
    # script agregar corrient y cant. (luminaria en Dialux)
ies_label_out["LUMINAIRE"]= 'STRADA-2X2-DNW'
    # Lamp catalog number
ies_label_out["LAMPCAT"]  =    '1'
    # Lamp description (marca, modelo de led, CCT)
    # Script agrega corriente y cant. (tipo lamp en Dialux)
ies_label_out["LAMP"]     =    'CreeXPG-3000K'
    # Other information
ies_label_out["OTHER"]    =    'informacion adicional'

##### para ajustar valores de fotometria y potencia
# cantidad de lentes: puede ser una matriz,
#   por eso se indica como width y length
w_qty = 2
l_qty = 4
# cantidad de leds que tiene el lente
leds_per_unit = 4
# lumenes emitidos por el led, estimados con datos
# del fabricante para nueva corriente
new_lamp_lumen = 100*1.8*leds_per_unit    # led Lm=100 @350, 180%@700mA
# factor de correccion de lumenes de acuerdo a temperatura estimada de trabajo
lumen_temp_correction_factor = 0.87    # 87% a 85grados C
# corriente que se utilizara (A)
new_I_f = 0.7
# Vf para esa corriente de trabajo y temperatura
new_V_f = 3.05    # 3.05v a 0.7A

## ===== Ejecuto script con los parametros =====
sim_from_lies_script(base_ies_file, ies_label_out, w_qty, l_qty, leds_per_unit, ne
```

### A.1.2. Archivo sim\_from\_lies\_script.py

```
#!/usr/bin/env python

# Script que permite simular fotometria resultante de utilizar
# mas de un modulo base con otra corriente de alimentacion
# El script no realiza correcciones de angulo ni tilt
```

## Apéndice A. Aplicación para estimar desempeño de luminaria

```
import re,sys
import ies_tools
import os
from copy import deepcopy
from numpy import *

def sim_from_ies_script(base_ies_file, ies_label_out, w_qty, l_qty, leds_per_unit, new_lamp_qty):
    ## ===== IES ajuste label and info =====
    base_ies= ies_tools.parse_ies(base_ies_file)

    # preparo IES_out con las cosas estandar
    out_ies=deepcopy(base_ies)

    # label de IES de salida a partir de parametros
    out_ies["IESLabel"]=ies_label_out

    # lumenes de la lampara en funcion de: lumenes de un elemento a usar
    # ajustado por temp y cantidad
    new_lamp_lumen_temp_adjusted= new_lamp_lumen * lumen_temp_correction_factor
    total_qty = w_qty * l_qty
    out_ies["IESInfo"]["LUMEN_PER_LAMP"]=new_lamp_lumen_temp_adjusted

    # factor de correccion para las candelas por utilizar led con otro flujo
    # y temperatura
    lumen_lamp_in = base_ies["IESInfo"]["LUMEN_PER_LAMP"]
    candela_correction_factor = new_lamp_lumen_temp_adjusted / lumen_lamp_in

    # lampara, luminaria. Se agrega corriente y cantidad de modulos
    out_ies["IESLabel"]["LAMP"]= ies_label_out["LAMP"]
    out_ies["IESLabel"]["LUMINAIRE"]= ies_label_out["LUMINAIRE"]+'-' +str(new_lamp_qty) +'mA-' +str(leds_per_unit)
    out_ies["IESInfo"]["NUMBER_OF_LAMPS"]=total_qty

    # potencia de la luminaria teniendo en cuenta cantidad de modulos,
    # leds por modulo e If y Vf de cada led
    out_ies["IESPower"]["INPUT_WATTS"]= new_lamp_qty * new_lamp_lumen * leds_per_unit / 0.9

    # tamaño
    out_ies["IESInfo"]["WIDTH"]= base_ies["IESInfo"]["WIDTH"]*w_qty
    out_ies["IESInfo"]["LENGTH"]= base_ies["IESInfo"]["LENGTH"]*l_qty

    ## ===== IES ajuste candelas =====
    candelas_in=base_ies["CANDELA_VALUES"]
    candelas_new = candelas_in * candela_correction_factor * total_qty
    out_ies["CANDELA_VALUES"]=candelas_new
```



## A.1. Código fuente de la aplicación

```
##### nombre de archivo IES de salida
# lente-lampara y el script agrega If y cantidad
out_ies_file = out_ies["IESLabel"]["LUMINAIRE"] + '_' + out_ies["IESLabel"]["LAMP"]
ies_tools.write_ies(out_ies,out_ies_file+'.ies')
```

### A.1.3. Archivo ies\_tools.py

```
#!/usr/bin/env python
import re,sys, logging

logger = logging.getLogger('ies_tools')
logger.setLevel(logging.INFO)
ch = logging.StreamHandler()
logger.addHandler(ch)

def parse_ies(ies_file):
    import numpy as np
    # Parse IES File and returns ies_data, a dictionary containing:
    # - IESNAStandard: string containing IES format of file
    # - IESLabel: dictionary containing IES label
    # - TILT: string containing tilt info
    # - IESInfo: dictionary containing IES Info
    # - IESPower: dictionary
    # - VERTICAL_ANGLES: list
    # - HORIZONTAL_ANGLES: list
    # - CANDELA_VALUES: 2 dimension array

    IESfile = open(ies_file, "r")
    lines = IESfile.readlines()
    ltp=0 # line to process.

    ## ----- IESNA -----
    ## which format of IES file is. Line may begin with IESNA: or not
    if re.search('IESNA:(.*)\\r',lines[0]):
        IESNAStandard= re.search('IESNA:(.*)\\r',lines[0]).group(1)
    elif re.search('(.)\\r\\n',lines[0]):
        IESNAStandard= re.search('(.)\\r',lines[0]).group(1)
    else:
        logger.debug( 'IESNA version not found')
        exit()

    logger.debug( 'IESNA: %s', IESNAStandard)
    ltp =1;
```

## Apéndice A. Aplicación para estimar desempeño de luminaria

```
logger.info("Finishes IESNA version parse")
## ----- IES Label -----
## data in IES file between IESNA and TILT parameter
## http://docs.python.org/2/tutorial/datastructures.html
IESLabel= {};

while not(lines[ltp].startswith('TILT')):
    if (IESNAStandard == "LM-63-2002" or IESNAStandard == "IESNA:LM-63-2002" ):
        line= lines[ltp];
        #segmentedLine = line.split("\t")
        #print(segmentedLine)
        #k= re.search('\[(.*)\]',segmentedLine[0])
        #v= segmentedLine[1]
        kv= re.search('\[(.*)\](.*)\\r',line)
        k= kv.group(1)
        v= kv.group(2)
        IESLabel[k]=v
    else:
        logger.debug("***No LM-63-2002 IESNA***")
        line= lines[ltp];
        segmentedLine = line.split(" ")
        #print(segmentedLine)
        kv= re.search('\[(.*)\](.*)\\r',segmentedLine[0])
        k= kv.group(1)
        v= kv.group(2)
        IESLabel[k]=v
    ltp=ltp + 1

logger.debug( IESLabel)

