



**Universidad de Valladolid**

## **TRABAJO FIN DE GRADO**

Grado en Física

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE REALIMENTACIÓN OPTOELECTRÓNICO EN  
LAZO CERRADO PARA EL CONTROL DEL FLUJO LUMINOSO DE LAS  
LUMINARIAS LED DE VIARIO PÚBLICO.**

*Autor: José Manuel PASTRIÁN GARCÍA*

*Tutores: D. Santiago Mar Sardaña*

*D. Fernando Rodríguez Merino*



# ÍNDICE GENERAL

---

<b>Resumen / Abstract .....</b>	<b>11</b>
<b>Introducción teórica.....</b>	
Capítulo 1.- Magnitudes básicas en iluminación.....	12
1.1.- Alumbrado de la calzada para el tráfico motorizado .....	12
1.2.- Iluminancia para peatones, ciclistas y residentes .....	13
1.2.1.- Iluminancia horizontal y hemisférica.....	14
1.2.2.- Iluminancia vertical y semicilíndrica.....	14
Capítulo 2.- Lámparas de estado sólido .....	15
2.1.- Principios.....	15
2.1.1.- Emisión .....	15
2.1.2.- Luz blanca .....	16
2.2.- LEDs.....	17
2.2.1.- Construcción.....	17
2.2.2.- Propiedades de las lámparas.....	19
2.3.- Equipos de control .....	20
2.3.1.- Controladores para LEDs .....	20
2.3.2.- Atenuadores para lámparas de estado sólido.....	21
2.4.- Calidad de energía.....	21
2.4.1.- Distorsión armónica .....	21
2.4.2.- Factor de potencia.....	22
2.5.- Interferencia electromagnética.....	22
Capítulo 3.- Luminarias.....	23
3.1.- Características fotométricas .....	23
3.1.1.- Distribución de luz y radio de salida de luz .....	23
3.1.2.- Clasificación de luminarias .....	25
3.2.- Características ópticas.....	26
3.3.- Características mecánicas .....	28
3.3.1.- Material .....	28
3.3.2.- Resistencia .....	28
3.3.3.- Protección de suciedad y humedad .....	28
3.3.4.- Instalación y mantenimiento.....	28
3.4.- Características eléctricas.....	29
3.5.- Características térmicas .....	30

3.6.- Aprobación de seguridad .....	30
3.7.- Características estéticas .....	31
3.8.- Luminarias inteligentes .....	31
<b>Descripción de materiales .....</b>	<b>.....</b>
Capítulo 4.- Dispositivos de emisión y control de luz.....	32
4.1.- Luminaria.....	32
4.2.- PCB .....	34
4.3.- Controlador .....	34
4.3.1.- Introducción .....	35
4.3.2.- Punto de temperatura del caso (punto $T_c$ ).....	35
4.3.3.- Medir $T_c$ en el punto $T_c$ .....	35
4.3.4.- Relación entre $T_c$ y temperatura ambiente.....	35
4.3.5.- Módulo de protección de temperatura (MTP).....	36
4.4.- Software .....	37
4.5.- Luxómetro .....	38
4.6.- Vatímetro .....	38
4.7.- Termopares .....	39
4.8.- Multímetro .....	39
Capítulo 5.- Dispositivo de detección .....	40
5.1.- Fotorresistencia (LDR) .....	40
5.2.- Fotodiodo.....	40
5.3.- Fototransistor.....	41
5.4.- Análisis de los posibles dispositivos .....	42
<b>Mediciones .....</b>	<b>.....</b>
Capítulo 6.- Medidas previas .....	41
6.1.- Variación de la resistencia del NTC con la temperatura .....	41
6.2.- Medida de los parámetros de emisión, consumo y temperatura de la luminaria sin driver .....	42
6.3.- Medida de los parámetros de emisión, consumo y temperatura de la luminaria con una atenuación del 70%.....	45
6.4.- Medida de los parámetros de emisión, consumo y temperatura introduciendo un potenciómetro y ejerciendo un control manual del conjunto.....	47
6.5.- Toma de datos necesarios de resistencia y luxes a diferentes corrientes de alimentación para la parte final del experimento.....	48
Capítulo 7.- Pruebas con el sistema de realimentación optoelectrónico (SISRO-E) .....	50
7.1.- Primera medida de los parámetros de la luminaria con el SISRO-E .....	50
7.2.- Medida de los parámetros de la luminaria con el SISRO-E en ambiente frío .....	52

7.3.- Medida de los parámetros de la luminaria con el SISRO-E en ambiente cálido .....	54
<b>Conclusiones.....</b>	<b>55</b>
<b>Referencias bibliográficas.....</b>	<b>57</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS, TABLAS Y GRÁFICAS

---

## FIGURAS

### Capítulo 1

Figura 1.1. Cantidad de luz reflejada en dirección al observador .....	12
Figura 1.2. Influencia de la reflectancia de la superficie de la carretera en el brillo .....	13
Figura 1.3. Tipos de iluminancia .....	14

### Capítulo 2

Figura 2.1. Principio de operación de las lámparas de estado sólido .....	15
Figura 2.2. El espectro estrecho de un LED .....	16
Figura 2.3. Ejemplo de espectro de un LED blanco .....	17
Figura 2.4. Ejemplo de un chip LED .....	17
Figura 2.5. Los principales componentes de un LED de alta potencia .....	18
Figura 2.6. Encapsulado de fósforo y revestimiento de fósforo .....	18
Figura 2.7. Principio de un módulo LED de fósforo remoto que crea luz blanca .....	18
Figura 2.8. Característica V-I de un LED con alta variación de corriente y con resistencia.....	20
Figura 2.9. Modulación de ancho de pulso .....	21
Figura 2.10. Una señal ideal y una distorsionada de la corriente frente a armónicos.....	22
Figura 2.11. Desfase entre la forma sinusoidal de la corriente y el voltaje .....	22

### Capítulo 3

Figura 3.1. Distribución de luz de la luminaria .....	23
Figura 3.2. El sistema C- $\gamma$ usado para especificar la distribución de luz de la luminaria.....	24
Figura 3.3. Diagrama polar de intensidad luminosa para una luminaria asimétrica.....	24
Figura 3.4. Apertura de una luminaria .....	26
Figura 3.5. Formas de reflectores.....	27
Figura 3.6. Luminarias inteligentes con comunicación entre ellas y conexión a internet .....	31

### Capítulo 4

Figura 4.1. Luminaria Córdoba .....	32
Figura 4.2. Recreación de un boulevard con luminarias Córdoba.....	32
Figura 4.3. Luminaria Córdoba desmontada .....	33
Figura 4.4. Diferentes estéticas para la luminaria Córdoba .....	34
Figura 4.5. PCB similar a la utilizada en el experimento .....	34
Figura 4.6. Controlador Xitanium del fabricante Philips para luminarias LED .....	35

Figura 4.7. Curva típica de resistencia frente a temperatura de un resistor NTC.....	36
Figura 4.8. Software Multione 3.0 del fabricante Philips .....	37
Figura 4.9. Imagen del control del sensor térmico con el configurador utilizado .....	37
Figura 4.10. Luxómetro similar al utilizado en el experimento.....	38
Figura 4.11. Vatímetro digital.....	38
Figura 4.12. Ejemplo de termopar.....	39
Figura 4.13. Multímetro .....	39

## Capítulo 5

Figura 5.1. Fotorresistencia (LDR) .....	40
Figura 5.2. Representación con su símbolo eléctrico de un LDR.....	40
Figura 5.3. Fotodiodo .....	40
Figura 5.4. Representación con su símbolo eléctrico de un fotodiodo.....	40
Figura 5.5. Fototransistor .....	41
Figura 5.6. Representación con su símbolo eléctrico de un fototransistor .....	41
Figura 5.7. Esquema de corrientes de un fototransistor.....	42
Figura 5.8. Circuito equivalente de un fototransistor .....	42

## TABLAS

### Capítulo 3

Tabla 1. IP code (IEC 2013) .....	30
Tabla 2. Clasificación de seguridad eléctrica (IEC 2009).....	33

### Capítulo 5

Tabla 3. Comparativa de factores que influyen en la elección del detector.....	42
--	----

### Capítulo 6

Tabla 4. Datos de emisión de la luminaria .....	49
Tabla 5. Variación de resistencia y flujo para diferentes corrientes .....	49
Tabla 6. Resistencia del conjunto para diferente nivel de dimming .....	49

## GRÁFICAS

### Capítulo 6

Gráfica 1. Variación de la resistencia del NTC con la temperatura .....	43
Gráfica 2. Variación del flujo y la temperatura con el tiempo (luminaria sin driver).....	44
Gráfica 3. Variación de la potencia con el tiempo (luminaria sin driver).....	45
Gráfica 4. Variación de flujo y temperatura con el tiempo (luminaria con dimming al 70%)..	46
Gráfica 5. Variación de la potencia con el tiempo (luminaria con dimming al 70%) .....	46
Gráfica 6. Variación de flujo y temperatura con el tiempo (con reajuste manual).....	47

Gráfica 7. Variación de la potencia con el tiempo (con reajuste manual) .....48

**Capítulo 7**

Gráfica 8. Variación de flujo y temperatura con el tiempo (usando el SISRO-E) .....50

Gráfica 9. Variación de la potencia con el tiempo (usando el SISRO-E) .....51

Gráfica 10. Variación de flujo y temperatura con el tiempo (SISRO-E en ambiente frío) .....52

Gráfica 11. Variación de flujo y temperatura con el tiempo (SISRO-E en ambiente frío) .....53

Gráfica 12. Variación de flujo y temperatura con el tiempo (SISRO-E en ambiente cálido) ....54

Gráfica 13. Variación de flujo y temperatura con el tiempo (SISRO-E en ambiente cálido) ....55



# ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

---

CA: Corriente alterna  
CC: Corriente continua  
CIE: Commission internationale de l'éclairage (Comisión internacional de la iluminación)  
DOE: Department of Energy (Departamento de energía del gobierno de EE. UU.)  
EMI: Electromagnetic Interference (Interferencia electromagnética)  
ENEC: Europeans Norms Electrical Certification (Certificado europeo de normas eléctricas)  
IEC: International Electrotechnical Commission (Comisión electrotécnica internacional)  
IES: Illuminating Engineering Society (Sociedad de ingeniería en iluminación)  
IP: International protection code (Código de protección internacional)  
LDR: Light dependent resistor (Fotorresistencia)  
LED: Light-Emitting Diode. (Diodo emisor de luz)  
MTP: Module temperature protection (Módulo de protección de temperatura)  
NTC: Negative temperature coefficient (Coeficiente de temperatura negativa)  
PCB: Printed-circuit board. (Placa de circuito impreso)  
PWM: Pulse-width modulation (Modulación por ancho de pulso)  
RGB: Red-Green-Blue. (Rojo-Verde-Azul)  
S.I.: Sistema Internacional de Medidas  
SLI: Specific index of the luminaire (Índice específico de la luminaria)  
SISRO-E: Sistema de realimentación optoelectrónico  
UL: Underwriter's Laboratories (consultoría de seguridad y certificación de Illinois, EE. UU.)  
UNE: Una Norma Española



# RESUMEN

---

Este trabajo tiene por objetivo el desarrollo de un sistema que monitorice la luz producida por los leds de una luminaria de viario para compensar la progresiva depreciación de la fuente lumínica, o la variación del flujo luminoso debido al cambio de la temperatura ambiental, mediante el incremento o reducción de la corriente de alimentación de los LEDs. Dicho sistema permitirá que el flujo final de la luminaria sea constante a lo largo de su vida útil acorde a una consigna marcada de fábrica. Por ello, el sistema generaría un ahorro energético en el alumbrado público aprovechando la normalmente baja temperatura ambiente nocturna, la diferencia de temperatura estacional y el exceso de iluminación en los primeros años de una instalación.

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.

# ABSTRACT

---

The objective of this work is the development of a system that monitors the light produced by the LEDs of a street luminaire to compensate for the progressive depreciation of the light source, or the variation of the luminous flux due to the change in the environmental temperature, by increasing or reduction of the supply current of the LEDs. This system will allow the final flow of the luminaire to be constant throughout its useful life according to a slogan marked at the factory. Therefore, the system would generate energy savings in public lighting taking advantage of the normally low night-time temperature, the seasonal temperature difference and the excess of lighting in the first years of an installation.

This project has been carried out with the company Boos Technical Lighting S.L dedicated to the design of outdoor luminaires, which with great interest develops new projects that can suppose an economic saving and a saving in the impact of the environment.



# Introducción teórica

## Capítulo 1.- Magnitudes básicas en iluminación.

El primer asunto que se debe determinar es: cuales son los parámetros que tienen una influencia positiva en el rendimiento visual y confort de los usuarios de la iluminación vial. Para ello es necesario definir aquellas magnitudes básicas en iluminación que juegan un papel importante en el proceso de visión de automovilistas, peatones y residentes, estas son: la **iluminancia** o la **luminancia**.

- La *iluminancia* es un término que describe la medición de la cantidad de luz cayendo (iluminando) y expandiéndose en una superficie determinada. La iluminancia también se relaciona en cómo las personas perciben el brillo de un área iluminada. Como resultado, la mayoría de la gente usa el término iluminancia y brillo en forma intercambiable lo que genera confusión, dado que el brillo también puede ser usado para describir la luminancia. Para clarificar la diferencia, la iluminancia se refiere a un tipo específico de medición de luz, mientras que el brillo se refiere a las percepciones visuales y sensaciones psicológicas de luz. El brillo no es un término usado de forma cuantificativa.

La unidad SI para iluminancia es lux, lx, o  $\text{lm}/\text{m}^2$  en el S.I.

- La *luminancia* describe la medición entre la cantidad de luz emitida, pasando por o reflejada desde una superficie particular desde un ángulo sólido. También indica cuánta energía luminosa puede ser percibida por el ojo humano. Esto significa que la luminancia indica el brillo de la luz emitida o reflejada fuera de la superficie.

Existen diferentes unidades usadas para la luminancia. La unidad SI para luminancia es candela/metros cuadrados ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ). Los profesionales en la industria están familiarizados con el término nit (nt). Nit es un término no SI usado para luminancia y 1 nit equivale a  $1 \text{ cd}/\text{m}^2$ .

### 1.1.- Alumbrado de la calzada para el tráfico motorizado.

Una superficie se hace visible en virtud de la luz que se refleja desde ella y entra al ojo del observador: cuanto mayor sea la cantidad de luz que ingrese al ojo, más fuerte será la sensación visual experimentada. Así, la iluminancia en la superficie de la carretera, que se refiere solo a la cantidad de luz que llega a esa superficie, no da ninguna indicación de cuán fuerte será la sensación visual, o, en otras palabras, qué tan brillante aparecerá la superficie. El brillo de la superficie de la carretera dependerá de la cantidad de luz reflejada en la dirección del observador como se ve en la siguiente figura.

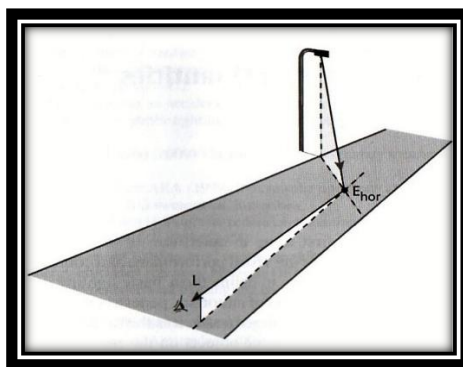


Figura 1.1. la luz incidente hacia la carretera resulta en la iluminancia horizontal,  $E_{\text{hor}}$  en la carretera, mientras que la luz reflejada desde la superficie de la carretera resulta en la luminancia de la superficie de la carretera,  $L$ .

La medida fotométrica para esto es la *luminancia de la superficie*. Es la luminancia y no la iluminancia lo que determina el brillo, se ilustra este hecho por medio de las cuatro fotografías de una misma instalación de alumbrado vial en la figura 1.2. El patrón de iluminancia en la carretera es el mismo en cada fotografía porque las luminarias de alumbrado vial y la configuración son las mismas; los cambios en las propiedades de reflexión de la superficie de la carretera producen cambios en el patrón de luminancia y, a su vez, en diferencias en el brillo. Ya que el brillo finalmente se determina no por iluminancia sino por luminancia, el rendimiento visual y el confort visual de un usuario de la carretera están directamente influenciados por el complejo patrón de luminancias que sale de su vista de camino hacia delante. Las propiedades de reflexión de automóviles, bicicletas, peatones, obstáculos y otros objetos del campo de visión varían ampliamente. Las superficies secas de la carretera, por otro lado, tienen propiedades de reflexión relativamente similares para las direcciones de visión normales de un automovilista hacia el área de la carretera a unos 50-150 m frente a él. La luminancia de la calzada, como resultado de una determinada instalación de alumbrado vial, puede predecirse con precisión. la superficie de la carretera a menudo forma el fondo de los objetos en o cerca de la carretera. Este es el porqué de que el concepto de luminancia de la calzada sea generalmente más adecuado que el de iluminancia (horizontal) para su uso en la definición del rendimiento visual y la comodidad del usuario motorizado de la carretera.

