



---

**Universidad de Valladolid**

Facultad de Ciencias

## **TRABAJO FIN DE GRADO**

Grado en Físicas

**Estudio del flujo luminoso para la estabilidad de luminarias**

*Autor: Diana Gozalo*

*Tutor/es: Fernando Rodríguez*

*Santiago Mar*



# RESUMEN

Este proyecto se ha realizado con la empresa Boos Technical Lighting S.L y en colaboración con otro compañero que realiza la parte técnica. El proyecto en conjunto se basa en la idea de aprovechar las características de los LEDs con la temperatura y mejorar su eficiencia en su uso en las luminarias de exterior. Se quiere que la cantidad de luz que emite a lo largo del día se mantenga constante aunque varíe la temperatura ambiental.

En esta parte del proyecto se van a estudiar las características de la placa de LEDs con una serie de simulaciones con el programa Photopia, las cuales permiten realizar diferentes medidas sin invertir en los elementos necesarios para poder hacer mediciones reales.

Con estas simulaciones se pretende encontrar cual es el punto idóneo dentro de la placa para colocar un sensor que cuide del buen funcionamiento de todos los LED. Para ello se han realizado diferentes tipos de simulación, midiendo en cada punto la cantidad de luz que llega, y que ocurre al ir apagando diferentes LEDs, como varía esa cantidad de luz en función de la distancia.

La parte de mi compañero, que completa el estudio, trata del diseño de un sistema optoelectrónico que permita regular la potencia del LED en función de su temperatura.

## ABSTRACT

This project has been made by Boos Technical Lighting S.L and in collaboration with another partner who performs the technical part. It is about taking advantage of the characteristics of the LEDs with the temperature and to improve its efficiency in its use in outdoor luminaires. The idea is in that the amount of light emitted throughout the day to remain constant even if the ambient temperature varies.

This part of the project will study the characteristics of the LED board with various simulations with the Photopia program, which allow different measurements without spending money on the elements necessary to be able to make real measurements.

With these simulations it is tried to find which the ideal point inside the plate is to place a sensor that takes care of the good operation of all the LEDs. For this, different types of simulation have been made, measuring at each point the amount of light that arrives, and that happens when different LEDs are turned off, as that amount of light varies according to the distance.

The part of my partner is about the design of an optoelectronic system that allows regulating the power of the LED according to its temperature.

Este proyecto se ha realizado con la empresa Boos Technical Lighting S.L dedicada al diseño de luminarias para exteriores, que con gran interés desarrolla nuevos proyectos que pueden suponer un ahorro económico y un ahorro en el impacto del medio ambiente.



Imagen. Luminaria Córdoba.

# ÍNDICE GENERAL

---

<b>1. Fotometría</b>	<b>1</b>
<b>2. Luminarias</b>	<b>5</b>
2.1. Características fotométricas. Distribución de la luz, relación de salida, diagrama polar de intensidad.....	7
2.2. Características ópticas.....	12
2.3. Características térmicas.....	15
2.4. Contaminación lumínica. Parámetros de control.....	16
<b>3. Dispositivos LED</b>	<b>22</b>
3.1. Electroluminiscencia.....	22
3.2. Luz blanca.....	24
3.3. Dependencia con la temperatura.....	26
<b>4. Photopia</b>	<b>30</b>
4.1. Trazado de rayos.....	32
4.2. Medida de la luminancia.....	35
4.3 LED.....	37
<b>5. Simulaciones.</b>	<b>40</b>
1. Flujo luminoso total. Comprobación de simetría.....	41
2. Variación del flujo con la distancia.....	46
3. Reflexión de la estructura.....	52
<b>6. Resultados y conclusiones.</b>	<b>54</b>
<b>7. Bibliografía.</b>	<b>55</b>

# 1. FOTOMETRÍA

---

La radiometría y la fotometría describen la propagación de energía mediante radiación a través del espacio. La radiometría trata el problema de manera puramente física, en términos de energía o potencia y de la geometría con la que se realiza la propagación. Mientras que en la fotometría el análisis está basado no solo en la energía sino también en el efecto visual que esa energía produce en los observadores.

Como cualquier otro detector físico de radiación, el ojo humano reacciona a la radiación electromagnética solo en un rango del espectro. Ese rango abarca desde 380-830 nm, que es la denominada región visible, fuera de ella está la radiación infrarroja o ultravioleta. El problema está en que la sensibilidad del ojo humano no es la misma para cada longitud de onda o intensidad, e incluso depende de cada persona. Es decir, el ojo se puede usar como instrumento de comparación pero nunca tomar los resultados como medidas absolutas.

El objetivo de la fotometría es que la medida de la luz se acerque lo mas posible a la sensación visual experimentada por un observador humano estándar que responda a los estímulos siempre de la misma forma. La Comisión Internacional de Iluminación (CIE) ha acordado tomar como observador patrón uno que tenga una curva de sensibilidad espectral como la siguiente:

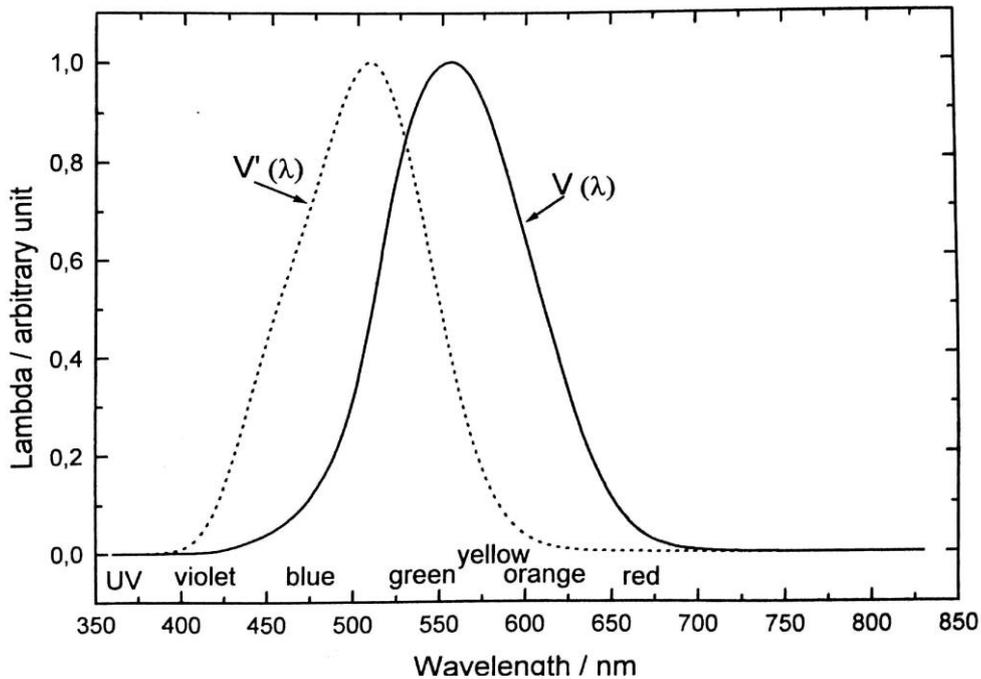


Imagen 1.1 Eficacia luminosa relativa

La función  $V(\lambda)$  representa la eficiencia luminosa relativa o factor de visibilidad :

$$V(\lambda) = \frac{W_0}{W_\lambda}$$

$W_\lambda$  es el poder emisor espectral, que depende de la longitud de onda.

$V(\lambda)$  es la función que describe la sensibilidad espectral para visión fotópica ( longitudes de onda altas) y  $V'(\lambda)$  describe la sensibilidad espectral para visión escotópica ( longitudes de onda bajas).

Cuando la iluminación está muy atenuada la sensibilidad del ojo aumenta mucho y el máximo se desplaza hacia longitudes de onda mas cortas. Este desplazamiento se conoce con el nombre de efecto Purkinje.

→ Unidades en fotometría.

Ahora se verán algunas definiciones y medidas útiles en fotometría y que se usaran a lo largo del proyecto.

- FLUJO LUMINOSO:

Es el término equivalente a flujo radiante en radiometría, el cual es la energía radiada por una superficie por unidad de tiempo, y su unidad de medida es el vatio. El total de flujo radiante es el poder de una fuente para emitir radiación en el espacio que la rodea. Mientras que el flujo luminoso es la parte de ese poder percibido como

luz. Para medir cualquiera de los dos flujos se tiene que detectar toda la radiación emitida.

El flujo luminoso,  $\phi_v$ , expresado en función del flujo radiante,  $\phi_{e,\lambda}$ , es:

$$\phi_v = K_m \int_{380 \text{ nm}}^{830 \text{ nm}} \phi_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda$$

Con  $K_m$  la constante referida al máximo de eficacia espectral.

El flujo radiante se mide en vatios y el flujo luminoso en lumen.

- ENERGÍA LUMINOSA:

La energía radiante describe la energía procedente de una superficie en forma de radiación electromagnética, su unidad de medida son los Julios. Como en el caso anterior la energía luminosa es la parte de esa energía que es percibida como luz, y su unidad de medida es  $lm \cdot s$  (lumen segundo). A veces también recibe el nombre de “cantidad de luz”.

La relación entre ambas medidas:

$$Q_v = K_m \int_{380 \text{ nm}}^{830 \text{ nm}} Q_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda$$

El concepto de energía se usa en aplicaciones donde el flujo de energía no es constante como en un láser pulsado.

- INTENSIDAD LUMINOSA:

La intensidad radiante esta definida como el flujo de energía por unidad de ángulo sólido en una dirección determinada. La intensidad luminosa es el equivalente fotométrico, da el flujo luminoso que emana de un punto por unidad de ángulo sólido en una dirección específica. Tiene las unidades de lumen por estereorradián,  $lm/sr$ , que es la denominada candela,  $cd$ .

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$$

La intensidad se representa como  $I_v(\theta, \phi)$  para indicar la dependencia con las coordenadas esféricas del ángulo sólido.

- ILUMINANCIA:

Es el término equivalente a la Irradiancia en radiometría. Es como una medida de vatios de luz (flujo luminoso) por unidad de área. La unidad de la irradiancia es el  $W/m^2$  y la de la iluminancia es el flux, que son  $lm/m^2$ .

$$E = \frac{d\Phi_S}{dS}$$

Este término es un índice representativo de la densidad de flujo luminoso sobre una superficie.

La iluminancia cumple con la ley del inverso del cuadrado de la distancia, las iluminancias producidas por fuentes luminosas disminuyen con el cuadrado de la distancia desde el plano a iluminar hasta la fuente:

$$E' = \frac{I \cos\theta}{r^2}$$

- LUMINANCIA:

Este término es el equivalente a la radiancia. Describe la luz que procede de una superficie. La luminancia se encuentra definida como la relación entre la intensidad luminosa y la superficie proyectada sobre el plano perpendicularmente a la dirección de irradiación.

$$L = \frac{d^2\Phi}{d\Omega_S dS \cos\theta}$$

La luminancia está relacionada con la sensación visual de brillo.

## 2. LUMINARIAS. ILUMINACIÓN DE EXTERIOR

---

La luminaria es un aparato de alumbrado que reparte, filtra o transforma la luz emitida por una o varias lámparas y que comprende todos los dispositivos necesarios para el soporte, la fijación y la protección de lámparas, y en caso necesario, los circuitos auxiliares en combinación con los medios de conexión con la red de alimentación. ( Definición de luminaria según la norma UNE-EN 60588-1)

La luminaria es un elemento que controla la distribución de la luz de la lámpara contenida en ella, también contiene todos los elementos necesarios para proteger la lámpara y el engranaje de control. La luminaria conecta todos estos elementos al circuito del suministro eléctrico

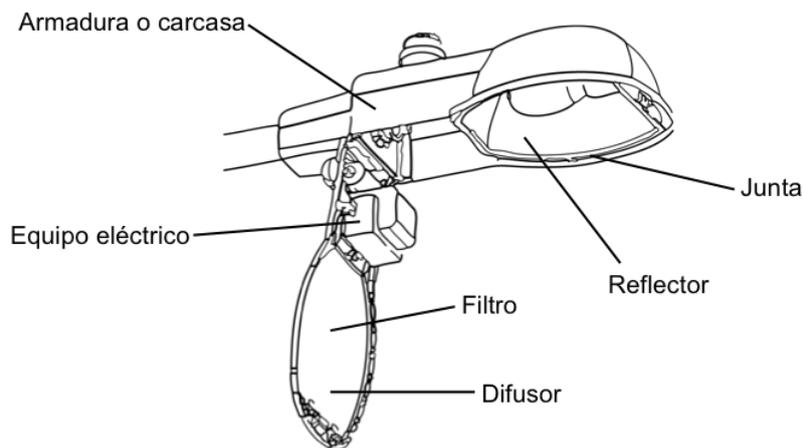


imagen 2.1. PARTES DE UNA LUMINARIA ( FUENTE: THOMAS & BETTS CORPORATION)

La imagen superior representa los diferentes componentes de una luminaria:

- Armadura o carcasa: Fabricada con materiales resistentes porque es el elemento que integra a los demás componentes.
- Equipo eléctrico: Formado por el portalámparas mas los elementos necesarios para el funcionamiento de la lámpara.
- Reflector: Es la superficie interna diseñada para reflejar el flujo luminoso en la dirección deseada. Mas adelante se hablará con mas detalle de este elemento.
- Difusor: Pantalla que tapa a la lámpara. Se usa para difuminar el haz de luz y evitar el deslumbramiento.

→ Filtro: Se acopla con los difusores. Su función es potenciar o disminuir la radiación ultravioleta o infrarroja, polarizar la luz en un plano, o alterar los colores de la radiación.

→ Refractor: Superficie que modifica la distribución de la luz.

→ Junta: Elemento de goma que asegura la estanqueidad de la luminaria.

Las características de una luminaria varían en gran manera dependiendo del tipo lámpara y de las diferentes áreas de aplicación. Las luminarias que se emplean para la iluminación de exterior son principalmente de tres tipos:

- Aquellas que lanzan la mayor parte de la luz a lo largo de la carretera, que se usan en su mayoría para la iluminación de las autopistas
- Aquellas que tienen una mayor simetría de rotación en la distribución de la luz, que se suelen usar para zonas no lineales como zonas residenciales.
- Aquellas usadas para iluminar postes altos, que deberían tener simetría de rotación en la distribución pero normalmente tienen una distribución asimétrica que permite la iluminación de zonas mas complicadas.

La calidad de la luminaria se mide por la distribución de la luz y la eficiencia, además de los aspectos mecánicos, eléctricos y térmicos.

Las principales características de una luminaria son:

- Fotométricas
- Ópticas
- Mecánicas
- Eléctricas
- Térmicas
- Estéticas

Se hablará de algunas de ellas en los siguientes puntos.

## 2.1. CARACTERÍSTICAS FOTOMÉTRICAS. DISTRIBUCIÓN DE LA LUZ Y RELACIÓN DE SALIDA.

### Distribución de la luz

Una lámpara radia su luz en todas las direcciones mas o menos con igual fuerza dando una distribución de luz uniforme. La función de la luminaria es dar forma a esa distribución para que radie en las zonas donde se necesite y apantallarla para que no vaya en direcciones donde podría resultar innecesario.

La distribución de luz de una luminaria define como se distribuye el flujo luminoso en las diversas direcciones dentro del espacio que la rodea. A esto también se le llama distribución de la intensidad luminosa, desde que se especifica en términos de intensidad luminosa en todas las direcciones en las que la luminaria radia luz.

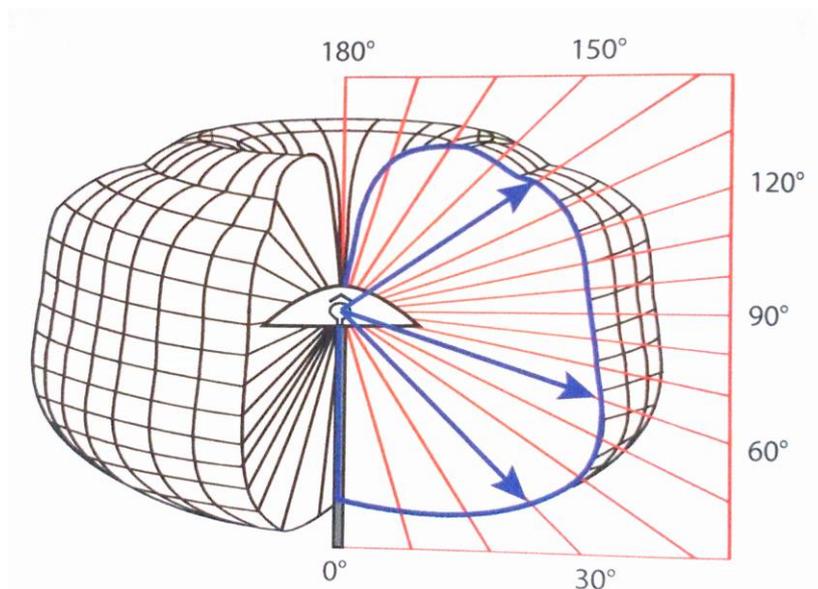


Imagen 2.2 Sólido fotométrico

La imagen anterior representa un sólido fotométrico, que determina de manera gráfica la distribución de la luz de la luminaria en todo el espacio. Las flechas representan las intensidades luminosas en diferentes direcciones. Estas representaciones tienen tres coordenadas: Intensidad luminosa ( $I$ ), plano vertical ( $C$ ) e inclinación respecto al eje vertical ( $\gamma$ ). Se podría decir que la distribución de la luz es la huella dactilar de una luminaria.