## ----- TILT -----
logger.debug("procesando TILT")
matchObj = re.search('\TILT=(.*)',lines[ltp])
TILT= "NONE" #matchObj.group(1)
ltp=ltp + 1
logger.debug( 'TILT: %s', TILT)

## ----- IES info
logger.debug("procesando IES Info")
IESInfoLabels= ['NUMBER_OF_LAMPS', 'LUMEN_PER_LAMP', 'CANDELA_MULTIPLIER', 'NUM_VERTICAL_ANGLE']
IESInfo={}
line= lines[ltp];
words= line.split()
i=0
for word in words:
```

## A.1. Código fuente de la aplicación

```
if i == len(IESInfoLabels):
    break
try:
    int(word)
    IESInfo[IESInfoLabels[i]] = int(word)
except ValueError:
    IESInfo[IESInfoLabels[i]] = float(word)
i = i+1
ltp=ltp + 1
logger.debug( 'IESInfo:', IESInfo)

## ----- IES power
logger.debug("procesando IES Power")
IESPowerLabels= ['BALLAST_FACTOR', 'FUTURE_USE', 'INPUT_WATTS']
IESPower={}
line= lines[ltp];
words= line.split()
i=0
for word in words:
    if i == len(IESPowerLabels):
        break
    try:
        int(word)
        IESPower[IESPowerLabels[i]] = int(word)
    except ValueError:
        IESPower[IESPowerLabels[i]] = float(word)
    i = i+1
ltp=ltp + 1
logger.debug( 'IESPower:', IESPower)

# ----- Vertical Angles
logger.debug("procesando Vertical angles:"+str(IESInfo['NUM_VERTICAL_ANGLES']))
num_vertical_angles= int(IESInfo['NUM_VERTICAL_ANGLES'])
VERTICAL_ANGLES= np.zeros(num_vertical_angles)
i=0
while (i < num_vertical_angles):
    line= lines[ltp];
    angles= line.split()
    for angle in angles:
        VERTICAL_ANGLES[i] = float(angle)
        #VERTICAL_ANGLES.append(float(angle))
        i=i+1
    ltp= ltp+1

# logger.debug( 'Vertical angles:', VERTICAL_ANGLES)
```

## Apéndice A. Aplicación para estimar desempeño de luminaria

```
# ----- Horizontal Angles
logger.debug("procesando Horizontal angles:"+str(IESInfo['NUM_HORIZONTAL_ANGLES']))
num_horizontal_angles= int(IESInfo['NUM_HORIZONTAL_ANGLES'])
HORIZONTAL_ANGLES= np.zeros(num_horizontal_angles)
i=0
while (i < num_horizontal_angles):
    line= lines[ltp];
    angles= line.split()
    for angle in angles:
        HORIZONTAL_ANGLES[i] = float(angle)
        i=i+1
    ltp= ltp+1

# logger.debug( 'Horizontal angles:',HORIZONTAL_ANGLES)

# ----- Candela Values
# CANDELA_VALUES[horizontales][verticales]
# debug num_vertical_angles = 3
# debug num_horizontal_angles = 2
num_values= num_vertical_angles * num_horizontal_angles
CANDELA_VALUES= np.ndarray(shape=(num_horizontal_angles,num_vertical_angles), dtype=float)
k=0
h=0
v=0
while (k < num_values):
    line= lines[ltp];
    candelas= line.split()
    for candela in candelas:
        CANDELA_VALUES[h,v] = float(candela)
        k=k+1
        if (k == num_values): break
        v=v+1 # siguiente angulo vertical para horizontal dado
        if v == num_vertical_angles:
            v=0
            h=h+1 # siguiente angulo horizontal
    ltp= ltp+1

logger.info("*** Parse Finished ***")

IESData={"IESNAStandard":IESNAStandard, "IESLabel":IESLabel, "TILT":TILT, "IESInfo":IESInfo}

return IESData
```

## A.1. Código fuente de la aplicación

```
def write_ies(ies_data, outfile):
    import numpy as np
    f = open(outfile, 'w')

    ##### IES Data #####
    # ies_data={"IESNAStandard":IESNAStandard,
    #           "IESLabel":IESLabel,
    #           "TILT":"NONE",
    #           "IESInfo":IESInfo,
    #           "IESPower":IESPower,
    #           "VERTICAL_ANGLES":VERTICAL_ANGLES,
    #           "HORIZONTAL_ANGLES":HORIZONTAL_ANGLES,
    #           "CANDELA_VALUES":CANDELA_VALUES}

    f.write(ies_data["IESNAStandard"]+"\r\n")

    IESLabel=ies_data["IESLabel"]
    logger.debug(IESLabel)
    for k,v in IESLabel.items():
        f.write("[+k+] "+"t"+v+"\r\n")

    f.write("TILT="+ies_data["TILT"]+"\r\n")

    IESInfo=ies_data["IESInfo"]
    IESInfoLabels= ['NUMBER_OF_LAMPS', 'LUMEN_PER_LAMP', 'CANDELA_MULTIPLIER', 'NUM_V
    for i,v in enumerate(IESInfoLabels):
        f.write(str(IESInfo[v])+" ")
    f.write("\r\n")

    IESPower=ies_data["IESPower"]
    IESPowerLabels= ['BALLAST_FACTOR', 'FUTURE_USE', 'INPUT_WATTS']
    for i,v in enumerate(IESPowerLabels):
        f.write(str(IESPower[v])+" ")
    f.write("\r\n")

    VERTICAL_ANGLES=ies_data["VERTICAL_ANGLES"]
    line=""
    for i,v in enumerate(VERTICAL_ANGLES):
        line=line+" "+str(v)
        if len(line) > 82:
            f.write(line+"\r\n")
            line=""
    f.write(line+"\r\n")
```

## Apéndice A. Aplicación para estimar desempeño de luminaria

```
HORIZONTAL_ANGLES=ies_data["HORIZONTAL_ANGLES"]
line=""
for i,v in enumerate(HORIZONTAL_ANGLES):
    line=line+" "+str(v)
    if len(line) > 82:
        f.write(line+"\r\n")
        line=""
f.write(line+"\r\n")