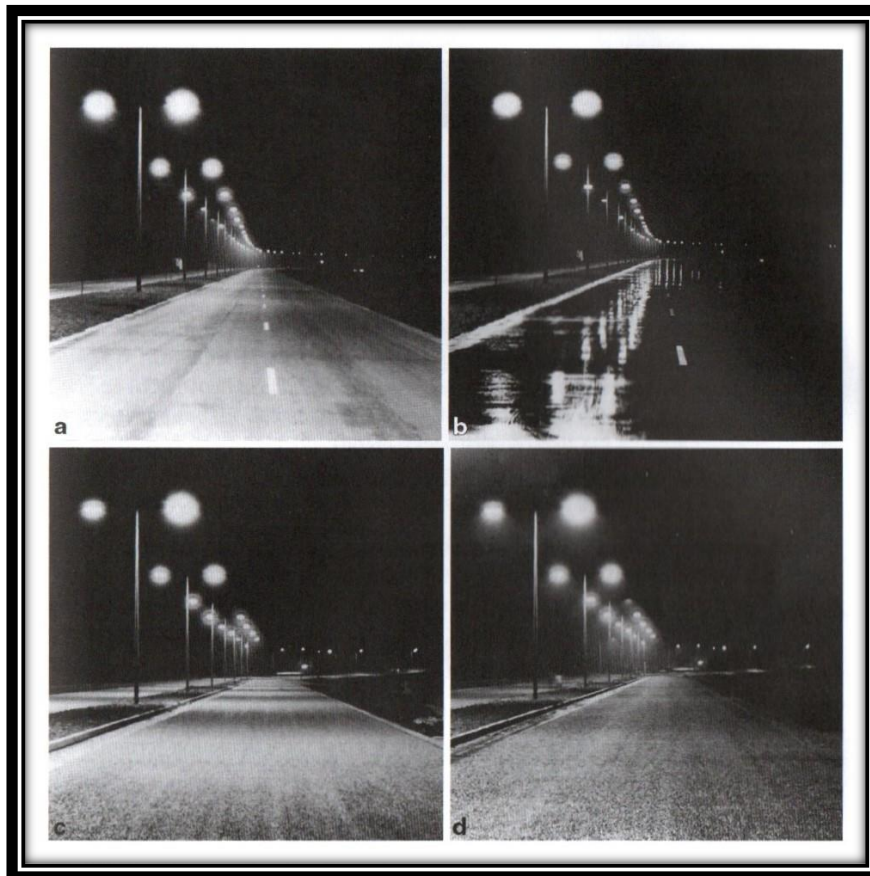


Figura 1.2. La influencia de la reflectancia de la superficie de la carretera en el brillo, con iluminancia constante: **a** superficie lisa y seca; **b** superficie lisa y húmeda; **c** superficie áspera y seca; **d** superficie áspera y húmeda. (Van Bommel y De Boer 1980)

## 1.2.- Iluminancia para peatones, ciclistas y residentes.

Las direcciones de observación de peatones y ciclistas son mucho más variadas que las de un automovilista. La superficie de interés para el primero no es solo la superficie de la carretera sino también la del pavimento o acera, las fachadas y las caras de otras personas en la calle. Por estas dos razones, no es posible trabajar con propiedades de reflexión estándar para esta categoría de usuarios de la carretera. Para el alumbrado vial específicamente destinado a los usuarios de la carretera no motorizados, por lo tanto, recurrimos a la iluminancia como el parámetro de iluminación básico.

### 1.2.1.- Iluminancia horizontal y hemisférica.

Es importante para peatones y ciclistas que la luz revele objetos potencialmente peligrosos que se encuentren en su camino o alguna irregularidad en este. La iluminancia horizontal es por tanto usada habitualmente como el parámetro de iluminación básico. Ya que la mayoría de los objetos no son planos, sino que son tridimensionales, algunos estándares de iluminación vial especifican la intensidad de la iluminación a nivel del suelo en términos de la iluminación hemisférica. En la figura 1.3. se ve de forma geométrica y esquemática las magnitudes que se tratan en este capítulo.

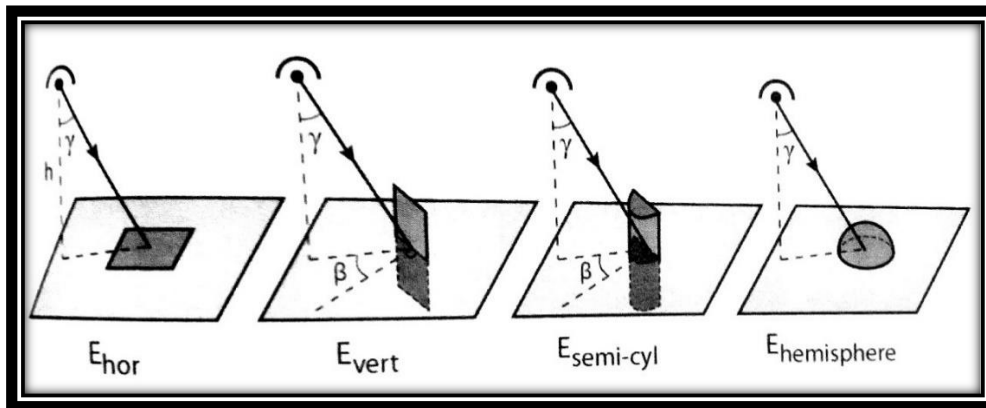


Figura 1.3. Tipos de iluminancia.

Las ecuaciones de la iluminancia horizontal y hemisférica en función de sus ángulos y alturas son:

- $E_{hor} = \frac{1}{h^2} \times \cos^3 \gamma$
- $E_{hemisphere} = \frac{1}{4 \times h^2} \times \cos^2 \gamma \times (1 + \cos \gamma)$

### 1.2.2.- Iluminancia vertical y semicilíndrica.

Por razones de seguridad, es importante ser capaces de identificar a otros en un encuentro en la calle. Es por esta razón que la iluminancia vertical a la altura de la cara es bastantes veces usada como parámetro básico de alumbrado. Se ha demostrado, sin embargo, que la iluminancia semicilíndrica es un parámetro básico aún mejor para este propósito, ya que las caras no son planas y la luz incidente por los lados de éstas también contribuye a la visibilidad. Sin embargo, para evaluar la calidad de visión de las fachadas de los lados de la calle, actualmente, es la iluminancia vertical el parámetro usado.

En este caso las fórmulas físicas que describen estas magnitudes son:

- $E_{ver} = \frac{1}{h^2} \times \sin \gamma \times \cos^2 \gamma \times \cos \beta$
- $E_{semi-cyl} = \frac{1}{\pi \times h^2} \times \sin \gamma \times \cos^2 \gamma \times (1 + \cos \beta)$

## Capítulo 2.- Lámparas de estado sólido

En 1907 el ingeniero de radio Round informó sobre luz emitida desde un cristal de carburo de silicio, destinando a ser usado en recepciones de radio (Round 1907). Esto fue, de hecho, la primera lámpara de estado sólido (SSL por sus siglas en inglés); en este caso, una pequeña luz emitida por el diodo o LED. Hasta 1962 no se hicieron las primeras prácticas con *diodos emisores de luz* para demostrarlo (Holonyak y Bevacqua 1962). Desde entonces los LED han sido ampliamente usados como lámpara de señal en todo tipo de aplicaciones eléctricas. En los años 90 empezó el proceso de desarrollo de la tecnología LED, cuando, en 1995, Nakamura desarrolló el gran poder del LED azul, que hizo posible la producción de luz blanca, basada en un LED azul recubierto de una capa fluorescente (Nakamura et al. 1995). Desde entonces fue claro que la iluminación de estado sólido se convertiría en una posibilidad en muchas aplicaciones. Hoy es una realidad en todo tipo de campos, especialmente en el alumbrado vial, y seguramente, en el futuro será el tipo de iluminación dominante.

### 2.1.- Principios

#### 2.1.1.- Emisión de luz

En las lámparas de estado sólido, la luz es creada por un material en estado sólido que consiste en un sándwich de dos tipos de semiconductores, también llamados material p y n (Schubert 2006; van Driel y Fan 2013). Este fenómeno físico de crear luz de esta manera se llama *electroluminiscencia*. Los semiconductores están hechos de un material mal conductor eléctrico al que se van añadiendo impurezas (átomos de otro material), proceso conocido como **dopado**. El proceso vuelve al material semiconductor, el tipo n queda con un exceso de electrones y el tipo p queda positivamente cargado con un defecto de electrones o visto de otra forma, con *huecos*. En el material tipo n los electrones extra de un átomo se mueven en una órbita con un nivel de energía excitado y en el material de tipo p los huecos se mueven en una órbita de menor energía. Conectando ambos materiales hace que se forme la capa de unión que se ve en la figura 2.1.

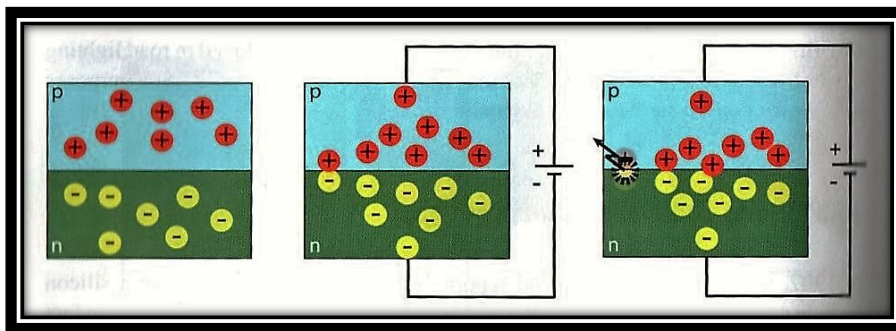


Figura 2.1. Principio de operación de las lámparas de estado sólido: movimiento de los átomos p y n hacia la unión del sándwich semiconductor p-n donde ocurre la recombinación radiativa que resulta en emisión de luz.

Cuando uno de los átomos del material n se encuentra con un átomo del material p en la unión, el electrón del primer átomo mencionado cae en la órbita del segundo con un nivel de energía menor. La energía correspondiente a la diferencia de energías entre los niveles será entonces radiada en forma de luz o puede calentar el material. Si la luz es emitida, se habla de recombinación radiativa.

La longitud de onda de la luz es dependiente de la diferencia de energías entre los niveles de los materiales p y n, las cuales a su vez también dependen del semiconductor usado. Entonces, diferentes semiconductores emiten diferentes longitudes de onda y, por tanto, diferentes colores de luz.

El espectro de emisión es siempre una banda estrecha (casi luz monocromática). El sándwich de semiconductores p-n, también llamado **chip**, es de hecho conocido en el campo de la electrónica como diodo rectificador. Las fuentes de luz de estado sólido también son llamadas en inglés *Light-Emitting Diodes* o *LEDs* por sus siglas.

### 2.1.2.- Luz blanca

Como se ha mencionado, el espectro de luz de un LED es siempre estrecho. En consecuencia, la luz será coloreada.

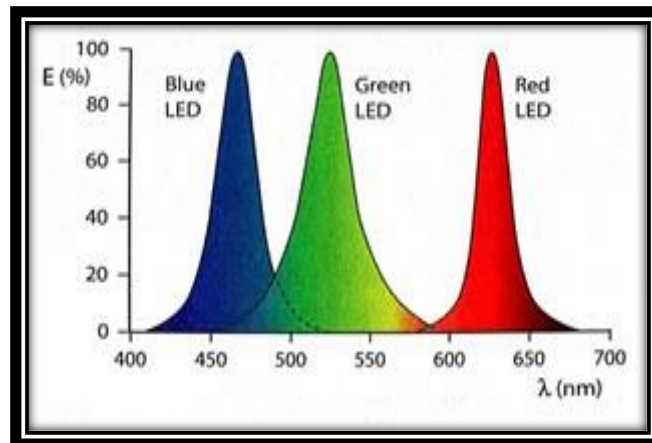


Figura 2.2. El espectro estrecho de un LED. Ejemplo de LED azul, verde y rojo.

La luz LED blanca se puede obtener por combinación de tres o más chips LED de diferente coloración. Un método común es combinar chips LED rojo, verde y azul en un módulo único (RGB LED por sus siglas en inglés). Sin embargo, tales sistemas no son muy eficientes y por tanto no adecuados para su uso en iluminación vial. La luz blanca de buena calidad y adecuada como luz de viario se obtiene por uso de un chip LED azul en combinación con un material fluorescente que convierte la gran parte de luz azul de longitud de onda corta en diferentes longitudes de onda que se extienden por casi todo el espectro visible. (ver figura5b). El LED azul usado, también llamado material InGaN, (compuesto de un semiconductor de Nitruro de galio-indio). La capa fluorescente usada es un material terrestre raro de fósforo. Este tipo de LEDs se conoce como LEDs de fosforo.

Un método novedoso para convertir la longitud de onda de la luz azul o ultravioleta es el uso de puntos cuánticos (Anikeeva et al. 2009; Talapind y Steckel 2013). Los puntos cuánticos son pequeñas partículas de 2-10 nm de tamaño hechas de un material semiconductor. Debido a su pequeño tamaño dotan al material de unas propiedades distintas a las del semiconductor del que provienen. Bajo excitación de radiación de longitud de onda corta emiten una longitud de onda mayor y de espectro muy estrecho, y esta cantidad emitida depende del tamaño de los puntos cuánticos (a mayor tamaño mayor longitud de onda). Por tanto, permiten afinar el espectro azul resultante del LED, ya que los tradicionales LEDs de fósforo también producen radiación infrarroja que no contribuye a la visión y que puede ser controlada por puntos cuánticos. El método de fluorescencia combinado con el de puntos cuánticos se usará mucho en el futuro con total seguridad en los sistemas de iluminación de viario.



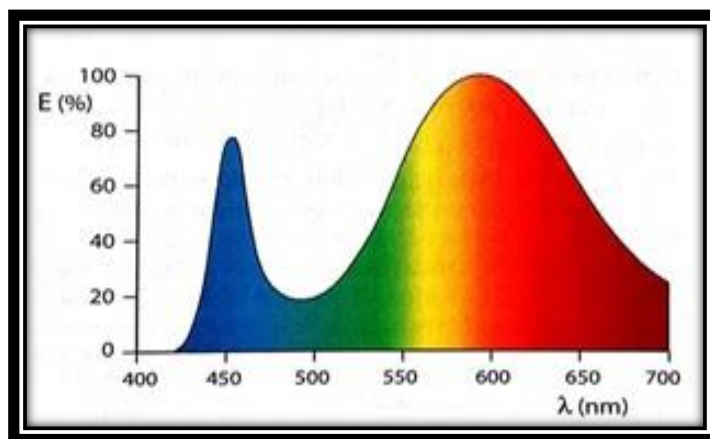


Figura 2.3. Ejemplo de espectro de un LED blanco.

## 2.2.- LEDs

### 2.2.1.- Construcción

Se distinguen habitualmente diferentes niveles en la construcción de un LED, que van desde nivel 0 a 3.

- **Nivel 0: Chip**

El sándwich de material p-n, la base del chip, es depositada en un sustrato de composición adecuada en un complejo proceso industrial llamado crecimiento epitaxial. El sándwich y el sustrato juntos determinan la calidad del chip. El resultado de este proceso es una “trampa de luz” ya que mucha de la luz emitida es reflejada internamente por las superficies del chip hasta que finalmente se absorbe en el material (calentándolo). Se puede ver un ejemplo de chip en la figura 2.4.

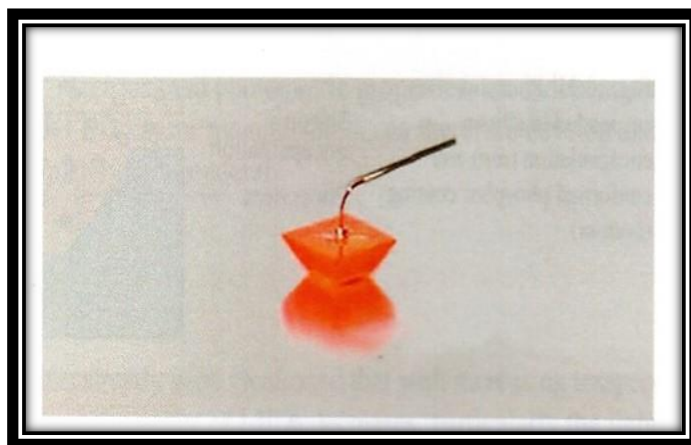


Figura 2.4. Un ejemplo de un chip LED de forma específica que mejora la eficiencia de extracción de luz.

- **Nivel 1: Paquete**

El conjunto de chip con su conexión eléctrica, mecánica y para protección, el dispositivo de disipación de calor y componentes básicos ópticos. En las figuras 2.5 y 2.6 pueden verse los componentes de un LED de alta potencia y dos tipos de encapsulamiento respectivamente.

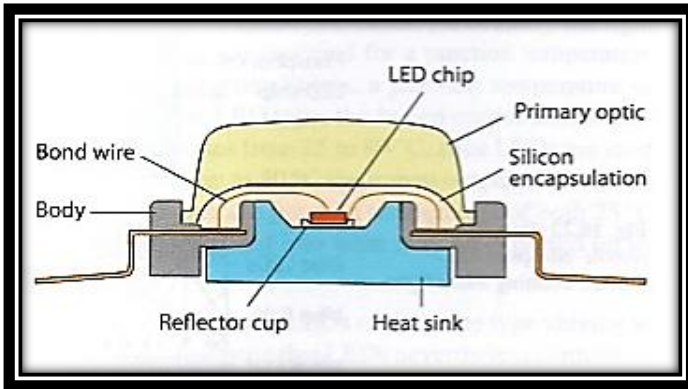


Figura 2.5. Los principales componentes de un LED de alta potencia.

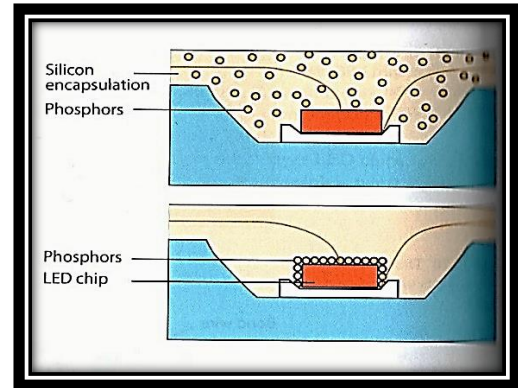


Figura 2.6. Encapsulado de fósforo suspendido en silicio (arriba) y revestimiento de fósforo (abajo).

- **Nivel 2: Cluster**

El flujo luminoso de un LED individual es bastante bajo comparado con otro tipo de lámparas, por ello, se suelen montar múltiples LEDs en una placa de circuito integrado (PCB por sus siglas en inglés) para obtener un módulo LED que emita un gran flujo luminoso. La PCB establece las conexiones eléctricas entre todos los componentes y el controlador eléctrico externo. La PCB también conduce al exterior el calor proveniente de los disipadores de calor individuales de cada LED.