Para representar la distribución de la luz se utilizan los diagramas polares. Estos diagramas se usan por que resulta más cómodo trabajar en dos dimensiones que en tres como con el sólido fotométrico, por lo que se realizan cortes en planos verticales y se obtiene la curva polar en dos dimensiones.

En estos diagramas se representa las intensidades lumínicas usando un sistema de coordenadas C-  $\gamma$  , este sistema es el mas utilizado y recomendado por la CIE. La coordenada C representa el ángulo que presentan los planos de rotación y el  $\gamma$  representa los planos de elevación de la luminaria.

Las curvas están referidas a un flujo de 1000 lúmenes, por lo tanto las intensidades estarán dadas como cd/1000 lm.

$$I_{real} = \Phi_{lámpara} \cdot \frac{I_{gráfica}}{1000}$$

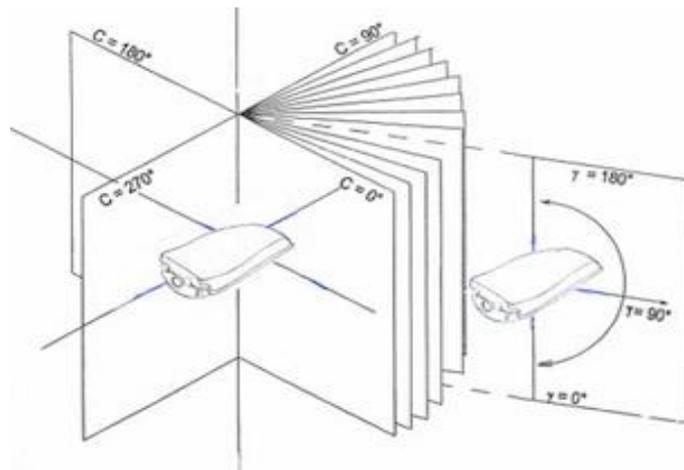


Imagen 2.3 Sistema de coordenadas C-  $\gamma$  usado para especificar la distribución de luz de una luminaria

Normalmente la curva polar representa los dos planos verticales: el transversal (0º) y el longitudinal (90º) aunque si la intensidad máxima no esta contenida en estos dos planos también se representa la curva polar del plano que la contiene. El centro del diagrama polar tiene intensidad 0 por lo que el valor de intensidad máxima será el punto más alejado del centro.

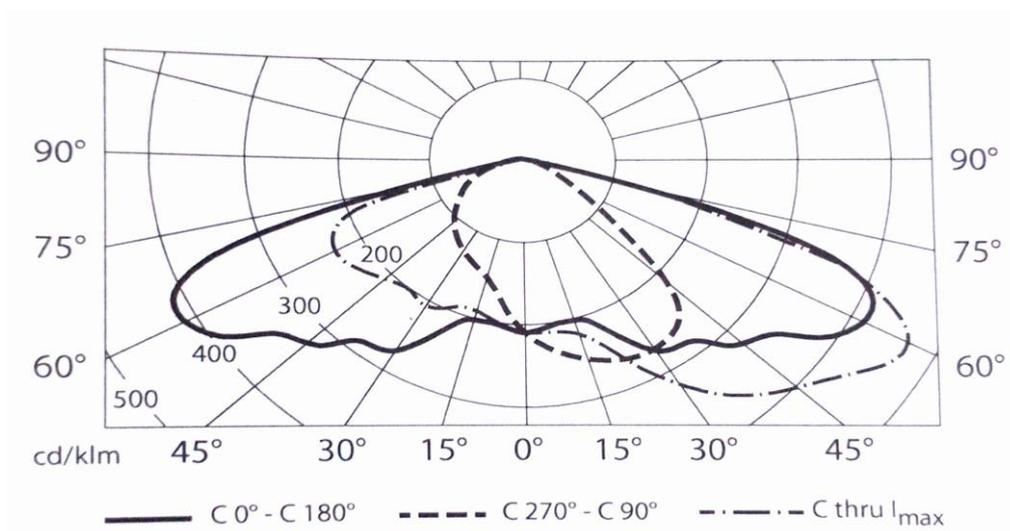


Imagen 2.4 Diagrama polar de intensidad luminosa para una luminaria

La figura anterior es un ejemplo de una luminaria de carretera con una distribución claramente asimétrica, en la curva que corresponde al plano de carretera (C270°-C90°) se ve que se radía más luz hacia la carretera que hacia el bordillo. Si la luz sale en dirección paralela a la carretera lo da la curva a través del plano C0°-C180°. La misma curva en los ángulos mas elevados da la información de lo buena o pobre que es la luminaria restringiendo el resplandor.

En el mismo ejemplo, por encima de unos 65° las intensidades decaen rápidamente para evitar la creación de resplandor. Finalmente la parte más alta del diagrama muestra cuán bien se limita la luz sobre el horizonte, lo cual es un criterio importante para prevenir la contaminación lumínica.

Hay por lo tanto una clasificación de las luminarias según sus características fotométricas determinadas por la CIE:

- **Alcance:** Es la distancia que alcanza la luz en la dirección longitudinal. Este criterio determina la separación entre postes de luminarias, a mayor alcance mayor distancia de separación. La clasificación se hace en función del ángulo  $\gamma_{max}$  y pueden ser de alcance corto ( $\gamma_{max} < 60^\circ$ ), alcance medio ( $60^\circ > \gamma_{max} > 45^\circ$ ) y alcance largo ( $\gamma_{max} > 45^\circ$ )
- **Apertura:** Es la distribución fotométrica en sentido transversal de la vía. Esta definida por la línea, paralela a la calzada, que es tangente a la curva del 90% de la intensidad máxima proyectada sobre la calzada. Con este criterio se determina la altura del montaje. La clasificación es: apertura estrecha ( $\gamma_{90} < 45^\circ$ ), apertura media ( $45^\circ > \gamma_{90} > 30^\circ$ ) y apertura ancha ( $\gamma_{90} > 30^\circ$ ).
- **Control:** Indica la capacidad para controlar el deslumbramiento. Se define mediante el SLI (Índice específico de la luminaria). La clasificación es: Control limitado (SLI < 2), control moderado ( $2 < SLI < 4$ ), control estricto (SLI > 4)

En la siguiente imagen se ven de manera gráfica las 3 características:

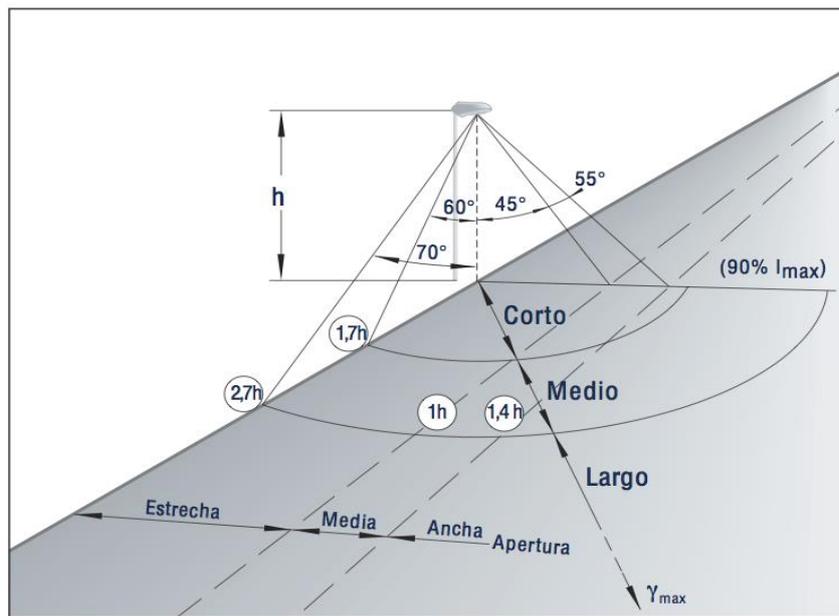


Imagen 2.5 Apertura de una luminaria ( Fuente: manual de iluminación INDAL)

### Relación de salida de flujo luminoso.

Los elementos ópticos que dan forma a la distribución de la luz absorben parte de esa luz, por eso el total del flujo que sale de la luminaria es menor que el flujo que sale de la lámpara situada en el interior de la luminaria. La relación de salida de la luz,  $\eta$ , es la relación del total de lumen que salen de la luminaria y los lumen que salen de la lámpara:

$$\eta = \frac{\phi_{luminaria}}{\phi_{lampara}}$$

Esta relación representa la eficacia luminosa, aun que a veces se la denomina “eficiencia luminaria”. El termino anterior puede llevar a confusión ya que una luminaria eficiente de verdad es aquella que, con la luz que emite la lámpara, la distribuye de manera eficiente en el área que se necesita. Esta relación solo da la eficiencia de la luz que sale, pero hay que incluir la geometría de la zona en la que se quiere aprovechar para poder usar el termino eficiencia luminaria, ya que si tenemos una luminaria con un ratio muy alto pero una pésima distribución de la luz no se podrá afirmar que es una luminaria eficiente.

En realidad es la medida de la efectividad de un haz de radiación en la simulación de la percepción de la luz en el ojo humano.

Las luminarias de carretera tienen una relación que varía entre el 0.65 y el 0.90 dependiendo de la calidad y del campo de aplicación para el que están destinadas. También se da el ratio de luz que sale hacia arriba y hacia abajo, y está claro que cuanto menor sea la relación de luz que va hacia arriba menor será la contaminación lumínica del cielo. Los fabricantes de luminarias incluyen en sus hojas de datos todo este tipo de información, los ratios y los diagramas polares de intensidad

## 2.2. CARACTERÍSTICAS ÓPTICAS

La distribución de luz deseada se obtiene pasando por los fenómenos físicos de reflexión, refracción y transmisión difusa, que dependen del material con el que se hayan fabricado los componentes de la luminaria. Muchas luminarias utilizan la armadura exterior principalmente para obtener el grado de resplandor requerido con el control de la luz, para ello se usan refractores, difusores, espejos reflectantes o incluso superficies negras. Entre sus funciones se encuentran hacer difusa la luz de la lámpara, distribuir la luz uniformemente en todas las direcciones o enfocar la luz en una dirección determinada, además de que sirven para proteger las lámparas, evitar los deslumbramientos o darle color a la luz emitida por la luminaria. Dependiendo de la técnica utilizada en el casco exterior y de las propiedades ópticas de los materiales tendremos determinado el ratio de luz de la luminaria.

Las propiedades ópticas anteriormente mencionadas consisten en:

→**Reflexión**: Una onda plana incide en una superficie plana que separa dos medios con distinta velocidad de propagación (distinto índice de refracción), esta onda se refleja formando un ángulo de reflexión igual al de incidencia.

→**Refracción**: Igual que para la reflexión una onda plana incide sobre una superficie plana, pero ahora la parte del haz que no se refleja se refracta en el segundo medio, variando la dirección. El rayo incidente, el refractado y la normal del plano se encuentran en el mismo plano. La ley que rige este fenómeno es la Ley de Snell:

$$n_i * \sin \alpha = n_r * \sin \theta$$

con  $\alpha, \theta$  los ángulos incidente y refractado respectivamente.

Estas definiciones anteriores solo dan cuenta de la dirección que tendrán los haces reflejado o refractado pero no da información sobre que fracción de la luz incidente se refleja o se refracta. Para ello se han de establecer las condiciones deben satisfacer los campos eléctricos y magnéticos en la superficie límite. El resultado dependerá del grado de polarización de la luz incidente, de los índices de refracción y del ángulo de incidencia. Son el resultado de las ecuaciones de Fresnel

→**Transmisión difusa** : La transmisión ocurre cuando la luz traspasa un material transparente o semitransparente. Para que sea difusa el material que atraviesa tiene que tener cierta textura de manera que la luz en vez de salir en una dirección se desvía en varias direcciones. Las características de la luz que se obtiene son que será mas suave, con menos contraste, menos intensa, va a generar sombras mas claras y tendrá una transición entre luz y sombra mas suave que la luz directa.

Y ahora atendiendo a los elementos del casco exterior:

- **Reflectores:**

Son los encargados del control del haz de luz y también es responsable del rendimiento de la duración de la lámpara. El material más común de fabricación es la chapa de aluminio aún que también se suele usar la chapa de hierro junto con un tratamiento para evitar la oxidación, incluso de plástico si la temperatura que alcanza la lámpara no es demasiado elevada.

Hay diferentes tipos de reflectores como los especulares, los difusos o los dispersos. Cada uno utiliza un tipo de reflexión para conseguir distintos tipos de dispersión de la luz. Para las luminarias de exterior se utilizan los de tipo especular.

Estos reflectores se caracterizan por dar una distribución de la luz precisa. Para este tipo de reflector rara vez se usa un material que no sea una hoja de aluminio, con un grosor mínimo para garantizar la eficacia y estabilidad del reflector. El valor de la reflectancia ronda un 0.7. Si se quiere conseguir un mejor resultado se puede revestir con una fina capa de aluminio con una pureza muy elevada o con una capa de plata. Con el aluminio de alta pureza se tendría una reflectancia del 0.8 y con la plata de más de un 0.9.

El material del que esté fabricado nos da el valor de la reflectancia, pero la distribución de la luz la da la forma geométrica que tenga el reflector. De esta manera, se tendrán reflectores circulares, parabólicos o elípticos.

Algunos ejemplos se muestran en la siguiente imagen:

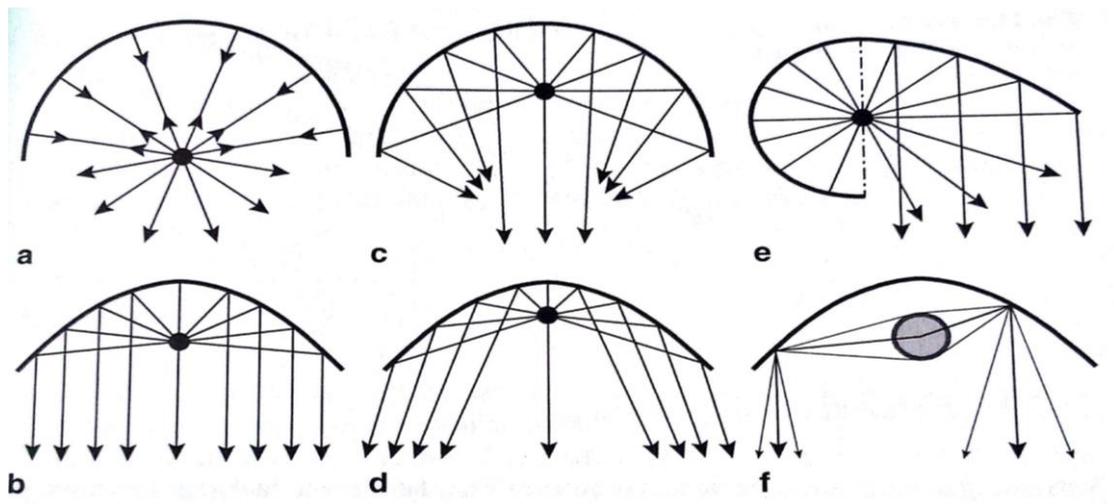


Imagen 2.6 Formas de reflectores: a) cilíndrico; b) parabólico con el punto de luz en el foco; c y d) parabólicos con el punto de luz fuera del foco; e) combinación de cilíndrico y parabólico; f) divergencia de los rayos por una fuente de luz no puntual.

Los de tipo circular como el c) distribuyen la luz como se ve en la figura cuando la fuente de luz esta situada hacia el interior de la circunferencia, sin embargo en el a), que la fuente de luz esta en el centro de la circunferencia , salen los rayos directamente de la luminaria lo que significa un rendimiento muy bajo y una elevación en la tensión del arco.

Los de tipo parabólico como el b) y el d) son los mas utilizados. Cuando la fuente de luz se sitúa en el foco el haz sale paralelo, si se sitúa fuera del foco salen como en la figura d).

Hay que tener en cuenta que estos ejemplos son considerando fuentes puntuales, la distribución final de la luz dependerá del tamaño de la lámpara.

- **Refractores y lentes:**

Los dispositivos de refracción son lentes o prismas. Son encargados de curvar la luz. El ángulo de curvatura dependerá de la forma del refractor y del índice de refracción que tenga este, es decir, del material que este fabricado. Hoy en día para las luminarias LED se utilizan unos tipos de lente avanzadas, una para cada LED, esto hace posible dar forma exacta a la distribución de la luz, con este sistema se puede modificar la distribución cambiando y reduciendo la luz de cada LED por individual poniendo las lentes delante de ellos.