CANDELA_VALUES=ies_data["CANDELA_VALUES"]
line=""
i=0
j=0
num_vertical_angles=int(IESInfo["NUM_VERTICAL_ANGLES"])
num_horizontal_angles=int(IESInfo["NUM_HORIZONTAL_ANGLES"])

for h in range(num_horizontal_angles):
    for v in range(num_vertical_angles):
        line=line+" "+str(CANDELA_VALUES[h][v])
        if len(line) > 78:
            f.write(line+"\r\n")
            line=""
f.write(line+"\r\n")
line=""
```

### A.2. Acerca del estandar IES

La Illuminating Engineering Society (IES) a creado estándares para presentar los datos fotométricos de una luminaria. La primera versión de este es la IESNA LM-63-1986, actualmente existe la ANSI/IESNA LM-63-2002 o LM-63-02

El estándar especifica que la información debe de almacenarse en un archivo de texto con palabras claves y valores, respetando las siguientes características:

- las líneas pueden tener hasta 256 caracteres
- las líneas deben terminar con un CR y LF
- pueden haber trailing blanks entre IESNA:LM-63-2002 y TILT=
- tipos de números permitidos según campo:
  - enteros: <# of lamps >, <# of vertical angles >, <# of horizontal angles >, <photometric type >, and <units type >
  - el resto reales
  - los valores dentro de una línea deben estar separados por delimitadores: coma o espacio

### A.2.1. Formato

El formato del archivo linea a linea debe de ser:

1. IESNA:LM-63-2002
2. TEST
3. TESTLAB
4. MANUFAC
5. ISSUEDATE
6. <<otras palabras claves >>
7. TILT = <filename >o INCLUDE o NONE
8. <lamp to luminaire geometry >(solo si TILT == INCLUDE)
9. <number of tilt angles >(solo si TILT == INCLUDE)
10. <angles >(solo si TILT == INCLUDE)
11. <multiplying factors >( solo si TILT == INCLUDE )
12. <number of lamps ><lumens per lamp ><candela multiplier ><number of vertical angles ><number of horizontal angles ><photometric type ><units type ><width ><length ><height >
13. <Ballast factor ><future use ><input watts >
14. <vertical angles >
15. <horizontal angles >
16. <candela values for all vertical angles at 1st horizontal angle >
17. <candela values for all vertical angles as 2nd horizontal angle >
18. <candela values for all vertical angles at last horizontal angle >

Las lineas que van entre la primera, que define la versión de estandar utilizada ne ese archivo IES , y la que indica el valor de la variable TILT, contienen las palabras claves o metadata del archivo. Algunas de estas son requeridas y otras opcionales.

- Requeridas  
[TEST] número de reporte, [TESTLAB] laboratorio donde se realiza la medición, [ISSUEDATE] fecha en que se confecciona el archivo IESNA:LM-63-2002 con la infrmación, [MANUFAC] fabricante de la luminaria

## Apéndice A. Aplicación para estimar desempeño de luminaria

- opcionales  
[LUMCAT] nombre de catálogo de la luminaria, [LUMINAIRE] descripción de la luminaria, [LAMPCAT] nombre de catálogo de la lámpara, [LAMP] descripción de la lámpara (i.e., tipo, potencia)
- lúmenes per lamp  
Lo lúmenes por lámpara en la cual se basa en ensayo. En caso de fotometría absoluta, donde los lúmenes por lámpara no son la base de los datos fotométricos, se debe usar el valor (-1)  
  
Si se pone -1, conviene agregar el keyword [OTHERS] y aclarar que los valores de Candela son absolutos
- Candela multiplier  
Usualmente 1.0
- Photometric type (integer number)
  1. Type C
  2. Type B
  3. Type A

Por la forma en como se montan las luminarias en el goniofotometro del IIE, se realizan ensayos de tipo C. La luminaria se monta como si estuviera boca abajo, el goniofotometro en el piso.

El 0 grado del plano vertical esta desde la luminaria hacia el gonio. El 0 grado del plano horizontal esta hacia donde “adelante” en la sala negra en la dirección hacia el goniofotometro.

- Unit types (integer number)
  1. pies
  2. metros

De <width ><length ><height >

- <width ><length ><height >  
Hacen referencia a la superficie que emite luz de la luminaria. No a la luminaria en si.  
  
La forma de la superficie emisora debe aproximarse por formas simplificadas (prismas, cilindros, esferas)  
  
Pueden ser valores >0 si en esa dimension la superficie es rectangular, o negativa si es redonda  
  
With es en la dirección 90-270 grados, length es en la dirección 0-180 grados
- ballast factor  
Representa la fracción de lúmenes que se pierden por operar la lámpara con un balasto comercial con respecto a un balasto de referencia.



## A.2. Acerca del estandar IES

- future use  
Debe valer 1
- input watts  
total de watts que ingresan a la luminaria incluyendo el balasto.
- vertical angles  
valores en orden ascendente.  
Fotometría tipo C:
  - primero 0 o 90
  - último 90 o 180Fotometría tipo A:
  - primero -90 o 0
  - último 90
- horizontal angles  
Fotometria C:
  - primero: siempre 0
  - último:
    - 0 : es simétrica en todos los ángulos
    - 90: es simétrica en cada cuadrante
    - 180: es simétrica con respecto al eje 0-180
    - 360: no tiene simetría lateral
- Candela values  
Cada fila tiene todos los valores para todos los ángulos verticales, para un ángulo horizontal dado.

### A.2.2. Ejemplo

