

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE

GRADO EN INGENIERÍA DE TECNOLOGÍAS DE
TELECOMUNICACIÓN



"Diseño e implementación de un sistema de adquisición de datos de bajo coste para la caracterización lumínica de luminarias para alumbrado público"

TRABAJO FIN DE GRADO

Julio - 2020

AUTOR: Luis García Tíscar

DIRECTOR/ES: Abraham Ruiz Gómez

1. ÍNDICE	2
2. RESUMEN	4
2.1. PALABRAS CLAVE	4
3. ABSTRACT	5
3.1. KEY WORDS	5
4. INTRODUCCIÓN	6
CONCEPTOS MATEMÁTICOS	6
4.1.7. RADIÁN	6
4.1.8. ÁNGULO SÓLIDO Y ESTERERRADIÁN	7
4.2. MAGNITUDES LUMINOSAS	7
4.2.1. FLUJO LUMINOSO (ϕ)	8
4.2.2. INTENSIDAD LUMINOSA (I)	9
4.2.3. NIVEL DE ILUMINACIÓN O ILUMINANCIA (E)	10
4.2.4. LUMINANCIA (L)	13
4.2.5. UNIFORMIDAD	15
4.2.6. DESLUMBRAMIENTO	16
4.2.7. CONTRASTE	17
5. ESTADO DEL ARTE	19
5.1. FOTOMETRÍA	19
5.1.1. SISTEMAS DE MONTAJE DEL GONIOFOTÓMETRO	19
5.1.1.1. GONIOFOTÓMETRO TIPO A (MEDICIONES X-Y)	20
5.1.1.2. GONIOFOTÓMETRO TIPO B (MEDICIONES V-H)	21
5.1.1.3. GONIOFOTÓMETRO TIPO C	22
5.1.2. CURVAS FOTOMÉTRICAS	23
5.1.2.1. MATRIZ DE INTENSIDADES	23
5.1.2.2. DIAGRAMAS CARTESIANOS	25
5.1.2.3. CURVAS POLARES	26
5.1.2.4. CURVAS ISOLUX	27
5.1.2.5. CURVAS ISOLUMINANCIAS	28
5.1.2.6. CURVAS ISOCANDELAS	28
5.2. LUMINARIAS	29
5.2.1. COMPONENTES	30
5.2.1.1. ARMADURA O CARCASA	30
5.2.1.2. EQUIPO ELÉCTRICO	30
5.2.1.3. REFLECTORES	31
5.2.1.4. DIFUSORES	31
5.2.1.5. FILTROS	31
5.2.1.6. REFRACTOR	32
5.2.1.7. JUNTA	32
5.2.2. CLASIFICACIÓN DE LUMINARIAS	32

5.2.2.1. SEGÚN EL GRADO DE PROTECCIÓN ELÉCTRICA	32
5.2.2.2. SEGÚN LAS CONDICIONES OPERATIVAS	33
5.2.2.3. SEGÚN EL GRADO DE INFLAMABILIDAD DE LA SUPERFICIE DE MONTAJE	34
5.2.2.4. SEGÚN SUS CONDICIONES DE SERVICIO	35
5.2.2.4.1. LUMINARIAS PARA INSTALACIONES DE ILUMINACIÓN INTERIOR	35
5.2.2.4.2. LUMINARIAS PARA ALUMBRADO PÚBLICO.	36
6. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA	40
6.1. MOTIVACIONES Y OBJETIVO PRINCIPAL DEL PROYECTO	40
6.2. DISEÑO DEL SISTEMA Y MATERIALES	40
6.3. RELACIÓN DE MATERIALES	43
6.4. EJEMPLO DE USO	43
6.4.1. PROGRAMACIÓN DEL EJEMPLO	45
6.4.1.1. PROGRAMA ARDUINO	45
6.4.1.2. PROGRAMA MATLAB	45
6.4.2. RESULTADOS DEL EJEMPLO	46
6.5. MODELO DE LUMINARIA A MEDIR	47
6.6. DIAGRAMAS, SIMULACIONES Y MONTAJE	50
6.7. MÉTODO PARA EL CÁLCULO DE INTENSIDADES EN EXCEL	52
6.7.1. DIAGRAMAS	52
6.7.2. SISTEMA DE CÁLCULO EN EXCEL:	54
7. CONCLUSIONES, PROBLEMAS Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	57
7.1. CONCLUSIONES	57
7.2. PROBLEMAS	57
7.3. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	58
8. ANEXOS	61
9. REFERENCIAS	61

2. RESUMEN

En el presente Trabajo de Fin de Grado (en adelante, TFG), se pretende detallar el diseño de un sistema de bajo coste de adquisición de datos para la caracterización de luminarias de alumbrado público.

Este sistema se compondrá de una superficie de captación con sensores equidistantes entre sí, conectados mediante buses I2C a un switch y una placa Arduino UNO que los preparará para su posterior envío al ordenador. Los datos recogidos se procesarán en Matlab, que los recibirá por un puerto serial. Una vez procesados, el objetivo es comparar los resultados de nuestro sistema con los resultados ofrecidos por el fabricante de la luminaria para, entre otras cosas, calcular la diferencia de nuestros datos con los del fabricante y el error cometido que presenta este nuevo sistema.

2.1. PALABRAS CLAVE

Luminaria / Caracterización / Sensor / Arduino / Iluminancia / Luminancia / Curva fotométrica / Goniofotómetro

3. ABSTRACT

The main objective of this Bachelor's Degree Final Project is the design and further implementation of a low-cost data acquisition system to characterize street lighting luminaires.

This system will consist of an acquisition surface with equispaced light sensors on it, all of them connected by an I2C bus to a switch and an Arduino UNO board in order to send the acquired data to the PC. Once the data has been delivered through a serial port to the computer, Matlab will receive the data and process it. Once the data has been processed, the aim is to compare our system results versus the results offered by the manufacturer of the luminaire and determine the numeric error of our system.

3.1. KEY WORDS

Luminair / Characterization / Sensor / Arduino / Illuminance / Luminance / Photometric Curve / Goniophotometer

4. INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo trataremos de definir los diferentes conceptos teóricos necesarios para la óptima comprensión del trabajo en su totalidad. No se trata de una carga teórica excesivamente complicada o abstracta, ni son necesarios conocimientos previos sobre óptica. Detallaremos diferentes magnitudes luminosas que se usarán a lo largo del trabajo.

CONCEPTOS MATEMÁTICOS

4.1.7. RADIÁN

Según la Real Academia Española [1], un radián es una unidad de ángulo plano del sistema internacional, equivalente a un ángulo cuyo arco tiene igual longitud que el radio (su unidad es el rad). Se puede ver gráficamente lo que es un radián en la siguiente figura, extraída de [2]:

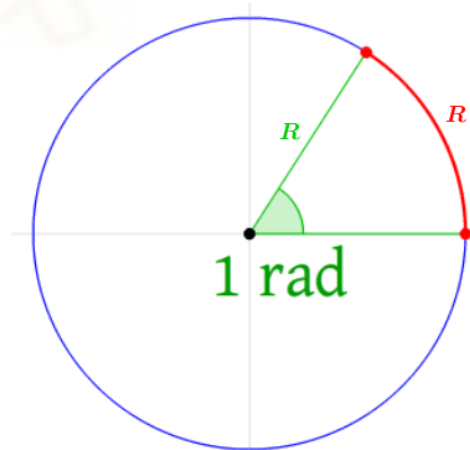


Figura 1: Representación gráfica de radián.

En total, una circunferencia de 360° equivale a 2π radianes.

4.1.8. ÁNGULO SÓLIDO Y ESTERERRADIÁN

El ángulo sólido, según [3], se define por el volumen que forma la superficie lateral de un cono cuyo vértice coincide con el centro de una esfera de radio r y cuya base está situada sobre la superficie de la esfera.

Según la RAE, en [4], un estereorradián es una unidad de ángulo sólido del sistema internacional, equivalente al que, con su vértice en el centro de una esfera, determina sobre la superficie de ésta un área equivalente a la de un cuadrado cuyo lado es igual al radio de la esfera (su unidad es el sr).

Cuando el radio de la esfera r es de 1 metro y la superficie de la base del cono es de 1 m^2 , el ángulo sólido es equivalente a un estereorradián, como se indica en la figura 6:

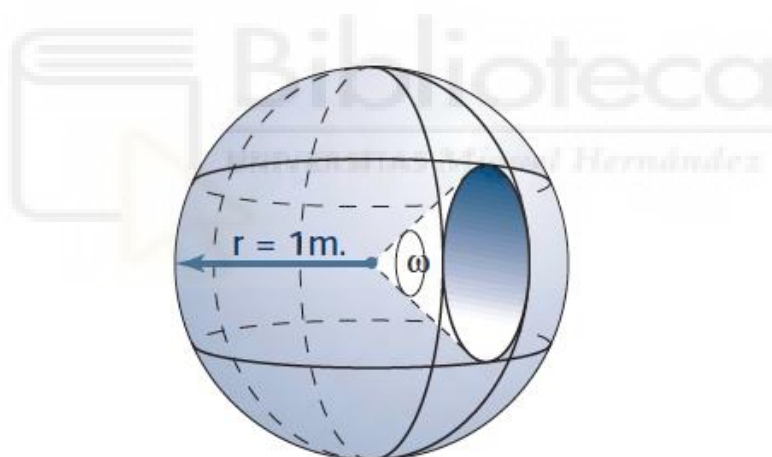


Figura 2: Ángulo sólido equivalente a 1 sr.

4.2. MAGNITUDES LUMINOSAS

En este trabajo se tratarán solo las magnitudes fotométricas, es decir, aquellas usadas para la caracterización de la luz dentro del espectro visible para el ojo humano. Es importante diferenciar la fotometría de la radiometría, la primera es la ciencia que se ocupa de la medida de las magnitudes asociadas a la radiación

óptica, y la segunda se ocupa fundamentalmente de la medida de potencia radiante asociada a la radiación, como se explica en [5].

Según [4], desde el punto de vista de la iluminación técnica, solo hay dos elementos principales: la fuente de iluminación y el objeto o espacio que se quiere iluminar. Estas magnitudes luminosas nos proporcionan información sobre las características técnicas de su luz, permitiendo clasificarlas, compararlas y ver qué relación existe entre ellas para, así, escoger la que mejor se adapte a nuestro proyecto de iluminación.

4.2.1. FLUJO LUMINOSO (ϕ)

Según [6], el flujo luminoso se define como la potencia en vatios (W) emitida en forma de radiación luminosa a la que el ojo humano es sensible. Su unidad es el lumen (lm). La relación entre vatios y lúmenes se le denomina “equivalente luminoso de la energía”:

$$1 \text{ watt} - \text{luz a } 555 \text{ nm} = 683 \text{ lm}$$

En [4], la definición que se da de esta magnitud es interesante: se define como el flujo total lumínico emitido o radiado en todas direcciones por una fuente de luz durante una unidad de tiempo. Es importante recalcar la parte de “en todas direcciones” porque el siguiente concepto ahondará más en esto. También se da una definición formal del lumen:

“1 lumen se define como el flujo luminoso emitido por un estereorradián por un emisor de luz cuando su intensidad es de 1 candela”

A continuación, se recogen en una pequeña tabla los valores típicos de flujo luminoso en diversas lámparas:

Nombre	Descripción	
Flujo luminoso	Flujo lumínico emitido por una fuente de luz en todas direcciones	
Símbolo	Unidades	Instrumental de medida
Φ	lumen (lm)	Esfera de Ulbricht
Valores Tipo		
Lámpara incandescente de 100W	1380 lm	
Lámpara fluorescente de 36W	3250 lm	
Lámpara mercurio alta presión de 400 W	22000 lm	
Lámpara de luz mezcla 250W	5600 lm	
Lámpara de sodio a baja presión de 35 W	4800 lm	
Lámpara de sodio a alta presión de 400W	47000 lm	
Lámpara halogenuro metálico de 250W	17000 lm	

Tabla 1: Valores típicos de flujo luminoso.

4.2.2. INTENSIDAD LUMINOSA (I)

En [6], recoge la definición de flujo luminoso y ejemplifica, con un proyector de luz (solo radia en una dirección), que es necesaria otra magnitud luminosa para definir cómo se distribuye el flujo en cada dirección del espacio. Así nace el concepto de Intensidad Luminosa (I):



Figura 3: Diferencia entre flujo luminoso e intensidad luminosa.

Por lo tanto, se conoce como intensidad luminosa al flujo luminoso emitido por unidad de ángulo sólido en una dirección concreta del espacio. Su símbolo es I y su unidad, la candela (cd):

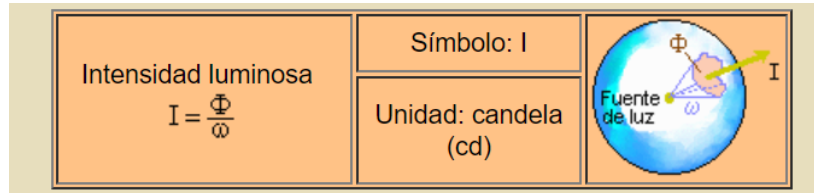


Figura 4: Intensidad Luminosa

Como se dice en [4], en los laboratorios, se calcula la intensidad de la fuente en todas las direcciones del espacio con un goniómetro, del que hablaremos más adelante en el capítulo de Estado del Arte.

4.2.3. NIVEL DE ILUMINACIÓN O ILUMINANCIA (E)

Según [7], se define Iluminancia o nivel de iluminación de una superficie como la relación entre el flujo luminoso que recibe la superficie y su área. Se simboliza mediante la letra E y su unidad es el lux (lx). Según el Sistema Internacional (S.I.), un lux se define como la iluminancia de una superficie que recibe un flujo luminoso de un lumen, repartido sobre un metro cuadrado de superficie. La fórmula que describe la iluminancia es:

$$E = \frac{\phi}{S} (lx = lm/m^2)$$

Es trivial deducir de la fórmula que cuanto mayor sea el flujo luminoso incidente sobre una superficie, mayor será su iluminancia, y que, para un mismo flujo

incidente, la iluminancia será tanto mayor en la medida en que disminuya la superficie. Sobre esta deducción, en [6] se representa esta relación con un ejemplo muy sencillo:



Figura 5: Relación entre la superficie alumbrada y la iluminancia.