- **Difusores:**

Los difusores son piezas translucidas que sirven para aumentar la apariencia de la superficie que es iluminada. Dispersan la luz de la lámpara en todas las direcciones pero sin que redefina la distribución de la luz. Básicamente sirven para reducir el brillo de la luminaria el deslumbramiento que pudiera producir. Se suelen usar en zonas urbanas peatonales donde el control de la iluminación no es critico.

Los materiales mas comunes son plásticos translucidos, acrílicos o policarbonatos. Tiene que ser un material que produzca la dispersión pero con el mínimo de absorción de luz.

### 2.3. CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS

Una gran cantidad de la energía que se proporciona a la lámpara es convertida en calor. Además hay un componente en las luminarias que es el balastro para las lámparas convencionales o el controlador de dispositivo o driver para las placas LED, este componente es el encargado de regular el flujo de electricidad asegurando que los LEDs se alimenten siempre con el voltaje y la corriente adecuada. Entonces al calor anterior que producía la lámpara se añade el que genera este dispositivo. Para evitar este añadido, a veces, este dispositivo se coloca fuera de la luminaria.

Para una combinación lámpara/driver ya dada, la temperatura de trabajo depende de tres factores:

1. El volumen de la luminaria. Cuanto mayor sea el tamaño menor será la temperatura que alcance en el interior.
2. La facilidad con la que el calor generado pueda ser conducido al exterior. Una manera de facilitar las corrientes de aire es utilizar materiales conductores del calor en la fabricación. Los metales son buenos conductores, mientras que los plásticos son aislantes térmicos y no se pueden utilizar como materiales de cubierta cuando tenemos lámparas de alta potencia.
3. El enfriamiento producido por el aire exterior. Es un buen disipador del calor, las lámparas LED, que son muy sensibles al calor, están provistas de alerones de refrigeración.

La temperatura máxima a la que puede funcionar bien una luminaria viene especificada en las etiquetas del fabricante, si no viene se entiende que la temperatura máxima son 25°. El uso de ellas por encima de la temperatura máxima reduce considerablemente la vida útil de estas. Además en este caso de las lámparas LED se reduce la vida útil y la eficacia.

## 2.4. CONTAMINACIÓN LUMÍNICA

Uno de los propósitos de este proyecto es la reducción de la contaminación lumínica. Una mala instalación se considera cuando la luz se sale de la zona que en principio se quería iluminar, lo que implica un gasto de energía con todas las consecuencias negativas para el medio ambiente incluyendo las emisiones de CO<sub>2</sub>, y una pérdida de dinero. El propósito de la reducción de la contaminación lumínica es minimizar o eliminar todos los efectos negativos. Un aumento en el brillo en el medio ambiente es molesto para las personas y puede acarrear problemas de salud como el estrés, el rendimiento visual y el confort en la vista para los usuarios de la carretera.

Para saber cuanta contaminación genera una luminaria hay una serie de organizaciones que miden los parámetros: parámetros ligados a la instalación, y parámetros ligados a las áreas afectadas. Estas asociaciones son la CIE (International Lighting Commission) y la IDA-IESNA (International Dark sky Association, Illuminating Engineering Society of North America)

- Parámetros de instalación.

- I. *Usados por la CIE*

→ **Relación de luz ascendente (ULR: Upward Light Ratio)**

El ULR es la proporción de flujo luminoso de una luminaria o de toda una instalación de luminarias que es emitido por encima de la horizontal.

$$ULR = \frac{\phi_{lum\ up}}{\phi_{lum\ tot}}$$

Este parámetro no da cuenta de la luz reflejada en las superficies iluminadas por que es un criterio relacionado con la luminaria y no con la instalación.



Imagen 2.7 Variables usadas en ULR

→ **Relación de flujo superior (UFR: Upper Flux Ratio)**

EL UFR si tiene en cuenta la luz directa emitida hacia arriba y la luz indirecta que ha sido reflejada hacia arriba. La importancia de este factor es que si se considera una instalación de luminarias con un ULR nulo aun así dará lugar a cierto grado de brillo del cielo debido a la luz reflejada hacia arriba desde la horizontal y otras superficies.

Para calcular este factor:

$$UFR = \frac{E_{av,inicial}}{E_{av,maint}} \left\{ 1 + \frac{ULOR}{\rho_{area} * \mu} + \frac{\rho_{alrededor}}{\rho_{area}} \left( \frac{DLOR - \mu}{\mu} \right) \right\}$$

donde:

$E_{av, inicial}$  : La iluminancia media inicial del área a iluminar

$E_{av, maint}$  : La iluminancia de mantenimiento requerida del área a iluminar

ULOR: Proporción del flujo que sale hacia arriba respecto del flujo total de las luminarias en la posición instaladas.

DLOR: Proporción del flujo que sale hacia abajo respecto del flujo total.

$\rho_{area}$  : Reflectancia del área a iluminar

$\rho_{alrededor}$  : Reflectancia de las superficies que rodean la luminaria

$\mu$  : Factor de utilización de la instalación relacionado con el área a iluminar.

En el caso de la instalación de las luminarias de carretera están diseñadas sobre la base de la luminancia, entonces habría que sustituir el ratio de iluminancia por el de luminancia. Que el nivel de mantenimiento de la luz inicial desempeñe un papel en el valor de UFR es un impulso para diseñar una instalación lo mas cerca posible del nivel de iluminación requerido: La sobre-iluminación innecesaria automáticamente da un resultado peor de UFR.

También puede parecer curioso que la reflectancia del área a iluminar este en el denominador, pero cuanto mayor sea este valor mejor será el UFR y de hecho el resplandor del cielo será menor.

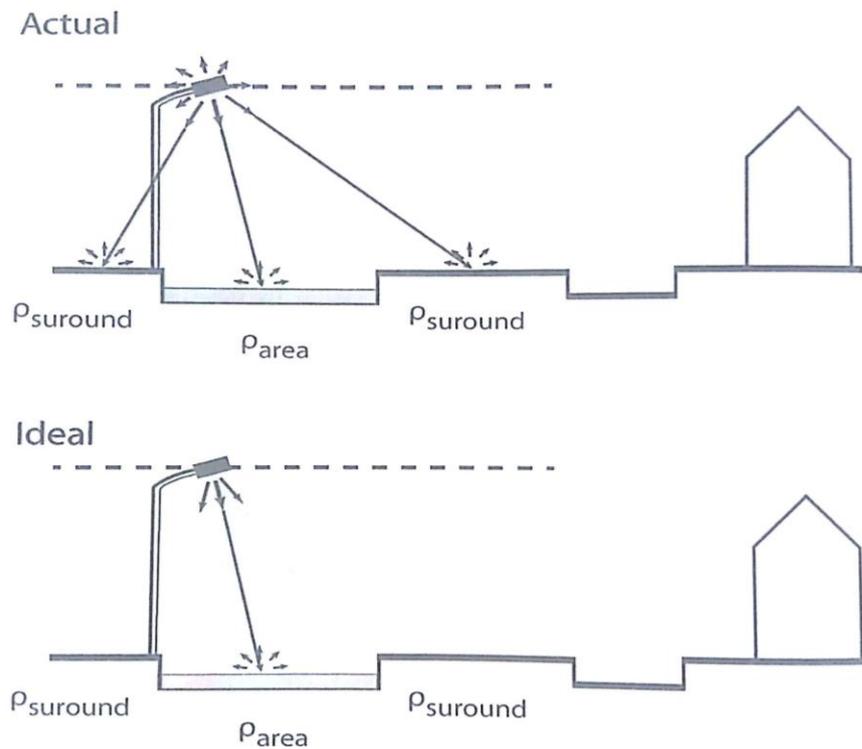


Imagen 2.8 Comparación de la situación actual y la ideal para la definición de UFR

→ **Intensidades luminosas cerca de la horizontal.**

La luz radiada cerca de la horizontal entre  $90^\circ$  y  $110^\circ$  viaja hacia delante una distancia mucho mayor que la luz radiada en ángulos mayores. Esta luz dispersada es la responsable del resplandor del cielo en una gran área. Esto es un problema principalmente para los observatorios, por lo cual se recomienda limitar las intensidades de la zona en sus alrededores.

II. *Usados por la IDA-ESNA*

→ **Flujo total inicial de la luminaria**

IDA-ESNA especifica el límite del flujo luminoso inicial total de todas las luminarias instaladas en un área. O determina el flujo total por unidad de área.

→ **Relación virtual de flujo**

Una medida directa para la cantidad de lúmenes que salen de un área se basa en un recinto virtual alrededor del perímetro del área a iluminar, con el tope del recinto a 10 metros por encima de la luminaria mas alta instalada. El límite es expresado como un porcentaje máximo de lúmenes en las superficies interiores del recinto con el total inicial de lúmenes proporcionado por la instalación.

Este parámetro es, por lo tanto, la relación del flujo luminoso en el interior de las superficies con el flujo total.

$$\frac{\phi_{sup\ virtual}}{\phi_{total}}$$

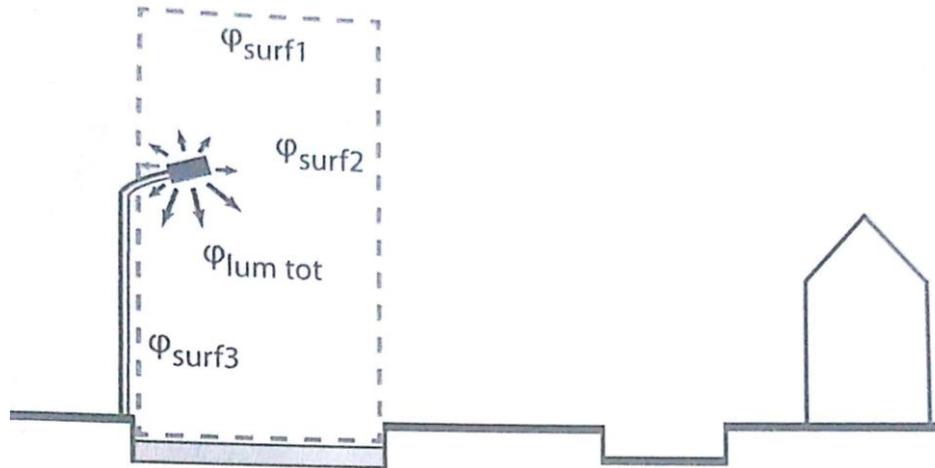


Imagen 2.9 Flujo luminoso saliendo de las tres superficies alrededor del área iluminada.

→ **Iluminancia vertical virtual :  $E_{vert\ virt}$**

Este parámetro da cuenta de la relación en cualquier punto dentro de las superficies verticales del mismo recinto vertical definido anteriormente . Este parámetro se combina con el anterior para tener el flujo luminoso total que sale de las superficies que rodean el área a iluminar.

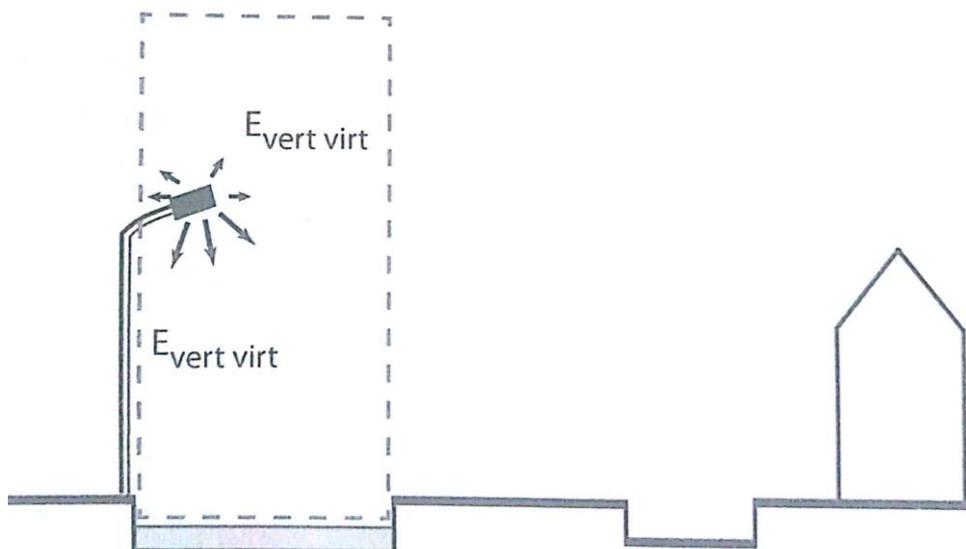


Imagen 2.10 Iluminancia vertical en las superficies verticales

→ **Clasificación BUG de luminarias (BUG: Backward, Upward, Glare)**

IDA-ESNA usa la clasificación de luminarias de IES (2007), esta clasificación es la llamada BUG que divide la distribución de la luz en tres zonas o ángulos sólidos, dependiendo del total de flujo radiado en cada zona se clasificará a la luminaria con un número del 0 al 5 según la limitación en cada zona. Las zonas son las siguientes:

B: el cuarto de esfera detrás de la luminaria, responsable de la luz detrás de la zona que se quiere iluminar.

U: El hemisferio de la parte superior, responsable del resplandor en el cielo.

G: El cuarto de esfera en la parte frontal de la luminaria, responsable de la iluminación en la zona requerida pero responsable también del resplandor ("Glare") hacia los usuarios de la carretera fuera de la zona requerida.

Por ejemplo una luminaria con una clasificación BUG 505 tendrá una muy mala limitación hacia la parte de atrás y hacia la de delante, tiene muy mal control del deslumbramiento.

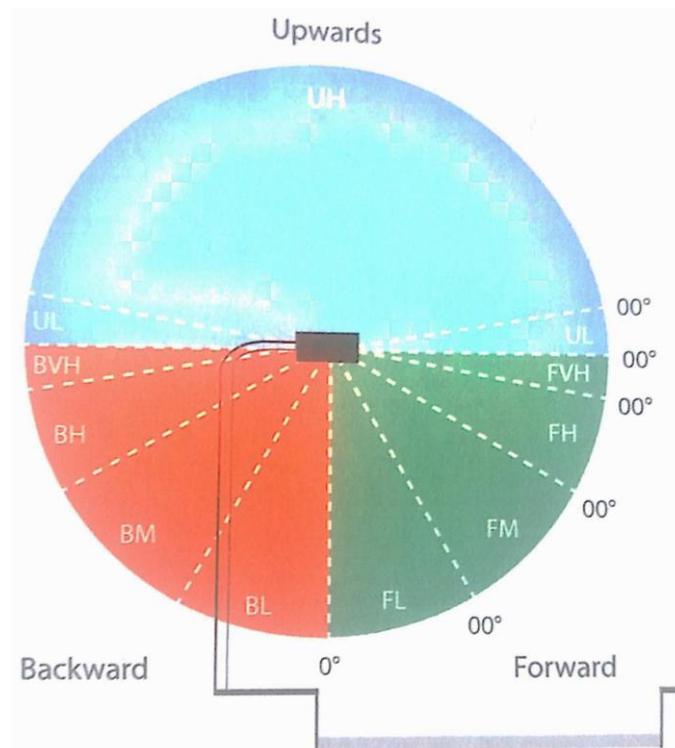


Imagen 2.11 Los ángulos sólidos de la distribución de la luz basados en la clasificación BUG

- Parámetros de áreas afectadas.

- I. Usados por la CIE

→ **Iluminancia vertical de las fachadas:  $E_{\text{vertical property}}$**

La luz que se introduce en el ambiente de vida privado se puede caracterizar por la iluminancia vertical de las fachadas de las propiedades exteriores al área que se quiere iluminar. La ventaja de usar este parámetro para limitar la luz intrusiva es que el cumplimiento se puede comprobar en la propiedad cuando se produce una posible perturbación.

→ **Intensidad luminosa:  $I_{\text{property}}$**

La intensidad luminosa con que puede entrar la luz en una vivienda por las ventanas puede ser muy molesta para los residentes. Esa perturbación puede ser minimizada limitando la intensidad luminosa de las luminarias en las direcciones necesarias.

→ **Luminancia de las fachadas:  $L_{\text{facade}}$**

Este parámetro limita la iluminación de las propias fachadas de manera decorativa, con elementos LED o focos potentes, los cuales también pueden perturbar a los viandantes y residentes.

→ **Velo de luminancia:  $L_{\text{veil}}$**

El efecto perturbador de la contaminación lumínica en los usuarios de la vía es principalmente por el incremento del deslumbramiento en las vías de los barrios por la instalación responsable de esa contaminación.