```
LM-63-2002
[MANUFACT]      IIE
[LUMCAT]        AL-700-24-DWC-760
[TESTDATE]
[LAMP]  XPGBWT
[OTHER]
[LAMPCAT]
[TEST]  a1-24-700-DWC-760
[LUMINAIRE]    Road light, 24 leds XPG2-R4 6000k, 700mA, lente AT
[ISSUEDATE]    20/jan/2015
[TESTLAB]      IIE-Lab
```

Apéndice A. Aplicación para estimar desempeño de luminaria

TILT=NONE

24 237 1.0 15 53 1 2 0.12 0.22 0.02

1 1 53

0.0 10.0 20.0 30.0 40.0 45.0 50.0 55.0 60.0 65.0 70.0 75.0 80.0 85.0 90.0  
 0.0 15.0 30.0 40.0 45.0 50.0 55.0 60.0 65.0 70.0 75.0 80.0 85.0 90.0 95.0 100.0 105.0  
 110.0 115.0 120.0 125.0 130.0 135.0 140.0 150.0 165.0 180.0 195.0 210.0 220.0 225.0  
 230.0 235.0 240.0 245.0 250.0 255.0 260.0 265.0 270.0 275.0 280.0 285.0 290.0 295.0  
 300.0 305.0 310.0 315.0 320.0 330.0 345.0 360.0  
 1665.79138347 1739.63247009 1816.19163351 2002.83290765 1612.78888572 1337.35710251  
 1028.85538481 804.16103536 597.134185156 443.109832707 311.872024165 187.021696121  
 59.0455797475 16.0954360543 0.55332870912  
 1667.60343468 1740.99150849 1790.36990383 1934.88098746 1683.00586992 1528.07549187  
 1253.54973427 939.158850153 711.293411089 534.618418574 386.936245343 245.596251331  
 112.954103105 17.5360167625 0.50258094336  
 1666.69740907 1735.55535487 1736.91439328 1846.5434912 1728.76016286 1682.09984432  
 1581.53100243 1512.22004382 1451.06331565 1296.13293759 957.279362206 593.057069944  
 263.852667225 43.2807342616 0.48165861888  
 1662.16728106 1735.10234207 1711.99868921 1763.64214856 1806.22535188 1814.83259511  
 1836.57720957 1731.93125246 1321.04864167 908.806992465 500.642458475 294.340428753  
 126.997499946 36.8479524828 0.45361380096  
 1662.16728106 1732.83727807 1698.40830517 1721.51195803 1784.93375022 1850.16759361  
 1875.98932328 1885.04957931 1410.29216353 986.272181491 560.440148249 363.379579675  
 167.949857185 35.7154204795 0.45806535936  
 1662.62029386 1730.57221406 1691.61311315 1687.53599793 1743.7095853 1819.36272312  
 1931.25688505 2131.03553043 1711.99868921 1268.04614391 871.206929955 632.92219646  
 298.508146526 39.4754267305 0.50035516416  
 1660.35522986 1726.94811165 1684.36490833 1658.09016585 1689.80106194 1773.60843019  
 1942.12919228 2430.4769921 2232.05738512 1880.0664385 1493.19350617 929.645581326  
 387.389258145 85.7280337453 0.6209923968  
 1661.26125546 1723.32400924 1681.64683152 1634.53350018 1651.29497383 1741.89753409  
 1953.90752511 2575.44108852 2594.01461338 2555.96153807 2515.19038595 1311.98838564  
 379.688040522 100.405648508 0.83377688832  
 1659.90221705 1714.71676601 1679.38176751 1617.77202653 1622.30215454 1728.76016286  
 1966.59188355 2564.11576849 2771.5956315 2849.06082052 3099.57689965 1535.77670949  
 276.537025662 72.7265663474 1.1395989504  
 1658.54317865 1702.93843318 1676.2106779 1606.8997193 1604.63465529 1720.60593243  
 1972.02803716 2482.12045145 2896.62716466 2927.43203515 2993.11889134 1459.21754607  
 167.904555905 47.7655609946 1.5001751808  
 1657.63715305 1686.62997233 1665.79138347 1597.83946327 1591.49728405 1709.2806124  
 1964.32681954 2381.09859676 2901.15729267 2964.12607206 2635.6917911 1326.48479528  
 146.477050402 39.2489203298 1.86920937216  
 1656.73112745 1667.60343468 1640.8756794 1577.90690002 1572.0177336 1685.72394673  
 1933.06893625 2279.17071646 2835.01742368 2921.08985593 2418.24564647 1284.80761756  
 152.909832181 38.297593447 2.44746680832  
 1658.54317865 1644.49978181 1608.2587577 1533.96465829 1522.63933825 1626.83228256

## A.2. Acerca del estandar IES

1861.49291364 2175.43078496 2719.04614654 2860.38614055 2338.06238063 1305.646206  
 176.104087609 35.6701191994 3.12410368512  
 1654.91907624 1620.49010334 1561.14542637 1470.0898533 1428.86568838 1508.1429286  
 1715.16977882 2009.62809967 2508.39519393 2711.34492892 2287.77795968 1343.246268  
 195.493035505 38.8865100887 3.4677639936  
 1654.01305064 1591.49728405 1504.5188262 1386.73549786 1303.38114242 1341.4342177  
 1499.08267259 1748.69272611 2158.66931131 2408.73237764 2201.25251463 1352.306524  
 222.130188223 41.9216958576 3.9574354176  
 1653.10702503 1563.41049037 1441.09703402 1284.35460476 1139.84352114 1127.159162  
 1197.82915971 1371.78607541 1636.34555139 1878.25438729 1796.25907025 1291.149796  
 288.949576418 45.0474841867 -2.55510097607  
 1653.10702503 1534.41767109 1370.42703701 1159.7760844 923.756414908 828.62372663  
 779.245331287 806.426099366 914.696158882 1037.46262804 949.578144584 857.163533  
 306.435870549 44.0055547437 -2.6004022562  
 1651.74798663 1501.80074939 1285.71364316 988.990258299 608.912517991 468.0255367  
 392.372398959 376.516950913 427.707397462 516.04489372 466.213485575 430.87848707  
 251.93843055 46.2253174701 -2.67288430441  
 1651.74798663 1467.82478929 1179.25563485 728.054884738 360.208490065 280.0705255  
 235.765873543 220.136931897 224.259348389 266.253635072 230.782732728 204.3720864  
 159.161408839 46.3612213105 -3.09871633765  
 1649.48292262 1430.67773959 1047.88192247 472.102651992 285.325474007 237.8950337  
 208.358599063 192.231343336 178.142645215 181.902651466 150.871274575 119.9305002  
 86.2263478268 42.2841060986 -3.86430797188  
 1649.48292262 1395.34274108 874.831032366 346.255695785 272.73171813 230.32971992  
 202.967746727 183.805305231 169.082389188 160.746953644 132.705461242 101.4022766  
 64.9800474448 29.1920361405 4.0865306112  
 1647.21785862 1351.85351216 693.625911837 314.454197132 263.082545462 226.5244123  
 200.838586561 185.073741075 171.800465996 155.265498748 129.987384434 97.18925761  
 58.6831695065 21.481758262 3.7259543808  
 1647.67087142 1319.23659046 536.883482581 314.046485611 257.283981605 225.0294701  
 208.132092662 196.172554707 181.812048905 160.520447243 131.029313877 98.63889858  
 59.90630407 20.6074435555 3.4098937344  
 1648.12388422 1284.35460476 420.912205442 315.677331696 251.213610068 228.8347776  
 223.217418946 218.823194773 195.447734225 166.998530302 131.618230519 98.04998194  
 63.1679962395 20.2993948506 3.1962189312  
 1644.49978181 1201.90627492 316.266248337 317.670588021 246.321071813 244.4184180  
 269.923038762 260.636276335 204.961003053 159.569120361 130.032685714 111.4138595  
 76.8942841195 28.1048054173 3.5790529536  
 1643.14074341 1098.61935622 303.808396301 313.955883051 253.161565113 273.2753334  