Cuando iluminamos una superficie desde cerca, el área alumbrada es pequeña, y por tanto, la iluminancia debería ser mayor que cuando nos alejamos, y abarcamos una mayor superficie alumbrada. Pero esto nos lleva a una nueva relación: la relación de la iluminancia con la distancia. Dicha relación sigue la ley inversa de los cuadrados, aunque este modelo sólo es válido si la dirección del rayo de luz incidente es perpendicular a la superficie:

$$E = \frac{I}{r^2}$$

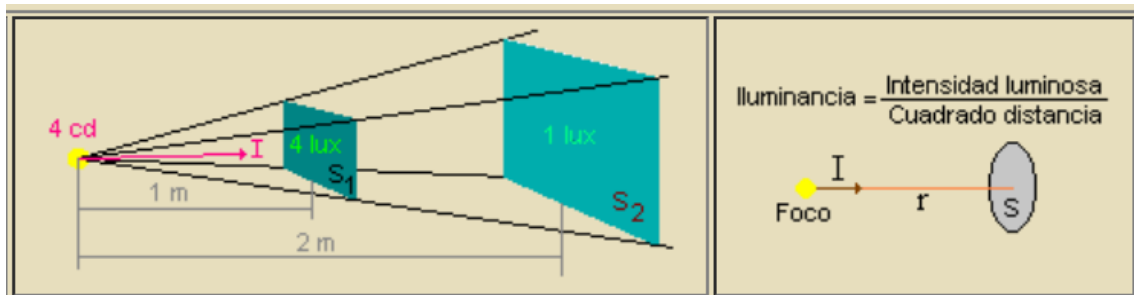


Figura 6: Ley inversa de los cuadrados.

Como podemos observar en la figura, una fuente de luz de 4 cd de intensidad luminosa, produce una iluminancia de 4 lux en la Superficie 1 (S1), a 1 metro de distancia:

$$I_1 = \frac{4}{1^2} = 4 \text{ lx}$$

Pero en la Superficie 2 (S2), a 2 metros (doble de la distancia), la iluminancia se reduce en un factor 4:

$$I_2 = \frac{4}{2^2} = 1 \text{ lx}$$

Pero hemos dicho que solo podemos aplicar este modelo si el rayo incide perpendicularmente sobre la superficie. ¿Qué ocurre cuando no es así? En este caso, hay que descomponer la iluminancia recibida en una componente horizontal y en otra vertical a la superficie:

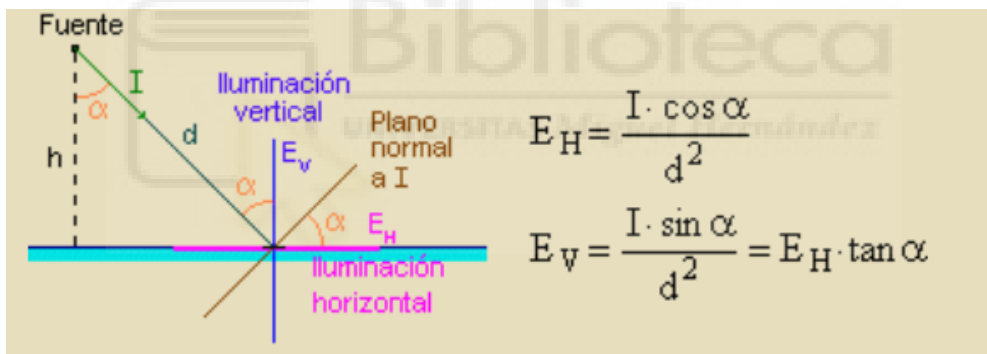


Figura 7: Ley del coseno para el cálculo de la iluminancia,

Este modelo un poco más elaborado no es más que la ley inversa de los cuadrados para un caso más específico, ya que si $\alpha = 0$, nos queda dicha ley. En general, si un punto está iluminado por más de una lámpara, su iluminancia total es la suma de las iluminancias recibidas:

$$E_H = \sum_{i=1}^n \frac{I_i \cdot \cos^3 \alpha_i}{h_i^2}$$

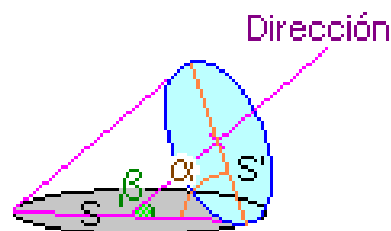
$$E_v = \sum_{i=1}^n \frac{I_i \cdot \cos^2 \alpha_i \cdot \text{sen} \alpha_i}{h_i^2}$$

4.2.4. LUMINANCIA (L)

Si seguimos atendiendo a [7], la luminancia se define como el efecto de luminosidad que produce una superficie en la retina del ojo, tanto si procede de una fuente primaria que produce luz, como si procede de una fuente secundaria o superficie que refleja la luz. La luminancia mide el brillo de las fuentes luminosas primarias y de las fuentes que constituyen los objetos iluminados. Su unidad es la cd/m^2 .

Cabe recordar que el ojo no ve colores sino brillo, como atributo del color. La percepción de la luz es realmente la percepción de diferencias de luminancias, es decir, a igual iluminación, diferentes objetos tienen luminancia distinta porque tienen distinto poder de reflexión. La luminancia de una superficie iluminada es el cociente entre la intensidad luminosa de una fuente de luz, en una dirección, y la superficie de la fuente proyectada según dicha dirección (Superficie aparente):

$$L = \frac{I}{S_{\text{aparente}}} = \frac{I}{S \cdot \cos \alpha} \text{ cd} / \text{m}^2$$



$$S' = S \cos \alpha$$

S: superficie

S': superficie aparente

Figura 8: Superficie aparente.

En [4] ofrecen una representación gráfica de la unidad de luminancia, que es la cd / m^2 , o NIT (nt):

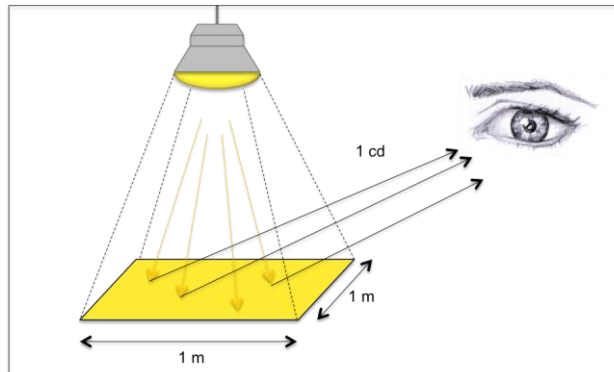


Figura 9: Representación gráfica de unidad de luminancia

También se aconseja que se vigile atentamente esta magnitud, ya que, realmente la luminancia mide el brillo de las fuentes de luz u objetos tal como los ve el ojo humano. A mayor luminancia, mayor es la sensación de claridad, pero una luminancia muy alta puede causar deslumbramiento. Para el diseño de proyectos de alumbrado exterior existen criterios de calidad que se basan en los siguientes parámetros recogidos en una tabla para conocer si la instalación cumple con los requisitos establecidos:

Valores Tipo	
Sol	150000 cd/m^2
Lámpara de sodio a alta presión	500 cd/m^2
Lámpara incandescente clara	100-200 cd/m^2
Lámpara incandescente mate	5-50 cd/m^2
Lámpara vapor de mercurio	11 cd/m^2
Lámpara fluorescente	0,75 cd/m^2
Lámpara halogenuros metálicos	78 cd/m^2
Cielo de noche	0,3-0,5 cd/m^2

Tabla 2: Valores tipo de luminancias.

En relación a la medida de la luminancia, el aparato que se utiliza para ello es el Luminancímetro o nitómetro, según [7]. Se basa en dos sistemas ópticos, uno de

dirección y otro de medición (fig.14). El de dirección se orienta de forma que la imagen coincida con el punto a medir, la luz que llega una vez orientado se ve convertida en corriente eléctrica y recogida en lectura analógica o digital, siendo los valores medidos en nits o cd / m^2 .

4.2.5. UNIFORMIDAD

Si nos basamos en [4], la uniformidad hace referencia a la iluminancia proporcionada sobre la superficie de referencia. Generalmente, la iluminancia no será uniforme, pero es una magnitud importante para el confort y la visión.

La iluminancia media proporcionada por cualquier tipo de instalación irá disminuyendo con el tiempo debido a la depreciación luminosa que sufren las lámparas y a la suciedad que acumulan tanto lámparas como luminarias con el tiempo. Es, por tanto, imposible considerar una uniformidad en el tiempo.

La zona o espacio a iluminar también afecta a la uniformidad. Por ejemplo, la relación entre iluminancias medias para dos interiores no puede ser mayor que la relación 5:1. Existen varios tipos de factores de uniformidad, todos ellos calculados en tanto por ciento [%]. Vienen recogidos en el apartado 5.6. otras magnitudes luminosas de interés de [7] y son:

- Factor de uniformidad media (U_m): Es la relación entre la iluminancia mínima y media de una instalación de alumbrado:

$$U_m = \frac{E_{min}}{E_{med}}$$

- Factor de uniformidad extrema (U_E): Es la relación entre la iluminación mínima y máxima, de una instalación de alumbrado:

$$U_E = \frac{E_{min}}{E_{max}}$$

- Factor de uniformidad longitudinal (U_L): Es la relación entre luminancia mínima y máxima longitudinal de una instalación de alumbrado.

$$U_L = \frac{L_{min\ longitudinal}}{L_{max\ longitudinal}}$$

- Factor de uniformidad general (U_0): Es la relación entre la luminancia mínima y media, de una instalación de alumbrado

$$U_0 = \frac{L_{min}}{L_{med}}$$

- Factor de mantenimiento (F_m): Coeficiente que indica el grado de conservación de una instalación:

$$F_m = F_{pl}F_{dl}F_tF_eF_c$$

Siendo:

F_{pl} = factor posición lámpara

F_{dl} = factor depreciación lámpara

F_t = factor temperatura

F_e = factor equipo de encendido

F_c = factor conservación de la instalación

4.2.6. DESLUMBRAMIENTO

Basándonos en la definición de [7], el deslumbramiento es un fenómeno que produce molestia o disminución de la capacidad para distinguir objetos debido a una inadecuada distribución o escalonamiento de luminancias, o como consecuencia de contrastes excesivos en el espacio o en el tiempo.

El deslumbramiento actúa sobre la retina del ojo, en la que se produce una enérgica reacción fotoquímica, insensibilizándola durante un cierto tiempo, transcurrido el cual vuelve a recuperarse.

Podemos diferenciar dos tipos de deslumbramiento:

1. Molesto (psicológico).
2. Perturbador (fisiológico).

En cuanto a la forma de producirse, puede ser directo como el proveniente de fuentes luminosas, que se encuentren en el campo visual o reflejado por superficies de gran reflectancia, especialmente superficies especulares como las del metal pulido.

Generalmente, las fuentes luminosas producen un deslumbramiento perturbador: éste es proporcional a la iluminación producida por la fuente de luz sobre la pupila del ojo, así como a un factor dependiente del ángulo " θ " que forman la línea recta "R" que une el ojo con el foco "F" y el plano horizontal "H" que pasa por el ojo en la posición de trabajo. En la fig. 8 se indican los distintos deslumbramientos en función de este ángulo:

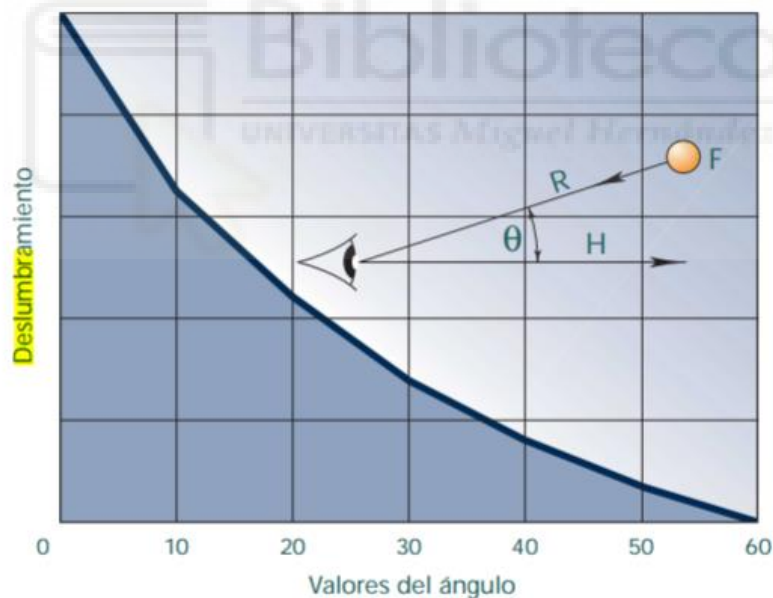


Figura 10: Deslumbramiento en función del ángulo θ

4.2.7. CONTRASTE

Según [4], el contraste mide la relación entre la luminancia de un objeto y la luminancia de su fondo:

$$K = \frac{L_0 - L_f}{L_f}$$

Siendo L_0 la luminancia del objeto y L_f la luminancia del fondo, ambas medidas en nits o cd / m^2 .

Consideramos que los conceptos descritos son suficientes para la comprensión de los capítulos siguientes, en los que serán bastante recurrentes las magnitudes luminosas, tales como luminancia o deslumbramientos y de los conceptos de plano y vectores, entre otros conceptos geométricos en fotometría.



5. ESTADO DEL ARTE

En el presente capítulo se intentará dar una visión general sobre el estado del arte en el área de iluminación y fotometría. Empezaremos definiendo qué es la fotometría y las principales técnicas usadas en ese ámbito, qué es una luminaria y, por último, los diferentes tipos de luminarias según su clasificación.

5.1. FOTOMETRÍA

Entendemos por fotometría a la ciencia encargada de estudiar la capacidad que tiene la radiación electromagnética, en el rango visible del espectro, para estimular al ojo humano, según se recoge en [4]. Como ya dijimos, la diferencia con la radiometría es que ésta última se encarga de la medida de la potencia asociada a dicha radiación.

La fotometría define la forma y dirección de la luz emitida por la fuente óptica en el espacio. Es muy importante disponer de esta información en forma de tablas o curvas para conocer de antemano cómo se distribuye la luz y poder elegir una fuente de luz óptima en la etapa de diseño del proyecto. Los datos fotométricos suelen proporcionarlos los propios fabricantes, ya que su cálculo se realiza en laboratorios con aparatos específicos (goniofotómetros).