# 3. DISPOSITIVOS LED

---

Se hablará de los diodos electrolumiscentes LED (Light Emitting Diode : Diodo emisor de luz). El LED es un dispositivo semiconductor basado en una unión PN, que emite luz incoherente cuando se polariza de manera directa. Dependiendo de los materiales con los que haya sido fabricado puede emitir una radiación ultravioleta, visible o infrarroja. Este fenómeno es una forma de electroluminiscencia, lo que quiere decir que es un diodo común pero que al ser atravesado por la corriente eléctrica emite luz.

## 3.1 ELECTROLUMINISCENCIA

La luminiscencia es la emisión de luz causada por una excitación que provoca un salto de los electrones de la banda de conducción a la banda de valencia saltando el GAP de energía que las separa, es la recombinación de los portadores inyectados que dan lugar a fotones de energía aproximadamente igual a la de la banda prohibida. Dependiendo del GAP (que a su vez depende de los semiconductores empleados) el diodo emitirá luz en una determinada longitud de onda. Estas transiciones entre bandas pueden ser directas o indirectas. Las transiciones directas son las que ocurren cuando el máximo de la banda de valencia y el mínimo de la banda de conducción se dan para el mismo vector de onda  $\bar{k}$ , mientras que las indirectas se dan entre estados electrónicos con diferente vector de onda.

La luminiscencia se caracteriza en términos de las características de la luz emitida (intensidad, espectro, polarización y coherencia) y su duración. Así, se puede clasificar según su excitación ( foto-, cátodo- , electro-, quimio- ,etc.) o según el desequilibrio ( monomolecular cuando ocurre sobre un centro de impureza, metaestable, recombinación cuando involucra a una banda, etc.) .

En este caso el tipo de luminiscencia que interesa es la electroluminiscencia, es decir la radiación óptica producida por el paso de una corriente eléctrica.

La electroluminiscencia se descubrió con semiconductores que presentaban una transición indirecta y se vio que la eficiencia luminosa del LED estaba muy limitada. Mas adelante se llegó a la conclusión de que para mejorar la eficiencia se debían de utilizar materiales en los que el salto de electrones entre la banda de valencia y la de conducción fuese una transición directa. Después se introdujeron impurezas isoelectrónicas, que poseen el mismo numero de electrones (elementos del mismo grupo periódico) ,en el semiconductor lo cual supuso un gran avance en los LEDs comerciales. Y finalmente el uso de materiales del grupo III (In, Ga) ha permitido obtener las zonas del espectro UV y azul que hasta entonces no se habían podido conseguir.

En una unión polarizada p-n polarizada en directo, los electrones inyectados del lado n al p, donde se recombinan por parejas con los portadores mayoritarios liberando la diferencia de energía en forma de fotones.

Estos procesos de recombinación pueden ser radiativos y no radiativos, según den lugar o no a emisión de fotones. La mayor parte de los procesos no radiativos son de naturaleza extrínseca, es decir, no involucran parejas electrón-hueco libres. En este tipo de procesos el exceso de energía se libera en forma de energía cinética de un tercer portador o en forma de emisión de muchos fonones, lo que conlleva un calentamiento.

La frecuencia con que ocurren este tipo de procesos se caracteriza por la vida media o tiempo medio de existencia en la banda correspondiente como portador libre antes de recombinarse.

### 3.2 LUZ BLANCA

Hay dos opciones de conseguir luz blanca con LEDs, ya que no existe un único material semiconductor que nos de este tipo de luz, el espectro de un LED de un único material es estrecho y por lo tanto tiene color. Una de las maneras de conseguir luz blanca es la mezcla RGB (red, green and blue LED) y otra la conversión de fósforos de luminiscencia.

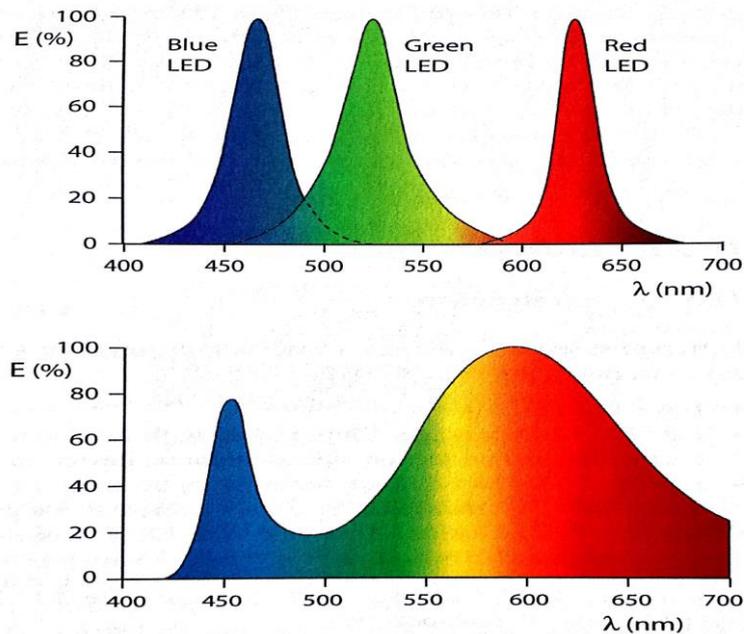


Imagen 3.1 Espectro de los LED emitiendo luz blanca

La opción que da una mejor calidad para la iluminación de carretera es con el uso de fósforos. Estos dispositivos constan de un único LED azul recubierto por una capa de fósforo fluorescente, que emiten luz blanca gracias al principio de la fluorescencia. La fluorescencia es un tipo de luminiscencia que es propia de sustancias capaces de absorber energía en forma de radiación electromagnética para después emitir parte de esa energía en forma de radiación electromagnética pero con una longitud de onda diferente. La energía emitida siempre es menor a la absorbida, esa diferencia es disipada en forma de calor. Parte de la luz producida por el LED se emplea en excitar los átomos del fósforo, los cuales al desexcitarse emiten en una banda de longitudes mucho mayor, creando así un ensanchamiento del espectro y emitiendo luz que se percibe blanca.

En el proceso de fabricación hay que tener en cuenta que lo más crítico es la dosificación del recubrimiento fosfórico, ya que de este depende la temperatura de color (fría o cálida), la eficiencia y el índice de reproducción cromática.

Existen dos opciones de fósforos para obtener la luz blanca, se puede utilizar un fosforo amarillo con el que se obtiene una luz blanca fría y de relativamente buena reproducción cromática. También se puede utilizar un fósforo rojo y verde junto al diodo azul con el que se obtiene la luz blanca con algo mejor de reproducción cromática pero menor flujo que con el método anterior.

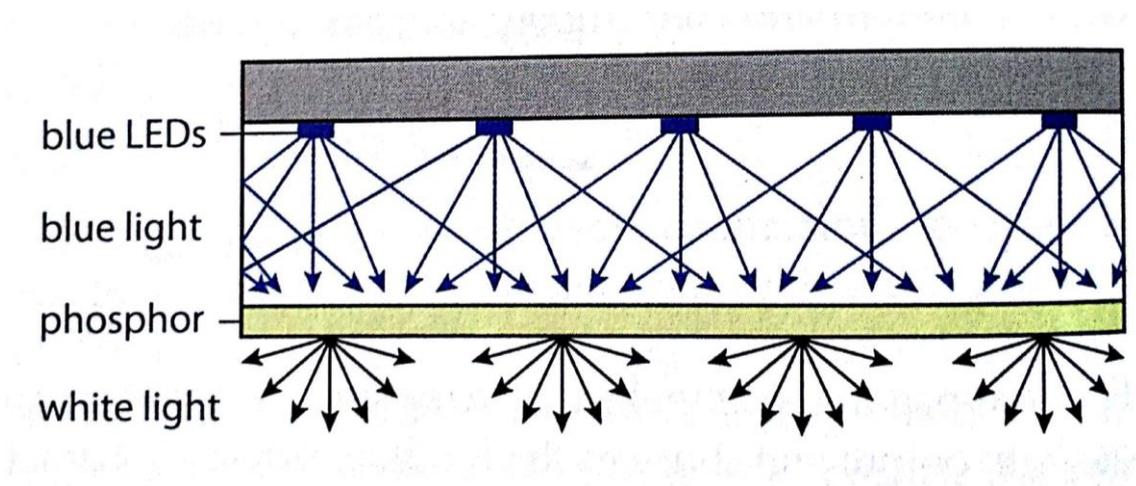


Imagen 3.2. Principio de un LED de fosforo para crear luz blanca

### 3.3 DEPENDENCIA CON LA TEMPERATURA.

La propiedad de los LEDs que interesa para este proyecto es la variación de la eficacia con la temperatura, cuanto mayor temperatura alcance el LED peor será el funcionamiento, la luz que emite y el tiempo de vida.

Los átomos de los materiales están en constante movimiento debido a la temperatura, movimiento que es de tipo armónico y puede describirse en función de una vibración fundamental llamada fonón. Como consecuencia de este movimiento las distancias interatómicas varían constantemente con la consiguiente ruptura de la periodicidad cristalina, o lo que es lo mismo se puede suponer que sobre el potencial periódico existen desviaciones causadas por la agitación térmica.

Con el aumento de la temperatura aumenta la importancia de las interacciones de tipo electrostático entre el portador de carga y el potencial que perturba el potencial periódico del semiconductor, a estas interacciones se las llama colisiones.

Con mayor temperatura también aumentan los portadores con mayor energía, que se traduce en mayores velocidades, de modo que las colisiones son también mas frecuentes.

Entonces cuanto menor sea la temperatura menor serán los saltos no deseados de electrones de una región a otra. La temperatura de la unión p-n y la temperatura ambiental son las que afectan al LED.

La variación en la eficacia depende del tipo de LED, normalmente se trabaja a unos 25º, pero la temperatura en la unión sube fácilmente a unos 60-90º, lo que implica una decremento en la intensidad de entre un 60-95%. Los LEDs azules son los menos sensibles a los cambios de temperatura de la unión p-n, aun así a 80º la intensidad desciende entre un 80-95%.

La variación en la vida útil del LED es tal que un incremento en la temperatura de unos 25º supone una reducción de entre 50.000 y 16.000 horas.

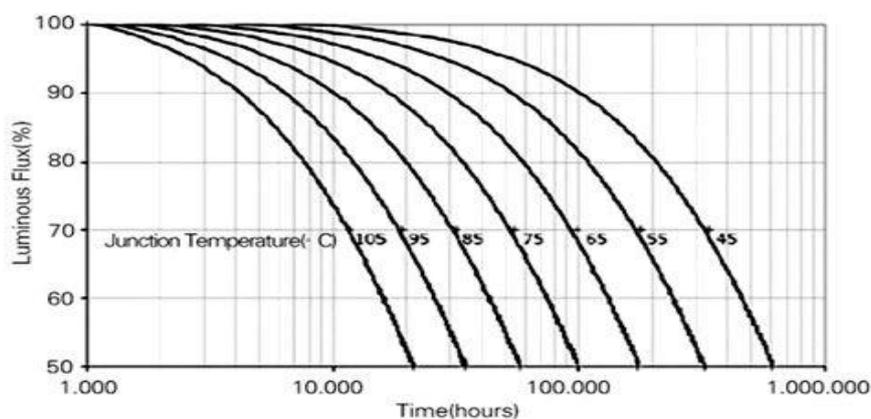


Imagen 3.3 Vida media y flujo luminoso en función de la temperatura de la zona de unión

La variación en la temperatura también es responsable de cambios en el espectro de emisión, como se muestra en el siguiente gráfico:

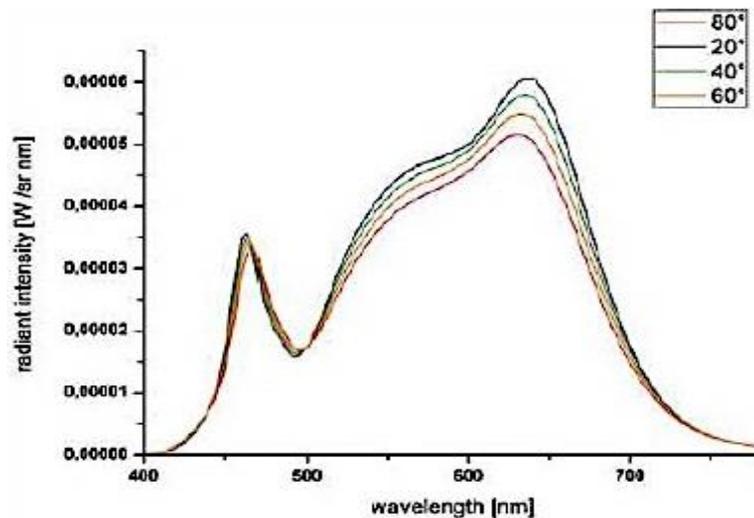


Imagen 3.4 Dependencia de la emisión espectral de un LED de luz blanca con la temperatura

Este gráfico representa la dependencia espectral de un LED blanco de alta potencia con la temperatura en un rango de 20° a 80°. Vemos que cuanto mayor es la temperatura el pico de la emisión azul se desplaza hacia valores de longitud de onda mayores, y la emisión de intensidad total decrece. Esto cambia también la percepción del color.

Las siguientes gráficas están sacadas de la ficha de datos de la compañía NICHIA específicas del LED que se utiliza en la luminaria: NVSL219C-3800K. Una muestra la variación del flujo luminoso con la temperatura y la otra la variación de la tensión directa con la temperatura.

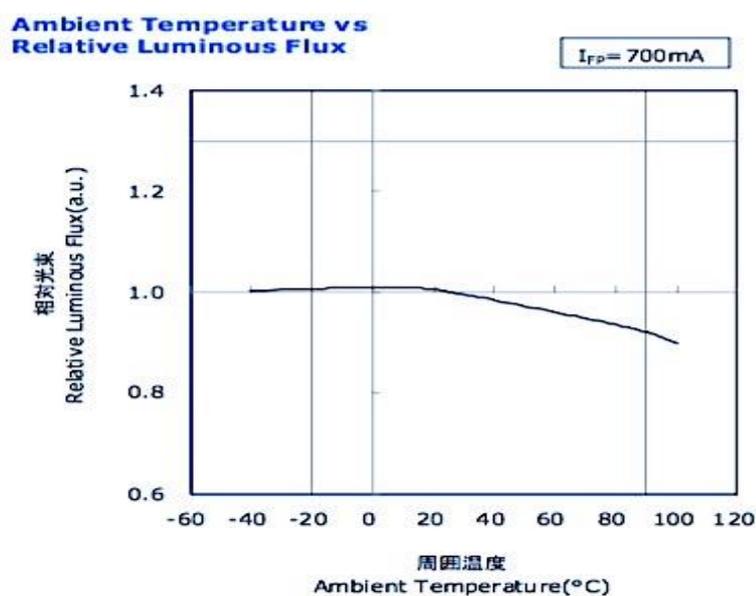


Imagen 3.5 Variación del flujo luminoso en función de la temperatura ambiente

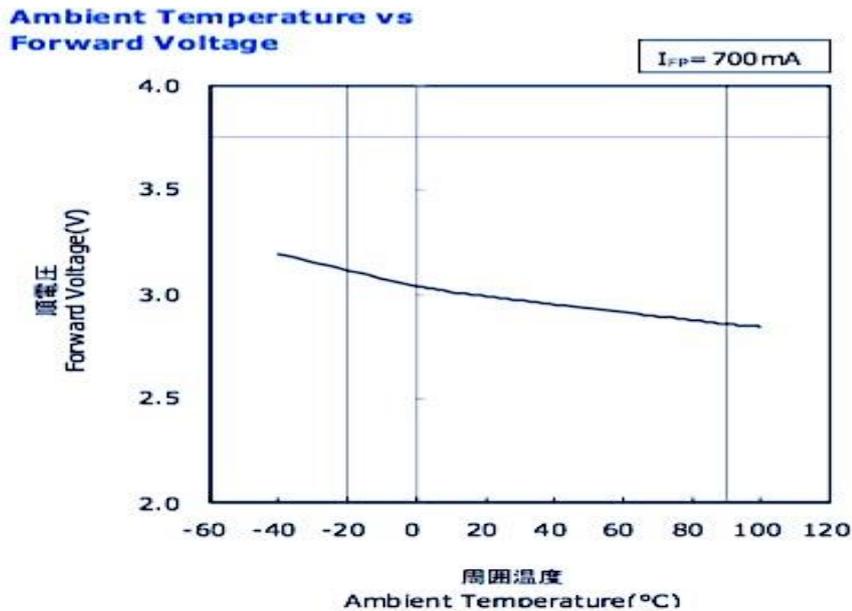


Imagen 3.6 Variación de la tensión en función de la temperatura ambiente.

En ambas se aprecia que ambas magnitudes descienden con el aumento de la temperatura. En la primera se ve que el flujo luminoso se mantiene constante a muy bajas temperaturas y comienza a descender a partir de los 20º aproximadamente. En la segunda es un descenso constante el que experimenta la tensión.

Una vez visto como afecta la temperatura a muchas características de los LED de alta potencia queda claro que el calor generado debe de ser eficazmente disipado. Y que, efectivamente, a altas temperaturas el LED pierde efectividad y vida media.