 321.838305794 274.634371896 197.803400792 163.374427892 137.552698216 119.3415836  
 89.8504502373 29.5544463815 2.44568618496  
 1665.79138347 1130.78326511 308.836838396 319.346735386 258.099404648 285.5519804  
 339.822914006 285.144268887 201.563407043 168.719978947 130.440397236 102.0817958  
 81.6056172533 30.2339655835 1.22818496256  
 1667.60343468 1172.91345563 305.982857747 320.52456867 252.617949752 265.21170562

## Apéndice A. Aplicación para estimar desempeño de luminaria

305.122133425 270.647859244 201.382201922 166.454914941 142.535839031 121.198936089  
97.7328729803 32.9067411113 1.469014272  
1666.69740907 1262.15697749 347.524131628 322.517824996 251.304212628 240.522507957  
251.93843055 248.133123019 208.132092662 164.099248374 132.07124332 106.657225166  
66.429688409 19.5111525763 1.8229131648  
1662.16728106 1336.90408971 511.061752905 316.764562419 264.939897948 232.096469852  
215.878611565 206.274740177 192.050138215 167.723350784 137.009082855 98.2311870617  
57.6412400634 17.0784738332 2.05038779904  
1662.16728106 1365.896909 671.881297374 315.360222735 274.317262935 233.999123618  
208.132092662 193.092067658 179.637587459 160.701652364 135.33293549 98.8654049836  
52.6127979688 16.8021360244 2.15588973312  
1662.62029386 1401.2319075 842.214110671 334.703869351 284.555352245 238.12154011  
209.717637467 189.966279329 172.887696719 158.028876836 133.928595806 96.4191358565  
54.3795478939 19.769369873 2.35754532864  
1660.35522986 1434.7548548 1020.24814159 431.331499873 295.427659477 244.871430849  
214.655477001 192.639054857 175.877581208 167.496844384 139.636557102 103.757943238  
67.7434255329 29.6903502219 2.65179333888  
1661.26125546 1470.5428661 1157.05800759 657.384887732 331.125068221 264.079173625  
224.938867591 203.013048007 194.722913743 205.912329936 171.664562156 137.915108457  
94.0634692896 36.9838563232 3.35558472192  
1659.90221705 1500.89472379 1265.3280671 931.004619729 513.326816912 372.439835701  
296.016576118 269.968340042 286.684512411 352.597875003 310.512985761 265.71001971  
175.786978648 42.0122984179 3.6547294464  
1658.54317865 1534.41767109 1353.21255056 1132.14230352 865.770776339 730.772961546  
622.50290203 591.245018739 655.119823725 771.997126466 733.038025552 640.170401282  
280.478237033 44.1867598642 -3.61968105917  
1657.63715305 1561.59843917 1423.88254757 1255.81479828 1093.1832026 1040.63371765  
1051.50602488 1168.38332762 1360.91376818 1623.66119295 1639.9696538 1122.17602189  
276.355820541 41.2421766556 -3.9730310442  
1656.73112745 1589.23222005 1486.85132695 1356.83665297 1250.37864466 1249.01960626  
1345.96434574 1582.89004083 1909.51227058 2268.29840923 2194.00430981 1344.15229453  
229.695502005 38.7053049682 3.24919247616  
1658.54317865 1613.69491132 1535.32369669 1430.22472678 1359.10171698 1391.26562587  
1548.91408073 1833.40611996 2300.00930532 2618.93031745 2383.36366076 1379.03428024  
179.184574658 36.7573499225 1.69782437376  
1654.91907624 1637.70458979 1582.43702803 1493.64651897 1452.42235405 1510.86100542  
1707.46856119 2032.27873974 2586.76640856 2854.94998694 2466.71801621 1360.00774258  
165.186479097 36.6214460821 1.57050980352  
1654.01305064 1658.99619145 1619.58407774 1547.55504233 1518.56222304 1588.32619445  
1796.71208305 2158.66931131 2796.05832277 2990.40081453 2613.49416383 1305.64620642  
143.940178715 37.1650614437 1.27225539072  
1653.10702503 1678.92875471 1643.14074341 1570.65869519 1542.57190151 1613.69491132  
1837.93624797 2238.85257714 2904.78139508 3025.73581304 2871.71146059 1366.3499218  
137.009082855 40.7438625742 1.0995349248  
1653.10702503 1693.87817715 1654.91907624 1581.53100243 1552.53818314 1626.83228256

## A.2. Acerca del estandar IES

1845.6374656 2308.61654855 2927.88504795 2979.5285073 3175.23003747 1476.88504532  
156.216825631 45.9988110695 0.79816442112  
1651.74798663 1705.20349719 1660.35522986 1586.06113044 1568.84664399 1639.063628  
1846.5434912 2383.81667356 2845.88973091 2903.87536948 3269.45670015 1692.9721515  
270.013641323 59.9516053502 0.60363131904  
1651.74798663 1714.26375321 1663.52631946 1599.65151448 1595.12138647 1662.620293  
1840.65432478 2444.97340174 2631.61467589 2664.68461038 2875.7885758 1647.2178586  
395.543488568 94.6976872114 0.4629620736  
1649.48292262 1721.05894523 1665.33837067 1619.13106494 1636.79856419 1706.562535  
1846.996504 2366.14917431 2294.1201389 2081.65713508 1818.90971032 1031.12044882  
389.654322151 75.4899444355 0.38550495744  
1649.48292262 1726.49509885 1668.05644748 1645.40580741 1696.59625396 1762.736122  
1875.08329768 2189.021169 1835.21817117 1431.13075239 1089.10608739 701.32712946  
303.672492461 35.3530102384 0.36547294464  
1647.21785862 1729.21317566 1676.6636907 1678.92875471 1744.6156109 1812.1145183  
1866.02304166 1928.99182104 1474.61998131 1051.05301208 665.992130957 436.7676534  
189.649170368 27.1534785345 0.36102138624  
1647.67087142 1730.57221406 1686.17695953 1717.43484282 1775.87349419 1802.148236  
1821.17477432 1743.2565725 1334.63902571 908.353979663 516.04489372 287.771743134  
128.990756271 25.6675965462 0.35434404864  
1648.12388422 1731.47823966 1698.86131797 1760.92407175 1773.15541738 1745.974649  
1754.58189253 1615.95997533 1318.78357766 957.279362206 602.117325971 366.0976564  
143.170056953 29.9621579027 0.35122795776  
1644.49978181 1734.64932927 1730.11920126 1842.91938879 1692.06612595 1597.839463  
1444.26812363 1339.62216652 1225.00992779 1177.89659645 949.125131782 612.5366204  
284.057038163 37.1650614437 0.34633124352  
1643.14074341 1737.82041888 1781.76266061 1928.99182104 1663.97933227 1443.815110  
1201.90627492 908.806992465 682.300591804 511.061752905 372.892848502 230.0579122  
101.13046899 17.1509558814 0.28222880256  
1665.79138347 1739.63247009 1816.19163351 2002.83290765 1612.78888572 1337.357102  
1028.85538481 804.16103536 597.134185156 443.109832707 311.872024165 187.02169612  
59.0455797475 16.0954360543 0.55332870912

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

# Referencias

- [1] AfterImage + Space. Spectrally Enhanced Lighting Program Implementation for Energy Savings : Economics Validation Study. Technical Report August, 2006.
- [2] ANSI and IESNA. Nomenclature and Definitions for Illuminating Engineering, 2010.