5.1.1. SISTEMAS DE MONTAJE DEL GONIOFOTÓMETRO

Un goniofotómetro es un sistema de montaje con el que se realizan pruebas normalizadas a las luminarias en un entorno controlado.



Figura 11: Goniofotómetro LGS 1000 de Instrument Systems.

Existen diferentes tipos de sistemas de montaje de goniofotómetro que aportan diferentes medidas, detallados a continuación.

5.1.1.1. GONIOFOTÓMETRO TIPO A (MEDICIONES X-Y)

Según [4], este sistema de eje horizontal fijo, como observamos en la figura 16, tiene una rotación de la luminaria alrededor del eje horizontal fijo Y. La luminaria también puede girar alrededor del eje vertical X, de modo que se forma una esfera sobre la que se obtienen los datos de intensidad.

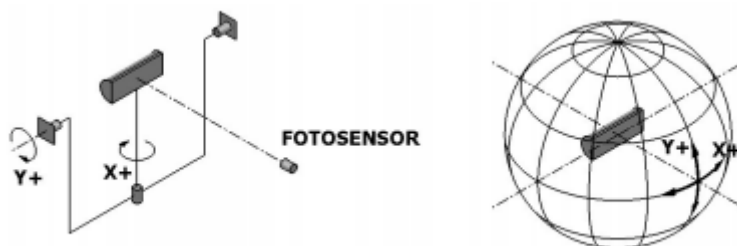


Figura 12: Goniofotómetro tipo A

En este sistema de coordenadas, los ángulos entre los planos son los llamados X y los ángulos medios de un plano se denominan Y:

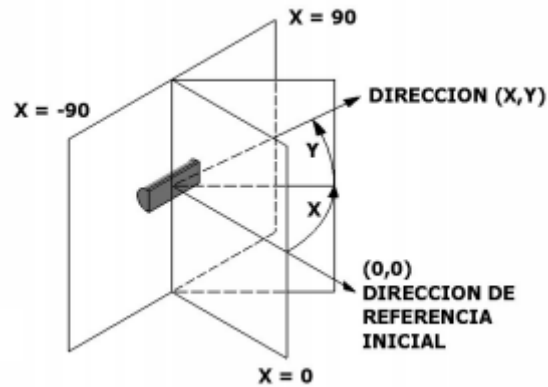


Figura 13: Planos X e Y.

5.1.1.2. GONIOFOTÓMETRO TIPO B (MEDICIONES V-H)

El sistema calcula los valores de intensidad igual que el anterior, pero en este caso, el sistema fijo es el vertical.

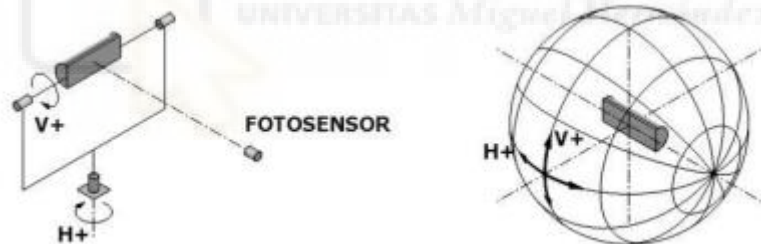


Figura 14: Goniómetro tipo B.

Los ángulos entre planos se denominan V y los intermedios, H. Este tipo de goniómetro se suele usar principalmente en el cálculo de las medidas de los proyectores.

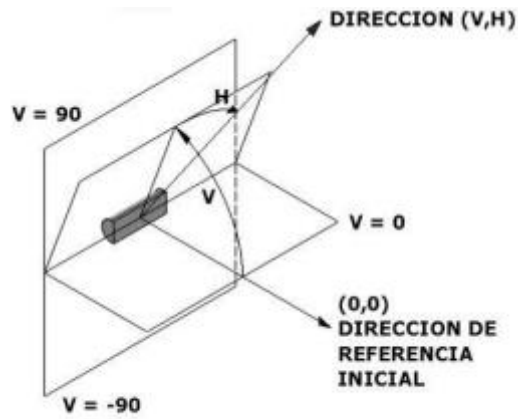


Figura 15: Planos V y H.

5.1.1.3. GONIOFOTÓMETRO TIPO C

Según se recoge en [4], este tipo de sistemas de coordenadas es el más utilizado y recomendado por la CIE (Comisión Internacional de Iluminación o *Commission Internationale de l'Eclairage*, en francés).

La coordenada C representa el ángulo que presentan los planos de rotación y representa los planos de elevación de la luminaria. Existe una variante de este tipo de goniofotómetro que consta de un fotosensor responsable de la toma de datos o espejo móvil alrededor del eje horizontal. La luminaria está suspendida y solo puede moverse alrededor del eje vertical:

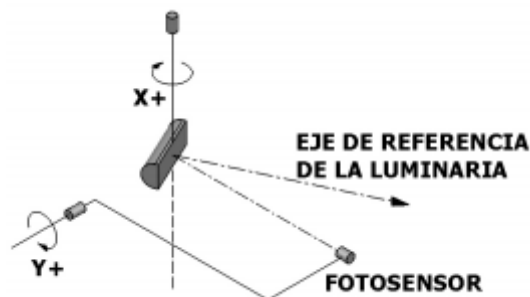


Figura 16: Goniofotómetro tipo C.

Este tipo de medidas se realizan para luminarias de alumbrado público y de interior.

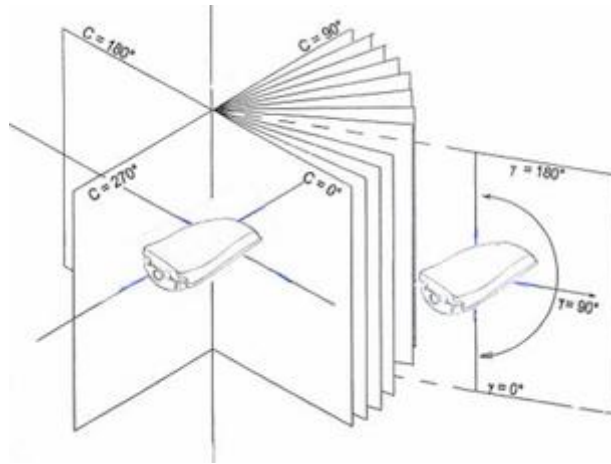


Figura 17: Curvas tipo C-γ.

Con estos sistemas de montaje llamados goniómetros, los datos calculados se representan mediante una serie de curvas fotométricas.

5.1.2. CURVAS FOTOMÉTRICAS

Existen diferentes formas de representar los datos de intensidad, el que más nos interesa en este proyecto es la Matriz de Intensidades:

5.1.2.1. MATRIZ DE INTENSIDADES

Los valores de la intensidad luminosa pueden encontrarse tabulados de forma matricial para distintas direcciones del espacio, según [4]. Cada fabricante debe proporcionar la matriz calculada previamente. En la siguiente figura se muestra una matriz de intensidades tipo C-γ correspondiente a una luminaria de alumbrado público:

Matriz de INTENSIDADES - cd/klm

		c 270.0	c 285.0	c 300.0	c 310.0	c 315.0	c 320.0	c 325.0	c 330.0	c 335.0
G 0.0		241.00	241.00	241.00	241.00	241.00	241.00	241.00	241.00	241.00
G 10.0		179.00	177.00	181.00	187.00	190.54	194.00	197.37	201.00	205.21
G 20.0		150.00	148.00	147.00	148.00	150.50	153.00	155.99	162.00	172.80
G 30.0		127.00	129.00	130.00	131.00	132.02	134.00	137.70	143.00	149.94
G 35.0		114.00	120.00	119.00	121.00	123.66	127.00	131.51	137.00	143.54
G 40.0		107.00	111.00	112.00	117.00	117.98	120.00	123.80	129.00	135.19
G 45.0		98.00	102.00	101.00	107.00	110.92	114.00	116.00	119.00	124.98
G 47.5		95.00	96.00	97.00	102.00	107.74	112.00	114.15	117.00	123.16
G 50.0		91.00	91.00	94.00	99.00	104.72	109.00	111.33	115.00	122.70
G 52.5		83.00	85.00	92.00	97.00	101.72	106.00	109.85	115.00	122.64
G 55.0		75.00	78.00	89.00	93.00	97.97	103.00	108.22	114.00	120.54
G 57.5		67.00	70.00	84.00	91.00	95.35	100.00	105.21	111.00	117.30
G 60.0		58.00	61.00	79.00	87.00	91.21	96.00	101.75	108.00	114.30
G 62.5		47.00	53.00	72.00	83.00	87.79	93.00	98.87	105.00	111.11
G 65.0		36.00	43.00	59.00	76.00	82.54	89.00	95.25	101.00	106.34
G 67.5		24.00	33.00	47.00	68.00	76.21	84.00	90.99	97.00	102.31
G 70.0		13.00	24.00	33.00	58.00	68.34	78.00	86.36	93.00	98.21
G 72.5		10.00	17.00	21.00	44.00	58.37	72.00	83.64	90.00	89.30
G 75.0		6.00	10.00	11.00	30.00	47.91	61.00	65.90	65.00	62.10
G 77.5		3.00	5.00	5.00	17.00	30.05	39.00	39.00	39.00	36.34
G 80.0		0.00	2.00	2.00	9.00	15.47	19.00	17.72	14.00	10.78
G 82.5		0.00	0.00	0.00	2.00	0.81	0.00	0.00	0.00	0.30
G 85.0		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
G 87.5		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
G 90.0		0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.50	0.25	0.00	0.00
G 92.5		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
G 95.0		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
G 97.5		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
G 100.0		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
G 102.5		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
G 105.0		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Figura 18: Matriz de intensidades en cd/klm, tipo C-y.

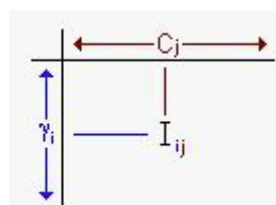


Figura 19: Esquema matriz de intensidades tipo C-y.

Por ejemplo, siguiendo la matriz anterior, para un ángulo de $C=270^\circ$ y un ángulo $\gamma=10^\circ$, tenemos una intensidad de 179 cd/klm. Cabe mencionar que para cada pareja de valores C y γ , se obtiene un valor de intensidad normalizado para una lámpara de flujo de 1000lm, de ahí la unidad [klm]. Para conocer el valor real de la intensidad es necesario realizar el siguiente cálculo:

$$I_{real} = \phi_{lámpara} \cdot \frac{I_{matriz\ o\ gráfico}}{1000}$$

Este tipo de representación de intensidad luminosa es el que más nos interesa porque nuestro sistema de captación recogerá valores de iluminancia (en lux) mediante los sensores. Mediante el procesamiento de estos valores, crearemos una matriz de intensidades como la anterior, para nuestra luminaria en cuestión.

5.1.2.2. DIAGRAMAS CARTESIANOS

Los diagramas cartesianos se usan típicamente para caracterizar proyectores. Se clasifican en función de su apertura del haz. El sistema de coordenadas es el B-beta, y aparecen tres valores:

- Plano Horizontal.
- Plano Vertical.
- Mitad de la intensidad máxima.

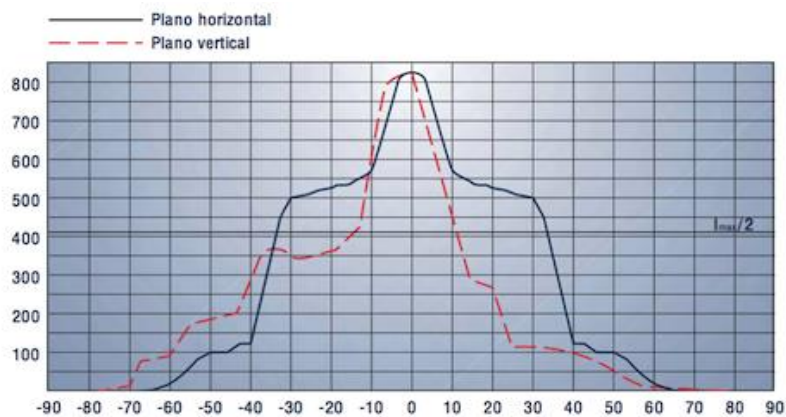


Figura 20: Diagrama Cartesiano.

5.1.2.3. CURVAS POLARES

Según [7], si representamos por medio de vectores (I) la intensidad luminosa de una fuente de luz en las infinitas direcciones del espacio, engendramos un volumen que representa el valor del flujo total emitido por la fuente, el cual viene definido por la expresión:

$$\phi = \int_v \underline{I} d\omega$$

El sólido que obtenemos recibe el nombre de sólido fotométrico. A modo de ejemplo, en la siguiente figura se puede apreciar el sólido fotométrico de una lámpara incandescente:

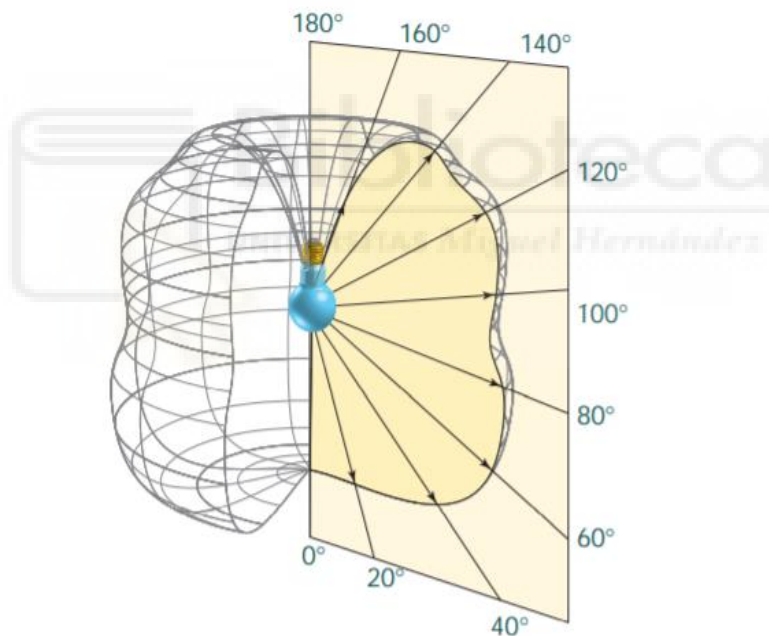


Figura 21: Sólido fotométrico de una lámpara incandescente.