- **Nivel 3: Módulo**

El módulo LED integra el cluster con el controlador eléctrico, con las conexiones mecánicas y con los componentes ópticos secundarios que determinan la distribución de luz del módulo. Muchos LED hacen uso de la llamada tecnología de fósforo remoto (Fig 2.7). Aquí un número de LED azules son dispuestos dentro de una cámara de mezcla, de un material reflectivo y difusor. La capa de fósforo situada alejada de los LEDs y bajo la cámara, convierte la luz azul de los chips en luz blanca. De esta forma gracias al proceso de mezcla, las pequeñas diferencias de la luz de salida y el color de los chips individuales no se hacen visibles. Para los usuarios es importante tener módulos LED (también llamados motores de luz LED) que, como las lámparas convencionales, sean intercambiables con productos de diferentes fabricantes. La intercambiabilidad se logra mediante las especificaciones producidas por Zhaga, una organización global de la industria (Zhaga 2013)

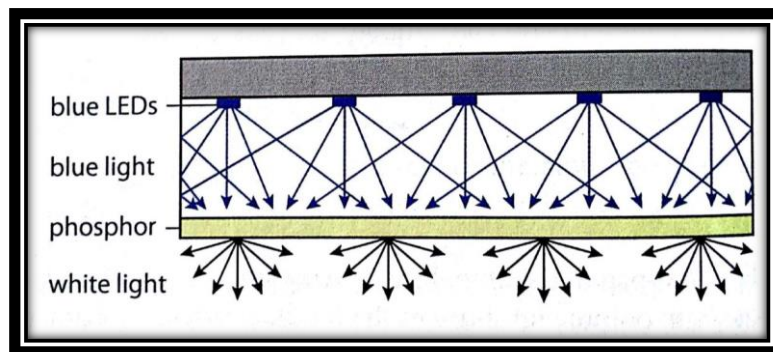


Figura 2.7. Principio de un módulo LED de fósforo remoto que crea luz blanca.

## 2.2.2.- Propiedades de las lámparas

- **Temperatura de la unión**

El rendimiento del LED decrece al incrementar la temperatura de la unión p-n, en especial la luz de salida y el tiempo de vida. Los datos de rendimiento suelen venir dados por el fabricante para una temperatura de la unión de 25°C. Sin embargo, bajo condiciones de uso normales, una temperatura de la unión de 60-90°C se obtiene fácilmente. Dependiendo del tipo de LED la luminosidad de salida cae un 60-95% cuando la temperatura de la unión crece de 25 a 80°C. Los LED azules son menos sensibles: a 80°C decrece su rendimiento un 80-95%.

- **Binning**

La producción en masa de LEDs resulta en dispositivos del mismo tipo variando en color, luz de salida y voltaje. Con el fin de garantizar que los LED cumplan las especificaciones, un proceso llamado “binning” es usado en el proceso de producción. Al finalizar el proceso de fabricación, las propiedades de los LED son medidas y estos son, en consecuencia, ordenados en subclases, o “bins” de propiedades definidas.

- **Espectro y propiedades del color**

La temperatura del color de una fuente de luz se define comparando su color dentro del espectro luminoso con el de la luz que emitiría un cuerpo negro calentado a una temperatura determinada, por este motivo esa magnitud se expresa en Kelvin a pesar de no reflejar expresamente una medida de temperatura. Por aplicación de diferentes fósforos, la luz blanca de los LED se produce en un rango de 2700 a 10000K.

- **Rango luminoso**

Hoy día, los LED de alta potencia emiten paquetes de luz de hasta 1000 lm. En el caso de estar cerca de este valor, se requiere un nivel de cribado severo para restringir el deslumbramiento, ya que mucha luz proviene de una superficie emisora pequeña.

- **Eficacia del sistema**

Como las lámparas más convencionales la eficacia de la luminosidad del LED es dependiente de la potencia y de la calidad del color de la luz que emite el LED. Los de potencia alta tienen mayor eficacia, mientras que aquellos con mejor representación de color tienen eficacias más bajas. El departamento US de energía (DOE) del gobierno de Estados Unidos ha hecho una estimación sobre la eficacia de los sistemas hasta 2025.

- **Tiempo de vida**

Las lámparas LED tienen un tiempo de vida basado en entre 50000 y 100000 h, pero como ya se ha mencionado, este tiempo depende de la temperatura de la unión a la que se trabaje.

- **Periodo previo y reencendido**

Los LED emiten toda la luz de la que son capaces inmediatamente después de ser encendidos o de su reencendido.

- **Oscurecimiento**

Los LED pueden atenuarse mediante una simple modulación de ancho de pulso de hasta un 5% de luz total al aire libre.

- **Sensibilidad a la temperatura ambiente**

Por la influencia de la temperatura de la unión, los LED trabajan mejor a bajas temperaturas (mejor eficacia y tiempo de vida). La influencia precisa de la temperatura de unión varía para los diferentes tipos de LED y luminarias LED. En ambientes de temperatura elevada, por tanto, la información relevante se debe obtener del fabricante.

## 2.3.- Equipos de control

El equipo de control necesario para las lámparas de operación cumple una serie de funciones: asegura que la lámpara se puede encender y, una vez iniciada, puede funcionar de manera estable durante un período de tiempo más prolongado. Además, si el tipo de lámpara lo permite, garantiza que la lámpara pueda *atenuarse*. El inicio instantáneo no es problema para las lámparas de estado sólido, pero el suministro de la red tiene que rectificarse y transformarse a un voltaje más bajo, y se deben tomar medidas para asegurar que la corriente a través de la fuente de luz sea constante. El equipo de control eléctrico empleado para este propósito en lámparas de estado sólido se conoce como controlador o “**driver**”. Para ajustar el nivel de iluminación a las necesidades reales del momento, cada tipo de lámpara diferente, a menudo, requiere un método diferente de atenuación.

### 2.3.1.- Controladores para LEDs

Al igual que otro tipo de lámparas, como las lámparas de descarga de gas, los LED tampoco funcionan correctamente cuando se conectan directamente a la tensión de la red. Las lámparas de estado sólido son rectificadores de bajo voltaje que permiten que la corriente pase solo en una dirección. Esto significa que la fuente de alimentación de CA debe transformarse en baja tensión y luego rectificarse en un suministro de CC. Aunque un LED tiene una característica de resistencia positiva, la dependencia voltaje-corriente es exponencial en el área de operación. Pequeñas fluctuaciones en el voltaje de suministro causan grandes variaciones en la corriente que pueden dañar la fuente de luz (figura 2.8 izquierda). Una simple resistencia en serie en el circuito eléctrico estabiliza la corriente para crear, un suministro de corriente "constante" (figura 2.8 derecha). En la práctica, sólo los indicadores LED en miniatura usan una resistencia así para estabilizar la corriente. Los LED de alta potencia usan un *controlador electrónico* para obtener una corriente constante característica similar.

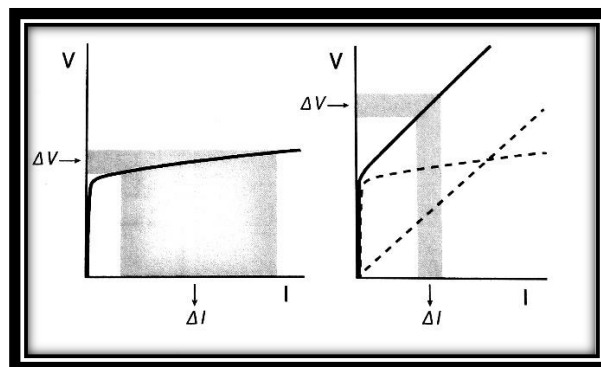


Figura 2.8. *Izquierda:* Característica V-I de un LED con alta variación de corriente. *Derecha:* Característica V-I con una resistencia en serie.

### 2.3.2.- Atenuadores para lámparas de estado sólido

La regulación se realiza para adaptar de nivel la iluminación a las necesidades que se requieren en ese momento con el fin de optimizar el consumo de energía. Las lámparas de baja presión de sodio no pueden ser oscurecidas, porque su temperatura de funcionamiento decrecería entonces demasiado y se extinguiría. Por otro lado, las lámparas de alta presión de mercurio y muchas de haluros de metal no pueden ser oscurecidas sin producir un desplazamiento inaceptable en su color emitido.

Muchos drivers para LEDs llevan integrada una función de oscurecimiento por modulación de ancho de pulso (PWM por sus siglas en inglés) para regular la potencia del LED. Al igual que con el atenuador de corte de fase para lámparas incandescentes y fluorescentes, la modulación de ancho de pulso enciende y apaga el LED rápidamente, reduciendo así el “encendido” para lograr el nivel de atenuación deseado. La rapidez con la que se hace (con LEDs normalmente entre 150 y 400Hz) es tan rápido que la mayoría de la gente no nota el parpadeo de la luz. La investigación sobre qué determina exactamente que la perturbación sea sentida por un grupo más pequeño de personas está en curso (DOE 2013b). Cuánto más largos sean los periodos de apagado en relación con los periodos de encendido (ancho de pulso) más se atenúan los LED (Figura 2.9.). Hay una gran diferencia de calidad entre los atenuadores LED en cuanto a cuánto disminuye la eficacia del sistema de LED en la situación atenuada.

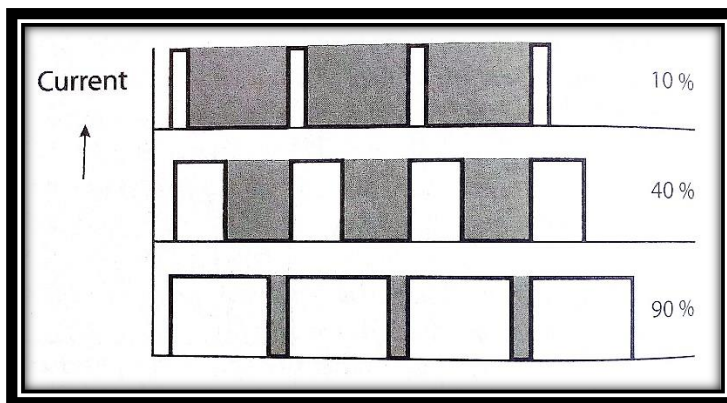


Figura 2.9. Modulación de ancho de pulso (PWM por sus siglas en inglés) usada para la atenuación de LEDs.

## 2.4.- Calidad de energía

### 2.4.1.- Distorsión armónica

En lámparas de descarga y de estado sólido la forma de onda de la corriente de red se distorsiona, es decir, ya no es puramente sinusoidal (Figura 2.10. arriba) Algunas de las razones por las que ocurre son: los picos de ignición durante el encendido de la lámpara y los de reencendido durante el paso a cero de la corriente, el uso de sistemas oscurecedores de corte de fase y, en el caso de uso de LEDs, la necesidad de convertir el voltaje proporcionado de corriente alterna a corriente continua con bajo voltaje. La distorsión de la forma de la onda se llama **distorsión armónica**. Este término viene del hecho de que la corriente distorsionada consista en un gran número de ondas sinusoidales de baja amplitud, llamadas armónicos, de frecuencias más grandes que la de la corriente de red (50 o 60 Hz) y están numerados secuencialmente. La figura 2.10. abajo muestra los armónicos que se suman a la onda cuadrada distorsionada ( $d+c-b-a = e$ ). Los armónicos más grandes dan como resultado una impedancia diferente de las bobinas y condensadores en el sistema eléctrico de engranaje de la lámpara. Para proteger la red, la distorsión armónica total causada por la lámpara tiene que ser limitada mediante el uso de lámparas de calidad alta y controladores o atenuadores.

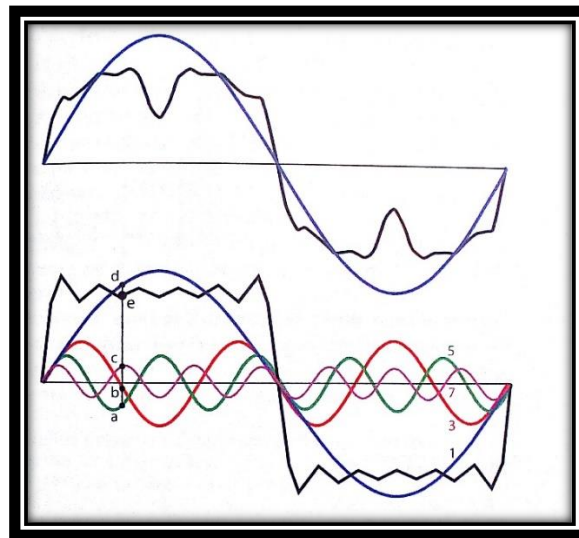
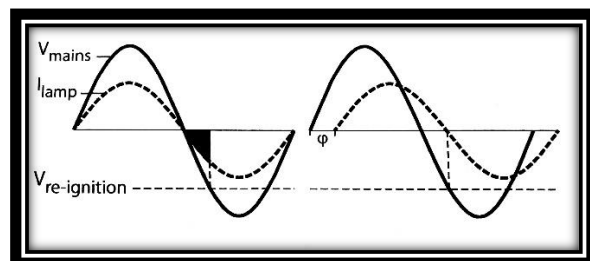


Figura 2.10. *Arriba*: una señal ideal sinusoidal y una distorsionada de la corriente. *Abajo*: Las diferentes ondas sinusoidales (armónicos) que sumadas juntas forman la onda distorsionada.

### 2.4.2.- Factor de potencia

Como se ha visto, el funcionamiento inductivo de las lámparas tanto en el sistema de balasto electromagnético como electrónico desplaza la fase de la corriente de la lámpara en relación con la de la tensión de la red. Este desplazamiento se conoce como *cambio de fase*. Se indica por el ángulo  $\phi$  entre la forma sinusoidal de la corriente y de la tensión (Véase la figura 2.11.). Un excesivo desfase es indeseable porque para la misma energía consumida una corriente más fuerte debe atravesar el cableado, requiriendo entonces un equipamiento de cables más potente. La relación entre la potencia medida y la potencia total realmente extraída por el sistema se llama **factor de potencia**.



$$\text{Factor de potencia} = \frac{\text{Potencia medida}}{\text{Potencia total extraída}}$$

Figura 2.11. Desfase entre la forma sinusoidal de la corriente y el voltaje.

Para ondas sinusoidales el factor de potencia es igual al coseno del ángulo  $\phi$ . Lo ideal por tanto es que este ángulo se aproxime a 0, y por ello, que el coseno del ángulo o factor de potencia esté en torno a 0.9 – 1.

### 2.5.- Interferencia electromagnética

El dispositivo de control de la lámpara debe garantizar que los circuitos de la lámpara cumplan estrictamente con estos requisitos de EMI. Los dispositivos eléctricos y electrónicos pueden emitir radiación electromagnética indeseada que podría interferir con otros aparatos eléctricos o electrónicos como ordenadores o radios. Para prevenir estos problemas todos los países y regiones tienen requisitos restrictivos para los niveles de radiación.



## Capítulo 3.- Luminarias

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)

Las características de las luminarias son diferentes en función del uso para el que estén destinadas. Las empleadas en el alumbrado de viario pueden ser de tres tipos:

- Aquellas que arrojan la mayor parte de su luz a lo largo de la carretera, que es el caso de la mayoría de las luminarias utilizadas para la iluminación de autopistas.
- Las que tienen más rotación de distribución de luz simétrica, que a veces se utilizan para la iluminación de áreas no lineales, como plazas y algunas áreas residenciales.
- Los utilizados para la iluminación de alto mástil, que pueden tener una distribución de la luz simétrica de rotación, pero más a menudo tienen una distribución asimétrica que permite la iluminación de complicadas uniones de varios niveles

A lo largo del capítulo se desgranarán las principales características de estos tipos de luminarias usadas en el alumbrado público.

### 3.1.- Características fotométricas

Una lámpara desnuda radia su luz en todas las direcciones más 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.

#### 3.1.1.- Distribución de luz y radio de salida de luz

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.

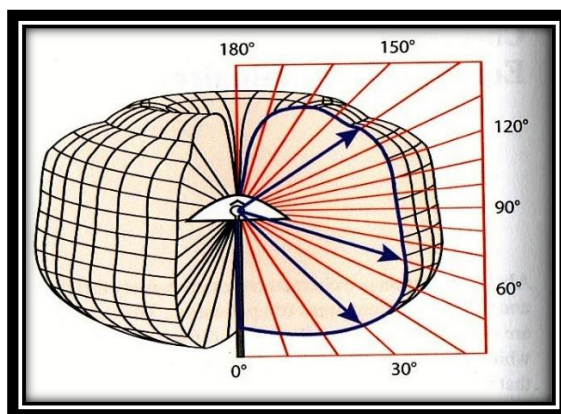


Figura 3.1. Distribución de luz de la luminaria. Las longitudes de las flechas representan las intensidades luminosas.

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 puede decir que la distribución de la luz es la "huella dactilar" de una luminaria. Para representar la distribución de la luz se usan los diagramas polares, ya que, resulta más

cómodo trabajar en dos dimensiones que en tres como es el caso del sólido fotométrico. Para ello, se realizan cortes en planos verticales y se obtiene la curva polar en dos dimensiones.

En estos diagramas se representan las intensidades lumínicas usando un sistema más utilizado y recomendado por la CIE (Comisión de Iluminación Internacional) que es el sistema de coordenadas C-γ. La coordenada C representa el ángulo que presentan los planos de rotación y γ 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.

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

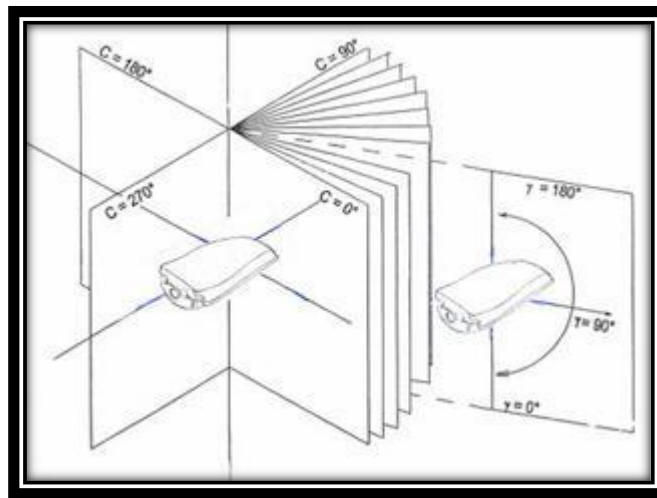


Figura 3.2. El sistema C-γ usado para especificar la distribución de luz de la luminaria.

Normalmente la curva polar representa los dos planos verticales: el transversal (0°) y el longitudinal (90°), aunque, si la intensidad máxima no está 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.