- [3] ANSI and UL. ANSI/UL 1598-2004 Luminaires: In-situ Temperature Measurement Test (ISTMT). Technical report, 2004.
- [4] Vitor C. Bender, Fernanda B. Mendes, Tiago Maggi, Marco a. Dalla Costa, and Tiago B. Marchesan. Design methodology for street lighting luminaires based on a photometrical analysis. *2013 Brazilian Power Electronics Conference*, pages 1160–1165, October 2013.
- [5] S. Berman. Photopic luminance does not always predict perceiver room brightness. *Lighting Research and Technologist*, pages 37–41, 1990.
- [6] S. Berman. Energy Efficiency Consequence of Scotopic Sensitivity. In *IESNA ANNUAL CONFERENCE*, 1991.
- [7] Encyclopedia Britannica. Human eye sensitivity and photometric quantities. 1:275–291, 1994.
- [8] Carandini. Ficha Técnica de luminaria para sodio STR 154.
- [9] Min Cheng, Jinghui Zhan, Fan Cao, Xiaoyang He, and Nianyu Zou. Design of led street lamps with nonsymmetrical optical distribution. *Proceedings of ICCTA2011*, 675:2–5, 2011.
- [10] CIE. CIE 191:2010 Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance, 2010.
- [11] Pacific Gas Company and Electric. LED Street Lighting. Host Site: City of San Francisco, California, 2008.
- [12] Cree. Data Sheet: XLamp XM-L.
- [13] Cree. Data Sheet: XLamp XP-G LEDs, 2013.

## Referencias

- [14] Cree. Cree TEMPO 24 Service. Technical report, 2014.
- [15] Cree. Cree ® LED Components IES LM-80-2008 Testing Results. Technical report, Cree, 2014.
- [16] Cree. Data Sheet: XLamp XP-E LEDs, 2014.
- [17] Cree. Data Sheet XLamp XP-G2 LEDs, 2014.
- [18] Cree. LM-80-08 report. Cree XLamp Xp-G2 White LEDs. 2014.
- [19] Instituto Uruguayo de Meteorología. Temperatura media de uruguay.
- [20] DIAL. DIALux.
- [21] Mark Fortunato. Ensure long lifetimes from electrolytic capacitors: A case study in LED light bulbs, 2013.
- [22] S Fotios and Teresa Goodman. Proposed UK guidance for lighting in residential roads. *Lighting Research and Technology*, 44:69–83, 2012.
- [23] Glamox. Pupil Lumen.
- [24] Teresa Goodman. Mesopic Photometry for SSL, 2013.
- [25] [Http://theledlighting.blogspot.com/](http://theledlighting.blogspot.com/). Efficacy & Price Trend Forecast 2014~2040 for LED Light, Fluorescent Light, N' Incandescent Light, 2014.
- [26] IEC. IEC 62386-102. Digital addressable lighting interface - Part 102: General requirements - Control gear. Technical report.
- [27] IEC. IEC 61643-1. P[1] IEC, “IEC 61643-1. Part 1: Surge protective devices connected to low-voltage power distribution systems – Requirements and tests,” 2005.art 1: Surge protective devices connected to low-voltage power distribution systems – Requirements an. Technical report, IEC, 2005.
- [28] IEC. IEC 60598-2-3. Luminaires – Part 2-3: Particular requirements – Luminaires for road and street lighting. Technical report, IEC, 2011.
- [29] IEC. IEC-62504-2011 General lighting –LEDs and LED modules – Terms and definitions. Technical report, IEC, 2011.
- [30] IEC. IEC 62722-1 Luminaire performance – Part 1: General requirements. Technical report, IEC, 2011.
- [31] IEEE. IEEE C62.41.2. Recommended Practice on Characterization of Surges in Low-Voltage (1000 V and Less) AC Power Circuits. Technical Report April, 2003.
- [32] IES. RP-8-00 Recommended Practice 8, Roadway Lighting. Technical report, 2000.



- [33] IES. IES LM-79-08. Electrical and Photometric Measurements of Solid-State Lighting Products. Technical report, 2008.
- [34] IES. LM-80-08. Measuring Lumen Maintenance of LED Light Sources. Technical report, IESNA, 2008.
- [35] IES. TM-21-11 - Projecting Long Term Lumen Maintenance of LED Light Sources. Technical report, IESNA, 2011.
- [36] IESNA. IESNA LM-63-02: Standard File Format for the Electronic Transfer of Photometric Data, 2002.
- [37] IESNA. Use of Spectral Weighting Functions for Compliance with IES, 2009.
- [38] IESNA. Use of Spectral Weighting Functions for Compliance with IES Recommendations, 2010.
- [39] IESNA. TM-12-12: Spectral Effects of Lighting on Visual Performance at Mesopic Lighting Levels. Technical report, 2012.
- [40] Light Laboratory Inc. In-situ Temperature Measurement Test report. Technical report, 2012.
- [41] NRV Inducción. Factor Pupil-Lumen.
- [42] Intendencia de Montevideo. Precios de luminarias sodio, 2015.
- [43] Michael R. Krames, Oleg B. Shchekin, Regina Mueller-Mach, Gerd O. Mueller, Ling Zhou, Gerard Harbers, and M. George Craford. Status and Future of High-Power Light-Emitting Diodes for Solid-State Lighting. *Journal of Display Technology*, 3(2):160–175, June 2007.
- [44] Sinoco Led. 180~200lm/w 50w solar street lighting system, 2014.
- [45] Ledil. Ledil.
- [46] Ledil. Data Sheet Ledil Strada Module series, 2013.
- [47] Ledil. Data Sheet . STRADA-2x2-NW. 2014.
- [48] Ledlightinchina. LED street lights are enjoying a great popularity over the world especially in China, 2014.
- [49] L.Halonen. CIE AND MESOPIC PHOTOMETRY. *CIE 27th Session*, 2011.
- [50] Shuji Nakamura and M. R. Krames. History of Gallium–Nitride-Based Light-Emitting Diodes for Illumination. *Proceedings of the IEEE*, 101(10):2211–2220, October 2013.
- [51] Pacific Northwest National and Laboratory. SSL Pricing and Efficacy Trend Analysis for Utility Program Planning. (October), 2013.

## Referencias

- [52] Next Generation Lighting Industry Alliance. LED LUMINAIRE LIFETIME : Recommendations for Testing and Reporting. (June), 2011.
- [53] P Nussbaum, J L Ron, D Segurola, and G Casaravilla. Controlador de Flujo Lumínico para Alumbrado Público. 1999.
- [54] D.R. Nuttall, R. Shuttleworth, and G. Routledge. Design of a LED street lighting system. *4th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2008)*, pages 436–440, 2008.
- [55] El Observador. La eficiencia energética todavía es un sueño para Montevideo, 2012.
- [56] U.S. Department of Energy. Thermal Management of White LEDs. Technical report, 2007.
- [57] U.S. Department of Energy. Lifetime of White LEDs, 2009.
- [58] Royal Swedish Academy of Sciences. The Nobel Prize in Physics 2014 - Press Release. page 1, 2014.
- [59] Philips. Xitanium 150W 0.35-0.7A GL Prog sXt.
- [60] Philips. Evaluating the Lifetime Behavior of LED Systems, 2012.
- [61] Philips. XITANIUM 75W 0.1A-0.70A AOCM 0-10V INT-Y SXT, 2012.