El proyecto que se está desarrollando se aprovecha de esta propiedad de los LED. Una luminaria que su lámpara sea una placa LED ya cuenta con la variación de la temperatura de la unión p-n, que se puede determinar aproximadamente con los materiales con los que estén hechos los LEDs. Pero al ser destinadas para alumbrado público y estar ubicada en el exterior la variación de la temperatura ambiente depende de la hora del día, de la estación, y de muchos factores que no son fácilmente predecibles. Por lo tanto la idea es que cada luminaria tenga un sensor y un sistema optoelectrónico que, en función de la temperatura, adapte en cada momento el flujo de luz que emiten sus LEDs para que sea constante, y siempre funcionen a la misma intensidad. Esto supone un ahorro económico y una reducción del impacto medioambiental, ya que el flujo luminoso se adaptará a la cantidad de luz y temperatura que haya en cada momento.

Para ello se necesita crear un circuito que sea el que regule el flujo en función de la temperatura, en el diseño y construcción del circuito se centra mi compañero en su TFG, y en la implantación de un sensor que detecte la variación de la temperatura y

además haga un control de funcionamiento de la placa detectando la variación del flujo que emite la placa. En esta parte estará centrada este proyecto.

Para este proyecto se ha utilizado una placa PCB de 36 LED de alta potencia InGaN. Las características de este LED se han obtenido de la hoja de datos de la compañía NICHIA (fabricante de los LED utilizados)

Esta hecho con los siguientes materiales: el envase es cerámico, el material de encapsulamiento es una resina de silicona con fosforo, la lente es de una silicona de resina y los materiales disipadores del calor son de oro cromado.

El peso del LED es 0,031 g



Imagen 3.7 LED NVSL219C-3800K

## 4. PHOTOPIA:

---

Para hacer las simulaciones se va a utilizar el programa de diseño Photopia.

Photopia es un programa de diseño óptico que produce evaluaciones de rendimiento para sistemas ópticos. Permite producir diseños virtuales en poco tiempo y por menos del coste que sería fabricar el prototipo físico. Tiene una librería predefinida de lámparas y todo tipo de materiales como reflexivos, refractivos o transmisivos para usar en el diseño muy útil.

Este programa permite diseñar una luminaria completa en 3D, permite elegir diferentes tipos de material para la placa, vidrios, cubiertas para los LED, y el tipo de LED. Es decir, se puede diseñar la luminaria con todos los elementos que tenga nuestro prototipo real. Una herramienta útil es que permite trabajar por capas con los elementos de nuestra luminaria, para realizar simulaciones en las que solo se necesite información sobre los LED por ejemplo, se pueden quitar las capas innecesarias.

La opción para poder quitar o añadir capas esta en “ settings → layers “ y ahí aparece la lista de todas las capas de las que consta la luminaria, con la clasificación que tienen debido a los materiales de los que están compuestos. Una vez ahí podemos activarlas o desactivarlas dependiendo de con que elementos se quiera trabajar.

Trabajando con la capa que incluye a los LED el programa también permite encenderlos o apagarlos, uno o varios en función de lo que se quiera medir. Seleccionando un LED aparece a la derecha la tabla con la información de ese LED, incluyendo nombre, posición y su estado: activo o inactivo, el cual se puede cambiar.

Otra herramienta que proporciona el programa y que usaremos a lo largo de todo el proyecto es la creación de planos de medida, son planos ficticios que proporcionan una serie de datos en función de las características que se le quieran dar. Se puede elegir su posición, su orientación, su tamaño, y la cantidad de datos que proporcionan. La información la dan en forma de matriz, de la cual podemos elegir el número de columnas y el número de filas (NC : Number of columns, NR: Number of rows). En función de los elementos de matriz y el tamaño que se le haya asignado al plano el programa automáticamente determina un espaciado equidistante entre filas y columnas, cada elemento de matriz será un punto en nuestro plano que nos proporcionará el flujo de luz en ese punto de la placa. Hay que tener cuidado con la orientación a la hora de ponerlo sobre la placa, para saber hacia que lado esta midiendo la cantidad de luz el programa lo indica con una flecha perpendicular al plano señalando la dirección en la que esta recogiendo la información.

Para dibujar un plano hay que ir a “draw → Illuminance plane”

El programa también permite copiar el plano, moverle, e incluso rotarle para elegir la orientación con la placa.

Una vez que se ha creado el plano con las características que interesen, se inicia el análisis. Si se hubieran creado varios planos, previamente a realizar el análisis se da la opción de elegir que planos están activos y cuales no, además de editar sus características nuevamente.

Y finalmente para poder ver los resultados del análisis hay que entrar en “illuminance text view” y proporciona la matriz de datos anteriormente mencionada además de un promedio, un máximo y mínimo.

#### 4.1. TRAZADO DE RAYOS. NACIMIENTO DE RAYOS.

Photopia es un programa basado en un estudio probabilístico del trazado de rayos y en las leyes de la óptica que rigen la incidencia sobre las superficies. Dependiendo el material que se escoja para las superficies y las lámparas se tendrá un trazado de rayos diferente. El trazado de rayos consta del conjunto de rayos que sale de la fuente de luz mas la geometría de esta.

El conjunto de rayos (Raysets) se ha convertido en una herramienta útil para modelar el comportamiento de una fuente de luz, normalmente lo proporcionan los vendedores de LEDs. Los Raysets consisten en una colección de rayos determinados por un vector (punto de inicio, dirección y magnitud en lúmenes) que describen la emanación inicial de luz de una fuente. Este dato se encuentra en la biblioteca del programa o lo podemos incorporar.

Para completar el conjunto de rayos anterior se necesita incluir la geometría de la lámpara. Algunos vendedores incluyen un modelo en 3D CAD como complemento al Raysets, pero recae en los usuarios el elegir el material adecuado para cada parte del LED. La geometría de la fuente también es necesaria para la determinación de los puntos precisos de emanación de rayos, ya que si no hay geometría los puntos de inicio de los rayos están en puntos del espacio y no de la lámpara. Se expone un ejemplo gráfico para ver la importancia de la geometría, en las imágenes se muestra una sección transversal del LED CREE XR-E:

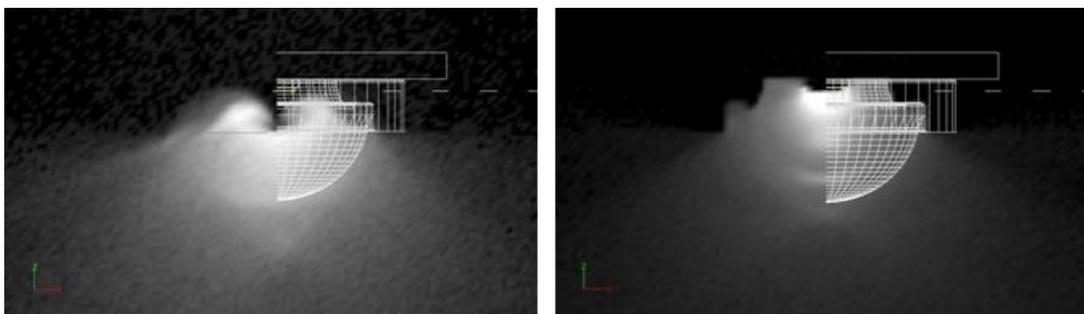


Imagen 4.1 Comparativa de la importancia de la geometría de la lámpara

La imagen de la izquierda muestra el campo de luz para un modelo basado en rayos ( la geometría se incluye solo como referencia para poder comparar), mientras que la imagen de la derecha muestra un modelo con la geometría asociada. La imagen de la derecha se ve mucho mas coherente y parece que coincide con la geometría mejor que el modelo que solo incluye el conjunto de rayos, en la que parece que la luz atraviesa la estructura que envuelve al LED lo cual es una imposibilidad física.

Una vez que se tiene el conjunto de rayos y la geometría de la lámpara, ya se puede formar el trazado de rayos. Pero primero se verá como emana los rayos la lámpara para crear la distribución de luz. En primer lugar la distribución de la

intensidad medida se utiliza para determinar cuantos lúmenes deben enviarse a todas las zonas angulares de una esfera. Se divide una esfera en zonas angulares según la densidad de los datos de la intensidad que se encuentran en el archivo IES. Después el flujo total de salida se divide entre el número de rayos a trazar y así se obtiene el flujo luminoso que representa cada rayo. Entonces sabiendo el flujo que necesita cada zona angular, el programa envía el número necesario de rayos para completarlo. Los rayos se distribuyen de manera aleatoria dentro de la zona, para que quede completamente cubierta se necesita el trazo de muchos rayos. En resumen, zonas con un flujo menor tendrán un número menor de rayos mientras que zonas con un flujo luminoso mayor tendrán un número mayor de rayos.

Con todo esto se obtiene es la dirección y la magnitud del rayo que conviene recordar que esta representado por un vector, falta determinar el punto inicial, de donde sale en la lámpara. Para ello el programa mira desde el punto final del rayo hacia la lámpara con el ángulo con el será lanzado y determina que superficies de la lámpara están a la vista y cuales son sus áreas aparentes. Después se multiplica el área aparente de cada superficie, en la dirección del rayo, por las luminancias asociadas. La zona que mayor producto tenga será de la que emane el rayo, dentro de esa zona el punto donde nace el rayo se elige de manera aleatoria. En la superficie general las zonas con mayor producto serán de las que nazcan la mayoría de rayos.

Este método funciona muy bien cuando la distribución de la luz en un punto de la lámpara es constante en toda la lámpara, es decir, que la lámpara sea homogénea. En el caso de que no lo sea, como por ejemplo en una lámpara fluorescente, se asignan luminancias relativas a las superficies. Así, los extremos oscuros de la lámpara fluorescente tendrán una luminancia menor y emanaran menos rayos que de la sección media mas brillante. Cuanto mas detalle de la luminancia se incluya en el modelo de la lámpara mejor estarán determinados los puntos de emanación de rayos.

El último elemento que afecta al nacimiento de los rayos es la presencia de superficies de sombra, que pueden ser estructuras de soportes o bases de la lámpara por ejemplo. Los rayos que inicialmente nacían de la lámpara se ven obligados a encontrar un nuevo punto de emanación. Se puede observar que la cantidad de luz emitida en una dirección que tenia sombreado ya esta disminuida y cuantificada en los valores de intensidad luminosa medidos para la lámpara. En una lámpara física si se observa un arco o un filamento a través de una estructura de soporte intermedia, solo se ve una parte de las superficies luminosas, esas partes que se ven son las que emanan luz en la dirección de observación. En el caso de que el programa no pueda encontrar un punto emanación que no este sombreado después de cierto numero de reintentos en los ajustes del análisis, forzará un rayo a través de la superficie de sombreado para asegurarse de la lámpara da en esa dirección el numero adecuado de lúmenes.

En ocasiones se encuentran valores de la intensidad no nulos en la distribución de la luz de una lámpara sin soporte ninguno pero en una dirección donde no hay una vista directa de las partes luminosas de la lámpara. Esto datos son causados por reflexiones o refracciones de la luz en componentes no luminosos de la lámpara.

Los resultados del estudio se hacen mas precisos cuantos más rayos se tracen, el numero de rayos que se requieren para obtener resultados precisos depende de la resolución que se haya especificado, es decir, el nivel de detalle en los resultados. Los resultados se pueden ver de manera gráfica sobre el diseño como un diagrama polar de las candelas, o sobre el plano de iluminación como un sombreado ( o un diagrama de colores) y ver como varían las tonalidades en torno a los valores finales.

El resultado menos detallado es la eficiencia de la luminaria,  $\eta$  ,definida en el apartado 2.1, que representaba cuantos lúmenes salen de la luminaria en comparación con los lúmenes que genera las lámparas. La dirección exacta de los lúmenes que salen no es necesaria para calcular la eficiencia de la luminaria, por lo tanto, se puede ver que este valor cambia muy poco en el proceso que dura el trazado de rayos.

La distribución de intensidad requiere mucho mas detalle para ser resuelto porque Photopia necesita determinar el flujo pertenece a cada zona angular de la distribución. Cuantos más ángulos se especifiquen en la distribución mas pequeñas serán las zonas angulares y mas rayos se necesitaran para determinar las proporciones correctas de flujo en todas las zonas.

## 4.2. MEDICIÓN DE LA LUMINANCIA DE LA LÁMPARA

El proceso de trazado de rayos anteriormente descrito depende de que los modelos de las lámparas usados sean precisos para producir predicciones fotométricas precisas. Los modelos de lámparas deben representar tanto la distribución angular como la distribución espacial de la luz emitida por la lámpara. Con la medida de la distribución de intensidades de la lámpara sin soporte ninguno se obtiene la distribución angular, mientras que la geometría de la lámpara y los datos de luminancia se utilizan para reproducir la distribución espacial. Por distribución espacial se entiende los puntos de la lámpara que emiten luz.

Para que el modelo este completo se necesita medir la luminancia de todas las partes luminosas de la lámpara. Los valores de luminancia específicos determinan la cantidad de relativa de la luz emitida por las diversas partes. Las superficies luminosas dentro de la lámpara pueden ser superficies físicas como filamentos o virtuales para representar corrientes de arco. En cualquiera de los casos la variación de la luminancia ha de ser medida.

- Medidas de luminancia de superficies de la lámpara.

Para lámparas tales como fluorescentes o halógenos la luminancia de las superficies luminosas debe medirse en varios lugares según sea apropiado para caracterizar adecuadamente las variaciones de luminancia a través de la fuente.

- Medidas de luminancia del arco.

Para las fuentes de luz de arco, la luminancia y la geometría del propio arco necesitan ser medidas y representadas en el modelo CAD de la lámpara. Las propiedades de la forma y la luminancia del arco dependerán de la orientación del arco, las mediciones deben realizarse con la lámpara funcionando en la orientación en la que vaya a usarse.

→Técnicas de medición:

Para las superficies de lámpara lo suficientemente grandes se puede tomar la medida de la luminancia directamente con un medidor estándar, aun que algunas lámparas pueden requerir un filtro de densidad neutra sobre el objetivo para reducir los valores de luminancia en el rango del medidor.

Para lámparas que tengan superficies luminosas muy pequeñas o que sean demasiado brillantes para medir directamente es necesario medir indirectamente la luminancia. Esto puede hacerse proyectando imagen de la fuente en la pantalla, siguiendo el siguiente esquema:

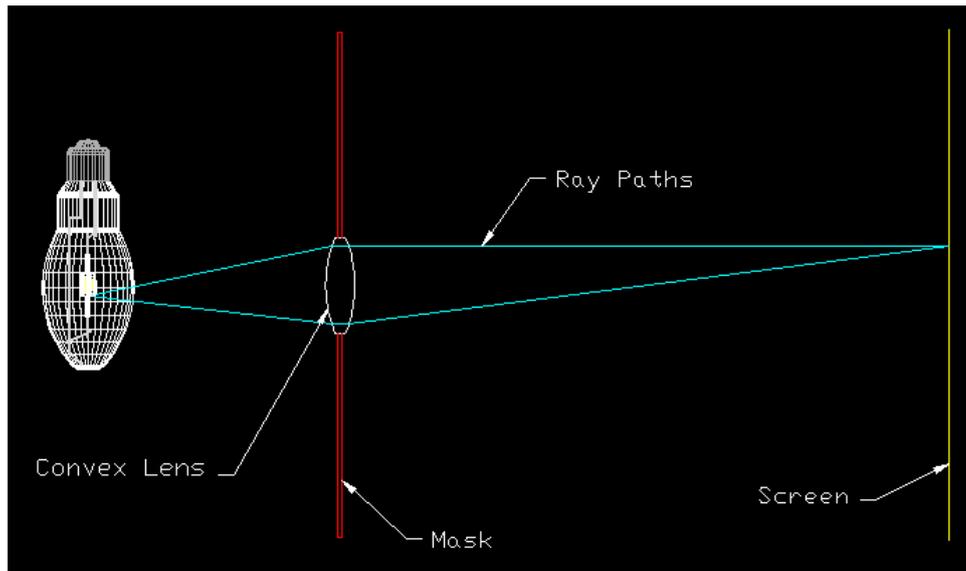


Imagen 4.2 montaje para la medida de la luminancia.

Este esquema debe hacerse en una habitación negra y con algo en torno a la lente (máscara) que bloquee toda la luz que no pase por la lente. Si no hubiera una habitación negra se puede hacer introduciendo la lámpara en una caja con una pequeña abertura. La elección de la lente y las distancias dependen del tipo de lámpara, aun que suele ser preferible proyectar la imagen lo más lejos posible para aumentar su tamaño. Y para lente será necesario que tenga una distancia focal lo suficientemente alejada de la lámpara para que se pueda montar físicamente sin interferir con el resto del montaje. Una vez que se tiene la imagen clara de la fuente entonces se deberá medir un rango de puntos con el medidor de luminancia, si la lámpara es simétrica se deberá comprobar la simetría de los resultados, si es asimétrica se usan otros procesos y se promediarán los resultados.