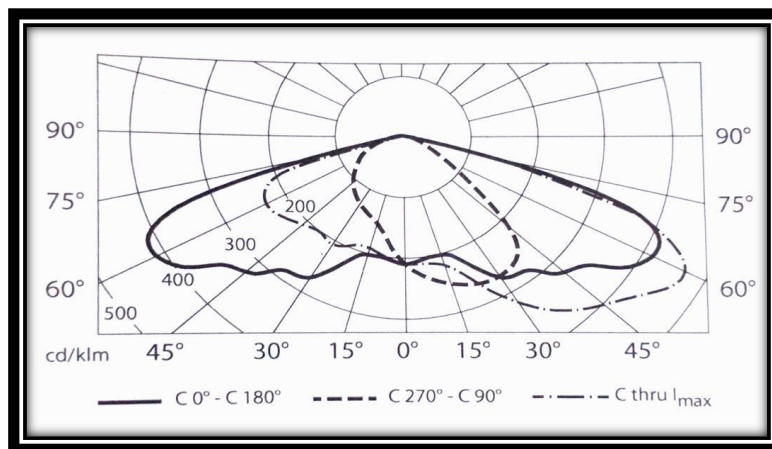


Figura 3.3. Diagrama polar de intensidad luminosa para una luminaria de carretera asimétrica.

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 lúmenes que salen de la lámpara:

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

Esta relación representa la eficacia luminosa, aunque 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 de emisión 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 es 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.

### 3.1.2.- Clasificación de luminarias

Existe, por 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  $\gamma_{m\acute{a}x}$ . Pueden ser: de alcance corto ( $\gamma_{m\acute{a}x} < 60^\circ$ ), alcance medio ( $60^\circ < \gamma_{m\acute{a}x} < 70^\circ$ ) y alcance largo ( $\gamma_{m\acute{a}x} > 70^\circ$ )
- **Apertura:** Es la distribución fotométrica en sentido transversal de la vía. Está 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 ( $45^\circ < \gamma_{90} < 55^\circ$ ) y apertura ancha ( $\gamma_{90} > 55^\circ$ )
- **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 figura 3.4. se pueden ver de manera gráfica las 3 características:

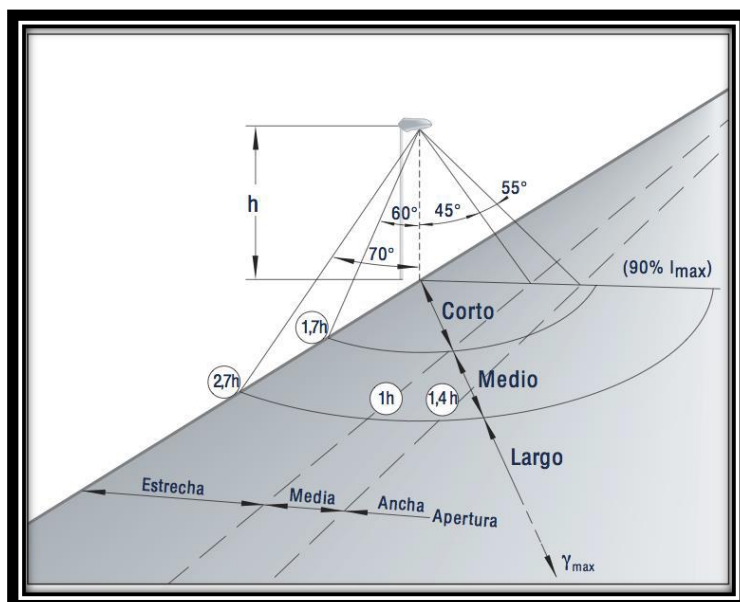


Figura 3.4. Apertura de una luminaria (Fuente: manual de iluminación INDAL).

### 3.2.- Características ópticas

La distribución de luz deseada se obtiene pasando por los fenómenos físicos de **reflexión** (cambio de dirección de los rayos de luz que ocurre en un mismo medio después de incidir sobre la superficie de un medio distinto), **refracción** (cambio de dirección de los rayos de luz que ocurre tras pasar estos de un medio a otro en el que la luz se propaga con distinta velocidad. La ley que rige este fenómeno es la ley de Snell.) y **transmisión difusa** (se produce cuando la luz pasa a través de un objeto transparente o semi-transparente con textura), 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 servir 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.

Conforme a sus características ópticas pueden existir las siguientes partes en la luminaria:

- **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, aunque 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 figura 3.5.:

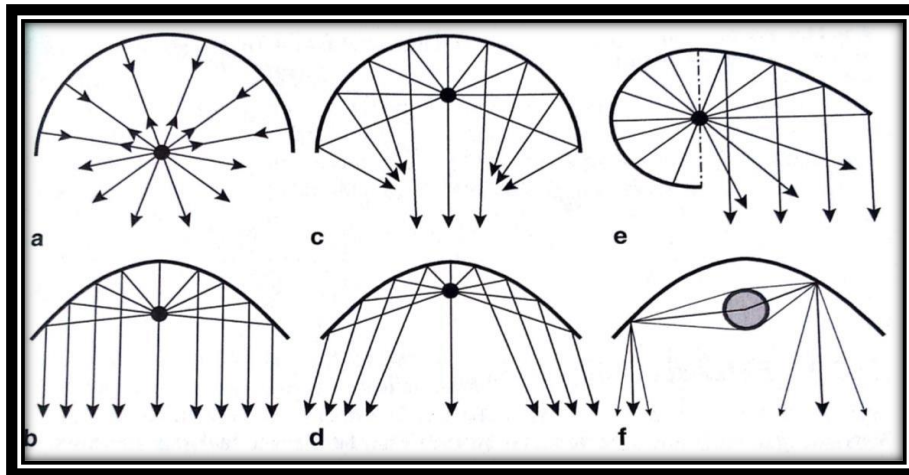


Figura 3.5. Formas de reflectores: a) cilíndrico; b) parabólico con el punto de luz en el foco; c y d) parabólicos con el punto de luz fuera del foco; e) combinación de cilíndrico y parabólico; f) divergencia de los rayos por una fuente de luz no puntual.

- **Refractores y lentes**

Los dispositivos usados para la refracción son *lentes* o *prismas* y se encargan 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 esté 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 translúcidas 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 crítico.

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

### 3.3.- Características mecánicas

La función mecánica de la carcasa de la luminaria es triple: debe acomodar los diferentes componentes de la luminaria, como los del sistema óptico y eléctrico; debe proteger a éstos de las influencias externas; y debe proporcionar los medios de montaje de la luminaria en la instalación.

#### 3.3.1.- Material

- **Aleaciones de aluminio**, en las que se han agregado otros elementos al aluminio puro para mejorar sus propiedades mecánicas y físicas y su protección química, son usadas en la fabricación de luminarias de *fundición* (la aleación de aluminio fundido se vierte, fundido, en un molde), de *extrusión* (la aleación de aluminio ablandada se presiona a través de las aberturas de un troquel), y de *chapa*.
- El **plástico** puede usarse para carcasas de luminarias completas, para cubiertas transparentes y para muchas piezas más pequeñas.

#### 3.3.2.- Resistencia

La luminaria y sus accesorios de montaje deben ser de construcción robusta para asegurar un buen y estable posicionamiento de la luminaria y sus componentes. Cualquier debilidad aquí podría conducir a cambios en la distribución de su luz y por consecuencia a cambios en la calidad de iluminación planificada. La parte más crítica en lo que se refiere a su resistencia son los soportes de montaje. Estos deben soportar al menos 5 veces el peso de la luminaria misma. Estos requerimientos se testan con pruebas en laboratorios.

#### 3.3.3.- Protección de suciedad y humedad

La luminaria debe proteger a los componentes eléctricos y ópticos contenidos en ella contra la suciedad y la humedad. La correcta protección proporcionada por la luminaria es clasificada de acuerdo con el código de Protección Internacional (IP code) que se describe en IEC (2013). El código consiste en dos números:

- El primer número clasifica la correcta protección contra el ingreso de cuerpos extraños sólidos (desde dedos y herramientas hasta fino polvo) y protección contra el acceso a partes peligrosas.
- El segundo número clasifica la adecuada protección contra el ingreso de humedad.

A mayores valores de IP, mejor protección (Ver tabla 1).

#### 3.3.4.- Instalación y mantenimiento

Muchas luminarias son de una forma, tamaño y peso tal que hacen que su montaje sea una operación difícil y que requiere mucho tiempo. El montaje, pero también el reencendido y la limpieza, debe llevarse a cabo normalmente por encima del suelo. Esto significa que el diseño ergonómico de la luminaria debe ser tal que haga que estas operaciones sean lo más fáciles y seguras posibles. Por ejemplo, para una buena funcionalidad, las cubiertas deben estar articuladas para que el electricista tenga las manos libres para trabajar con la lámpara y el equipo.

IP primer dígito	Descripción	Protegido contra	IP segundo dígito	Descripción	Protegido contra
1*	Protección de mano	Objetos sólidos > 50 mm	*1	A prueba de goteos	Caída vertical de gotas de agua
2*	Protección de dedo	Objetos sólidos > 12 mm	*2	A prueba de goteos	Caída de agua desde un ángulo de 15°
3*	Protección de herramientas	Objetos sólidos > 2.5 mm	*3	A prueba de lluvia	Caída de agua desde un ángulo de 60°
4*	Protección de cableado	Objetos sólidos > 1 mm	*4	A prueba de chapoteos	Caída de agua desde cualquier dirección
5*	Protección de polvo	Acumulación de polvo perjudicial	*5	A prueba de chorros	Agua de boquilla de 6.3 mm (30kPa)
6*	Polvo apretado	Penetración de polvo	*6	A prueba de chorros	Agua desde boquilla de 12.5 mm (100kPa)
			*7	Hermético	Inmersión en agua temporal
			*8	Presión hermética	Continuamente sumergido en agua

Tabla 1. IP code (IEC 2013).

### 3.4.- Características eléctricas

La construcción de luminarias debería ser tal que lo haga seguro eléctricamente para todos los involucrados en su manejo. IEC (2009) clasifica las luminarias de acuerdo con una correcta protección contra choques eléctricos, como puede verse en la tabla 2.

Clase de seguridad	Protección
I	Aislamiento básico con conector de tierra de protección
II	Aislamiento doble o reforzado sin puesta a tierra
III	Circuitos de bajo voltaje denominados SELF (voltaje de seguridad muy bajo)

Tabla 2. Clasificación de seguridad eléctrica (IEC 2009).

### 3.5.- 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) que 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:

- El volumen de la luminaria. Cuanto mayor sea el tamaño menor será la temperatura que alcance en el interior.
- 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.
- 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 es 25°. El uso de ellas por encima de la temperatura máxima reduce considerablemente la vida útil de estas. Además, en el caso de las lámparas LED se reduce la vida útil y la eficacia como ya se ha visto.

### 3.6.- Aprobación de seguridad

Las luminarias siempre deben cumplir con las apropiadas reglas de seguridad. ENEC (siglas en inglés de Certificado Europeo de Normas Eléctricas) es la marca europea para demostrar el cumplimiento con los estándares de seguridad europea. UL (Undewriters' Laboratories) es el análogo norteamericano. Ambos institutos de certificación ofrecen pruebas de prototipos y pruebas del proceso de producción.

### 3.7.- Características estéticas

No menos importante que las características funcionales de una luminaria es lo que se puede llamar su atractivo estético, es decir, su apariencia y estilo generales. Debe recordarse que, durante las horas de luz del día, mientras la instalación de iluminación no esté en uso, será claramente visible para todos. Especialmente en las áreas peatonales, incluso una instalación inactiva puede contribuir positivamente al atractivo de la localidad.

### 3.8.- Luminarias inteligentes

Se conocen como luminarias inteligentes aquellas que portan los sistemas inteligentes de iluminación dinámica que controlan y monitorean la iluminación. El control en este contexto se refiere, por ejemplo, al flujo de tráfico, la velocidad y la densidad, las condiciones climáticas, el tiempo y la presencia de otro tráfico, ya sea este tráfico motorizado o peatonal. Para este fin, se necesitan diferentes tipos de sensores y dispositivos de comunicación para el control remoto. La parte principal de muchos de estos dispositivos consiste en chips al igual que los LED consisten en chips. Se están introduciendo luminarias inteligentes en las que estos dispositivos están integrados en la luminaria, o a veces incluso montados en la carcasa del conjunto de LED. "Sistemas de luz digital" es una descripción apropiada para sistemas que hacen uso de tales luminarias inteligentes.

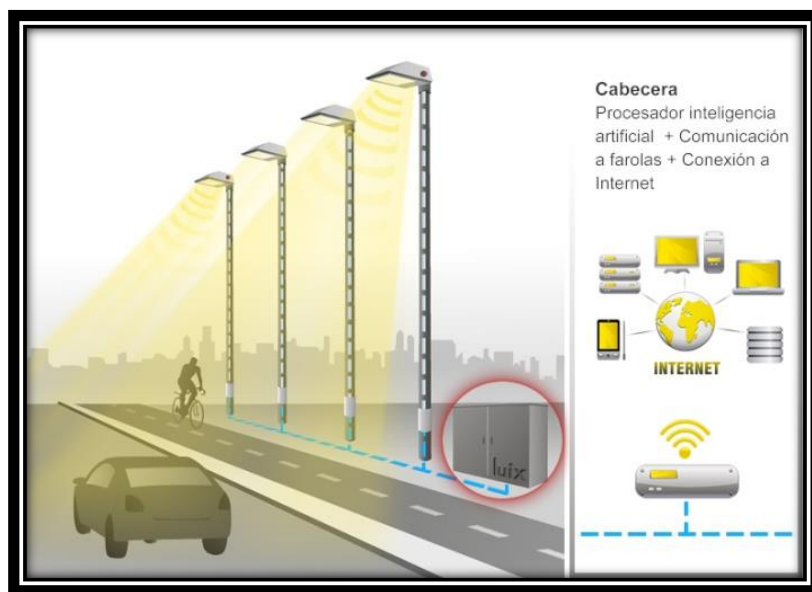


Figura 3.6. Luminarias inteligentes con comunicación entre ellas y conexión a internet.

# Descripción de materiales

---

## Capítulo 4.- Dispositivos de emisión y control de luz

### 4.1.- Luminaria

La luminaria utilizada en los experimentos es la luminaria **Córdoba**, de uso preferente en iluminación de centros históricos, bulevares, plazas, jardines y parques, terraplenes, áreas recreativas públicas o calles peatonales.



Figura 4.1. Luminaria Córdoba, cuyo diseño enfatiza el estilo de la tendencia a repensar las formas clásicas de Pushkin para el desarrollo estético de luminarias para parques.

Los nombres de la serie de luminarias Córdoba se toman prestados de los nombres de los famosos centros históricos españoles de Andalucía, eso ayuda a quitar el velo del misterio de la autoría. Las luminarias están diseñadas por la división española de BL Group Europe GmbH de conformidad con los requisitos europeos de seguridad, salud y protección del medioambiente.

Es la ligereza y la elegancia, las formas modernas y la tecnología punta lo que acentúan las propiedades peculiares de la luminaria Córdoba. Su particular ventaja no es únicamente en la estética, sino también en la funcionalidad y la facilidad de mantenimiento, como el reemplazo rápido y conveniente de la unidad de fuente de alimentación y la placa de circuito LED. El deslumbramiento ha sido liquidado, todos los detalles pueden ser reemplazados y al mismo tiempo la seguridad eléctrica queda garantizada.



Figura 4.2. Recreación de un boulevard con luminarias Córdoba.



- **Características técnicas**

En la siguiente tabla se pueden ver las especificaciones dadas por el fabricante:

Flujo luminoso / lm	2000-10000
Temperatura de color / K	3000, 4000, 5700
Voltaje / V (con Frecuencia de 50Hz)	230 (120-277)
Protección contra sobrecargas /kV	4, 10 opcional
Potencia / W	14-74
Clasificación de protección	IP66
Clase de protección	I, II
Certificados	CE, RoHS, ENEC
Reducción de potencia (por control de fase) /V	1-10

Tabla 3. Datos del fabricante para la luminaria Córdoba.



Figura 4.3. Luminaria Córdoba desmontada.

- **Novedades y ventajas respecto a otras luminarias del mercado**

- Nuevo sistema de apertura de la tapa - sin tornillos y pestillos
- Junta de sellado (sin selladores de silicona)
- Reemplazo rápido en el poste de la placa de circuitos impresos y el controlador
- Vidrio templado de silicato



Figura 4.4. Diferentes estéticas para la luminaria Córdoba.

#### 4.2.- PCB

Como ya se ha detallado en el apartado 2.2.1, PCB son las siglas en inglés de placa de circuito integrado. En la PCB se establecen las conexiones eléctricas entre todos los componentes y el controlador eléctrico externo además de conducir al exterior el calor proveniente de los disipadores de calor individuales de cada LED. En el caso de las medidas en las que se basa este trabajo, se ha usado una PCB de 36 LEDs.



Figura 4.5. PCB similar a la utilizada en el experimento.

#### 4.3.- Controlador

Existen controladores para todo tipo de uso, iluminación de interior o exterior e industrial, para calles, carreteras o diversas aplicaciones automáticas.

El controlador utilizado es de la gama Xitanium/ Xtreme de Philips. Estos controladores están disponibles en potencias de 40W a 150W para la integración por cable en las luminarias para exteriores para las aplicaciones más resistentes. Operan según las especificaciones bajo amplia temperatura y rangos eléctricos para garantizar la confiabilidad.

#### 4.3.1.- Introducción

Este capítulo describe dos aspectos del diseño térmico de los controladores de Xitanium / Xtreme LED:

- El controlador LED en sí y la relación entre el punto  $T_C$  y vida útil del controlador LED
- Función de protección de temperatura del módulo (MTP) para garantizar la vida útil del módulo LED / PCB.

Para facilitar el diseño de los controladores LED, los puntos críticos de administración térmica del controlador LED se establecen en esta sección. En la fase de diseño del producto de Philips, se tomaron todas las precauciones posibles para mantener la temperatura del componente lo más baja posible. Sin embargo, el diseño de la luminaria y la capacidad de guiar el calor de la luminaria son de suma importancia. Si se tienen en cuenta estos puntos térmicos, esto garantizará el rendimiento óptimo y la vida útil del sistema.

#### 4.3.2.- Punto de temperatura del caso (punto $T_C$ )

Para lograr una vida útil y fiabilidad óptimas, es fundamental que la temperatura de los componentes en el controlador permanezca dentro de su calificación. La temperatura de la caja ( $T_C$ ) es una referencia para temperaturas de los componentes internos críticos del controlador. La ubicación del punto  $T_C$  se identifica en la etiqueta del producto. El punto  $T_C$  está marcado por el signo ‘\*’ en la etiqueta del driver.