- [62] Philips. Xitanium 55W 0.35-1.0A. 2014.
- [63] Pioneer Lighting. Design Lumens vs. Pupil Lumens/Usable Light. page 5000.
- [64] Eric Richman. The elusive “life” of LEDs: How TM-21 contributes to the solution (MAGAZINE). *LEDs Magazine*, 2011.
- [65] Schreder. Brochure: Luminaria Ampera.
- [66] Vossloh Schwabe. LED Roadway Light ME / S. Brochure.
- [67] Maksim Shpak. Energy Efficiency of Outdoor Lighting. Technical report, 2012.
- [68] S Tanuja, K R Shailesh, Savitha G Kini, and Ciji Pearl Kurian. A review of existing methods for study and analysis of thermal design of LED lighting products. *2013 International Conference on Green Computing, Communication and Conservation of Energy (ICGCE)*, pages 404–408, December 2013.
- [69] PRO-LITE Technologies. Technical Note – LED Measurements Photometer or Spectroradiometer ? An Estimation of Errors When Using Filter- Based Photometers to Measure the Illuminance of LED Sources Technical Note – LED Measurements. (August):1–3, 2009.

- [70] Tatsukiyo Uchida, Yoshi Ohno, and Yuqin Zong. Design of Mesopic Photometers based on CIE 191. 2013.
- [71] Tatsukiyo Uchida, Yuqin Zong, Cameron Miller, and Yoshi Ohno. A Practical Photometer for CIE Performance Based Mesopic Photometry System. *CORM 2011*, 2011.
- [72] UNE-EN. UNE-EN 62471. Seguridad fotobiologica de lamparas y de los aparatos que utilizan lamparas. Technical report, 2009.
- [73] UNIT. UNIT-IEC/PAS 62717:2011. Módulos LED para iluminación general – Requisitos de desempeño. Technical report, 2014.
- [74] UNIT. UNIT-IEC/PAS 62722-2-1:2011. Desempeño de luminarias – Parte 2-1: Requisitos particulares para luminarias LED. Technical report, UNIT, 2014.
- [75] URSEA. EFICIENCIA ENERGÉTICA. Texto Compilado de Normativas de URSEA. Technical report, 2014.
- [76] Wwww.lednews.org. Taiwan reports high failure rate of LED street light, 2013.
- [77] Fu Xiaoyun, Liu Xiaojian, and Wu Yan. Research and Analysis of the Design Development and Perspective Technology for LED Lighting Products Application of LED Light Source. 2009.
- [78] Kai Yang, Jidong Song, Yuqing Chen, and Bin Lin. Secondary Light Distribution Design for LED Street Light. (Iceoe):378–381, 2011.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

# Glosario

- **candela:** unidad de medida de la intensidad luminosa.
- **CCT:** Temperatura de Color. Utilizado para definir el color de una luz blanca, se expresa en grados Kelvin. Luces cálidas tienen una temperatura menos 2000K a 3000K, luces frías una temperatura mayor 5000K a 8000K.
- **CIE:** Comisión Internacional de la Iluminación. Comisión encargada de estudiar y difundir temas relacionados con la iluminación, color y visión.
- **CRI:** Índice de reproducción cromática. Da una idea de que tan bien reproduce los colores una determinada fuente de luz.
- **distribución de flujo luminoso:** volumen determinado por los vectores que representan las intensidades luminosas en todas las direcciones.
- **distribución espectral de potencia:** forma en que se distribuye la potencia radiada de una fuente a lo largo del espectro.
- **EN:** Estándar Europeo, es un documento que ha sido ratificado por alguno de los tres organismos de estandarización europeos: CEN, CENELEC, o ETSI
- **flujo luminoso:** potencia luminosa percibida.
- **IES:** Illuminating Engineering Society. Organización sin fines comerciales que nuclea profesionales y trabaja en pos de generar conocimiento relacionado con la iluminación.
- **IESNA:** Illuminating Engineering Society of North America, Es lo mismo que la IES
- **IIE:** Instituto de Ingeniería Eléctrica
- **Intensidad luminosa:** flujo luminoso que emite una fuente de luz por unidad de ángulo sólido. Se mide en candelas (cd)
- **lux:** unidad de medida de la iluminancia,  $\text{lm}/\text{m}^2$ .
- **lumen:** medida de la potencia luminosa percibida. Es la potencia radiante de la fuente de luz, ponderada por la respuesta del ojo.

## Apéndice A. Glosario

- relación S/P: relación entre el flujo luminoso de una fuente percibido en condiciones de visión escotópica, sobre el percibido en condiciones de visión fotópica.
- UNIT: Instituto Uruguayo de Normas Técnicas
- Ts: Temperatura de empaque del led
- Tj: Temperatura de juntura del led.

# Índice de tablas

|  |    |
|--|----|
| 3.1. Desempeño de diferentes luminarias en escenario de iluminación barrial de la IMM . . . . .            | 20 |
| 3.2. Comparación entre resultados medidos y estimados para led XPG y lente Strada 2x2 DNW . . . . .        | 32 |
| 3.3. Comparación entre resultados medidos y estimados para led XPG2 y diferentes lentes . . . . .          | 35 |
| 4.1. Equipos de medición utilizados . . . . .  | 39 |
| 4.2. Fuentes de luz utilizadas . . . . .   | 40 |
| 4.3. Error al variar la intensidad de la fuente de luz led cálida. . . . .                                 | 43 |
| 4.4. Luxes de fuentes con diferente relación S/P, calculados para visión fotópica y pupil lumenes. . . . . | 44 |
| 4.5. S/P característico de algunas fuentes de luz. . . . .   | 49 |
| 4.6. ELF para algunos S/P y luminancias fotópicas . . . . .  | 52 |
| 5.1. Resumen de normas IEC que aplican a luminarias led viales. . . . .                                    | 57 |
| 5.2. Información a incluir en reporte de análisis de luminaria led realizado en el IIE . . . . .           | 66 |
| 6.1. Valores de fotometría para luminaria colgante de Ciudad Vieja. . . . .                                | 70 |
| 6.2. Iluminancias y uniformidades actuales y estimadas en el salón de actos. . . . .                       | 76 |

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.



# Índice de figuras

|  |    |
|--|----|
| 1.1. Eficiencia de led frente a otras fuentes de luz blanca. (Extraída de [43])  | 1  |
| 1.2. Luminarias led con distribución fotométrica no adecuada. (Extraído de [11]) . . . . .   | 2  |
| 1.3. Esquema de una luminaria vial led . . . . .   | 3  |
| 1.4. Pérdida de eficiencia por fotometría inadecuada . . . . .   | 4  |
| 1.5. Distribución con: a) lampara y reflector, b) led y lente . . . . .  | 4  |
| 1.6. Comparación de eficiencia energética en proyecto vial utilizando lámparas de sodio y leds . . . . .                                     | 5  |
| 1.7. Proceso de visión. . . . .  | 7  |