Si ahora hacemos pasar un plano por el eje de simetría de la fuente luminosa, por ejemplo, un plano meridional, obtendremos una sección limitada por una curva que se denomina curva fotométrica o curva de distribución luminosa:

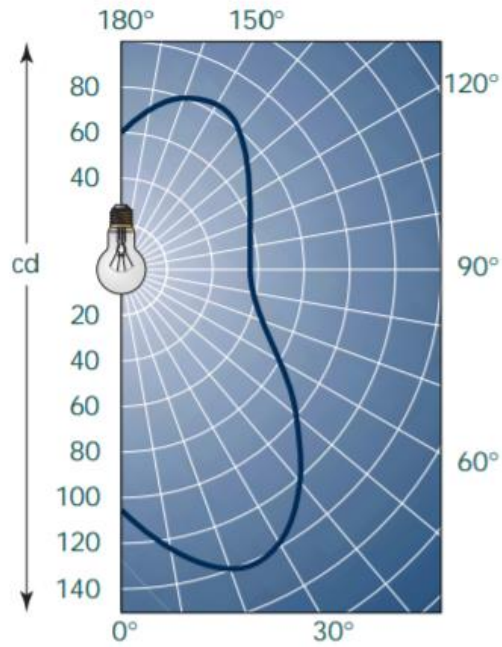


Figura 22: Curva fotométrica de una lámpara incandescente.

5.1.2.4. CURVAS ISOLUX

El flujo emitido por una fuente luminosa proporciona una iluminancia en una superficie, cuyos valores se miden en lux. Si proyectamos estos valores sobre un mismo plano y unimos por medio de una línea los de igual valor, entonces daremos lugar a las curvas Isolux:

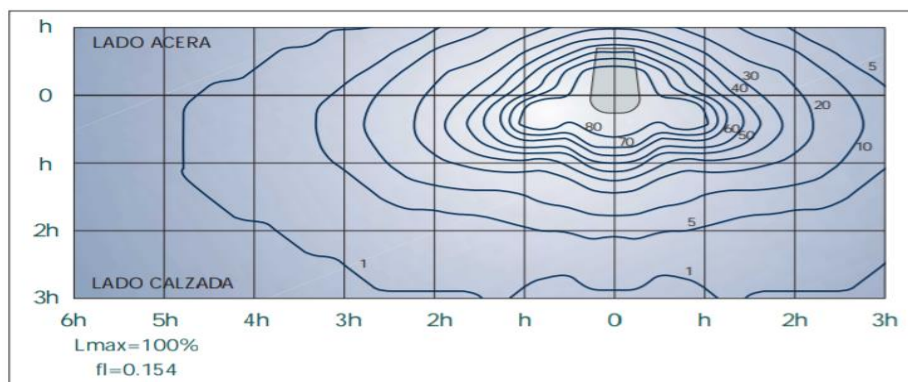


Figura 23: Curvas Isolux.

5.1.2.5. CURVAS ISOLUMINANCIAS

Las luminancias, que dependen del flujo luminoso reflejado por una superficie en la dirección del observador, se representan mediante las curvas isoluminancias. Se mide en candelas por metro cuadrado (cd/m^2):

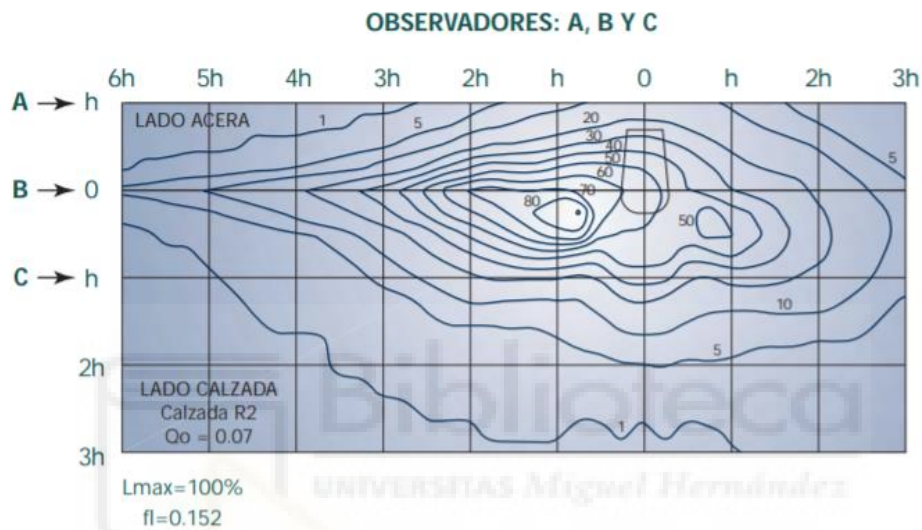


Figura 24: Curvas isoluminancias.

5.1.2.6. CURVAS ISOCANDELAS

Por último, otro método de representar la distribución del flujo luminoso es el diagrama de curvas isocandelas.

Consiste en imaginar la luminaria en el centro de una esfera, en cuya superficie exterior se unen por una línea los puntos de igual intensidad (curvas isocandelas). Generalmente las luminarias tienen, como mínimo, un plano de simetría, por lo que se desarrolla solamente una semiesfera:

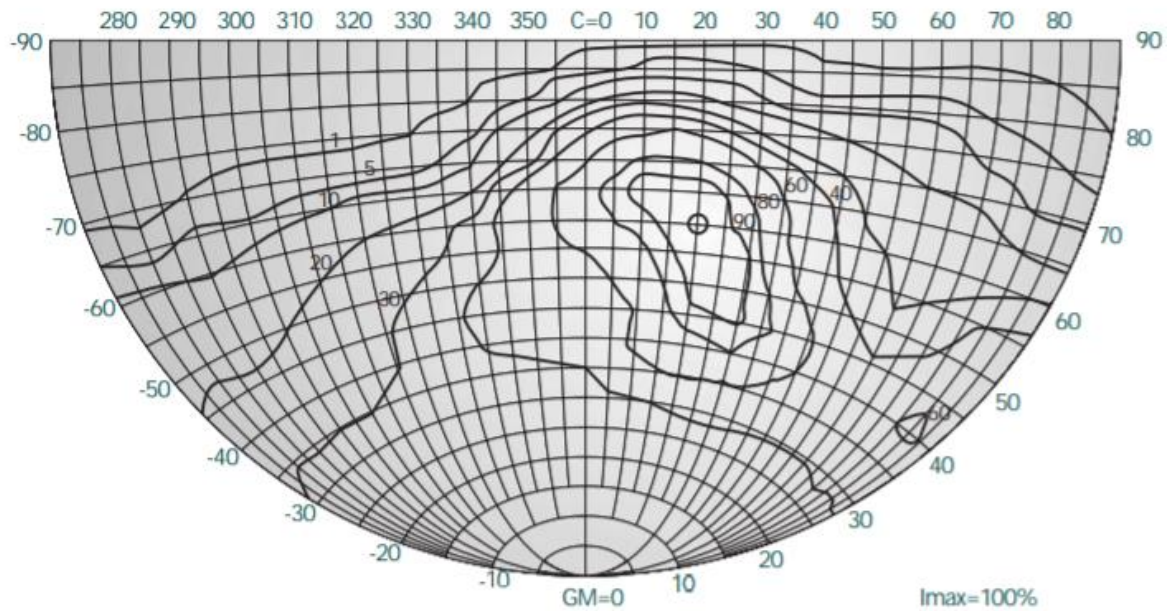


Figura 25: Curvas isocandelas.

5.2. LUMINARIAS

En [7] se recoge que, debido a la muy alta luminancia de las lámparas, es preciso aumentar la superficie aparente de emisión para evitar molestias visuales (deslumbramientos). Hay que tener en cuenta que el alumbrado público está a la intemperie y se espera que resista a diversos agentes exteriores, por ello, es necesario apantallar las lámparas. Del mismo modo, este apantallamiento dirigirá el flujo de luz en la forma más adecuada a la tarea visual.

Según la Norma UNE-EN 60598-1¹, se define luminaria como 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 (excluyendo las propias lámparas) y, en caso necesario, los circuitos auxiliares en combinación con los medios de conexión con la red de alimentación.

¹ La Norma UNE-EN 60598-1 adopta la Norma Internacional CIE-598-1

5.2.1. COMPONENTES

En [4], podemos observar un esquema de las componentes de una luminaria:

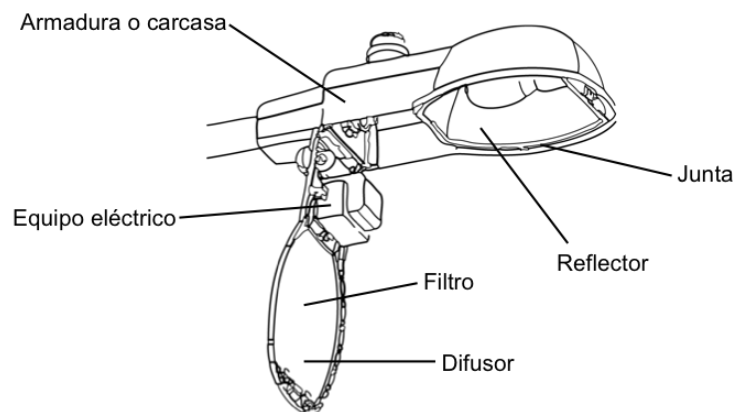


Figura 26: Componentes de una luminaria

Para la descripción de dichas componentes, sin embargo, seguiremos las descripciones de [7].

5.2.1.1. ARMADURA O CARCASA

Es el elemento físico que sirve de soporte y delimita el volumen de la luminaria conteniendo todos sus elementos. Pueden distinguirse varios tipos:

- Para interiores o exteriores.
- De superficie o empotradas.
- Suspendidas o de carril.
- De pared, para brazo o sobre columna.
- Abierta, cerrada o estanca.
- Para ambientes normales o de riesgo (de corrosión o explosión).

5.2.1.2. EQUIPO ELÉCTRICO

Sería el adecuado a los distintos tipos de fuentes de luz artificial y en función de la siguiente clasificación:

- Incandescentes normales sin elementos auxiliares.
- Halógenas de alto voltaje a la tensión normal de la red, o de bajo voltaje con transformador o fuente electrónica.
- Fluorescentes. Con reactancias o balastos, condensadores e ignitores, o conjuntos electrónicos de encendido y control.
- De descarga. Con reactancias o balastos, condensadores e ignitores, o conjuntos electrónicos de encendido y control.

5.2.1.3. REFLECTORES

Son determinadas superficies en el interior de la luminaria que modelan la forma y dirección del flujo de la lámpara. En función de cómo se emita la radiación luminosa pueden ser:

- Simétrico (con uno o dos ejes) o asimétrico.
- Concentrador (haz estrecho menor de 20°) o difusor (haz ancho entre 20° y 40° ; haz muy ancho mayor de 40°).
- Especular (con escasa dispersión luminosa) o no especular (con dispersión de flujo).

5.2.1.4. DIFUSORES

Elemento de cierre o recubrimiento de la luminaria en la dirección de la radiación luminosa. Los tipos más usuales son:

- Opal liso (blanca) o prismática (metacrilato translúcido).
- Lamas o reticular (con influencia directa sobre el ángulo de apantallamiento).
- Especular o no especular (con propiedades similares a los reflectores).

5.2.1.5. FILTROS

En posible combinación con los difusores sirven para potenciar o mitigar determinadas características de la radiación luminosa, según [2], como la radiación ultravioleta o infrarroja, polarización de la luz en un plano o alteración de los colores de la radiación.

5.2.1.6. REFRACTOR

Superficie que modifica la distribución del flujo luminoso de la lámpara por refracción.

5.2.1.7. JUNTA

Elemento de goma que aporta a la luminaria el grado de estanqueidad.

Cabe comentar que las luminarias de tipo LED tienen los mismos componentes que cualquier otro tipo de luminaria, pero su configuración vendrá determinada por la temperatura a la que trabaja cada LED. Un aumento de la temperatura reduce la eficacia de la lámpara y reduce la vida útil, por lo que es necesario un buen sistema para la disipación de calor que genera la fuente de luz.

5.2.2. CLASIFICACIÓN DE LUMINARIAS

Según [7] las luminarias se pueden clasificar basándonos en diferentes parámetros, algunos de estos son:

5.2.2.1. SEGÚN EL GRADO DE PROTECCIÓN ELÉCTRICA

Las luminarias deben asegurar la protección personal contra los contactos eléctricos. Según este grado de aislamiento eléctrico, las luminarias pueden ser:

- Clase 0: Aislamiento funcional, pero sin aislamiento doble ni reforzado en su totalidad y sin conexión a tierra.
- Clase I: Al menos, aislamiento funcional en su totalidad y con el terminal en contacto de conexión a tierra.
- Clase II: Aislamiento doble y/o aislamiento reforzado en su totalidad y sin provisión para descarga a tierra.
- Clase III: Diseñada para ser conectada a circuitos de voltaje extra-bajo, y que no tiene circuitos, ni internos ni externos, que operen a un voltaje que no sea el extra-bajo de seguridad.

5.2.2.2. SEGÚN LAS CONDICIONES OPERATIVAS

El sistema IP (International Protection - Protección Internacional) fijado por la UNE-EN 60598 clasifica las luminarias de acuerdo con el grado de protección que poseen contra el ingreso de cuerpos extraños, polvo y humedad. El término cuerpos extraños incluye aquellos elementos, herramientas y dedos que entran en contacto con las partes que llevan energía.

La designación para indicar los grados de protección se define de las letras características de IP, seguidas por dos números (tres números en Francia) que indican el cumplimiento de las condiciones establecidas en las tablas 3, 4 y 5. El primero indica la protección contra cuerpos extraños y polvo, el segundo número indica el grado de sellado para evitar el ingreso de agua y el tercero, en el sistema francés, indica el grado de resistencia a los impactos.



Primer número característico	Breve descripción	Símbolo
0	No protegida.	No tiene
1	Protegida contra objetos sólidos mayores de 50 mm.	No tiene
2	Protegida contra objetos sólidos mayores de 12,5 mm.	No tiene
3	Protegida contra objetos sólidos mayores de 2,5 mm.	No tiene
4	Protegida contra objetos sólidos mayores de 1 mm.	No tiene
5	Protegida contra polvo.	
6	Hermética al polvo.	