#### 4.3.3.-Para medir $T_C$ en el punto $T_C$

La temperatura puede medirse con un termopar que está firmemente pegado a la carcasa del driver. Para una medida representativa de la temperatura debe ser estable antes de que se puedan obtener datos confiables (típicamente > 3 horas).

#### 4.3.4.- Relación entre $T_C$ y temperatura ambiente

La  $T_C$  aumenta, por aproximación, linealmente con la temperatura ambiente del controlador ( $T_{AMB}$ ). La compensación de temperatura entre el controlador  $T_{AMB}$  y  $T_C$  depende del diseño térmico de la luminaria y la potencia de salida real entregada en relación con la potencia de salida nominal especificada. Una potencia de salida más baja permite una temperatura ambiente más alta del conductor siempre que no se exceda en el controlador el valor máximo especificado de  $T_C$ .



Figura 4.6. Controlador Xitanium del fabricante Philips para luminarias LED.

#### 4.3.5.- Módulo de protección de temperatura (MTP)

- **NTC y diseño térmico**

Esta característica ayuda a proteger los LED cuando estos operan en un ambiente cálido. El diseño térmico de un módulo LED / PCB debe diseñarse de tal manera que la temperatura del módulo LED ( $T_{C-LIFE}$ ) no se excede bajo condiciones normales de aplicación. La utilización de un componente, el *Coficiente de temperatura negativa (NTC)*, tiene el propósito de ayudar a alcanzar la vida útil del módulo LED si las influencias térmicas externas resultan en que se excede la temperatura de por vida ( $T_{LIFE}$ ). Cuando esto ocurre, la salida de luz será regulada para permanecer por debajo de la temperatura crítica del conductor disminuyendo la intensidad.

Los siguientes son dos números de pieza de NTC que son compatible con los módulos LED de Philips:

1. 15 k NTC - Vishay 15 kOhm  $\pm$  2% NTC, B25 / 85 = 3700, 2381 615 54153
2. 15 k NTC - Murata 15 k, Número de pieza NCP15XW153E03RC (con una resistencia de 390 ohmios separada en serie con NTC)

- **Configuración del comportamiento de MTP (solo controladores programables)**

Es posible establecer la temperatura a la cual la función MTP está activado, definido por "MTP warn" y la pendiente, definida por "MTP max". Usando el software de Philips, MultiOne Configurator, los ajustes de la configuración pueden ser cambiados.

- **Establecer el punto de clasificación térmica a través de NTC**

El controlador LED comenzará a reducir la salida de luz cuando el NTC alcanza un valor de 2900  $\Omega$ . El NTC debe ser seleccionado de modo que 2900  $\Omega$  representa el valor crítico deseado de temperatura dentro del módulo LED o PCB del que se disponga.

Por ejemplo: El Fortimo LED DLM Gen3 +, del fabricante Philips, tiene un valor definido  $T_{C-LIFE}$  a 65 ° C. Tomando las tolerancias del NTC en resultados de la cuenta en  $\pm$  5 ° C. Esto le da un valor típico para el NTC de  $71 \pm 5$  ° C. Al elegir esta configuración de 71 ° C, nos aseguramos de que el controlador no atenuará la salida, debido a un nivel de temperatura demasiado alto, antes de que el módulo alcance los 65 ° C.

El siguiente gráfico muestra una curva típica R vs. T de un NTC resistor. Para que coincida con 2900  $\Omega$  a esta temperatura, ha sido seleccionado el NTC de 15 k $\Omega$  de los dos mencionados anteriormente.

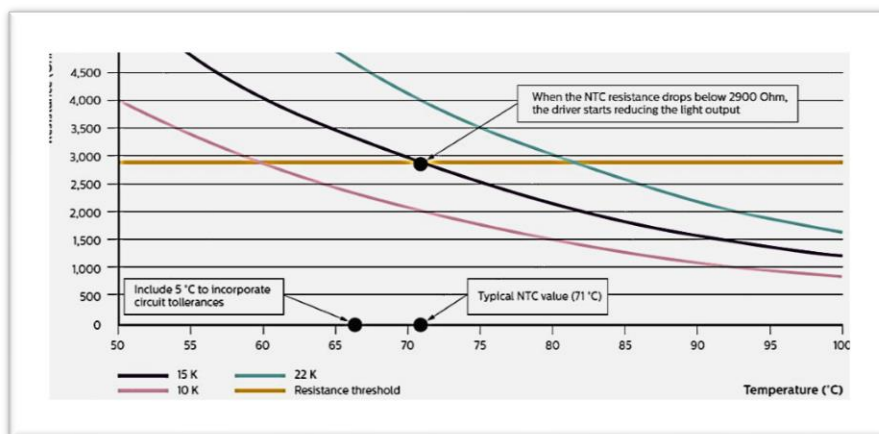


Figura 4.7. Curva típica de resistencia frente a temperatura de un resistor NTC.

#### 4.4.- Software

Como software del controlador se entiende un sistema inteligente que permite la configuración de las diferentes funciones en múltiples dispositivos de iluminación.

El configurador usado es Philips MultiOne, una herramienta universal flexible, que consta de hardware y software, que se puede usar para configurar todos los dispositivos Philips programables. Los controladores se han vuelto más inteligentes. Ahora se están integrando más opciones de control en los controladores y, por lo tanto, la configuración de última etapa es una necesidad para limitar la complejidad. Philips MultiOne Configurator es la herramienta más flexible para programar una luminaria, probarla, configurarla automáticamente en producción, leer su estado, realizar un análisis de calidad y actualizarla en el campo.

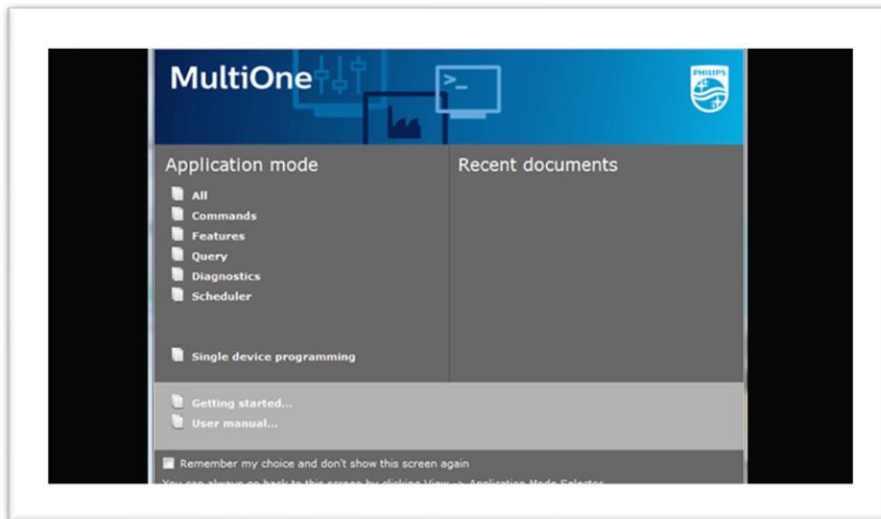


Figura 4.8. Software Multione 3.0 del fabricante Philips para la configuración del driver Xitanium utilizado en el experimento.

El sistema de control MTP que se usa en este experimento sólo es posible para drivers programables y compatibles con el software utilizado.

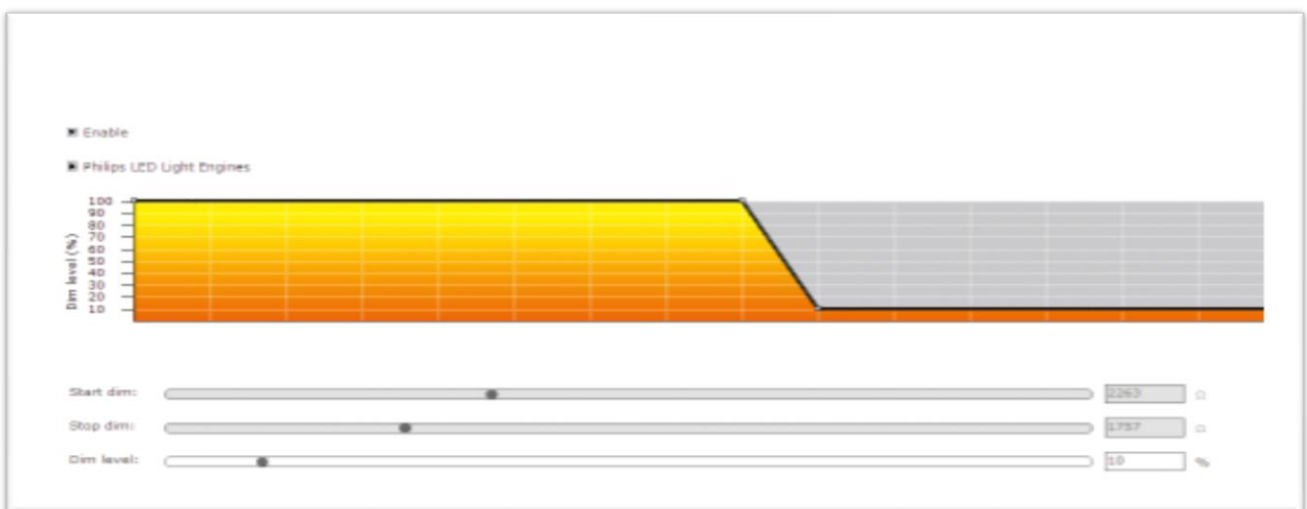


Figura 4.9. Imagen del control del sensor térmico con el configurador utilizado.

#### 4.5.- Luxómetro

Un luxómetro (light meter en inglés) es un instrumento de medición que permite medir simple y rápidamente la iluminancia real y no subjetiva de un ambiente. La unidad de medida es el lux (lx). Contiene una célula fotoeléctrica que capta la luz y la convierte en impulsos eléctricos, los cuales son interpretados y representada en un display o, como es nuestro caso, directamente en la pantalla del ordenador en el que se analizan los datos y con el que se maneja también el software del controlador.



Figura 4.10. Luxómetro similar al utilizado en el experimento.

Un lux es una unidad de medida que se usa en fotometría como medida de iluminancia. En el Sistema Internacional la equivalencia del lux es:

$$1 \text{ lx} = 1 \frac{\text{lm}}{\text{m}^2} = 1 \frac{\text{cd} \cdot \text{sr}}{\text{m}^2}$$

#### 4.6.- Vatímetro

El vatímetro es un instrumento electrodinámico para medir la potencia eléctrica o la tasa de suministro de energía eléctrica de un circuito eléctrico dado. El dispositivo consiste en un par de bobinas fijas, llamadas «bobinas de corriente» o amperométrica, y una bobina móvil llamada «bobina de potencial» o voltimétrica. En el experimento realizado las medidas de potencia además de visualizarse en el display del propio dispositivo también son presentadas por pantalla en el ordenador.



Figura 4.11. Vatímetro digital.

#### 4.7.- Termopares

Un termopar (llamado también Termocupla por traducción del término inglés Thermocouple) es un transductor (Dispositivo que tiene la misión de recibir energía de una naturaleza eléctrica, mecánica, acústica, etc., y suministrar otra energía de diferente naturaleza, pero de características dependientes de la que recibió) formado por la unión de dos metales distintos que produce una diferencia de potencial muy pequeña (del orden de los milivoltios) que es función de la diferencia de temperatura entre uno de los extremos denominado «punto caliente» o «unión caliente» o de «medida» y el otro llamado «punto frío» o «unión fría» o de «referencia» . Su funcionamiento está basado en el efecto Seebeck.



Figura 4.12. Ejemplo de termopar.

#### 4.8.- Multímetro

Un multímetro, también denominado polímetro o tester, es un instrumento eléctrico portátil para medir directamente magnitudes eléctricas activas, como corrientes y potenciales (tensiones), o pasivas, como resistencias, capacidades y otras. Las medidas pueden realizarse para corriente continua o alterna y en varios márgenes de medida cada una. Los hay analógicos y posteriormente se han introducido los digitales cuya función es la misma, con alguna variante añadida.



Figura 4.13. Multímetro.

## Capítulo 5.- Dispositivo de detección de luz

El primer problema que se plantea al llevar a cabo el experimento es qué dispositivo utilizar para que la luz sea detectada y en consecuencia se pueda regular a voluntad según las necesidades marcadas. Para ello se analizan las ventajas e inconvenientes de los siguientes componentes electrónicos:

### 5.1.- Fotorresistencia (LDR)

La resistencia dependiente de la luz o en inglés “Light dependent Resistor (LDR)” es una resistencia que varía su valor dependiendo de la cantidad de luz que lo ilumina. Los valores de una fotorresistencia cuando está totalmente iluminada y cuando está totalmente a oscuras varía, pero no pasa de 1 K  $\Omega$  en iluminación total y no es menor a 50 K  $\Omega$  cuando está a oscuras. El valor de la fotorresistencia (en Ohmios) no varía de forma instantánea cuando se pasa de luz a oscuridad o al contrario, y el tiempo que dura en este proceso no siempre es igual si se pasa de oscuro a iluminado o si se pasa de iluminado a oscuro, por tanto su precisión y rapidez son limitadas.

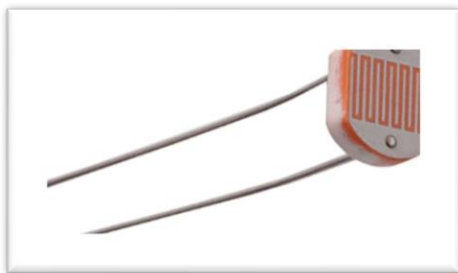


Figura 5.1. Fotorresistencia (LDR).

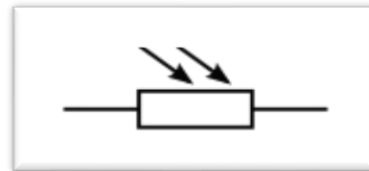


Figura 5.2. Representación con su símbolo eléctrico de un LDR.

### 5.2.- Fotodiodo

Un fotodiodo es un semiconductor construido con una unión PN, sensible a la incidencia de la luz visible o infrarroja. Para que su funcionamiento sea correcto se polariza inversamente, con lo que se producirá una cierta circulación de corriente cuando sea excitado por la luz. Debido a su construcción, los fotodiodos se comportan como células fotovoltaicas, es decir, iluminados en ausencia de una fuente exterior de energía generan una corriente muy pequeña con el positivo en el ánodo y el negativo en el cátodo



Figura 5.3. Fotodiodo.

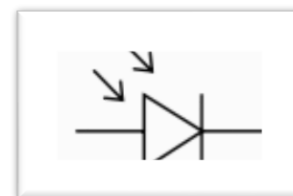


Figura 5.4. Representación con su símbolo eléctrico de un fotodiodo.



Un fotodiodo es una unión PN o estructura P-I-N. Cuando un haz de luz de suficiente energía incide en el diodo, excita un electrón dándole movimiento y crea un hueco con carga positiva. Si la absorción ocurre en la zona de agotamiento de la unión, o a una distancia de difusión de él, estos portadores son retirados de la unión por el campo de la zona de agotamiento, produciendo una *fotocorriente*.

Los diodos tienen un sentido normal de circulación de corriente, que se llama *polarización directa*. En ese sentido el diodo deja pasar la corriente eléctrica y prácticamente no lo permite en el inverso. En el fotodiodo la corriente (que varía con los cambios de la luz) es la que circula en sentido inverso al permitido por la juntura del diodo. Es decir, para su funcionamiento el *fotodiodo es polarizado de manera inversa*. Se producirá un aumento de la circulación de corriente cuando el diodo es excitado por la luz. En ausencia de luz la corriente presente es muy pequeña y recibe el nombre de *corriente de oscuridad*.

### 5.3.- Fototransistor

Un fototransistor es en esencia lo mismo que un transistor normal, solo que puede trabajar de 2 maneras diferentes:

- Como un transistor normal con la corriente de base ( $I_B$ ) (modo común)
- Como fototransistor, cuando la luz que incide en este elemento hace las veces de corriente de base. ( $I_p$ ) (modo de iluminación).



Figura 5.5. Fototransistor



Figura 5.6. Representación con su símbolo eléctrico de un fototransistor.

El transistor consta de tres partes dopadas artificialmente (contaminadas con materiales específicos en cantidades específicas) que forman dos uniones bipolares: el *emisor* que emite portadores, el *colector* que los recibe o recolecta y la tercera, que está intercalada entre las dos primeras, modula el paso de dichos portadores (*base*). A diferencia de las válvulas, el transistor es un dispositivo controlado por corriente y del que se obtiene corriente amplificada. En el diseño de circuitos a los transistores se les considera un elemento activo, a diferencia de los resistores, condensadores e inductores que son elementos pasivos.

Se pueden utilizar las dos en forma simultánea, aunque el fototransistor se utiliza principalmente con la pata de la base sin conectar. ( $I_B = 0$ )

Si se desea aumentar la sensibilidad del transistor, debido a la baja iluminación, se puede incrementar la corriente de base,  $I_B$ , con ayuda de polarización externa.

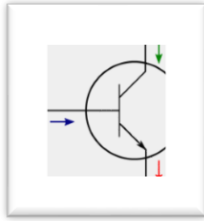


Figura 5.7. Esquema de corrientes de un fototransistor.

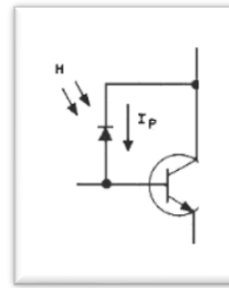


Figura 5.8. Circuito equivalente de un fototransistor.

El circuito equivalente de un fototransistor es un transistor común con un fotodiodo conectado entre la base y el colector, con el cátodo del fotodiodo conectado al colector del transistor y el ánodo a la base.

#### 5.4.- Análisis de los posibles dispositivos

En la siguiente tabla se muestran algunas características clave de cada componente que se han tenido en cuenta para la elección.

	Fotorresistencia	Fotodiodo	Fototransistor
Inmediatez de respuesta	rápida	Muy rápido	Muy rápido
Coste medio (unidad)	1.80€	6.99€	3.29€
Linealidad	poco	Casi	poco
Respuesta espectral (pico) /nm	570	550	880
Parámetro que modifica al ser iluminado	Resistencia	Corriente	Corriente

Tabla 3. Comparativa de factores que influyen en la elección del detector.