| 1.8. Funciones fotópicas y escotópicas de eficiencia espectral luminica $V(\lambda)$ y $V'(\lambda)$ (Extraído de [22]) . . . . .            | 8  |
| 1.9. Distribución espectral de lámpara de sodio, leds y curvas $V(\lambda)$ y $V'(\lambda)$ . En base a medidas realizadas. . . . .          | 9  |
| 1.10. Mantenimiento de flujo para varias fuentes de luz. (Extraída de [57])  | 10 |
| 1.11. Elementos que influyen en la confiabilidad de una luminaria led. (Extraído de [60]) . . . . .  | 10 |
| 1.12. Conversión de potencia en fuente de luz blanca (Extraído de [56]) .  | 11 |
| 1.13. Proyecciones de evolución de eficiencia y precios de lámparas led, FLC e incandescentes. (Extraído de [25]) . . . . .                  | 12 |
| 1.14. Proyecciones de evolución de precios para diferentes lámparas y luminarias led, normalizadas a precios de 2008. (Extraído de [51]) . . | 13 |
| 3.1. Diagrama polar de distribución de intensidades. Los datos corresponden a módulos leds fabricados y medidos durante este trabajo.        | 18 |
| 3.2. Escenario de iluminación en barrios de la Intendencia de Montevideo   | 19 |
| 3.3. Distribución fotométrica de los lentes DNW, A-T, A-T2. . . . .  | 20 |
| 3.4. Leds en serie con fuente de corriente constante. . . . .  | 22 |
| 3.5. Puntos de medición de $T_j$ y $T_s$ . . . . .   | 24 |
| 3.6. Lente Ledil STRADA-2X2-DNW. (Extraído de [45]) . . . . .  | 24 |
| 3.7. Corriente contra voltaje de led Cree XP-G a $T_j=25^\circ\text{C}$ . (Extraído de [13]) . . . . .                                       | 25 |
| 3.8. Flujo luminoso de led Cree XP-G a $T_j=25^\circ\text{C}$ . (Extraído de [13]) .   | 26 |
| 3.9. Variación de flujo con $I_f$ y $T_j$ para de led Cree XP-G. (Extraído de [13]) . . . . .  | 26 |
| 3.10. Distancia entre lentes vs. distancia a plano a iluminar. . . . .   | 27 |

## Índice de figuras

|   |    |
|---|----|
| 3.11. Entradas y salida de la aplicación . . . . .  | 27 |
| 3.12. Estructura de la aplicación . . . . .   | 28 |
| 3.13. Leds Cree XP-G con lentes Ledil Strada 2x2 DNW montados para medición en goniofotómetro . . . . .                         | 31 |
| 3.14. Escenario simulado utilizando DIALux . . . . .  | 32 |
| 3.15. Leds Cree XP-G2 montados para medición en goniofotómetro . . . . .  | 33 |
| 3.16. Distribución de intensidades luminosas de lentes utilizados con leds Cree XP-G2. . . . .                                  | 34 |
| 3.17. Escenario parada de omnibus . . . . .   | 35 |
| 3.18. Dialux en escenario parada de omnibus de luminaria estimada vs medida. . . . .  | 35 |
|   |    |
| 4.1. Distribución espectral de diferentes fuentes de luz con $V$ superpuesta. (En base a medidas realizadas) . . . . .          | 38 |
| 4.2. Aproximación $V(\lambda)$ en un luxómetro y un radiómetro . . . . .  | 39 |
| 4.3. Distribución espectral normalizada de las fuente de luz utilizadas. (En base a medidas realizadas) . . . . .               | 40 |
| 4.4. Comparativa de error relativo de todos los luxómetros para incandescente y fluorescente compacta . . . . .                 | 41 |
| 4.5. Comparativa de error relativo de los luxómetros con menor error en medida de fuente incandescente . . . . .                | 42 |
| 4.6. Comparativa de error relativo en los luxómetros más económicos . . . . .   | 42 |
| 4.7. Curvas de eficiencia $V(\lambda)$ y $V'(\lambda)$ y espectros de luz led y sodio. (En base a medidas realizadas) . . . . . | 45 |
| 4.8. En condiciones de baja luminosidad, fuentes de luz frías son percibidas como más brillantes. Extraído de [48]) . . . . .   | 46 |
| 4.9. VMes Función de eficiencia mesópica $V_{mes,m}(\lambda)$ (Extraído de [24]) . . . . .                                      | 47 |
| 4.10. Campo de visión (Extraído de [67]) . . . . .  | 48 |
| 4.11. Luminancia promedio para diferentes campos de visión (Extraído de [67]) . . . . .   | 49 |
| 4.12. Comparación entre luminancia mesópica y fotópica para diferentes fuentes de luz.(Extraído de [49]) . . . . .              | 50 |
|   |    |
| 5.1. Organización de normas IEC en cuanto a módulos led y fuentes de poder (Extraído de [29]) . . . . .                         | 55 |
| 5.2. Modules led y fuentes independientes y para incorporar. (Extraído de catálogos Philips y MeanWell) . . . . .               | 56 |
| 5.3. Caso hipotético de depreciación de flujo de 2 luminarias con mismo código fotométrico . . . . .                            | 59 |
| 5.4. Extracto de reporte LM-80 para led XP-G2. (Extraído de [18]) . . . . .   | 60 |
| 5.5. Ajuste de curva de depreciación con datos LM-80 (Extraído de [64]) . . . . .   | 61 |
| 5.6. Proyección de mantenimiento de flujo lumínico utilizando 6000 horas de datos LM-80. (Extraído de [35]) . . . . .           | 62 |
| 5.7. Proyección TM-21 para diferentes leds Cree XP-G2. (Extraído de [15]) . . . . .   | 63 |
| 5.8. Escenarios para In-situ Temperature Measurement Test (ISTMT). (Extraído de [3]) . . . . .                                  | 64 |

|   |    |
|---|----|
| 5.9. Termocuplas en ensayo In-situ Temperature Measurement Test (ISTMT).<br>(Extraído de [40]) . . . . .  | 64 |
| 6.1. Simulación de escenario de Ciudad Vieja . . . . .  | 68 |
| 6.2. Esquema de distancias y ángulos relevantes para selección de lentes.<br>Se muestra superpuesta la dist. de intensidades luminosas para el<br>lente STRADA-2x2-DNW (Extraído de [47]) . . . . . | 69 |
| 6.3. Proceso de soldado de leds en horno . . . . .  | 70 |
| 6.4. Módulos leds listos para medición en gonifotómetro. . . . .  | 71 |
| 6.5. Sistema de medición y generación de radiación con luminarias led<br>para plataforma de fenotipado . . . . .  | 72 |
| 6.6. Representación de espectro de luminaria con leds blancos y azules.   | 73 |
| 6.7. Representación de espectro de luminaria con leds de color. . . . .   | 73 |
| 6.8. Fotos de las luminarias construidas para cámara de fenotipado . .  | 74 |
| 6.9. Fotos de los módulos construidos para iluminar el salón de actos de<br>la Faculta de Ingeniería. . . . .   | 75 |
| 6.10. Niveles actuales de iluminancia relevados en el salón de actos. . . .   | 76 |
| 7.1. Esquema de una luminaria led . . . . .   | 80 |
| A.1. Estructura de la aplicación . . . . .  | 84 |



Esta es la última página.  
Compilado el domingo 17 julio, 2016.  
<http://iie.fing.edu.uy/>