### 4.3 LED:

Al usar LEDs en Photopia se consideran como una fuente de tipo 3. Lo que quiere decir que son esencialmente iguales que los modelos de luminarias que contienen lámparas, superficies reflectantes, transmisoras y/o refractivas, pero el uso de los modelos de tipo 3 es necesario cuando la interacción de los componentes es crucial para replicar el comportamiento de la lámpara física en su sistema óptico.

Para ilustrar el funcionamiento usaremos el ejemplo del siguiente LED, modelo P4 de semiconductor de Seúl:

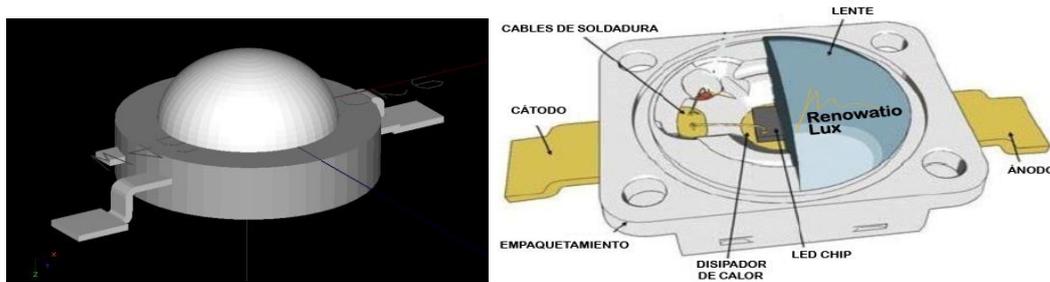


Imagen 4.3 Esquemas de un LED

En el LED la luz emana inicialmente de las superficies laterales o planas del chip de LED incrustado dentro de la bombilla. Las superficies reflectantes también están incrustadas dentro de la bombilla en la parte inferior. La distribución final de la luz está en función de lo siguiente:

1. Como la luz se emite inicialmente del chip
2. La forma de los componentes ópticos (reflectores y lentes)
3. La posición relativa del chip con respecto al resto de componentes.
4. Los materiales de fabricación.

Con el fin de producir tanto la distribución angular apropiada de la luz que sale del LED como la distribución espacial de los puntos de emanación es necesario modelar el bulbo (El vidrio o carcasa de cuarzo que encierra el elemento luminoso de una lámpara) como un refractor. Esto significa que la luz sale del chip y luego interactúa con el reflector y las superficies del refractor.

La siguiente imagen representa la distribución angular y espacial de los rayos. Los rayos emanan del chip, algunos reflejan fuera de las superficies reflectantes mientras que la mayoría van directamente a la interfaz bulbo-aire.

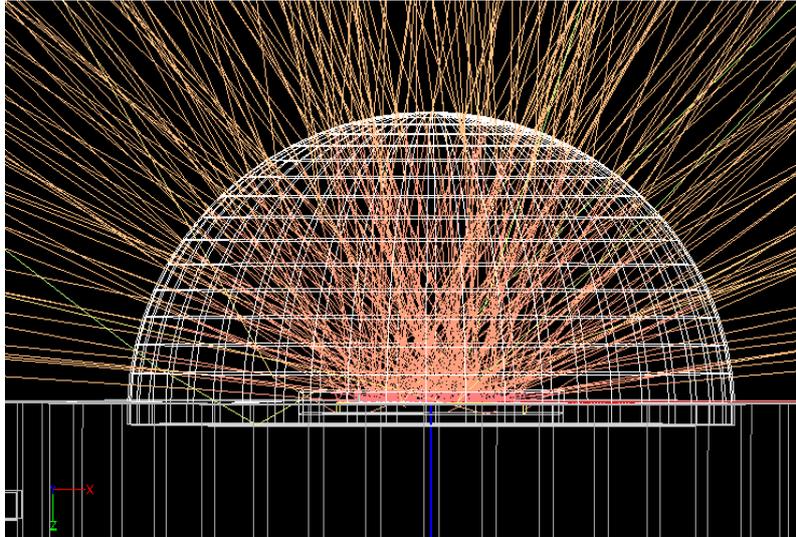


Imagen 4.4 Trazado de rayos de un LED completo

La luz que sale entonces es refractada, pero hay una parte que es reflejada en el bulbo según las leyes de Fresnel.

La siguiente imagen muestra la luz emitida por el chip en un gráfico sombreado con la capa del bulbo desactivada. La bombilla estaba encendida durante el trazado de rayos y apagada en el momento de tomar la imagen. Se puede ver cómo la luz inicialmente se emite solo del chip

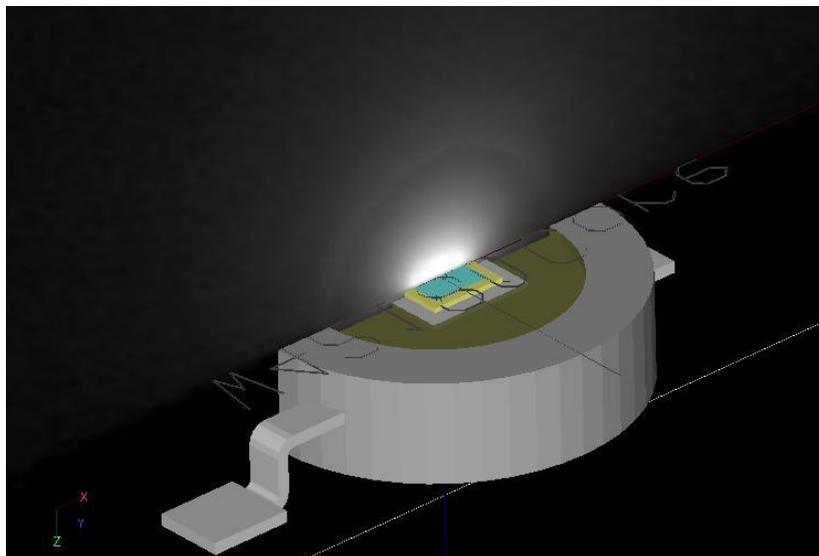


Imagen 4.5 Luz emitida por el chip de un LED

En la siguiente imagen muestran el patrón de luz en los planos de iluminación que pasan por el centro de varios tipos diferentes de LEDs.

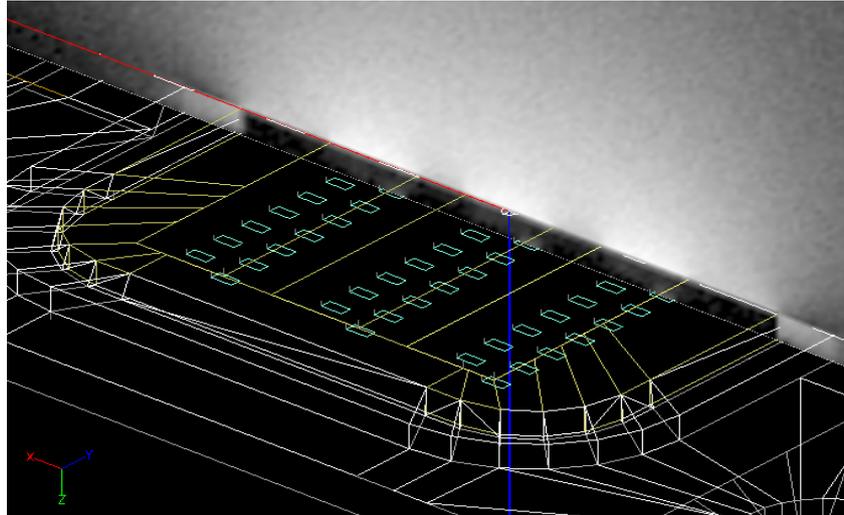


Imagen 4.6 Luz emitida por una placa de LEDs

Todos los LED de Photopia incluyen datos predeterminados que se pueden revisar y modificar incluyendo la clasificación del lumen, los vatios del conductor y los vatios de la lámpara. Los modelos LED se basan generalmente en una clasificación de temperatura de unión de 25°, que rara vez es realista, pero es lo que se proporciona en las hojas de datos LED para la salida de luz del dispositivo. Al comparar sus condiciones esperadas con la hoja de datos se puede estimar un grado de luz y vatios apropiados para usar en el programa.

## 5. SIMULACIONES:

---

Una vez se ha planteado todos los elementos de este proyecto se pueden presentar las simulaciones realizadas.

El propósito de estas simulaciones es estudiar el flujo luminoso emitido por el conjunto de los LEDs de la placa. Y encontrar como resultado la posición donde iría instalado el sensor, esa posición ideal será la que tenga mas información de la variación del flujo de luz. Otra parte importante es saber si con un sensor colocado en la base de la placa, en la base de los LEDs, como capta la variación de flujo de LEDs cercanos o lejanos al sensor. Es decir, si una vez colocado el sensor, falla algún LED, lo que supondría una disminución del flujo luminoso total, el sensor sería capaz de detectarlo.

Una vez se empieza a trabajar con el programa Photopia, se presenta toda la placa PCB con los 36 LEDs.

La siguiente imagen es la luminaria con los marcos, la placa PCB y los LEDs, no tiene los reflectores ni las lentes.

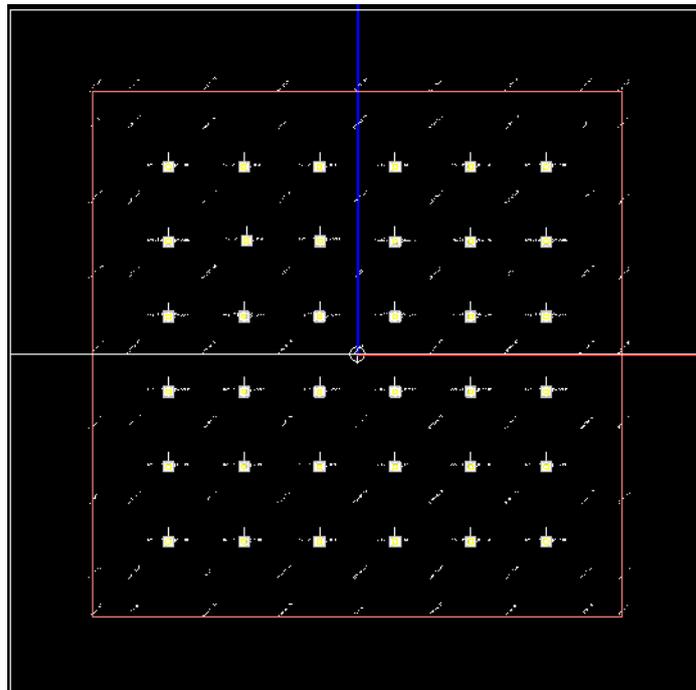


Imagen 5.1 Presentación de la placa en Photopia

La placa es cuadrada con una medida de 17,5 cm de lado, la separación entre LEDs es de 2,2 cm y la distancia entre el LED y el final de la placa es de 1,25 cm.

## 5.1. FLUJO LUMINOSO TOTAL

Se busca el dato del flujo luminoso total que da la placa cuando están todos los LEDs encendidos. Lo primero es medir la cantidad de luz que se recibe en los puntos intermedios de la placa, es decir, en puntos equidistantes a los LEDs. Para realizar estas simulaciones es más sencillo trabajar únicamente con la placa PCB y los LEDs, es decir, se eliminan los elementos de la luminaria que no influyen, como las cubiertas de los LEDs o el vidrio.

Con Photopia se crea un plano 75x75 mm centrado en el punto central de la placa (0,0,0), con 6x6 puntos de medida( NC=6, NR=6). Con esto lo que se consigue es un plano que ocupe toda la placa y nos de el valor del flujo en 36 posiciones. Como solo se tienen esas 36 posiciones para poder tener datos alrededor de cada LED hay que hacer tres tipos de simulaciones para tener datos rodeando al LED. A continuación se presenta el esquema que siguen las distintas simulaciones:

Simulación 1:	Simulación 2:	Simulación 3:
X    X	X	
O	O	X    O    X
X    X	X	

El punto central representa el LED y las X representan los puntos de medida. Con la suma de estas tres simulaciones tenemos datos de todos los puntos en torno al LED.

Por comodidad, no es necesario crear un plano con medidas distintas y variar el número de columnas y filas. Simplemente se desplaza el plano inicial creado. Primero presentamos la simulación 1 y a partir de ella se tiene la simulación 2 y 3, si movemos el plano completo 12,5 mm hacia la derecha se tiene el esquema de la simulación 2 y de igual manera si se baja 12,5 hacia abajo se tiene el esquema de la simulación 3. Se tiene el inconveniente de que al hacerlo de esta manera hay una fila o una columna en las simulaciones 2 y 3 que queda fuera de la placa, por lo que los datos no son válidos. Basta con eliminarla y trabajar con los datos útiles dentro de la placa.

En un primer momento se intentó obtener todos los datos en todas las posiciones con una sola simulación, pero para construir esa malla de puntos tenía que haber un punto de medida situado sobre cada LED de la placa. Esos datos había que desecharlos ya que el sensor no se puede colocar sobre un LED, y no era sencillo identificar todos los puntos de medida fallidos. Por este motivo se optó por conseguir la malla de medidas con tres modelos diferentes de simulaciones.

Se presentan los resultados con una tabla en la que se indican los valores del flujo ( $l/m$ ) en cada posición. Las distancias están medidas del centro de la placa hacia fuera ( $m$ ). Se añade también una imagen que representa la variación de flujo.

Simulación 1:

Distancias( X/Y)	0,0125	0,0375	0,0625	0,0875	0,1125	0,1375	0,1625
0,1625	102805	200675	197098	187185	205687	187878	81396,8
0,1375	196681	373127	404485	351474	379788	342818	151731
0,1125	203310	369579	364611	343122	387264	353236	153203
0,0875	192579	372093	369479	349919	374033	366992	151772
0,0625	184817	362070	351907	345520	383089	359898	160453
0,0375	194657	357045	356617	336670	370139	349557	152751
0,0125	103363	198244	196473	181640	203602	180581	81016

Tabla 5.1 Simulación 1 para flujo total

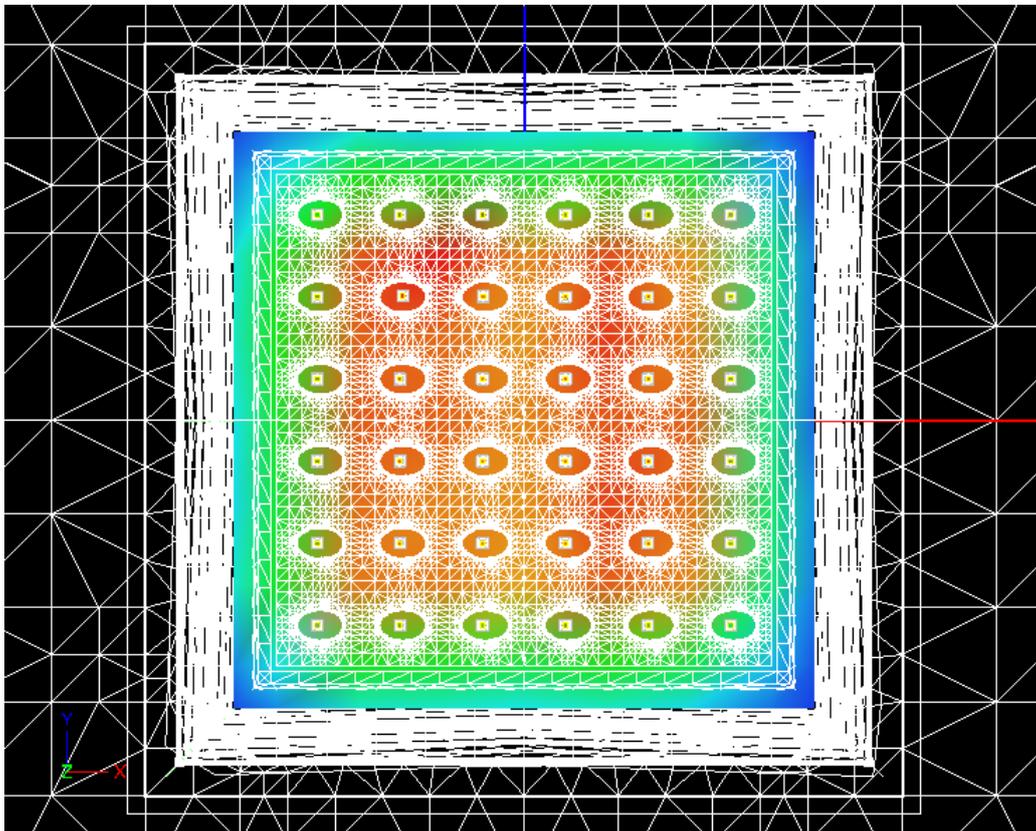


Imagen 5.2 Simulación 1 para flujo total

Simulación 2:

Distancias	0,0125	0,0375	0,0625	0,0875	0,1125	0,1375	0,1625
0,1625	11794,7	191199	198081	188453	195336	195706	168682
0,1375	15673,9	369406	395959	357209	358235	355907	312423
0,1125	15115,3	389917	377220	343701	368802	364706	328449
0,0875	15347,4	356792	363461	351843	359623	368055	314930
0,0625	14142,4	347124	354316	338558	370089	363558	323965
0,0375	13180,4	340486	365495	325774	362287	363371	321094
0,0125	11429,3	186058	195265	177034	191592	197284	167104

Tabla 5.2 Simulación 2 para flujo total

La columna marcada en rojo es debido a que sus datos no son válidos, al mover el plano de la simulación 1 hacia la derecha hay una columna que sus datos nos quedan fuera de la placa, por lo tanto los desecharmos. Se puede ver en la siguiente imagen que columna situada a la derecha queda fuera del conjunto de LEDs y sus datos no son válidos.