Se requiere que los cambios no sean repentinos, para no pasar automáticamente de luz sin modificar a totalmente oscurificada. También se busca que el espectro luminoso se asemeje al del ojo humano para tener una buena visibilidad. Un parámetro fácilmente ajustable como es la resistencia y aprovechando que la pieza del NTC tiene su propia resistencia, puede ser un parámetro común que modificar. Además, el coste es uno de los factores más importante en cualquier experimento que verse sobre el ahorro. Por todo ello el dispositivo seleccionado como detector es la **fotorresistencia o LDR**.

# Medidas realizadas

Como se ha mencionado en el resumen / abstract, el objetivo es desarrollar un sistema que monitorice la luz producida por los leds de una luminaria de viario para compensar la progresiva depreciación de la fuente lumínica, o la variación del flujo luminoso debido al cambio de la temperatura ambiental, mediante el incremento o reducción de la corriente de alimentación de los leds.

Para ello, el primer paso será seleccionar un detector de luz adecuado a nuestro problema. En el capítulo 5 de este trabajo se han señalado los dispositivos planteados para tal efecto, resultando la *fotorresistencia* como el más conveniente.

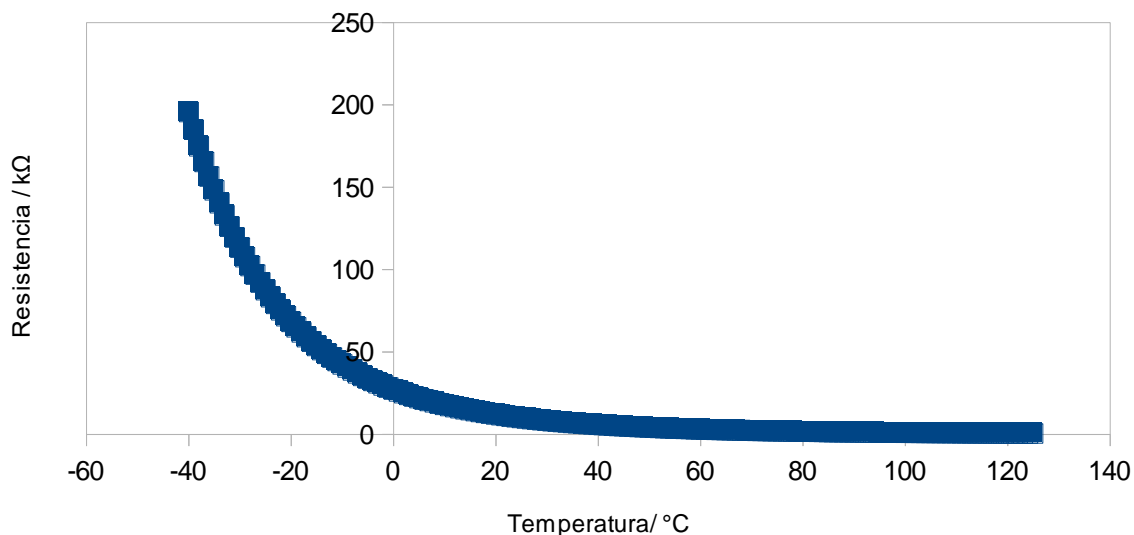
## Capítulo 6.- Medidas previas

### 6.1.- Variación de la resistencia del NTC con la temperatura

Usando el componente NTC del que se han dado detalles en el capítulo 4.3.5. se regulará la corriente de alimentación de los LED. El número de pieza de NTC utilizado y que es compatible con los módulos LED usados es:

- 15 k NTC - Murata 15 k, Número de pieza NCP15XW153E03RC (con una resistencia de 390 ohmios separada en serie con NTC)

#### Variación de la resistencia frente a la temperatura



Gráfica 1.

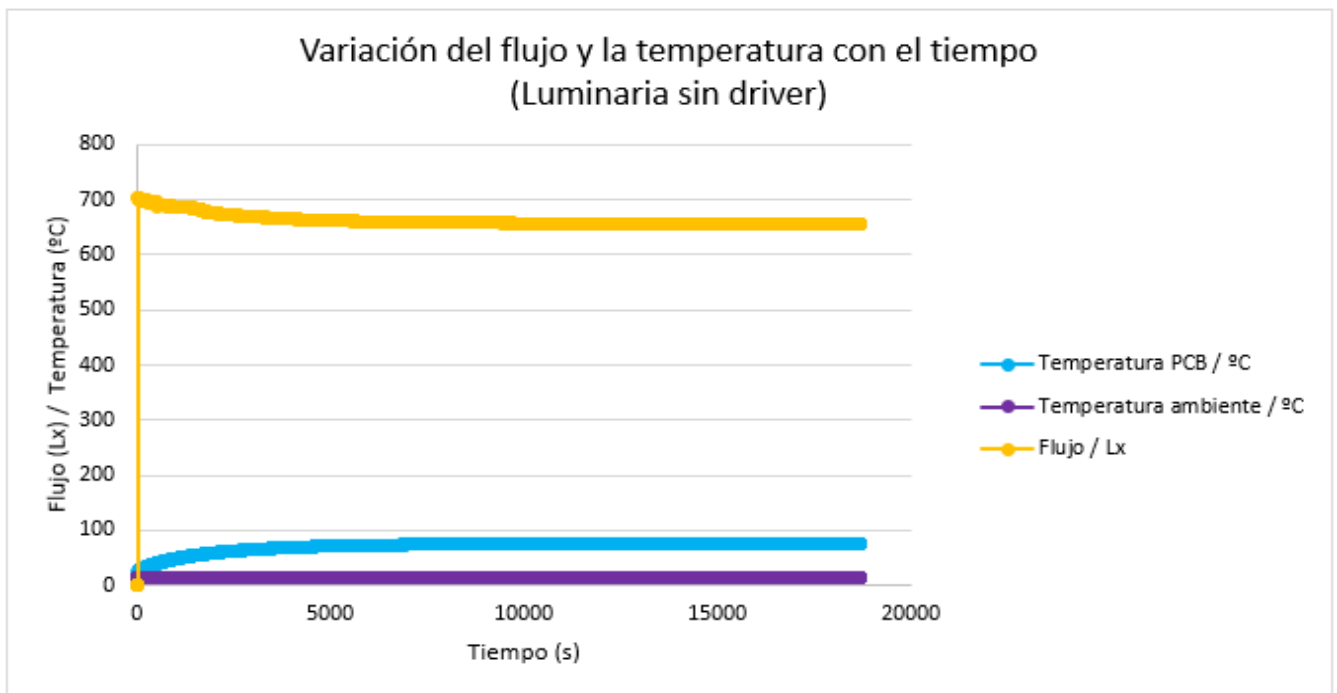
Esta gráfica formada con la tabla de datos dada por el fabricante será importante ya que nos indica la característica resistencia- temperatura del módulo que estamos usando. Atendiendo a la gráfica podemos determinar la temperatura crítica del módulo de tal forma que nos aseguramos de que el controlador no

atenuará la salida, debido a un nivel de temperatura demasiado alto, antes de que el módulo alcance dicha temperatura.

En nuestro caso, disponemos de un NTC de  $5000 \Omega$ , y ese valor al igual que en la figura 4.7, corta con el punto  $T_{LIFE}$ . En la situación del experimento que se describe el valor en el que la recta de  $5 k \Omega$  corta a la gráfica es de  $45 \text{ }^\circ\text{C}$ . Con este análisis se asegura que el nivel de temperatura a partir del cual comenzará la atenuación de la salida es el correcto, ya que no será antes de que el módulo alcance los  $45 \text{ }^\circ\text{C}$ .

## 6.2.- Medida de los parámetros de emisión, consumo y temperatura de la luminaria sin driver

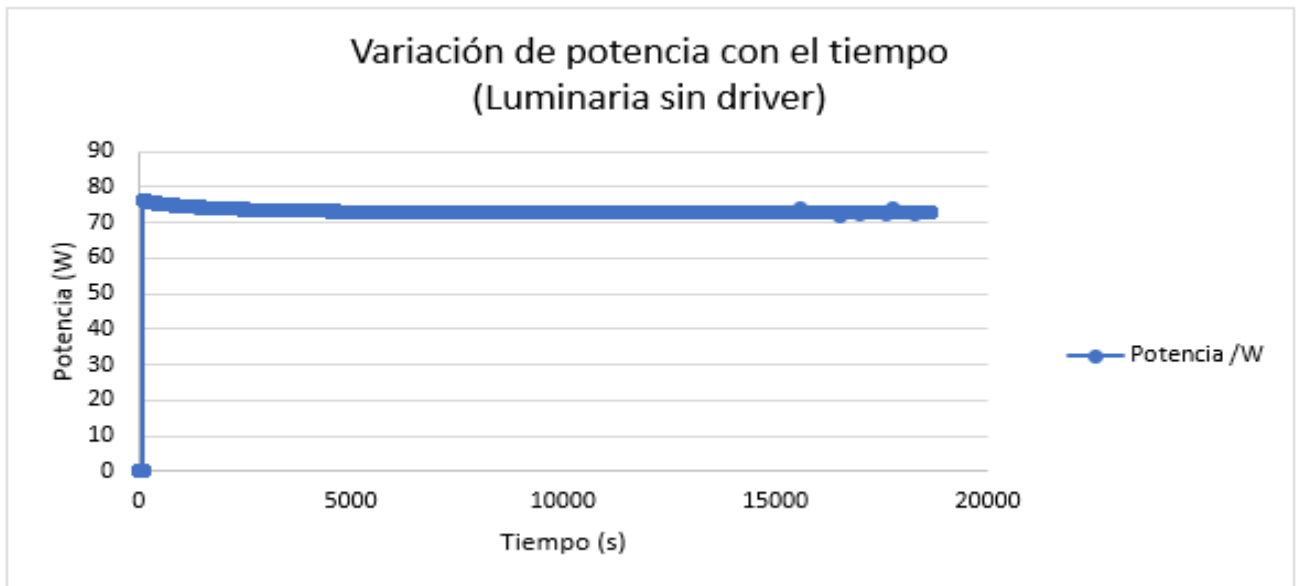
Para comenzar, se hace una medida de los parámetros que se desean analizar de la luminaria con el driver desconectado para ver la variación de flujo emitido, el consumo y el incremento de temperatura de los LED a medida que estos se calientan por el paso de corriente y la absorción producida como resultado de la “trampa de luz” del chip.



Gráfica 2.

En la gráfica obtenida, puede verse el fenómeno descrito en el resumen al comienzo de este trabajo, como a medida que el módulo LED se calienta, el flujo luminoso emitido disminuye, pero cuando alcanzan una temperatura constante el flujo se estabiliza.

Como parte del interés del proyecto es el ahorro energético, se analiza a su vez la variación de potencia consumida por la luminaria puesto que la tarificación del gasto se hace en función de los kW de potencia que se consumen. Este hecho puede verse en la gráfica 3.



Gráfica 3.

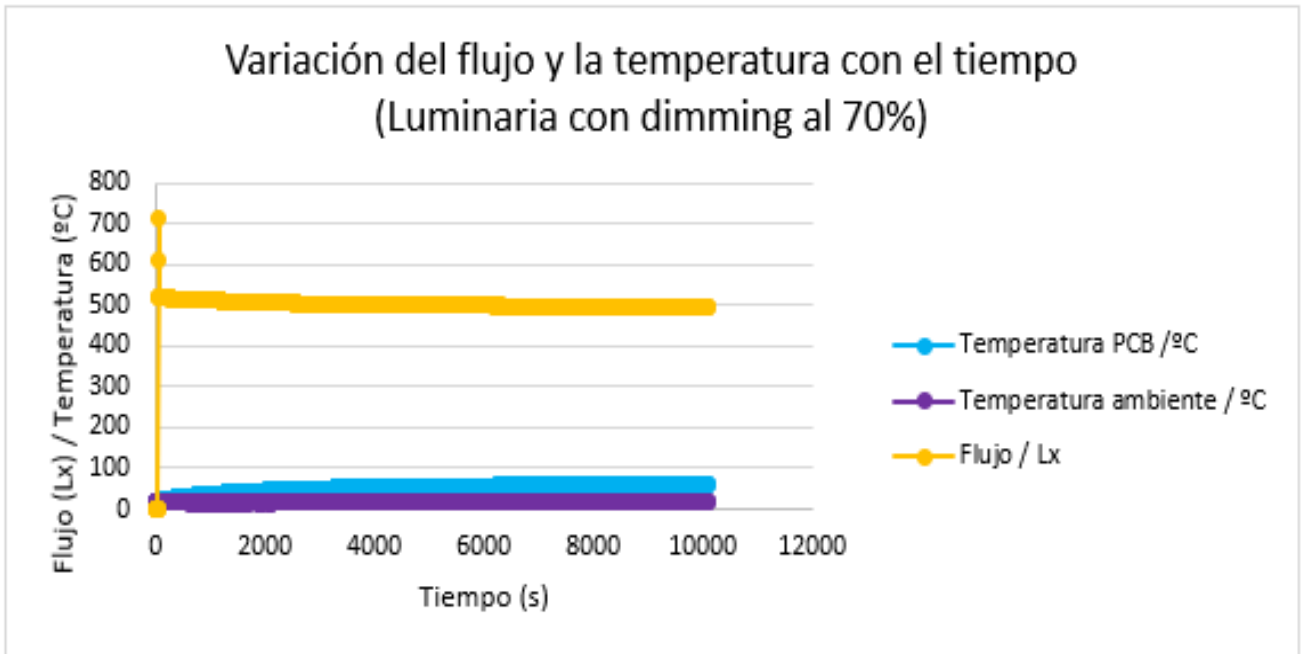
El consumo en vatios va relacionado con la emisión de flujo luminoso, como puede apreciarse al comparar las gráficas 2 y 3. Al disminuir el flujo por la variación de temperatura, disminuye el consumo, aunque prácticamente permanece constante al no sufrir una variación demasiado acusada. A su vez es de interés señalar que al no tener conectado el driver, la luminaria emite a plena capacidad, y el consumo, es el máximo posible para la temperatura que se encuentra la luminaria.

Con el fin de tener un consumo eficiente, en la siguiente medida se conectará el driver y se seleccionará con ayuda del software descrito anteriormente la función de atenuación o “nivel de dimming” que disminuya el consumo. Al usar el módulo NTC se recurre al análisis efectuado en el capítulo 6.1. asegurando que la luminaria no será atenuada antes de tiempo, no poniendo así en peligro la visión de los usuarios de la vía, es decir, no se atenuará la salida antes de alcanzar la temperatura que se ha llamado  $T_{LIFE}$ , en este caso  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ . El nivel de dimming seleccionado será del 70% que permitirá un ahorro considerable en el consumo sin comprometer la visibilidad.

### 6.3.- Medida de los parámetros de emisión, consumo y temperatura de la luminaria con una atenuación del 70%

Al finalizar el apartado 6.2. ya se indica el procedimiento a seguir en esta nueva toma de datos. Para tal efecto se indica en el software del controlador el nivel de atenuación deseado como se ve en la figura 4.9. mientras que el resto de los parámetros se dejan sin tocar para que las condiciones de la luminaria, que ahora si utiliza el componente NTC, sean las mismas que en la medida anterior.

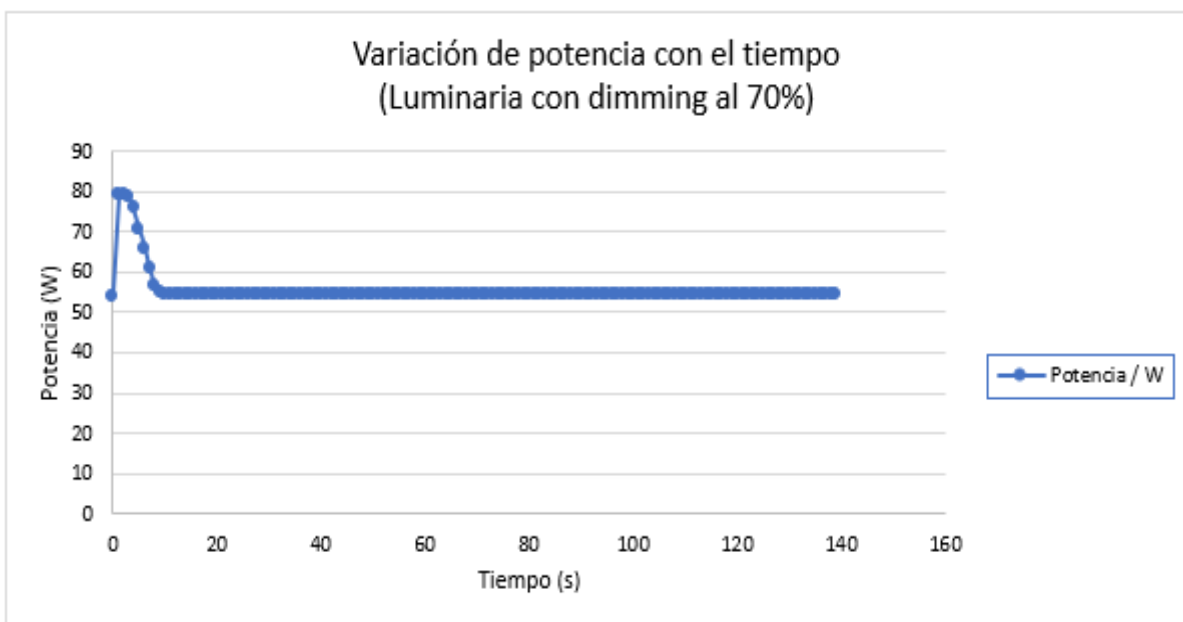
En la gráfica 4 puede verse la gráfica obtenida con los datos recopilados de la medida.



Gráfica 4.

Analizando la nueva gráfica se observan los fenómenos esperados. En un principio, la luminaria comienza a emitir de la misma forma que en la medida anterior mientras que el módulo LED comienza a calentarse. Al alcanzar la temperatura crítica, entra en funcionamiento el controlador, atenuando la salida al 70% de acuerdo con lo seleccionado previamente en el software Philips Multione. Lo que se sigue observando es la continua depreciación de la fuente lumínica a medida que aumenta la temperatura como en el caso anterior.

Se pasa ahora a analizar lo que sucede en este caso con el consumo.



Gráfica 5.