Tabla 3: Clasificación EN-60598 por grado de protección contra polvo (1ª cifra)







Segundo número característico	Breve descripción	Símbolo
0	No protegida.	No tiene
1	Protegida contra gotas de agua en caída vertical.	
2	Protegida contra caída de agua verticales con una inclinación máxima de 15° de la envolvente.	No tiene
3	Protegida contra el agua en forma de lluvia fina formando 60° con la vertical como máximo.	
4	Protegida contra proyecciones de agua en todas las direcciones.	
5	Protegida contra chorros de agua en todas las direcciones.	
6	Protegida contra fuertes chorros de agua en todas las direcciones.	No tiene
7	Protegida contra efectos de inmersión temporal en agua.	
8	Protegida contra la inmersión continua en agua.	

Tabla 5: Clasificación EN-60598 por grado de protección contra polvo (2ª cifra)

Tercer número característico	Breve descripción	Símbolo
0	Ninguna protección	No tiene
1	Protección contra un impacto de 0,225 J. de energía	No tiene
3	Protección contra un impacto de 0,5 J. de energía	No tiene
5	Protección contra un impacto de 2 J. de energía	No tiene
7	Protección contra un impacto de 6 J. de energía	No tiene
9	Protección contra un impacto de 20 J. de energía	No tiene

Tabla 6: Clasificación EN-60598 contra impactos mecánicos.

En lugar de esta tercera cifra, también es de aplicación la Norma EN-50102 sobre “Grados de Protección proporcionados por las envolventes de materiales eléctricos contra impactos mecánicos externos (código IK)”. En este caso, el grado de protección proporcionado por una envolvente contra los impactos se indica mediante el código IK de la siguiente forma:

- Letras del código (protección mecánica internacional): IK.
- Grupo de cifras características: De 00 a 10.

Estos grupos de cifras representan un valor de la energía de impacto, recogidos correspondientemente en la tabla 7:

Código IK	IK00	IK01	IK02	IK03	IK04	IK05	IK06	IK07	IK08	IK09	IK10
Energía de impactos en Julios.	*	0,15	0,2	0,35	0,5	0,7	1	2	5	10	20

Tabla 7: Correspondencia entre código IK y la energía de impacto.

En general, el grado de protección se estima sobre la envolvente en su totalidad. Si algunas partes de esta envolvente tienen grados de protección diferentes, éstos deben indicarse por separado.

5.2.2.3. SEGÚN EL GRADO DE INFLAMABILIDAD DE LA SUPERFICIE DE MONTAJE

La inflamabilidad de la superficie de montaje y la temperatura del cuerpo de la luminaria imponen ciertas restricciones. Nótese que esta clasificación no se

aplica si la superficie es no-combustible. Según la Norma EN-60598, existen dos categorías:

- Normalmente inflamables: Aquellos materiales cuya temperatura de ignición es de, al menos, 200°C y que no se debilitan ni deforman a esa temperatura. Las luminarias adecuadas para montaje directo sobre estas superficies tienen este símbolo sobre la placa de tipo:



Figura 27: Símbolo de luminaria adecuada para montaje directo sobre superficies normalmente inflamables.

- Fácilmente inflamable: Hace referencia a aquellos materiales que no pueden ser clasificados como normalmente inflamables o no-combustibles. El montaje suspendido es la alternativa para estos casos.

5.2.2.4. SEGÚN SUS CONDICIONES DE SERVICIO

5.2.2.4.1. LUMINARIAS PARA INSTALACIONES DE ILUMINACIÓN INTERIOR

Entran en este grupo las luminarias cuyo objetivo es la iluminación de locales y naves dedicadas a centros comerciales, industrias, oficinas, edificios docentes, etc. Por ello, este tipo de alumbrado trata de dotar de la iluminación adecuada a aquellos lugares donde se desarrolla una actividad. Este tipo de luminarias se encuentran clasificadas por la C.I.E de acuerdo con el porcentaje de flujo luminoso total distribuido por encima y por debajo del plano horizontal.

Clase de luminaria	% distribución del flujo hacia arriba	% distribución del flujo hacia abajo
Directa	0 - 10	90 - 100
Semi-directa	10 - 40	60 - 90
Directa-indirecta	40 - 60	40 - 60
General difusa	40 - 60	40 - 60
Semi-indirecta	60 - 90	10 - 40
Indirecta	90 - 100	0 - 10

Tabla 8: Clasificación C.I.E para luminarias de iluminación general de interiores.

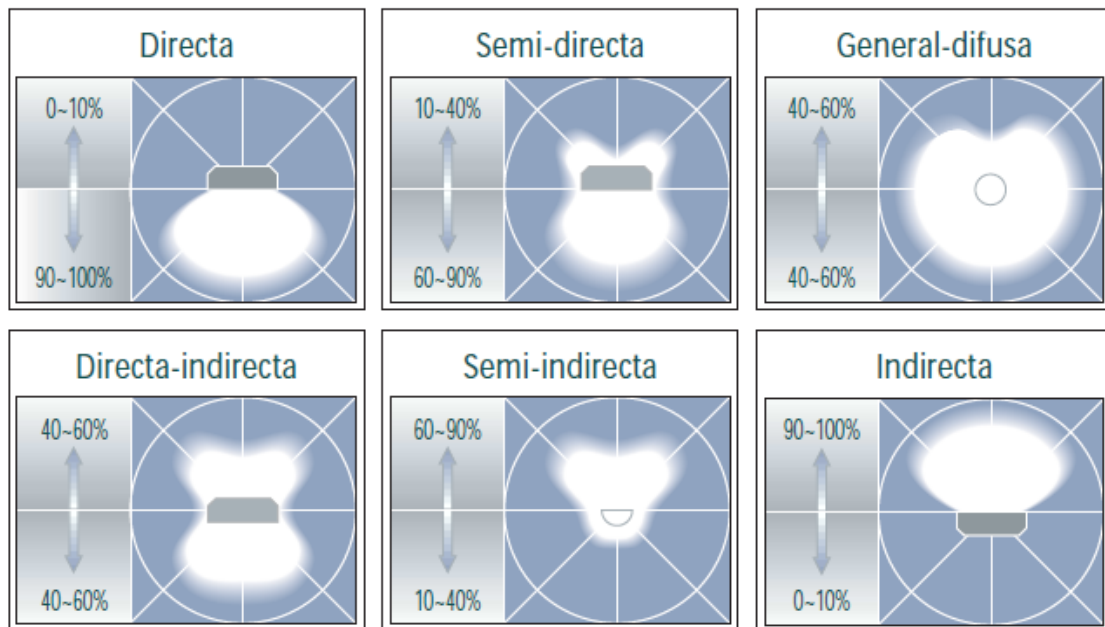


Figura 28: Clasificación de luminarias según la radiación del flujo luminoso.

5.2.2.4.2. LUMINARIAS PARA ALUMBRADO PÚBLICO.

Según se recoge en [7], dentro de este grupo tenemos luminarias de parques y jardines, así como las de iluminación pública viaria. Para las primeras, son instalaciones típicas, como su nombre indica: parques, jardines, zonas residenciales, etc. En el segundo tipo tenemos vías urbanas, autopistas, túneles, etc.

La CIE ha introducido un nuevo sistema para la clasificación de las luminarias para iluminación de viales y así sustituir al sistema que introdujo en 1965, que se clasificaban en tres categorías: *cut-off*, *semi-cut-off* y *non-cut-off*. No obstante, el antiguo sistema sigue siendo utilizado en ciertas recomendaciones nacionales para la iluminación de viales. Esta nueva clasificación se basa en tres propiedades básicas de las luminarias:

1. La extensión a la cual la luz de la luminaria se distribuye a lo largo de un camino: El "alcance" de la luminaria.
2. La cantidad de diseminación lateral de la luz, a lo ancho de un camino: La "apertura".

3. El alcance de la instalación para controlar el deslumbramiento producido por la luminaria: El "control" de la luminaria.

El alcance está definido por el ángulo γ_{max} que forma el eje del haz con la vertical que va hacia abajo. El eje del haz está definido por la dirección de la bisectriz del ángulo formado por las dos direcciones de $90\% I_{max}$ en el plano vertical de intensidad máxima.

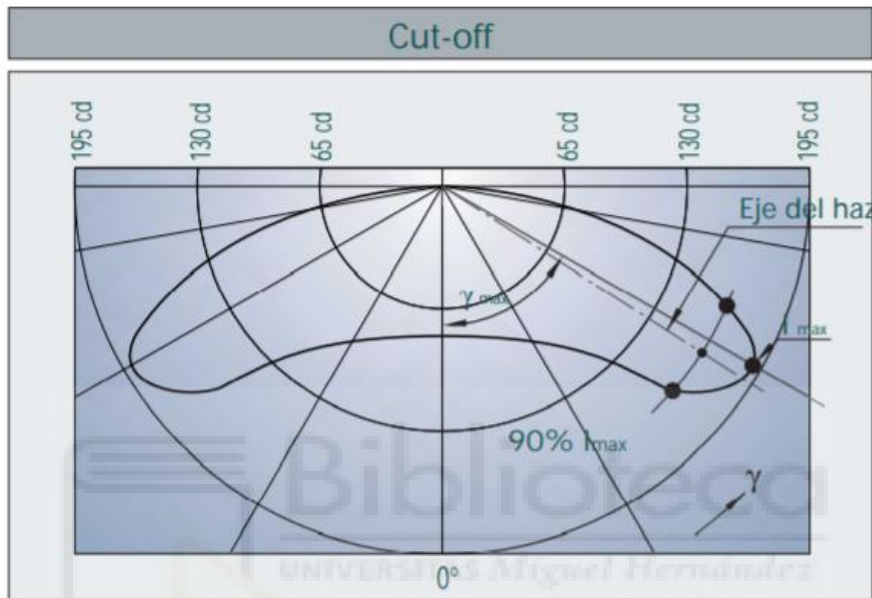


Figura 29: Curva polar de intensidad en el plano que contiene la intensidad luminosa máxima, que indica el ángulo utilizado para la determinación del alcance.

Se definen tres grados de alcance de la siguiente manera:

- $\gamma_{max} < 60^\circ$: Alcance corto.
- $70^\circ \geq \gamma_{max} \geq 60^\circ$: Alcance medio.
- $\gamma_{max} > 70^\circ$: Alcance largo.

La apertura o dispersión está definida por la posición de la línea, que corre paralela al eje del camino y que apenas toca el lado más alejado del $90\% I_{max}$ en el camino. La posición de esta línea está definida por el ángulo γ_{90} . Los tres grados de apertura se definen de la siguiente manera:

- $\gamma_{90} < 45^\circ$: Apertura estrecha.

- $55^\circ \geq \gamma_{90} \geq 45^\circ$: Apertura media.
- $\gamma_{90} > 55^\circ$: Apertura ancha.

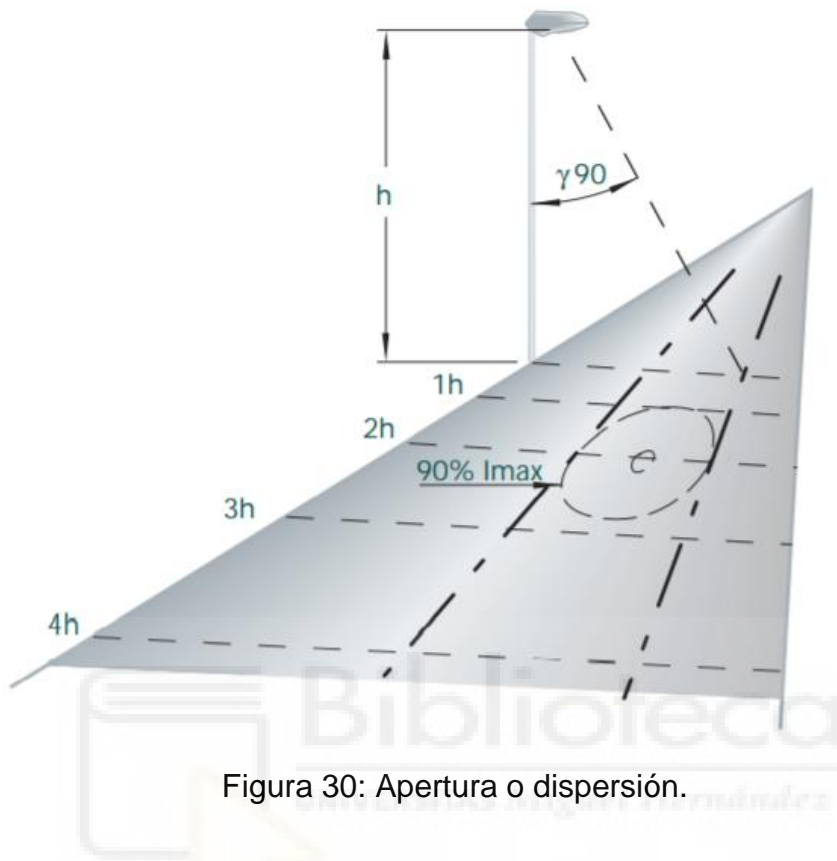


Figura 30: Apertura o dispersión.

El control está definido por el índice específico de la luminaria (SLI). Este índice se calcula de la siguiente manera:

$$SLI = 13.84 - 3.31 \cdot \log(I_{80}) + 1.3 \cdot \log(I_{80}/I_{88})^{0.5} - 0.08 \cdot \log(I_{80}/I_{88}) + 1.29 \cdot \log(F) + C$$

Siendo:

I_{80} = Intensidad luminosa a un ángulo de elevación de 80° , en un plano paralelo al eje de la calzada (cd).

I_{80}/I_{88} = Relación entre intensidades luminosas para 80° y 88° .

C = Factor de color, variable de acuerdo al tipo de lámpara (+0.4 para sodio de baja presión y 0 para las otras).