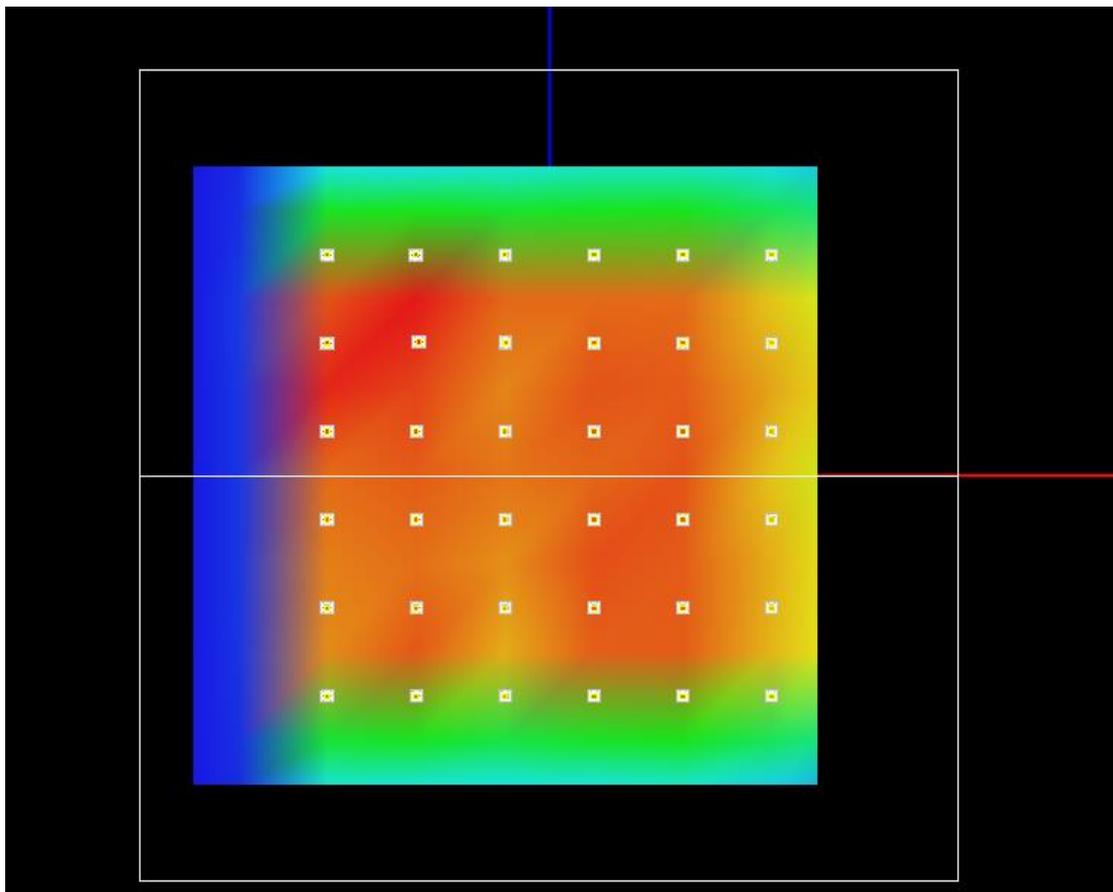


Imagen 5.3 Simulación 2 para flujo total

### Simulación 3:

Distancia	0,0125	0,0375	0,0625	0,0875	0,1125	0,1375	0,1625
0,1625	12579,6	16713,2	15263,2	14253	14754,2	13272,2	7606,24
0,1375	195675	379162	352333	330789	371537	341307	146822
0,1125	199051	365075	398956	355645	368381	353315	156080
0,0875	200088	385263	369439	346137	373761	354066	153521
0,0625	190239	368316	361240	349198	383524	352931	150199
0,0375	187385	359397	351061	339183	376780	350712	159056
0,0125	182237	356325	351312	324512	382080	350919	157716

Tabla 5.3 Simulación 3 para flujo total

En este caso ocurre lo mismo que para la simulación 2, la fila señalada nos proporciona datos no útiles.

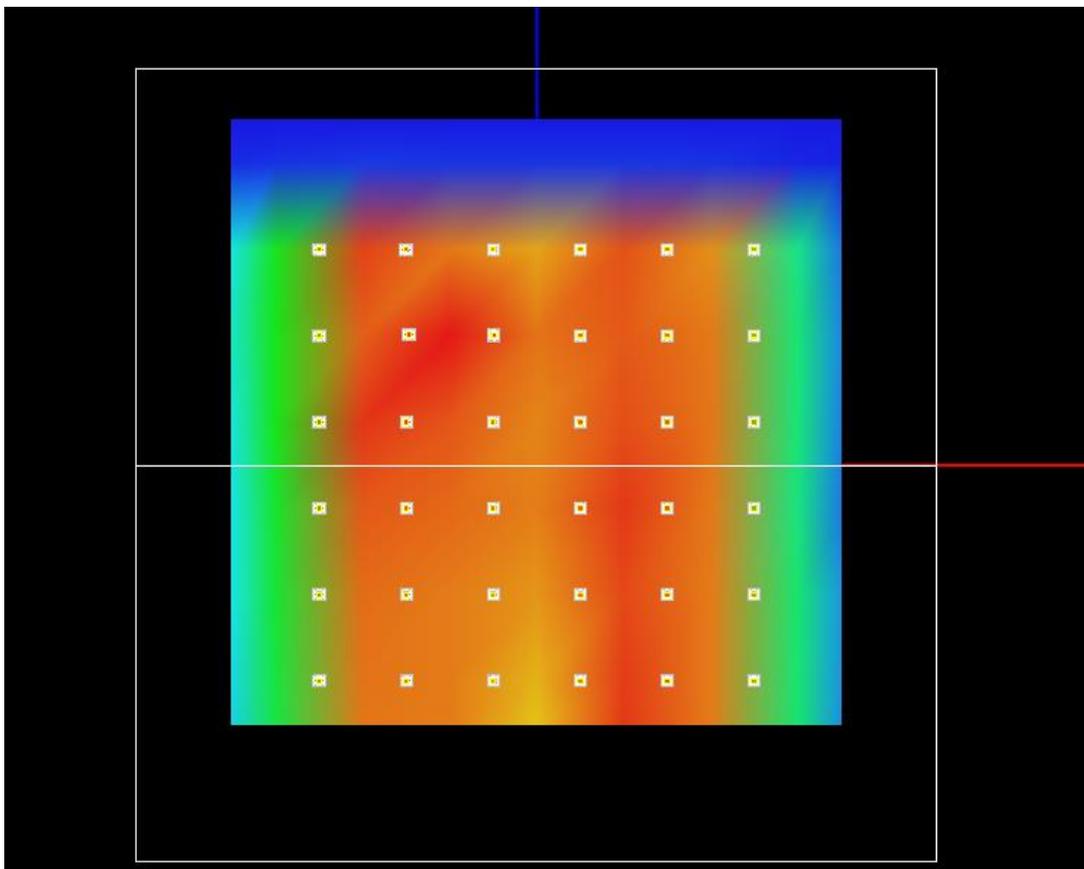


Imagen 5.4 Simulación 3 para flujo total

Tanto en las tablas como en las imágenes se aprecia que la zona con mas intensidad son las zonas centrales, y mas concretamente las zonas centrales de cada cuadrante.

→ Comprobación de la simetría de la placa:

Como la placa es cuadrada y con la misma distribución de LED se ha supuesto que los resultados deben presentar simetría en cada cuadrante. Esto permitiría trabajar únicamente con un cuadrante de 9 LED y extrapolar los resultados a toda la placa de 36 LED.

Para comprobar la simetría de la placa se toman los resultados anteriores con todos los LED encendidos y se calcula una media con los datos en posiciones simétricas, después se calcula la desviación de cada dato con su media. Esto se repite para los 3 tipos de simulaciones.

Se ha obtenido un resultado de una desviación en torno a un 5% , un resultado aceptable, por lo tanto a partir de ahora todas las simulaciones se harán sobre el primer cuadrante superior de la placa.

## 5.2. VARIACIÓN DEL FLUJO CON LA DISTANCIA.

Ahora que se tienen datos de la cantidad de luz que emiten los LEDs se quiere ver cual es la relación que tiene el flujo de luz que emiten los LED con la distancia. Si hay uno o varios LEDs apagados tiene que haber una variación en la cantidad de luz que llega a cada punto de la placa. Para ello se apagan de uno en uno en orden y se repiten las 3 simulaciones anteriores.

Esta medida se realiza para ver que capacidad podría tener el sensor de apreciar variaciones en la luz que emiten los LED. Es decir, que en el lugar que se ponga el sensor sea capaz de notar si ha fallado algún LED en la placa, notando una bajada en la cantidad de luz que recibe.

Las simulaciones se han realizado como en el primer apartado, usando el mismo plano y los mismos puntos de medida, pero solo se han recogido los del cuadrante superior. Para esta parte se han realizado los 3 tipos de simulación para cada LED apagado, es decir se han hecho 27 simulaciones.

Los datos obtenidos se han presentado en una tabla comparando el resultado con los LED encendidos y con ellos apagados, además se ha marcado en cada caso cual es la posición que más luz ha medido. A cada punto de medida se le ha asignado un número para poder comparar el resultado de cada simulación en la misma posición. A continuación se presenta el esquema seguido para cada tipo de simulación, para poder identificar el punto de medida con su valor en la tabla.

Además los LEDs se han numerado en el orden en que se iban apagando, es decir de izquierda a derecha y de arriba a abajo del 1 al 9.

### Numeración de LEDs:

1	2	3
0	0	0
4	5	6
0	0	0
7	8	9
0	0	0

Simulación 1

1		5		9		13
	o		o		o	
2		6		10		14
	o		o		o	
3		7		11		15
	o		o		o	
4		8		12		16

Simulación 2:

	1	5	9
	o	o	o
	2	6	10
	o	o	o
	3	7	11
	o	o	o
	4	8	12

Simulación 3:

1	o	4	o	7	o	10
2	o	5	o	8	o	11
3	o	6	o	9	o	12

Se presentan los resultados de la variación del flujo en las tablas anteriormente mencionadas:

Simulación 1:

posicion	all on	led 1 Off	led 2 off	led 3 off	led 4 off	led 5 off	led 6 off	led 7 off	led 8 off	led 9 off
1	102805	45169	103328	104080	101560	106031	104719	100285	103251	109114
2	196681	125047	182377	191336	125314	181135	185121	181542	186397	188978
3	203310	183910	191438	191750	132418	185081	194392	132716	189428	191311
4	192579	184808	188087	198899	187393	188701	189865	128657	181732	188627
5	200675	145371	133653	195387	194943	193933	195963	200286	191846	197796
6	373127	305997	304004	363956	314872	309256	356877	370845	360865	369728
7	369579	370572	368433	371386	315626	306787	365930	319589	310569	360719
8	372093	362678	365353	367602	350770	363914	364085	306737	307191	357245
9	197098	191568	132430	124851	191869	187618	188102	188457	187990	189462
10	404485	353944	299798	282860	343595	303095	297069	362698	358306	349755
11	364611	366520	370807	357806	369859	302917	299970	369761	313035	291820
12	369479	367118	363156	364178	356548	356088	368990	360115	305067	299234
13	187185	181991	176672	131333	179668	180440	181141	181858	181913	178019
14	351474	340003	339566	273860	333752	325291	287931	346992	349675	329823
15	343122	338876	339450	335984	347339	336041	292802	350331	340762	284883
16	349919	337170	342464	338086	335281	333556	338456	344865	349190	286979

Tabla 5.4 Simulación 1 para variación con la distancia.

Simulación 2:

posicion	all on	led1 off	led 2 off	led 3 off	led 4 off	led 5 off	led 6 off	led 7 off	led 8 off	led 9 off
1	191199	81043,9	180228	187643	186189	192316	187937	194284	187357	190046
2	369406	259097	354189	372664	261313	327440	355564	345041	350318	352312
3	389917	370209	376765	366887	273960	342458	351466	248105	342152	351919
4	356792	353771	348098	356319	343892	346733	349865	247426	340299	344390
5	198081	189703	89674,6	178204	186645	201517	189265	200723	196159	196821
6	395959	375984	283586	375507	388361	254384	360423	370471	355741	363773
7	377220	358404	368882	358889	363725	257950	364032	364425	272499	352546
8	363461	370236	365874	365056	359693	365589	361776	361868	262980	350117
9	188453	174570	175111	75160,9	180681	181998	184192	187357	180284	181881
10	357209	356046	341340	240766	350700	341761	237998	350318	337087	339481
11	343701	346460	335302	338532	337144	333936	241374	342152	330110	228864
12	351843	351801	347100	340043	338474	339099	333156	340299	337257	239441

Tabla 5.5 Simulación 2 para variación con la distancia

Simulación 3:

posicion	all on	led 1 off	led 2 off	led 3 off	led 4 off	led 5 off	led 6 off	led 7 off	led 8 off	led 9 off
1	195675	79876,3	184873	193625	188986	185303	194194	186504	197015	192247
2	199051	188138	191954	195653	83648,9	185792	193193	183491	196834	197768
3	200088	198809	203711	199479	188876	192912	197987	84360,4	196830	196637
4	379162	264820	252139	374983	363788	359621	364440	371684	378354	381055
5	365075	346069	353399	355426	265475	252463	348456	348675	354563	362483
6	385263	376021	359363	379766	368966	358521	354162	275019	252014	364725
7	352333	352641	253166	220762	350272	337371	351641	346244	352713	358884
8	398956	398026	393460	380932	399436	262720	277021	405201	390392	397616
9	369439	367196	376959	357362	367099	354450	341046	363400	265341	246423
10	79876,3	335078	321142	237977	325648	331164	327649	333692	327214	330685
11	188138	356417	336545	339341	356187	352470	239043	351387	339931	336061
12	198809	345454	347286	345595	348564	355932	340253	346459	341433	249397

Tabla 5.6 Simulación 3 para variación con la distancia

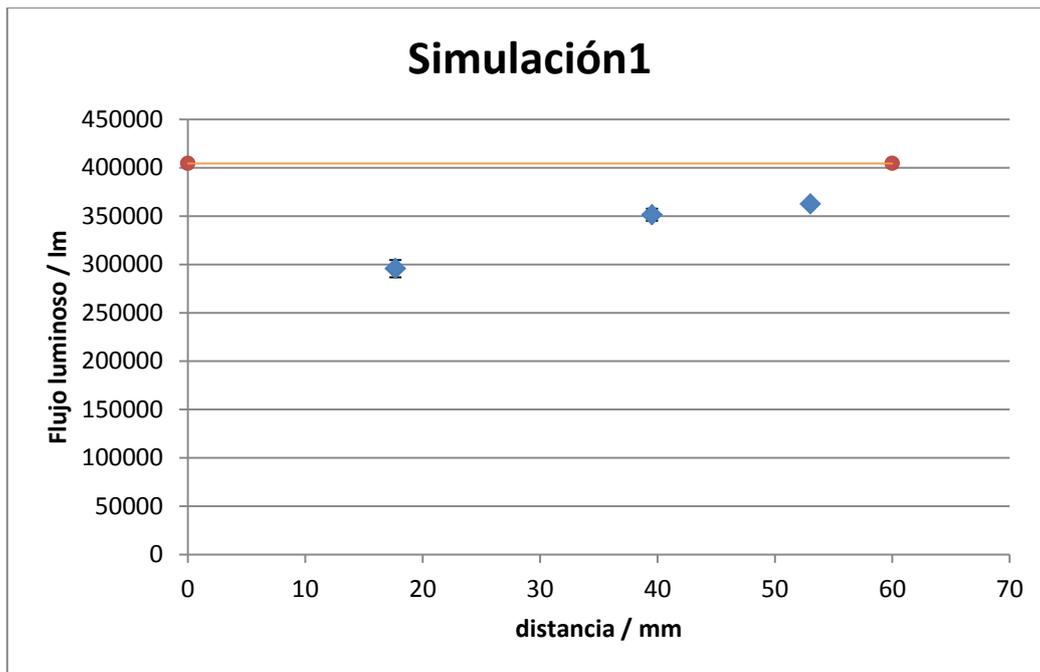
En las gráficas anteriores se ha recogido el grueso de los datos, sin embargo no se aprecia una variación en función de la distancia. Para ello hay que representar esos datos en una gráfica.