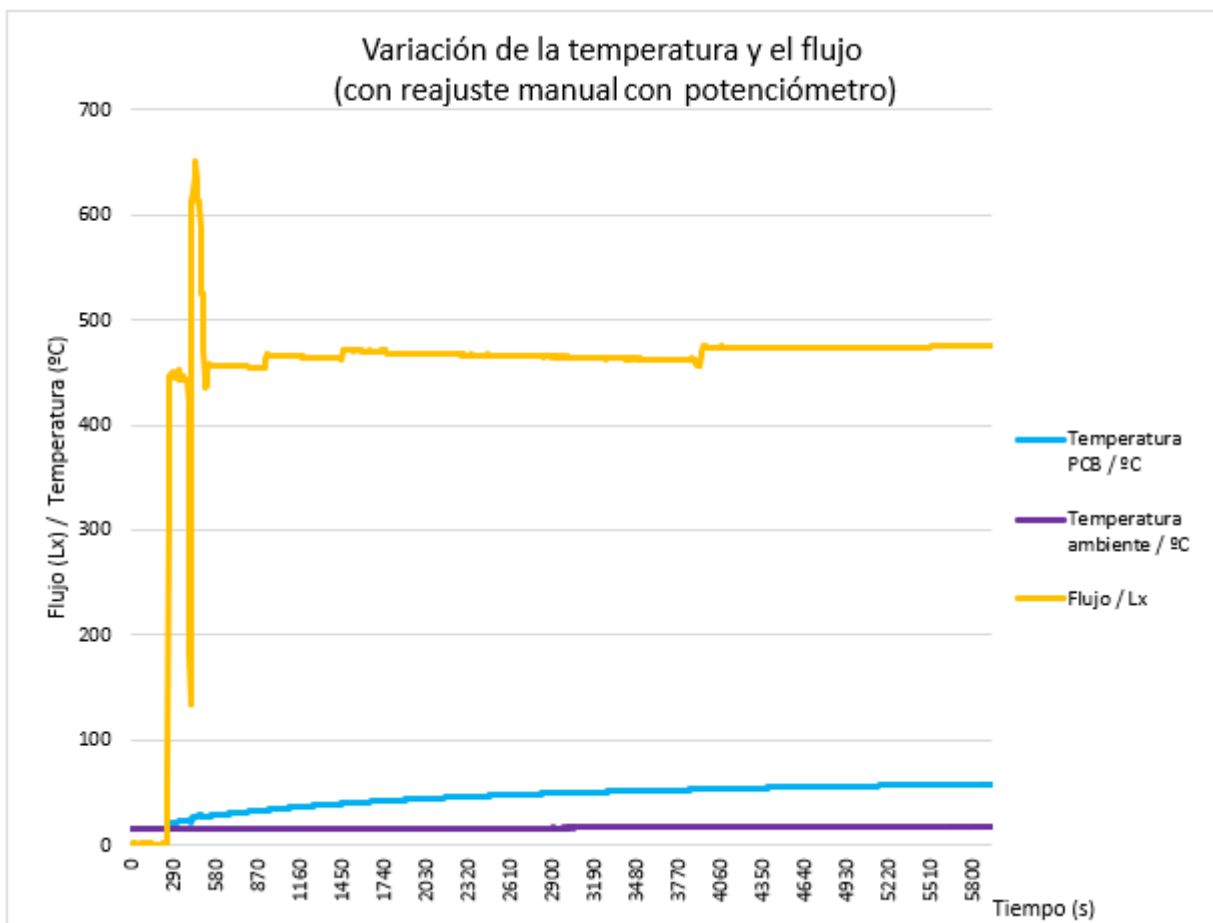
El consumo de potencia sube al encender la luminaria hasta valores similares a los de la gráfica 3, pero en el momento que entra en juego el papel del NTC el consumo baja y permanece en un valor, correspondiente a la nueva situación emisora con dimming del 70% y se mantiene en ese nivel de forma prácticamente constante.

#### 6.4.- Medida de los parámetros de emisión, consumo y temperatura introduciendo un potenciómetro y ejerciendo un control manual del conjunto.

Una vez realizadas las primeras medidas que se pueden considerar parte de la preparación o “set up” se pasa ahora a ver el efecto que tiene introducir el elemento que hemos seleccionado para detectar el flujo luminoso, que es la fotorresistencia o LDR.

Como paso previo a tener el sistema optoelectrónico que funcione de forma autónoma, el alumno será el que actúe de “ente inteligente” que realice los cambios adecuados conforme a la variación de parámetros, es decir, que el alumno visualizará en pantalla la depreciación de la fuente lumínica y será el encargado de, con la ayuda de un potenciómetro, modificar la resistencia que ofrece el conjunto al paso de la corriente eléctrica de forma que con este ajuste manual se mantenga constante el flujo emitido por la luminaria.

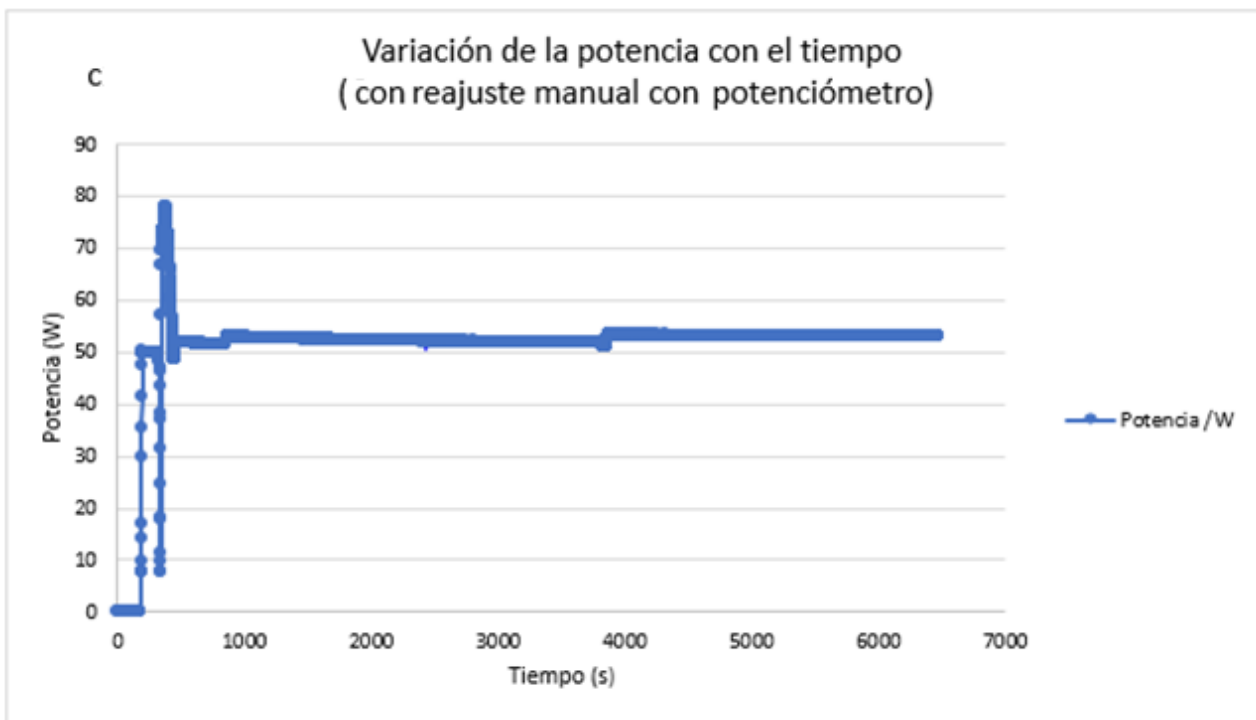
El resultado del experimento puede verse en la gráfica 6.



Gráfica 6.

En esta última gráfica se ve como el sistema esta desconectado y en el momento de conectarlo sufre una serie de fluctuaciones debidas a la conexión del sistema a la tensión de red. Una vez estabilizado y alcanzada la temperatura adecuada entra en funcionamiento la función de atenuación que como en el caso anterior sigue siendo del 70% para garantizar visibilidad sin problemas y bajo consumo. A partir de ahí el sistema evoluciona con el tiempo de la forma que ya se conoce, pero ahora el sistema funcionaría en lazo cerrado por medio manual y el alumno es el encargado de corregir la depreciación debida al aumento de temperatura. Puede verse como los pequeños escalones de la gráfica plasman el reajuste manual efectuado modificando la resistencia del potenciómetro al ver que el flujo disminuye demasiado del valor previsto.

Se pasa ahora a ver la evolución del consumo con el tiempo.



Gráfica 7.

De igual forma a lo descrito anteriormente, el consumo sigue una tendencia paralela a la del flujo. Se observa claramente el momento previo al encendido, las fluctuaciones del encendido y el momento en el que comienza la atenuación. También se ve en el reajuste manual como se intenta mantener un consumo prácticamente constante en el tiempo y los pequeños “escalones” consecuencia de la manipulación.

### 6.5.- Toma de datos necesarios de resistencia y luxes a diferentes corrientes de alimentación para la parte final del experimento

Una vez hechas las medidas anteriores se necesita analizar los datos obtenidos y tomar otros nuevos para introducirlos en el software del controlador y que este ya se ocupe de hacer de forma autónoma lo que en el apartado anterior se ha hecho manualmente a través de la LDR que será el sensor que haga que el sistema funcione en lazo cerrado.

Se cambiará la intensidad de corriente que recorre la luminaria y se medirá con el luxómetro como responde la luminaria en su emisión de luz. También se medirá como varía el valor de resistencia en  $k \Omega$  de la



fotorresistencia o LDR. Será de interés la situación en la que el flujo emitido se asemeje a los valores correspondientes a la atenuación al 70% que se han obtenido anteriormente.

Al comenzar tendremos estos dos datos de la luminaria presentes:

Emisión sin atenuación	618,0 lx
Emisión con atenuación del 70%	432,6 lx

Tabla 4. Datos de emisión de la luminaria.

Se presentan en sendas tablas las medidas de flujo luminoso y resistencia para distintas corrientes de alimentación y las medidas de la resistencia que presenta el módulo de la luminaria para diferentes niveles de atenuación o dimming.

I (mA)	Lux	R (k $\Omega$ )	NTC (dimming lV)	R <sub>DRIVER</sub> ( $\Omega$ )
700	632,1	0,828	50%	1005
650	580,8	0,878	60%	1187
600	541,0	0,923	<b>70%</b>	<b>1369</b>
550	506,8	0,967	80%	1551
500	465,9	1,020	90%	1733
<b>450</b>	<b>429,0</b>	<b>1,079</b>	100%	1915
400	385,0	1,154		
350	339,8	1,240		
300	295,5	1,338		
250	253,1	1,436		
200	206,0	1,549		

Tabla 5. Variación de resistencia y flujo para diferentes corrientes. / Tabla 6. Resistencia del conjunto para diferente nivel de dimming.

Al comparar los datos previos de la tabla 4 con los recogidos en esta parte del experimento que se presentan en la tabla 5, se está en disposición de seleccionar los datos adecuados para el potenciómetro asociado al LDR, como los que se deben introducir en el software del controlador: resistencia para una atenuación del 70% y corriente de alimentación.

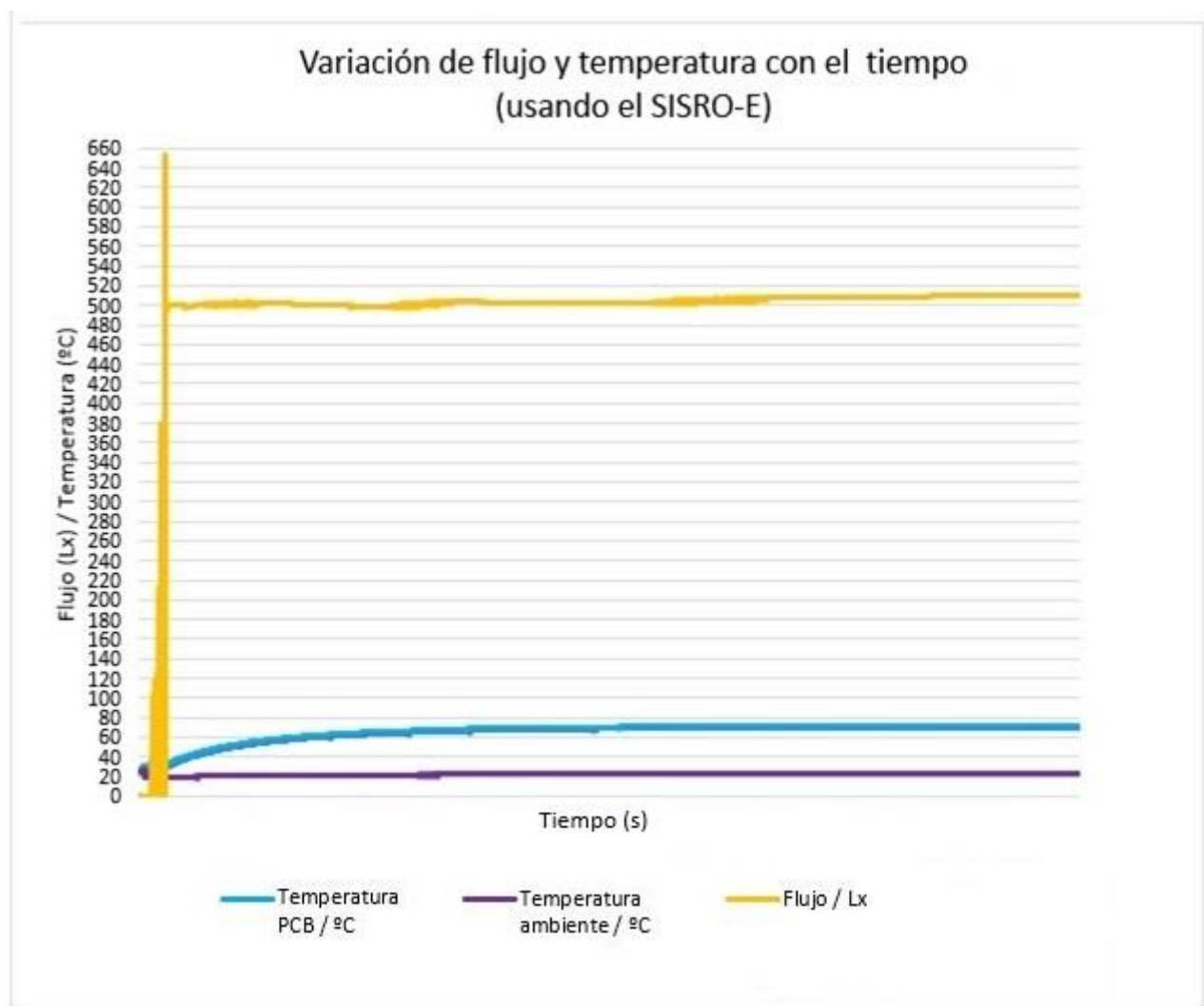
Tras todos estas mediciones y tomas de datos previas se procede a probar el sistema en estudio.

## Capítulo 7.- Pruebas con el sistema de realimentación optoelectrónico (SISRO-E)

### 7.1.- Primera medida de los parámetros de la luminaria con el SISRO-E

Tras todas las medidas previas se usa ya el sistema de realimentación optoelectrónico que se ha desarrollado, al que se le llamará a partir de este punto SISRO-E para abreviar. El sistema ahora ya es usado en lazo cerrado de forma automática, ya que la salida de luz es controlada por una referencia, en este caso la señal captada por la fotorresistencia es la que juega ese papel. No sólo la fotorresistencia forma parte del SISRO-E, los componentes del driver y el software de control forman parte fundamental del dispositivo de control de la luminaria.

Para evaluar su funcionamiento, se miden los mismos parámetros de los apartados anteriores. Es importante obtener un gran número de valores para poder observar si el sistema es estable o sufre alteraciones con facilidad.

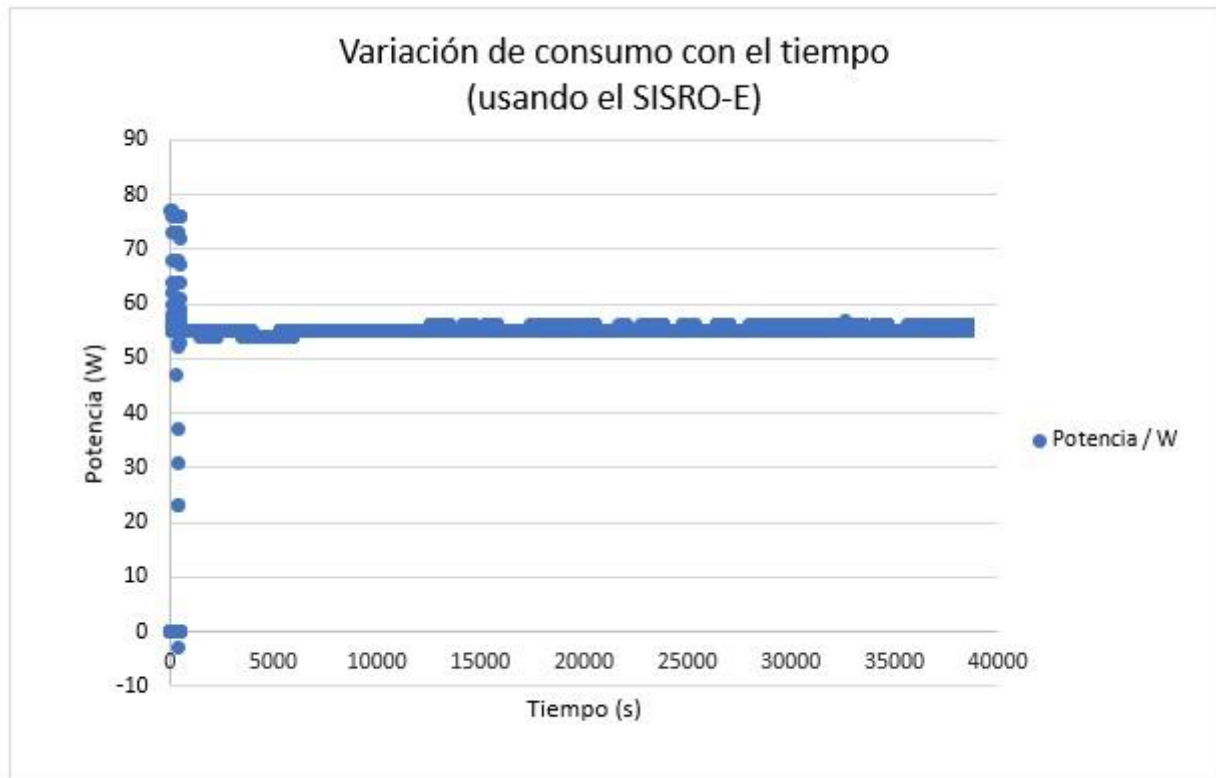


Gráfica 8.