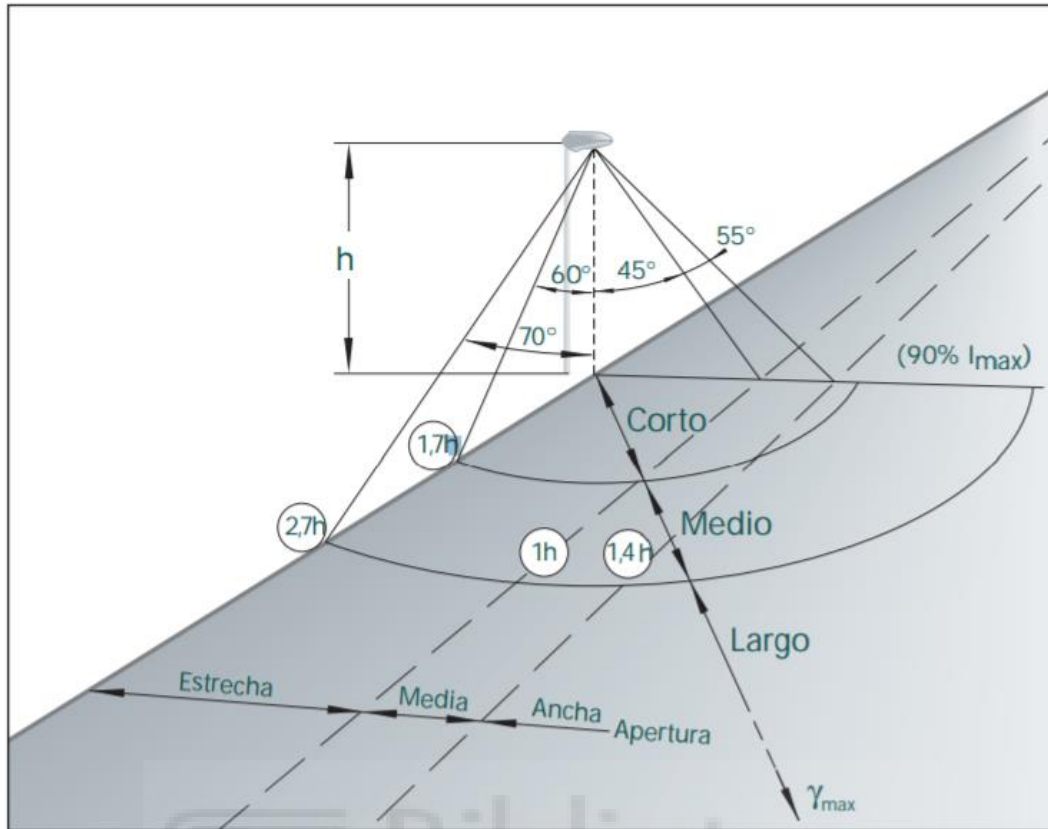


Figura 31: En esta figura se muestran los tres grados de alcance y apertura definidos por la CIE, donde “h” es la altura de montaje de la luminaria.

En el caso del control, se recomiendan también tres grados:

- $SLI < 2$: Control limitado.
- $4 \geq SLI \geq 2$: Control moderado.
- $SLI > 4$: Control estricto.

6. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

6.1. MOTIVACIONES Y OBJETIVO PRINCIPAL DEL PROYECTO

Los fabricantes de alumbrado público suelen proporcionar las prestaciones de sus productos en forma de curvas fotométricas como las expuestas en el apartado 5.1.2.

Las motivaciones por las cuales se ha llevado a cabo este proyecto son dos: obtener dichas curvas de forma independiente, mediante un sistema de adquisición de datos estático pero reconfigurable, para la verificación de las curvas que proporcionan los fabricantes de alumbrado público. Y segundo, proporcionar un sistema barato en comparación con la caracterización por goniofotómetro de los mismos. Para hacernos una idea, el precio de los goniofotómetros puede abarcar desde los 10.000\$ hasta los 60.000\$.

6.2. DISEÑO DEL SISTEMA Y MATERIALES

El sistema se basa en un conjunto de 5 placas de 1 m² cada una, en las que insertamos una matriz de 5 sensores por placa. En total, son 25 sensores de luz BH1750 (el datasheet del sensor se incluye en los anexos a este proyecto):

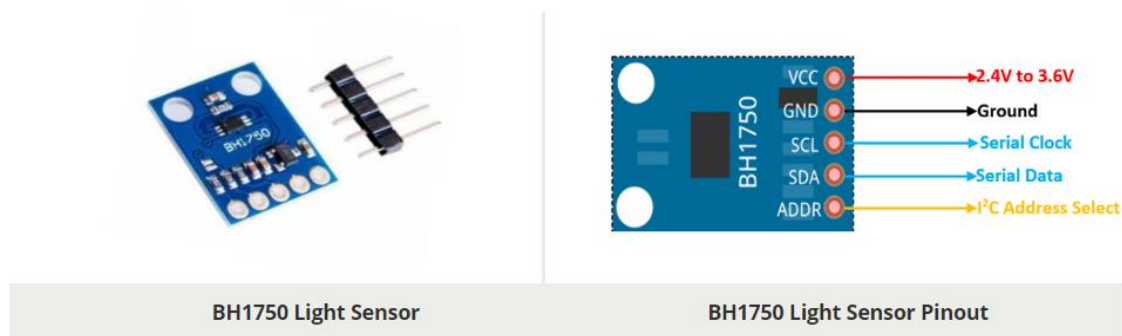


Figura 32: sensor de luz BH1750.

Los 5 sensores de cada placa irán a parar a un multiplexor I2C TCA9548A de 1-8 dispositivos:

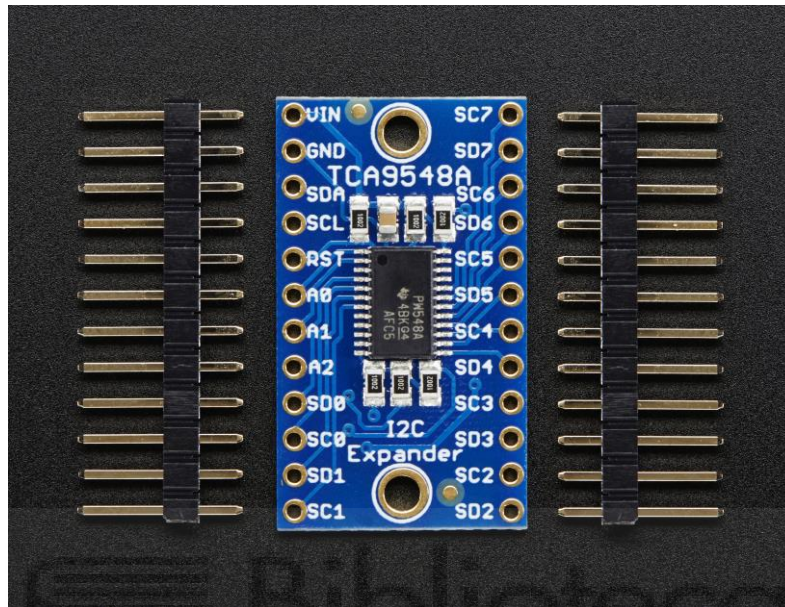


Figura 33: Multiplexor I2C TCA9548A.

Es necesario usar multiplexores de este tipo ya que el protocolo I2C exige que cada dispositivo dentro de un bus I2C tenga una dirección distinta. Nuestros sensores BH1750 solo pueden tener dos direcciones: 0x23 o 0x5C y tenemos 25 de ellos. Para solucionarlo, cada sensor irá conectado a un pin SCx / SDx de cada multiplexor y los pines de salida de este irán a los puertos SCL (puerto 28) y SDA (puerto 27) del Arduino UNO para la versión R3 y a los puertos A5 y A4 para versiones anteriores:

UNO PINOUT

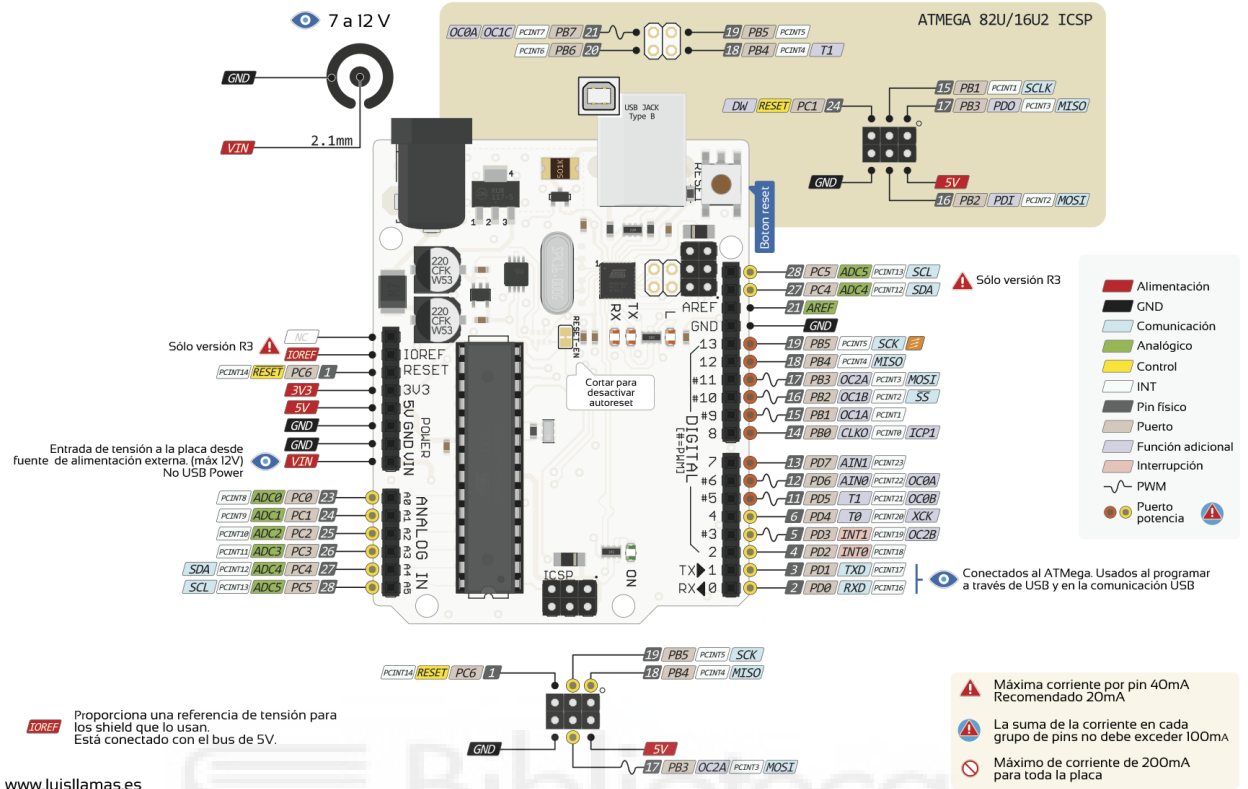


Figura 34: Pinout de Arduino UNO.

Dado que la placa de Arduino UNO solo tiene 2 pines para comunicación I2C, usaremos 5 placas Arduino UNO, conectadas a 5 puertos seriales diferentes de un ordenador para analizar los datos posteriormente con Matlab.

Una vez los datos lleguen a Matlab por los correspondientes puertos seriales, el objetivo es guardar los datos de cada matriz de 5 sensores, cada uno proporcionando un nivel de iluminación (en luxes). El objetivo ahora es crear una matriz de intensidades derivada de los datos recibidos y, a partir de ella, crear las curvas fotométricas necesarias para compararlas con las proporcionadas por el fabricante. Dichas curvas pueden ser curvas polares, curvas isolux, curvas isoluminancias o curvas isocandelas.

6.3. RELACIÓN DE MATERIALES

La relación de materiales del sistema en su totalidad quedaría así:

5 x placas de ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) de 1 m^2 .

5 x Arduinos UNO.

5 x Multiplexores I2C TCA9548A.

25 x Sensores BH1750.

35 x Buses I2C.

5 x Cables USB Arduino to PC.

6.4. EJEMPLO DE USO

Vamos a detallar a continuación un ejemplo de uso de un solo sensor BH1750, conectado a los puertos I2C de una placa arduino UNO R3, conectada a su vez al puerto de un ordenador con Matlab. Incluimos un diagrama de cómo sería este ejemplo, aunque, como ya hemos dicho, ni el software de simulación de Arduino más importante de la actualidad facilita el sensor BH1750 ni multiplexores, por lo que hemos tenido que sustituirlo en el diagrama por un fototransistor. Imaginemos que fuera un BH1750, los pines GND y VCC están conectados respectivamente a 5V y tierra. Los cables verdes son los buses I2C que irán desde los pines SDA y SCL hasta los pines A4 y A5, respectivamente:

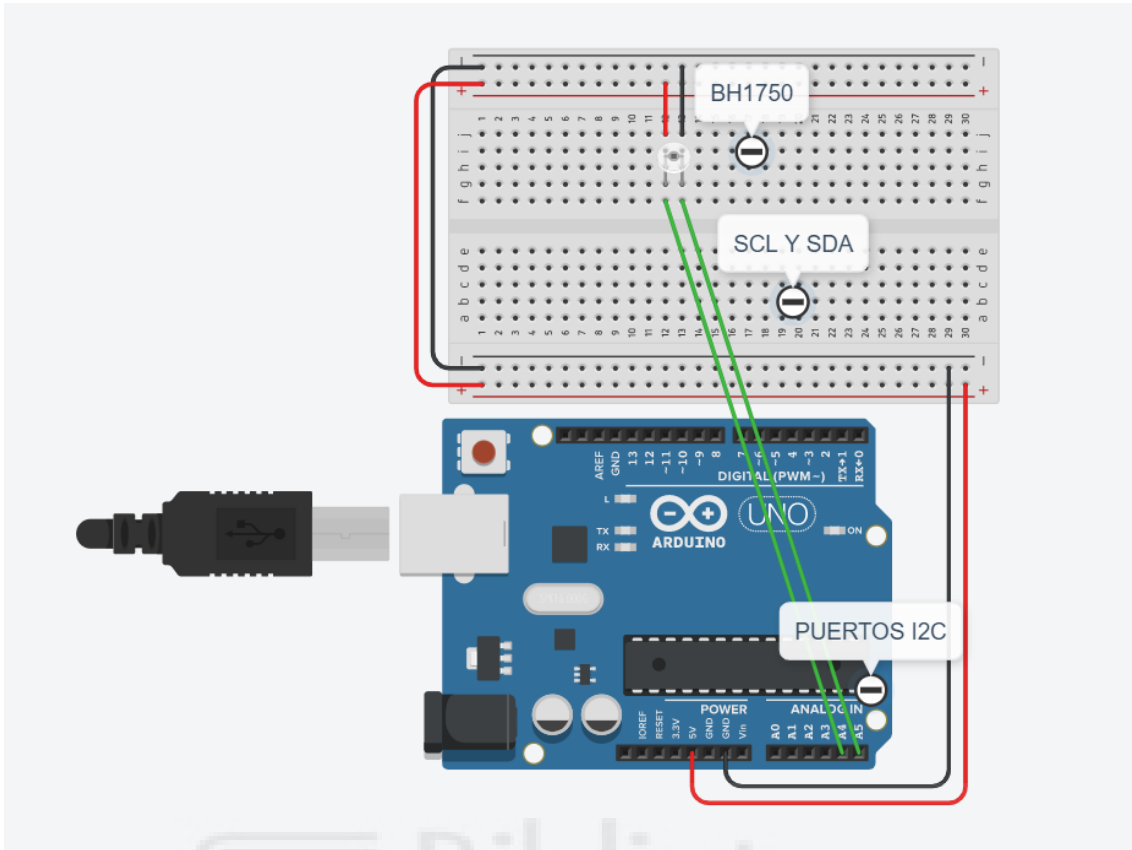


Figura 35: Diagrama cableado de nuestro ejemplo.