Para representar estas gráficas se ha tomado como referencia la posición con un mayor flujo de luz cuando todos los LEDs están encendidos. A partir de este punto se hace una media con los valores situados en posiciones a la misma distancia del punto de referencia. Para cada media se calcula la desviación estándar.

Con los valores de las distintas distancias y los resultados de las medias calculadas se dibujan las gráficas siguientes para cada tipo de simulación.

→ Simulación 1 :

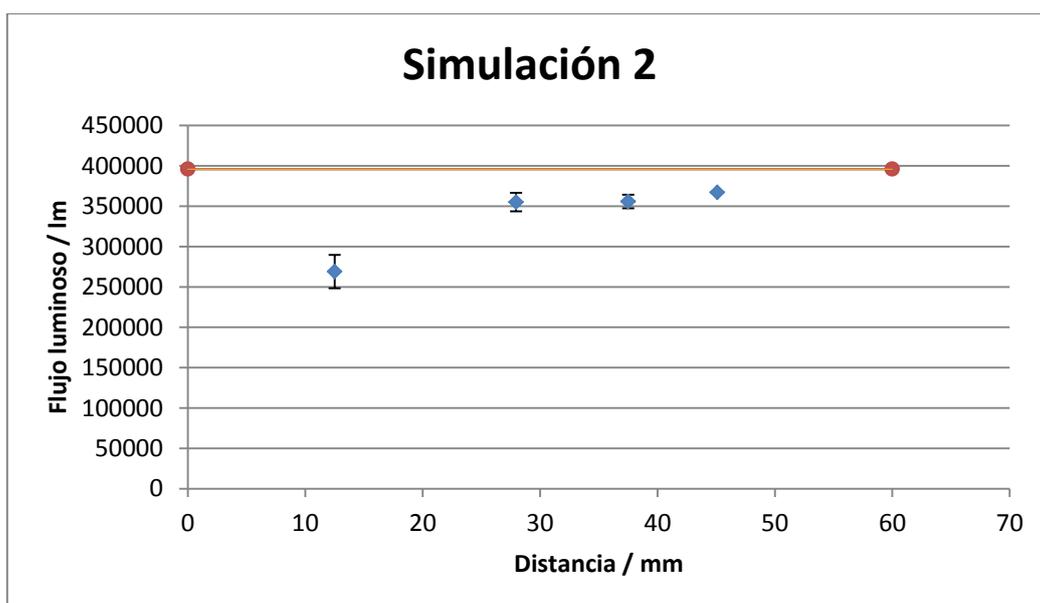
Número de LED	Distancia(mm)	Valor medio del flujo
2,3,5,6	17,68	295705,5
1,4,8,9	39,53	351400
7	53,03	362698



Gráfica 5.1 Simulación 1 variación del flujo con la distancia.

→ Simulación 2:

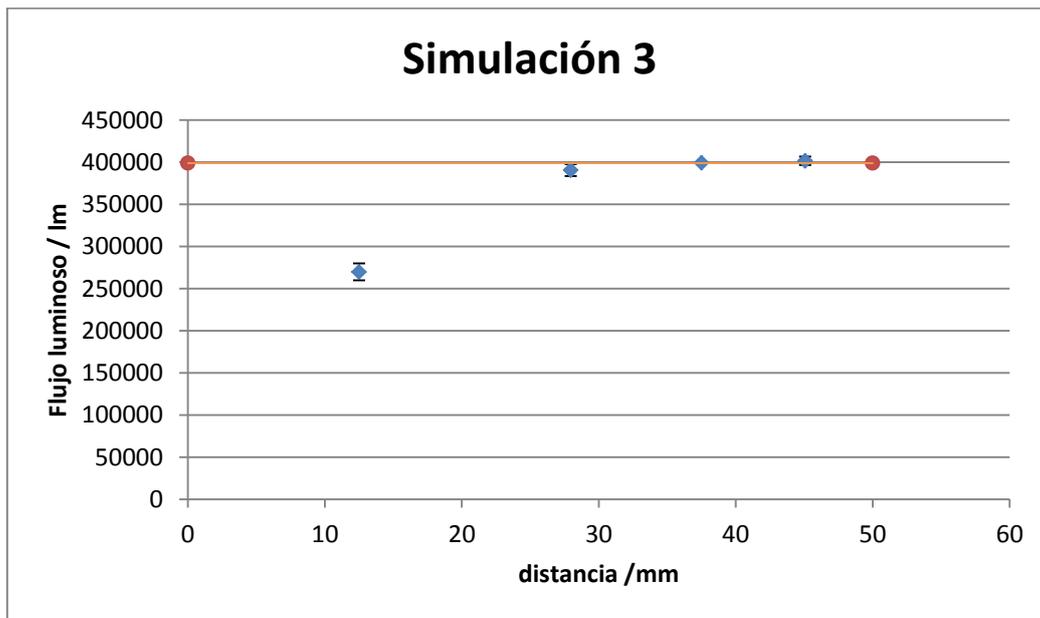
Número de LED	Distancia (mm)	Valor medio del flujo
2,5	12,5	268985
1,4,3,6	27,95	375068
7,9	45,07	367122
8	37,5	355741



Gráfica 5.2 Simulación 2 para variación del flujo con la distancia

→ Simulación 3:

Número de LED	Distancia (mm)	Valor medio del flujo
5,6	12,5	269870,5
2,3,8,9	27,95	390600
4	37,5	399436
1,7	45,06	401613,5



Gráfica 5.3 Simulación 3 para variación del flujo con la distancia.

En las gráficas se ha marcado con una línea el valor del flujo máximo cuando están todos los LEDs encendidos, el cual no se debería superar ya que al apagar algún LED el flujo debe disminuir.

En las 3 gráficas presentadas se ve que según aumenta la distancia los valores del flujo tienden a la asíntota, es decir que a partir de una cierta distancia no se aprecia variación de flujo. Este es el resultado que se buscaba, saber a partir de que distancia el sensor colocado en ese punto dejaría de notar el cambio de luz en los LEDs colocados mas allá de esa distancia.

### 5.3. REFLEXIÓN DE LA ESTRUCTURA.

El último dato que se quiere obtener es la cantidad de luz que refleja la estructura de la luminaria.

Para esta simulación se va a considerar la luminaria completa ya que se quiere estudiar la reflexión necesitamos todos los elementos, aunque en realidad solo se realizan medidas con los dos cuadrantes superiores ya que los datos son extrapolables a toda la luminaria. Pero en este caso por la situación del plano no se puede trabajar solo con un cuadrante pues las distancias del plano al LED son distintas para toda la mitad superior. Se van apagando de uno en uno los LED y se toma nota del promedio de luz que recibe para representarlo en una grafica en función de la distancia.

En este caso se plantea un plano situado en el exterior del conjunto de LEDs y en el borde derecho de la placa y en el medio de ella, como se ve en la imagen. Además se le rota  $15^\circ$  hacia el exterior de la placa para captar el flujo reflejado. El plano mide  $3 \times 3$  mm y tiene  $100 \times 100$  puntos de medida (  $NC= 100$  y  $NR= 100$ ) de manera que se consiguen unos datos más precisos.

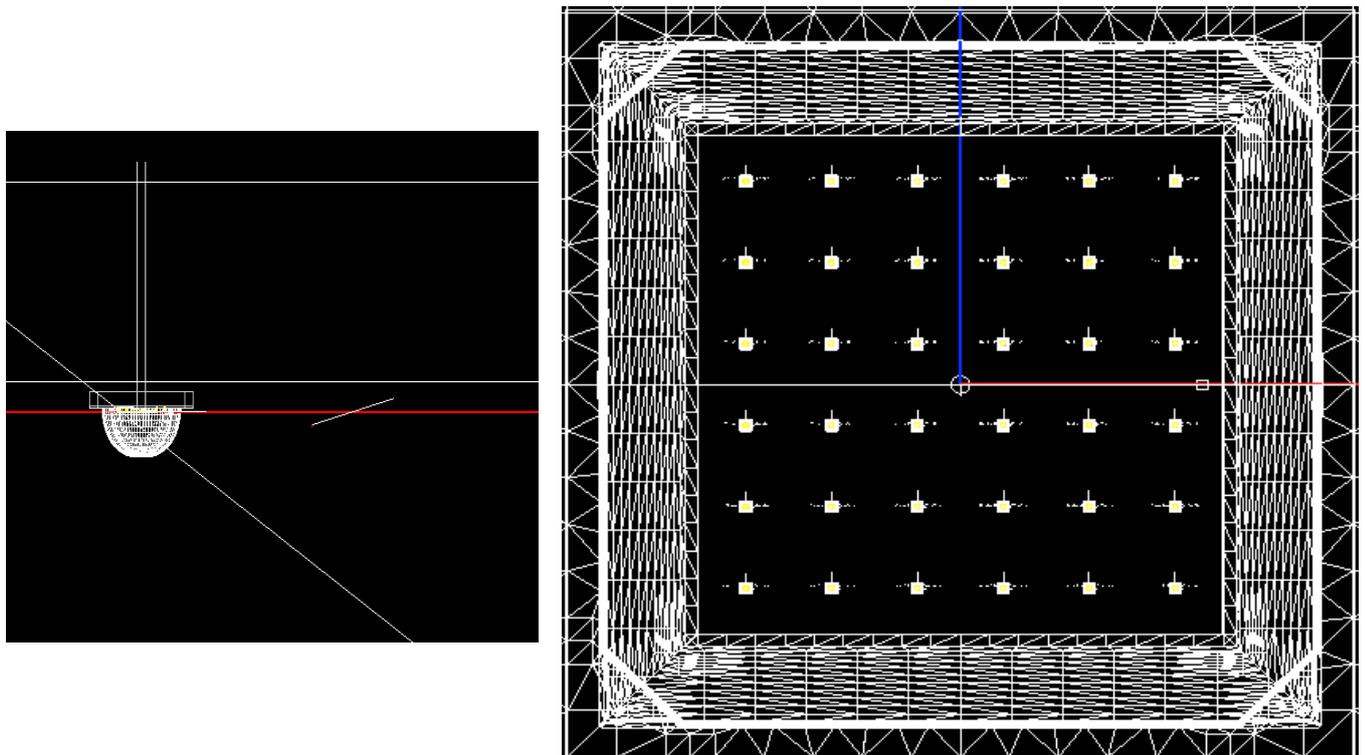
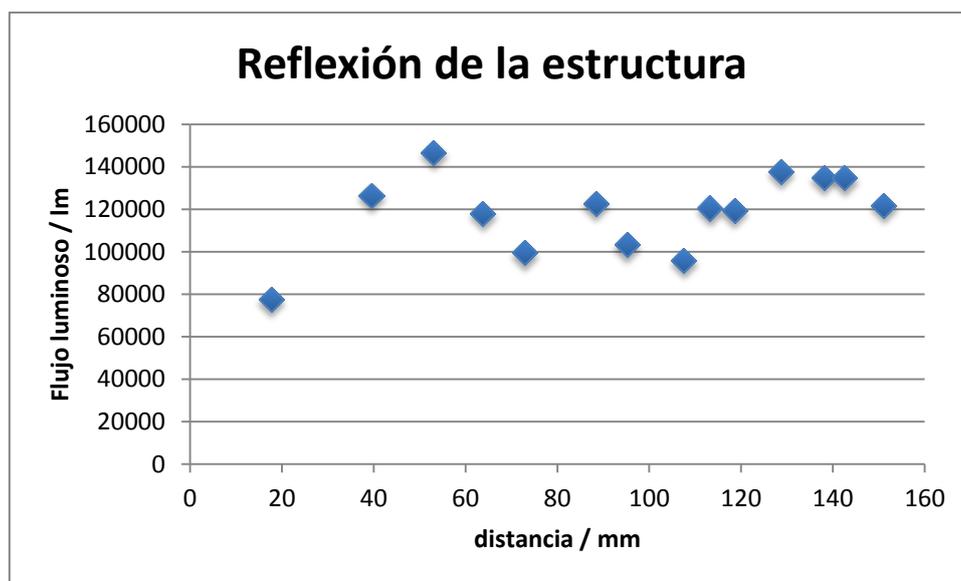


Imagen 5.5,6 Representación y situación del plano.

Para cada LED apagado se mide el flujo en ese plano y se toma el dato del promedio de flujo que recibe. Se tendrán por lo tanto 18 medidas, pero hay 4 LEDs que están a distancias iguales, con ellos se calcula la media con lo que quedan 14 medidas que están representadas en la siguiente gráfica:



Gráfica 5.4 Reflexión interna de la luminaria.

El resultado que podemos extraer es que la cantidad reflejada no tiene un patrón concreto con la distancia. Si se ve que, por ejemplo, el valor mínimo del flujo corresponde con la distancia mínima, lo que quiere decir que cuando el LED que está más cerca del plano de medida se nota un descenso notable en el flujo que recibe. Este flujo va aumentando según se van apagando LEDs que están mas lejos. Hasta aquí cumple con los resultados vistos en el apartado anterior, pero la variación de las distancias intermedias no tienen cabida en ese razonamiento. Luego solo cabe la explicación de que esas variaciones sean por el flujo reflejado por los demás elementos de la luminaria.

## 6. CONCLUSIONES

---

Este proyecto tenía una idea clara y era mejorar la eficiencia de una luminaria en todos los aspectos posibles. Por lo tanto, lo ideal hubiera sido que el resultado de las simulaciones fuera que con un solo sensor colocado en la placa se pudiese tener control sobre todos los LEDs colocados en ella. Sin embargo, hemos visto restricciones con la distancia, como se ve en las gráficas resultantes del segundo tipo de simulaciones. Solo hay control sobre los LED que estén a una distancia de unos 30 mm. Esto no quiere decir que no se pueda mejorar la eficiencia si no que en vez de colocar un solo sensor habrá que implantar mas dependiendo del tamaño y cantidad de LEDs de la luminaria. En la luminaria de este estudio alcanzaba a notar variaciones de luz en los LED que rodeaban al punto de estudio, es decir, unos 8 LEDs, por lo que para una placa con 36 LEDs habría que implantar 4 sensores.

Estos son los resultados que se han obtenido para la colocación del sensor, que esta claro que aumenta el coste, pero el aprovechamiento de la variación del LED con la temperatura es una gran ventaja y un gran ahorro a corto y largo plazo ya que se alarga la vida útil de los LEDs y el ahorro monetario en los picos de potencia.

## 7. BIBLIOGRAFÍA:

---

- Road lighting. Fundamentals, technology and application . Wout van Bommel
- Introduction to radiometry and photometry. William Ross McCluney
- Fundamentos de Óptica. Francis W. Sears , versión española de Albino Yusta Almaraza.
- Óptica. Justiniano Casas
- Optoelectronic y comunicación óptica. Coordinadores: J.M.Albella Martin; J.J. Jimenez Lidon; J.M. Martinez Duart
- Handbook of Applied Photometry. Casimer DeCusatis.
- Optoelectronics and photonics, principles and practices. S.O. Kasap
- PDF NICHIA
- Propiedades ópticas de los semiconductores. Apuntes asignatura Electrónica. Profesor L. Bailón y D. Pardo ; Salvador Dueñas.
- Apuntes Física del estado sólido. Profesor Miguel Ángel
- Apuntes de Óptica. Profesor Santiago Mar Sardaña y Profesor Carlos Baladrón García .
- Artículos Técnicos: Tecnología dentro del LED. [www.voltium.es](http://www.voltium.es)
- [www.lucescei.com](http://www.lucescei.com)
- Manual de luminotecnia. [www.grlum.dpe.upc.edu](http://www.grlum.dpe.upc.edu)
- [www.ltioptics.com](http://www.ltioptics.com)
- Eduardo Nogueira Díaz. Análisis de la fiabilidad de LEDs de AlInGaP de alta eficiencia luminosa (2013) Universidad politécnica de Madrid.
- Light extraction enhanced White light-emitting diodes with multi-layered phosphor configuration. You, Jiun Pyng ; Tran, Nguyen T.;and Shi.Frank G. Optics Express, 18(5), 5505-5060. Doi: 10.1364/OE.18005055. UC Irvine
- Crecimiento, fabricación y caracterización de diodos electroluminiscentes basados en pozos cuánticos de INGaN .Naranjo Vega, Fernando B. ; Calleja Pardo, Enrique.. 2003. Universidad Politecnica Madrid
- Color desing model of high color rendering index White-light LED module. Shang-Ping Ying; Han-Kuei Fu; Hsin-Hsin Hsieh and Kun-Yang Hsieh.. May 2017. Applied optics
- LED Source Modeling Method Evaluation. Review LED Professional. November/December 2008.