Analizando la gráfica de los datos obtenidos en condiciones normales (a 25 °C de temperatura ambiente) el módulo LED que se encuentra a la misma temperatura empieza a calentarse debido al paso de corriente, pero al contrario que al principio del experimento, el flujo luminoso no decae. La evolución del flujo en un principio es la misma que anteriormente, al encender la luminaria comienza la emisión normalmente hasta

que entra en juego el controlador y se atenúa la emisión al 70%. Una vez en este punto, el sistema mantiene niveles aproximadamente constantes durante las horas que se mantiene el experimento. Para las medidas del capítulo 7 se han tomado unos 10000 puntos de media (lo que equivale aproximadamente a un tiempo de medida de 3h).

También se evalúa el consumo utilizando el SISRO-E, para ver si se sigue manteniendo constante y con un nivel de ahorro similar al visto con anterioridad.



Gráfica 9.

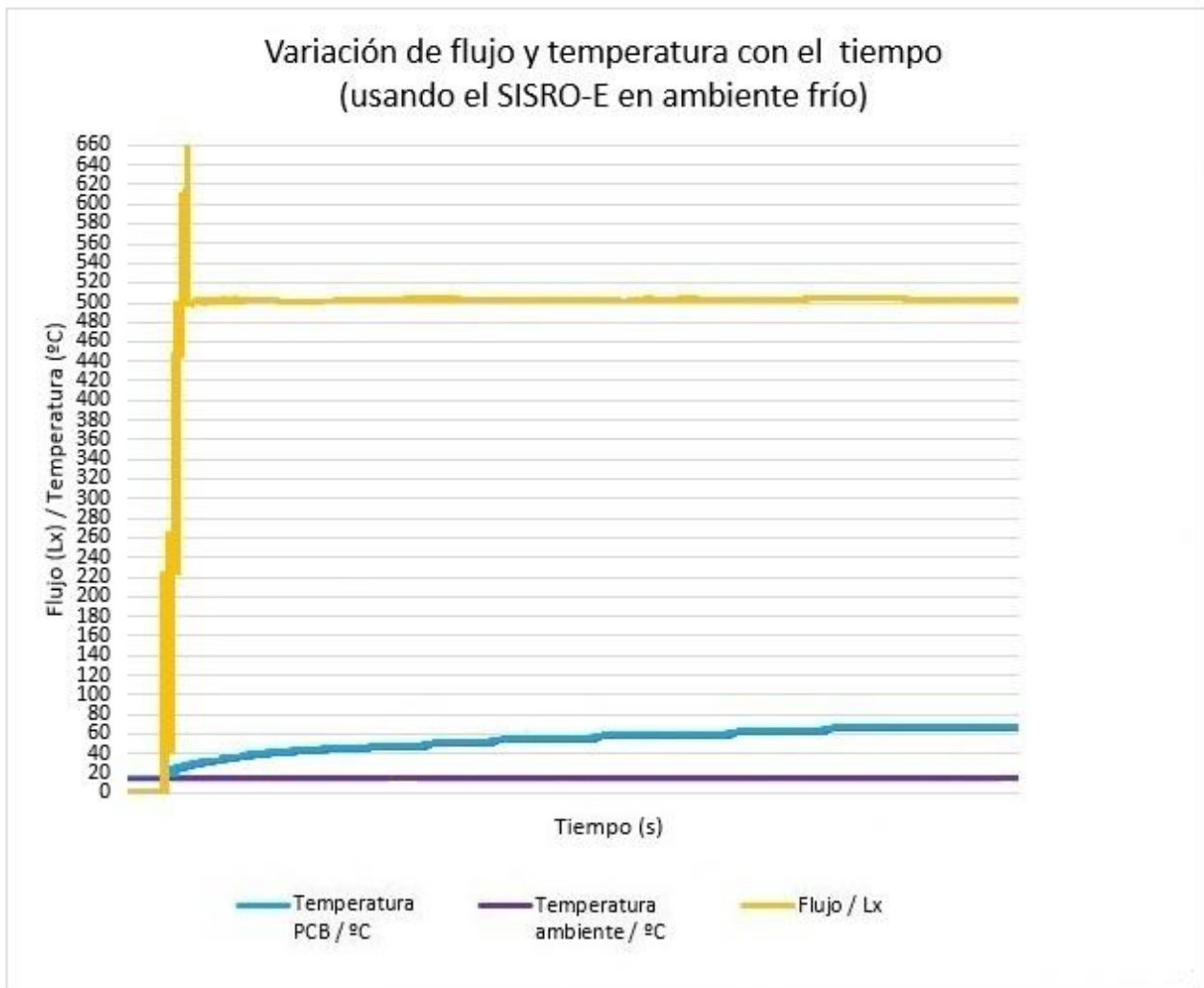
Analizando la gráfica 9 que muestra la variación del consumo con el tiempo, puede verse un consumo prácticamente constante en el tiempo salvo por los datos tomados al arrancar el experimento que no son válidos hasta que se estabiliza la luminaria y los aparatos de medida.

Aunque no se haya mostrado, ni se haya mencionado en el capítulo 4.6. por no ser muy relevante, el vatímetro del que disponemos no sólo toma los datos de potencia si no también toma los datos del factor de potencia y los muestra en el display. En el caso de esta medida el factor de potencia en todo momento se encuentra en torno a 0.96, lo que implica que, aunque el valor ideal del factor de potencia es 1 e indicaría que toda la energía consumida por los aparatos se transforma en trabajo, este valor obtenido *es adecuado*, pero si fuese menor que 0,96 significa un mayor consumo de la energía necesaria para producir un trabajo útil.

Tras comprobar el funcionamiento del SISRO-E, se procede a probarlo en un ambiente frío y en un ambiente más cálido, ya que las luminarias están sometidas a diferente temperatura en función de la estación del año en la que se encuentren o la latitud en la que estén instaladas.

## 7.2.- Medida de los parámetros de la luminaria con el SISRO-E en ambiente frío

Para poder probar el sistema diseñado en un ambiente frío se utiliza el aire acondicionado para refrigerar el laboratorio que se usa durante el experimento. Con él sólo se puede bajar la temperatura hasta estar a unos 15 °C. En invierno, y dependiendo de la zona del planeta en la que se encuentre la luminaria, la temperatura ambiente puede llegar a ser mucho menor, pero al carecer de métodos para bajar más la temperatura a la que se encuentra el laboratorio, se usará esta medida como referencia del funcionamiento para ambientes fríos.

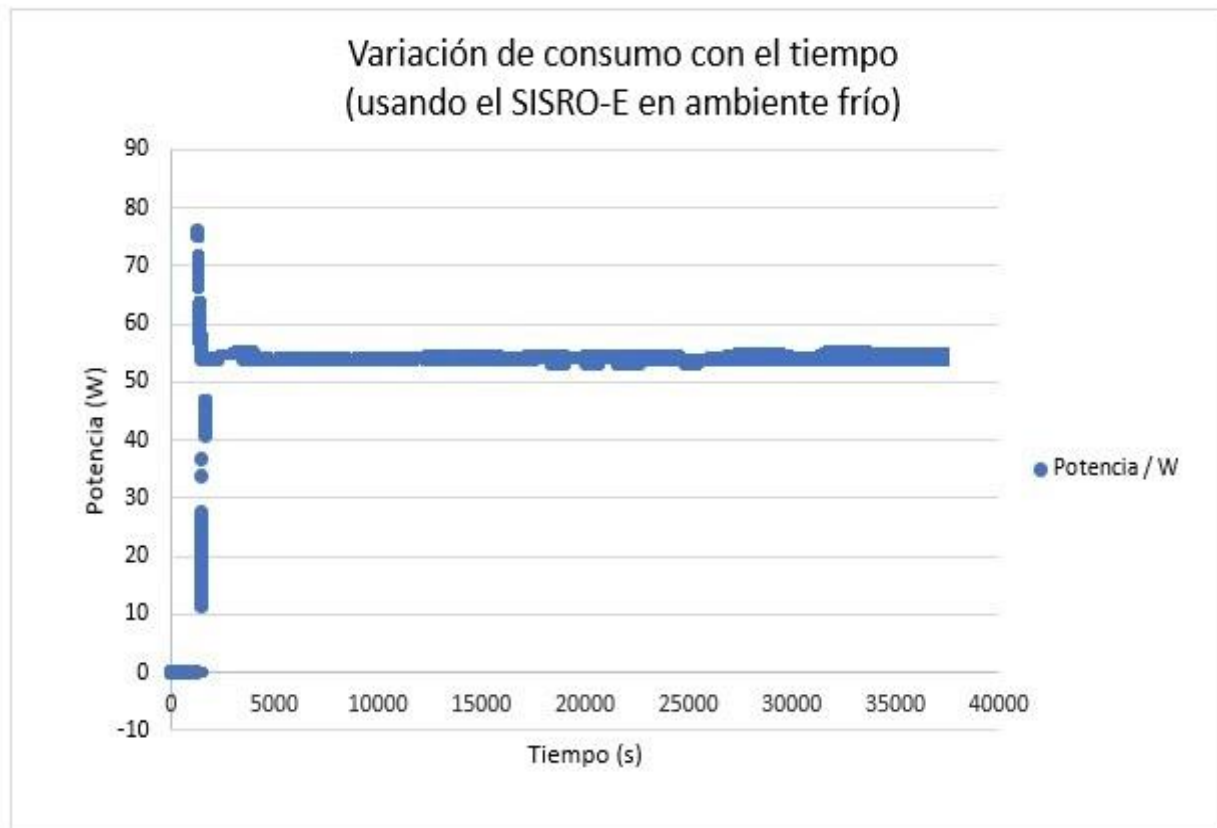


Gráfica 10.

La gráfica resultante es muy similar a la obtenida al probar el sistema por primera vez. Puede verse como el flujo es nulo hasta el encendido de la luminaria y como al entrar en funcionamiento el driver activando la función de dimming al 70% el flujo desciende. Tras ese punto el SISRO-E se encarga de mantener la emisión del mismo nivel de flujo luminoso de forma autónoma. A su vez la temperatura de los LED sube, pero esto no implica como al principio un descenso del flujo luminoso que es lo que se quiere conseguir con el diseño del SISRO-E.

Como en capítulos anteriores, además, tras la variación de flujo luminoso y temperatura se analiza el consumo de potencia en una gráfica aparte.

El interés de la gráfica de potencia obtenida en este apartado y en el siguiente será ver que como la potencia consumida sigue dependiendo del flujo emitido (que a su vez depende de la temperatura), pero el sistema diseñado corrige las variaciones de flujo debidas a las fluctuaciones de temperatura sea cual sea la temperatura ambiental a la que el sistema se encuentre.



Gráfica 11.

Puede verse que al igual que el flujo luminoso y la temperatura evolucionan de forma similar en este apartado 7.2. que en el 7.1. le sucede lo mismo al análisis de las gráficas de potencia de ambos capítulos.

Tanto la potencia sigue una evolución constante tras el encendido (se obvian los puntos del comienzo del experimento por tratarse de puntos que no marcan aún los valores correctos hasta estabilizarse los instrumentos de medida) como el factor de potencia sigue fluctuando en valores del intervalo 0.95-0.96.

Por lo tanto, sólo queda ver si la evolución con el tiempo de las magnitudes en estudio es la misma en un ambiente cálido, lo cual es examinado en el siguiente capítulo.

### 7.3.- Medida de los parámetros de la luminaria con el SISRO-E en ambiente cálido

Con el objetivo de conseguir elevar la temperatura del laboratorio, se utiliza uno o varios calefactores, con los que se consigue una temperatura cercana a los 40 °C, aunque algo inferior. Tanto en latitudes cercanas al ecuador, como en climas extremos, incluso en climas más suaves que puedan sufrir olas de calor en verano, la temperatura podrá subir de 40 °C, pero como en el capítulo anterior nos puede servir como referencia la temperatura alcanzada en el caso en estudio sobre qué sucedería con el sistema diseñado operando en un ambiente cálido.



Gráfica 12.

Lo más llamativo de la gráfica 12 es que en un principio ambos valores de temperatura, como en las experiencias previas coinciden, y desde el encendido de la luminaria el calentamiento de los LED respecto a la temperatura ambiente es escaso. Sea esta variación más pequeña como en este apartado, o más grande como en el capítulo anterior, comparando las gráficas 12 y 10, puede verse que no influye en la emisión de flujo, puesto que este se sitúa en niveles similares y permanece prácticamente constante a lo largo de todo el experimento.

Como comprobación final queda ver qué sucede con el consumo en ambientes cálidos, que puede verse en la gráfica 13.



Gráfica 13.

Tanto el consumo como el factor de potencia siguen la misma tendencia en este último experimento como en la primera prueba y en la prueba en ambiente frío. Por lo tanto, una vez hechas todas las medidas que se han planteado, queda extraer las conclusiones del estudio del sistema de realimentación optoelectrónico diseñado.

# Conclusiones

---

Tras el análisis de todos los datos obtenidos y las gráficas presentadas, puede decirse que el sistema de realimentación optoelectrónico en lazo cerrado que se ha diseñado para una luminaria LED de viario público cumple de manera más exitosa que la esperada en un principio los objetivos que se le exigían.

Con el uso del SISRO-E se monitoriza la luz producida por los LEDs de una luminaria de viario público y se compensa la progresiva depreciación de la fuente lumínica, o la variación del flujo luminoso debido al cambio de la temperatura tanto ambiental como del módulo LED.

Asimismo, con un uso hábil del driver que lleva la propia luminaria se establece un ahorro energético al oscurecer la emisión de flujo hasta emitir el 70% del flujo luminoso del que es capaz de obtenerse de dicho modelo de luminaria. Este ahorro en consumo energético conlleva a su vez un ahorro económico importante y que hace aún más interesante este proyecto.

El impacto en el medio ambiente también se ve afectado puesto que el control de la luminosidad hace que la contaminación lumínica descienda, un problema derivado del uso de un alumbrado ineficiente y mal diseñado.

Como posibles mejoras se puede plantear trasladar el experimento a un laboratorio con más recursos, para poder obtener medidas más exactas y a ambientes aún más cálidos y fríos que los analizados en este trabajo. Al estar implicada la intensidad de luz del ambiente cualquier pequeña variación de ésta, ya sea pasando cerca de los detectores o subiendo ligeramente la persiana se modificaban los resultados, aunque fuese de forma mínima, por lo que un entorno de trabajo más aislado hubiera sido lo ideal.

De la misma forma se puede plantear el uso de otro sensor que no sea la fotorresistencia para comprobar como se ven afectadas las medidas.

Aun así, los resultados obtenidos son muy satisfactorios y prometedores, e invitan a seguir investigando en este ámbito.



# Referencias bibliográficas

---

- Anikeeva, P.O., Halpert, J.E., Bawendi, M.G., Bulovic, V. (2009). *Quantum dot light-emitting devices with electroluminescence tunable over the entire visible spectrum*. Nano Lett 9/7:2532-2536
- Coaton, J.R., Marsden, A.M. (eds) (1997) *Lamps and lighting, 4th edn*. Wiley, New York
- DOE (2013a) *Sólid-state lighting research and development: multi-year program plan. Prepared for lighting research and development, building technologies office, office of energy efficiency and renewable energy*. Washington, DC
- DOE (2013b) *Sólid-state lighting technology fact sheet: flicker*. Building technologies office, energy efficiency and renewable energy. Washington, DC
- Holonyak N Jr, Bevacqua SF (1962) *Coherent (visible) light emission from Ga(As<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub>) junctions*. Appl Phys Lett 1:82-83
- IES (2008) Document LM-80-2008, *Measuring lumen maintenance of LED light sources*
- IES (2011) Document TM-21-2011, *Projecting long term maintenance of LED light sources*
- IEC (2009) IEC 61140 ed 3.1, *Protection against electric shock- common aspects for installation and equipment*
- IEC (2013) IEC 60529 ed 2.2, *Degree of protection provided by enclosures (IP code)*
- IEC/PAS (2011a) Document 62717, *LED modules for general lighting-performance requirements*
- IEC/PAS (2011b) Document 62722-1, *Luminaire performance. Particular requirements for LED luminaires*
- Ingeniería Mecafenix (s.d.) *Sensor fotoeléctrico- Fotorresistencia*. Recuperado de:  
<http://www.ingmecafenix.com/electronica/fotorresistencia/>
- *Luminaria Córdoba*. (s.d.). Recuperado del sitio web de la empresa Boos Technical Lighting S.L.:  
<http://www.booslight.com/products/cordoba/>
- Meyer C, Nienhuis H (1988) *Discharge lamps*. Kluwer Technische Boeken, Deventer
- Nakamura S, Senoh M, Iwasa N, Nagahama S (1995) *High-power InGaN single-quantum-well-structure blue and violet light-emitting diodes*. Appl Phys Lett 67/13:114359-114362
- Philips Lighting Holding B.V. (2018). *Xitanium FULL Programable Xtreme*. Recuperado de:  
[http://www.docs.lighting.philips.com/en\\_gb/oem/download/xitanium/PHIL\\_211217\\_Xitanium\\_LED\\_Xtreme\\_driver\\_DIG.pdf](http://www.docs.lighting.philips.com/en_gb/oem/download/xitanium/PHIL_211217_Xitanium_LED_Xtreme_driver_DIG.pdf)
- Philips Lighting Holding B.V. (2018). *Philips MultiOne Software*. Recuperado de:  
<http://images.philips.com/is/content/PhilipsConsumer/PDFDownloads/United%20Kingdom/oem/ODLI20160923%5F001%2DPDF%2Den%5FGB%2DMultiOne%5Fversion%5F3%5F2%5FGettingStarted.pdf>
- Schubert EF (2006) *Light-emitting diodes*, 2nd edn. Cambridge University Press, Cambridge

- Van Bommel WJM, De Boer JB (1980) *Road lighting*. Kluwer Technische Boeken, Deventer
- Van Driel WD, Fan XJ (eds) (2013) *Quantum dot light-emitting devices*. Mater Res Soc Bull 38:365-691
- Zhaga (2013) *Zhaga interface specification book 1: overview and common information*, edn 1. 4, April 2013