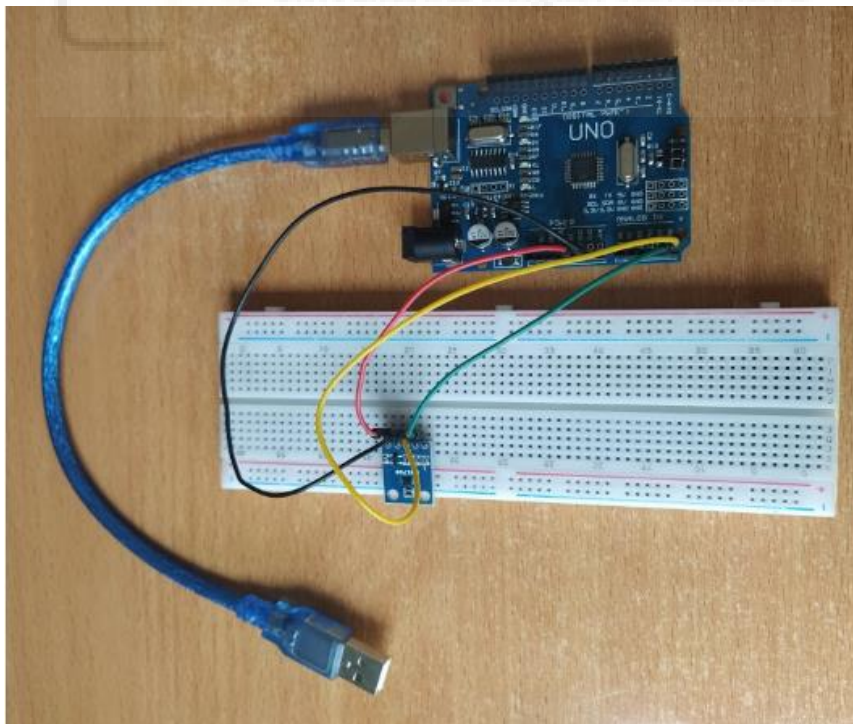


Figura 36: Montaje y cableado de nuestro ejemplo.

6.4.1. PROGRAMACIÓN DEL EJEMPLO

A continuación, se conecta al ordenador, se enciende el IDE de Arduino en el ordenador y se ejecuta el programa. Tanto el código del programa Arduino como el de Matlab para el procesamiento de los datos, se adjuntan en los anexos. Cabe mencionar que el sensor ofrece varios modos de registro de datos y, en este caso, usamos el modo continuo de alta resolución, es decir, recoge datos del entorno cada x tiempo, con una precisión de 0.5 lx y un tiempo de medida de 120 ms.

Es muy importante respetar este tiempo que tarda el sensor en recoger los datos a la hora de programar el envío de datos del arduino al ordenador. Si, por ejemplo, enviamos datos cada 100 ms y el sensor tarda en captar un nivel de iluminancia 120 ms por cada medida, es posible que haya errores en los datos enviados.

6.4.1.1. PROGRAMA ARDUINO

El programa de arduino ejecuta un loop indefinidamente que guarda las medidas recogidas en una variable llamada *lux* e imprime el valor por pantalla cada segundo, para ver si varía o no.

6.4.1.2. PROGRAMA MATLAB

El programa en matlab, cuyo código también está en los anexos, se encarga de crear un objeto serie *s* que adjudicamos al puerto que esté usando la placa arduino conectada por USB. Abrimos dicho puerto y especificamos un tiempo máximo de medida, *tmax*. En el diseño final del sistema de captación, el pc deberá disponer de 5 puertos para los 5 Arduinos UNO y el programa de Matlab creará 5 objetos serie.

El siguiente trozo de código se usa *exclusivamente* para este ejemplo, si se sigue la línea de investigación propuesta y se usa el código anexionado, se podrá eliminar o reescribir, pero no es necesario. Lo que hace es crear una gráfica que se actualiza en tiempo real con las medidas del sensor en el eje Y. Es bastante

útil para la comprobación de errores, ya que, si los valores que vemos en la gráfica no coinciden con los impresos por pantalla por el entorno de Arduino, algo va mal.

Las medidas se van guardando en un vector y , y al vencer el t_{max} , cerramos el puerto y limpiamos el objeto serie.

Durante las medidas de este ejemplo de prueba, hemos tapado el sensor con la mano, para comprobar si efectivamente el valor medido descendía.

6.4.2. RESULTADOS DEL EJEMPLO

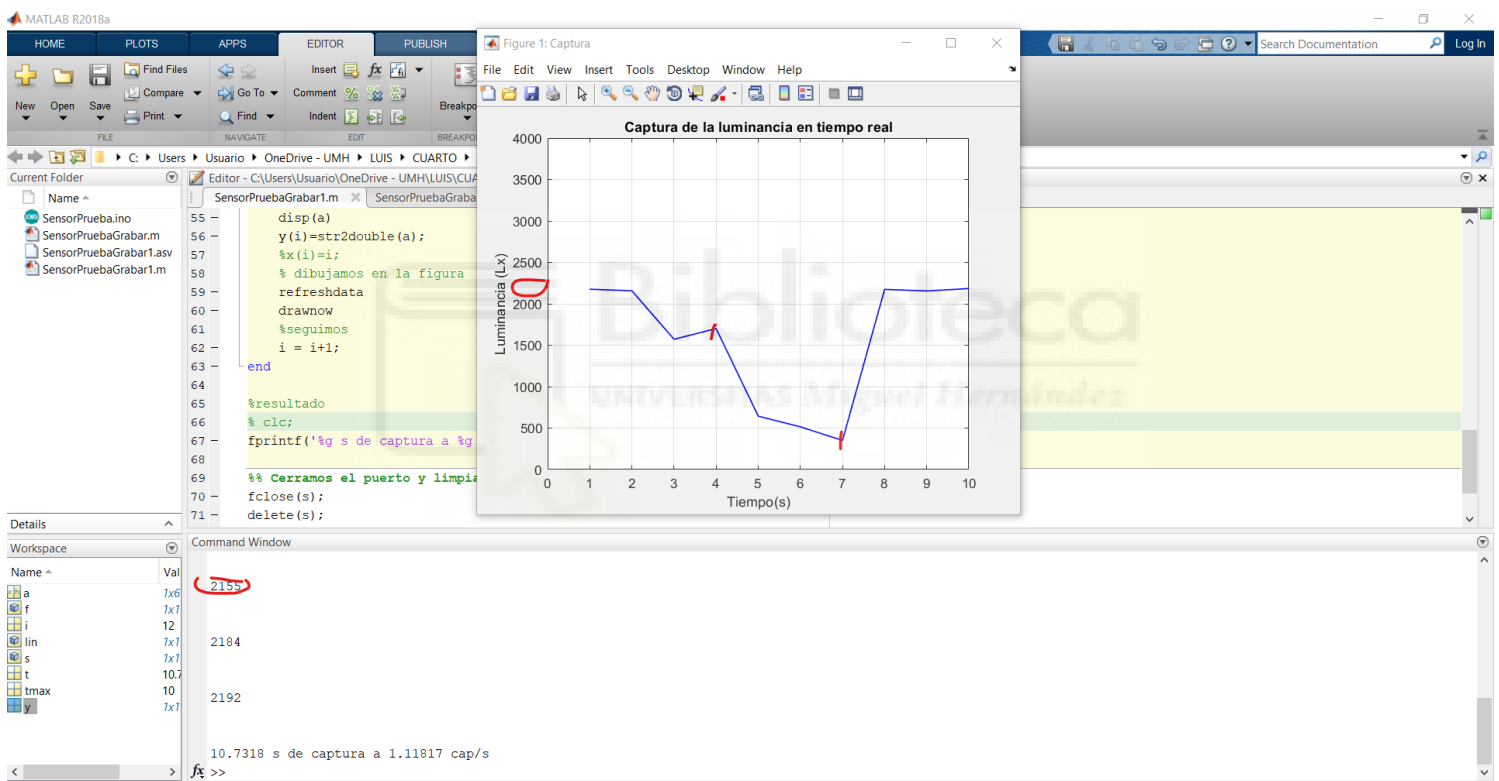


Figura 37: Resultados del ejemplo.

Como podemos observar en la figura anterior, el sensor registra un nivel de iluminancia estable, hasta que lo tapamos con la mano y el nivel cae drásticamente hasta los 500 lx aproximadamente, para luego subir cuando retiramos la mano hasta el nivel normal.

6.5. MODELO DE LUMINARIA A MEDIR

El modelo de luminaria que se propone para caracterizar es una SunStay BRP710 LED30 CW MR S1 12V LFP AIO Solar de Phillips. A continuación, adjuntamos varias figuras con las especificaciones de dicho modelo:

Datos del producto

Información general		Longitud global	
Temperatura de color	Blanco frío		684 mm
Driver incluido	Si	Anchura global	369 mm
Tipo lente/cubierta óptica	Cubierta de policarbonato estabilizado frente a UV	Altura global	156 mm
		Color	GR
Operativos y eléctricos		Aprobación y aplicación	
Tipo de batería	Litio ferrofosfato	Código de protección de entrada	IP65 [Protección frente a la penetración de polvo, protección frente a chorros de agua a presión]
Amperios hora batería	20 Ah		
Voltaje de la batería	12.8 V	Rendimiento inicial (conforme con IEC)	
Ciclos de carga y descarga de la batería	2000	Flujo lumínico inicial	3000 lm
Tipo de panel	Monocristalino	Eficacia de la luminaria LED inicial	175 lm/W
Tensión del panel	17 Vmp, 21 Voc V	Corr. inic. de temperatura de color	5700 K
Potencia pico del panel	35 W	Índice de reproducción cromática	>70
Tipo de controlador de carga	MPPT	Potencia de entrada inicial	17 W
Controles y regulación		Rendimiento en el tiempo (conforme con IEC)	
Regulable	Si	Vida útil media L70B50	50000 h
Posibilidades de configuración	Configurable en fábrica	Condiciones de aplicación	
		Rango de temperatura ambiente	0 °C a +35 °C
Mecánicos y de carcasa			
Material de la carcasa	Aluminio fundido a alta presión		

Figura 38: Datos técnicos de la luminaria.

Rango de temperatura ambiente para la carga	0 to +45 °C	EAN/UPC - Producto	8710163354613
Rango de temperatura ambiente para la descarga (cuando la luz está encendida)	-20 to +35 °C	Código de pedido	35461300
Ejemplo de regulación solar	30% Dusk to dawn, 100% on motion. (Sensor disabled for 5 Hrs, after 5 Hrs)	Cantidad por paquete	1
Tipo de conexión de red	Fuera de la red	Numerador SAP - Paquetes por caja exterior	1
Ubicación de la batería	Inside Luminaire	Código 12NC	919515812388
		Peso neto (pieza)	11,000 kg
Datos de producto			
Código de producto completo	871016335461300	IP 65	
Nombre de producto del pedido	BRP710 LED30 CW MR S1 12V LFP AIO Solar		

Figura 39: Datos técnicos de la luminaria SunStay BRP710.

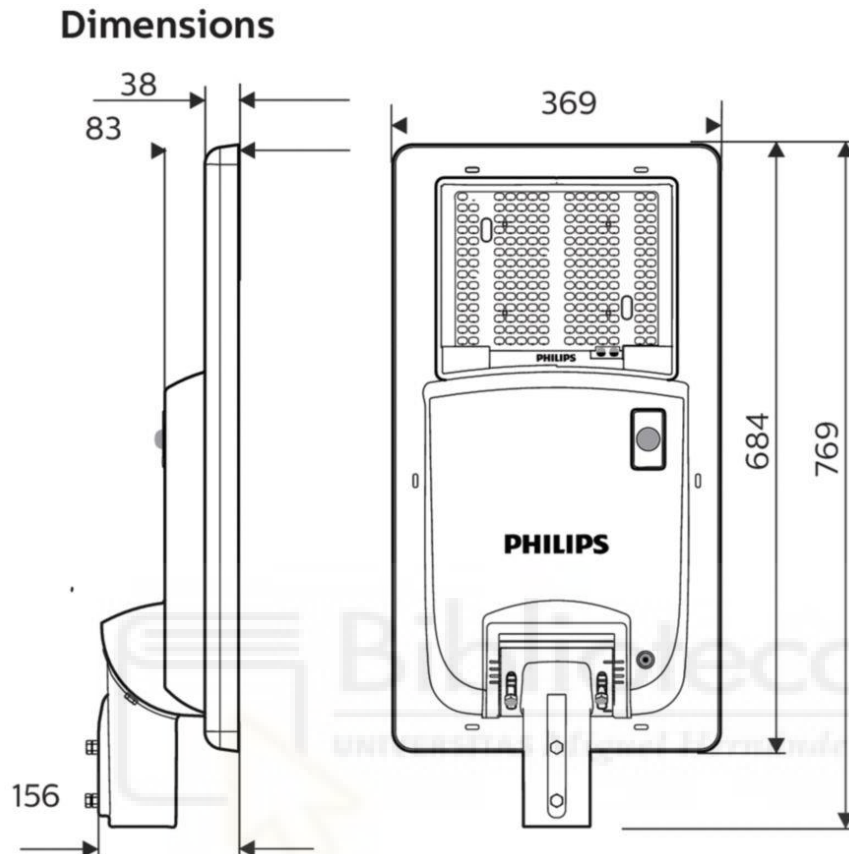


Figura 40: Dimensiones de la luminaria SunStay BRP710.

Y seguidamente, varias fotos del modelo en concreto del que se dispone en el departamento de la universidad:

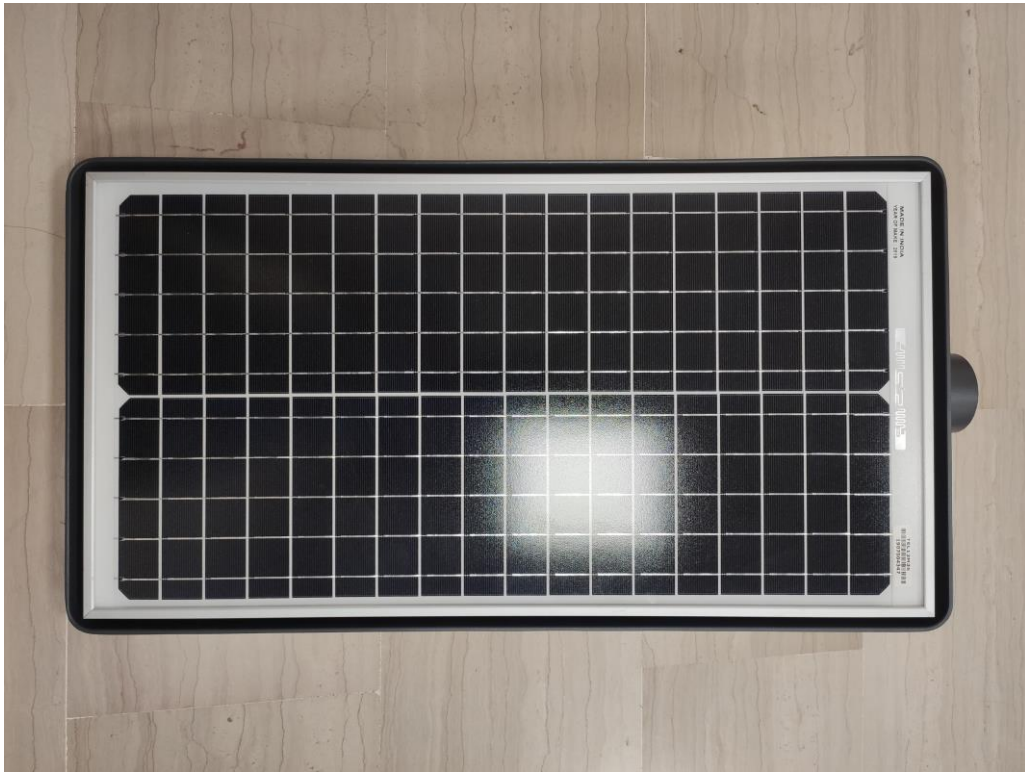


Figura 41: SunStay BRP710 disponible, parte frontal.



Figura 42: SunStay BRP710 disponible, parte trasera.

6.6. DIAGRAMAS, SIMULACIONES Y MONTAJE

Desgraciadamente, por la situación global debida a la pandemia de COVID-19, no nos han llegado ni los materiales necesarios para realizar el montaje que pedimos en Mayo, ni los que pedimos en Julio. Hemos intentado realizar diagramas con soporte para verificación de código, como Tinkercad, para suplir la falta de montaje, pero no dispone de multiplexores en su entorno gráfico. Hemos probado con diferentes entornos como VBB o Proteus Design Suite, ninguno ofrece sensores de luz como el que usamos o multiplexores. Es por ello que se indicará como futura línea de investigación el montaje e implementación del sistema, cuando las aduanas estén menos congestionadas y se puedan recibir los componentes.

Debido a que no podemos montar el sistema ni medir las intensidades reales, usaremos un programa de simulación para obtener una curva isolux de intensidades. A continuación, tendremos que diseñar un método para calcular la matriz y el diagrama polar de intensidades a partir de los datos de la simulación, para luego compararlos con los que nos da el fabricante. Recalamos que en una futura línea de investigación los datos a usar para este método serían los medidos por nuestro propio sistema.

En base a los datos que nos proporciona el fabricante en forma de matriz de intensidades, que adjuntamos en un libro de excel anexo, el programa DIALux ha calculado la curva isolux de la figura 43, así como la curva de intensidad en formato de diagrama polar con el programa LDT Editor, en la figura 44.

En DIALux, se ha simulado la curva isolux que obtendremos si se coloca la luminaria a 4 m de altura sobre una superficie de montaje de pruebas de 5 m de ancho por 20 de largo, en total $100 m^2$:

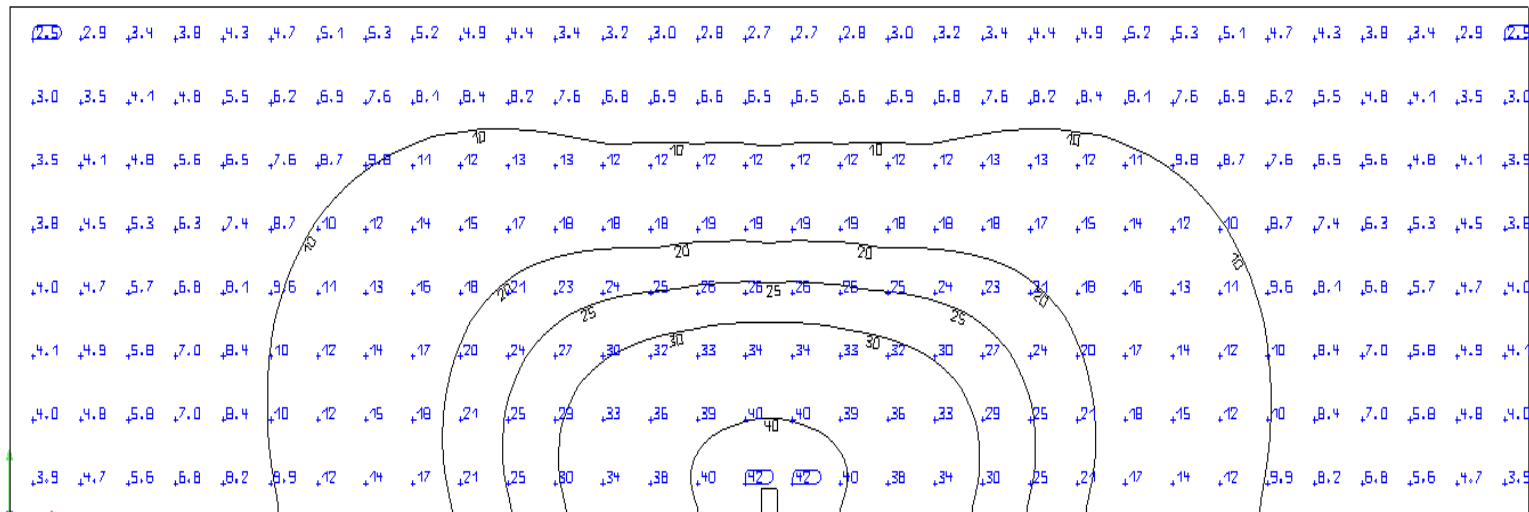


Figura 43: Simulación de la curva isolux con los datos del fabricante para SunStay BRP710.

Como nuestro sistema se compone de 5 placas de 1 m^2 , si dividimos el total de la superficie de montaje 100 m^2 entre los 5 m^2 del total del sistema, tendríamos que realizar 20 mediciones y luego superponer los resultados, formando una matriz de intensidades del mismo tamaño que la del fabricante.

También disponemos del diagrama polar de nuestra luminaria:

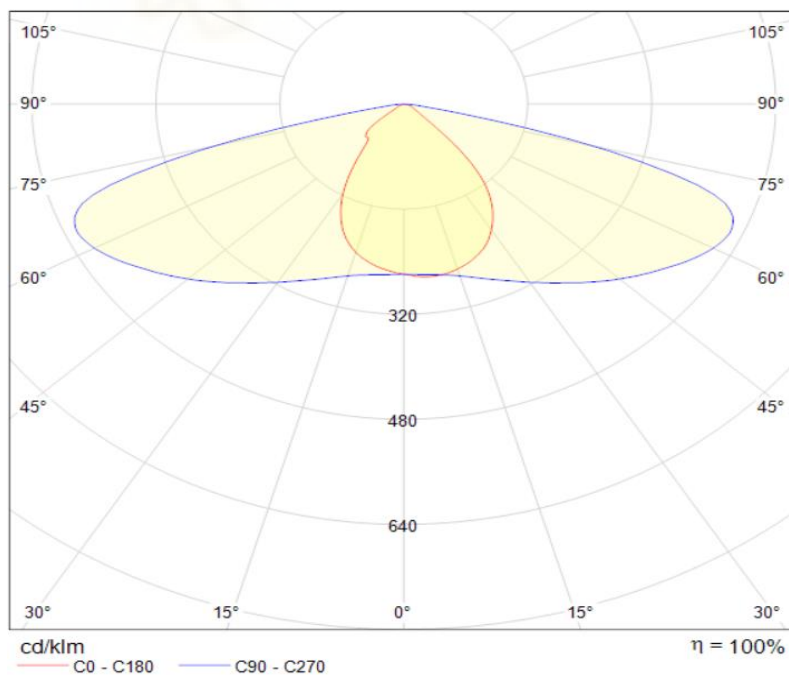


Figura 44: Diagrama polar de nuestra luminaria SunStay BRP710.

6.7. MÉTODO PARA EL CÁLCULO DE INTENSIDADES EN EXCEL

Hemos diseñado un método de cálculo, a partir de las expresiones del subapartado 4.2.3, para el cálculo de la matriz de intensidad de la luminaria y demás curvas fotométricas que requerimos para comparar las especificaciones.

6.7.1. DIAGRAMAS

A continuación, presentamos un diagrama del sistema de captación si se hubiera fabricado con los ejes de coordenadas para determinar la posición de cada sensor (E_{ij}):

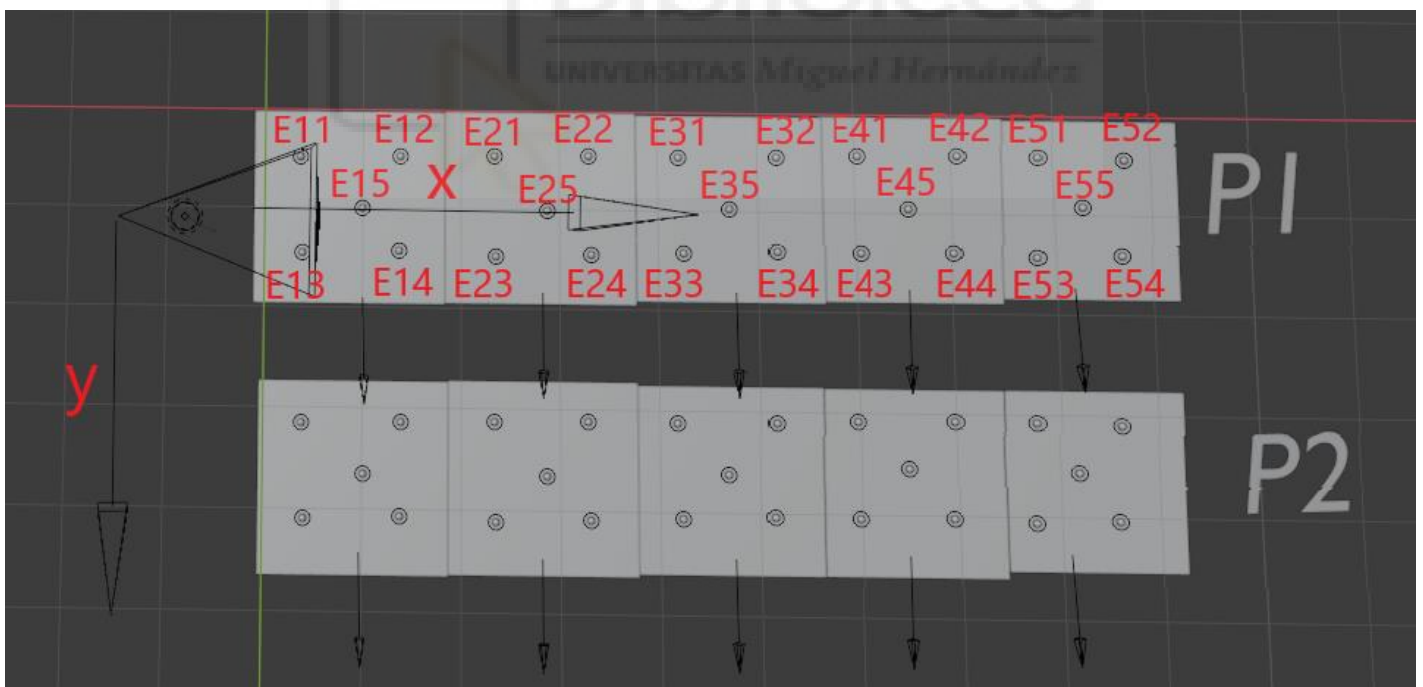


Figura 45: Diagrama del sistema de captación.

Como podemos observar, nuestro sistema se basa en dos coordenadas, x e y , mediante las cuales definiremos la posición de cada sensor. Por ejemplo, el E_{11}

tiene coordenadas $(\frac{1}{6}, \frac{1}{3})$ y el E_{12} , $(\frac{5}{6}, \frac{1}{3})$, mientras que E_{13} , $(\frac{1}{6}, \frac{-1}{3})$ y E_{13} , como está en el centro de la placa, $(\frac{1}{2}, 0)$.

Al disponer de 5 placas, tendremos que hacer 5 mediciones del sistema formado por las 5 placas, como se ve en la figura anterior. A estas mediciones las llamamos P_i y, como ejemplo, en el diagrama hemos simulado P1 y P2, seguiríamos moviendo las placas a lo largo del eje y para P3, P4 y P5.

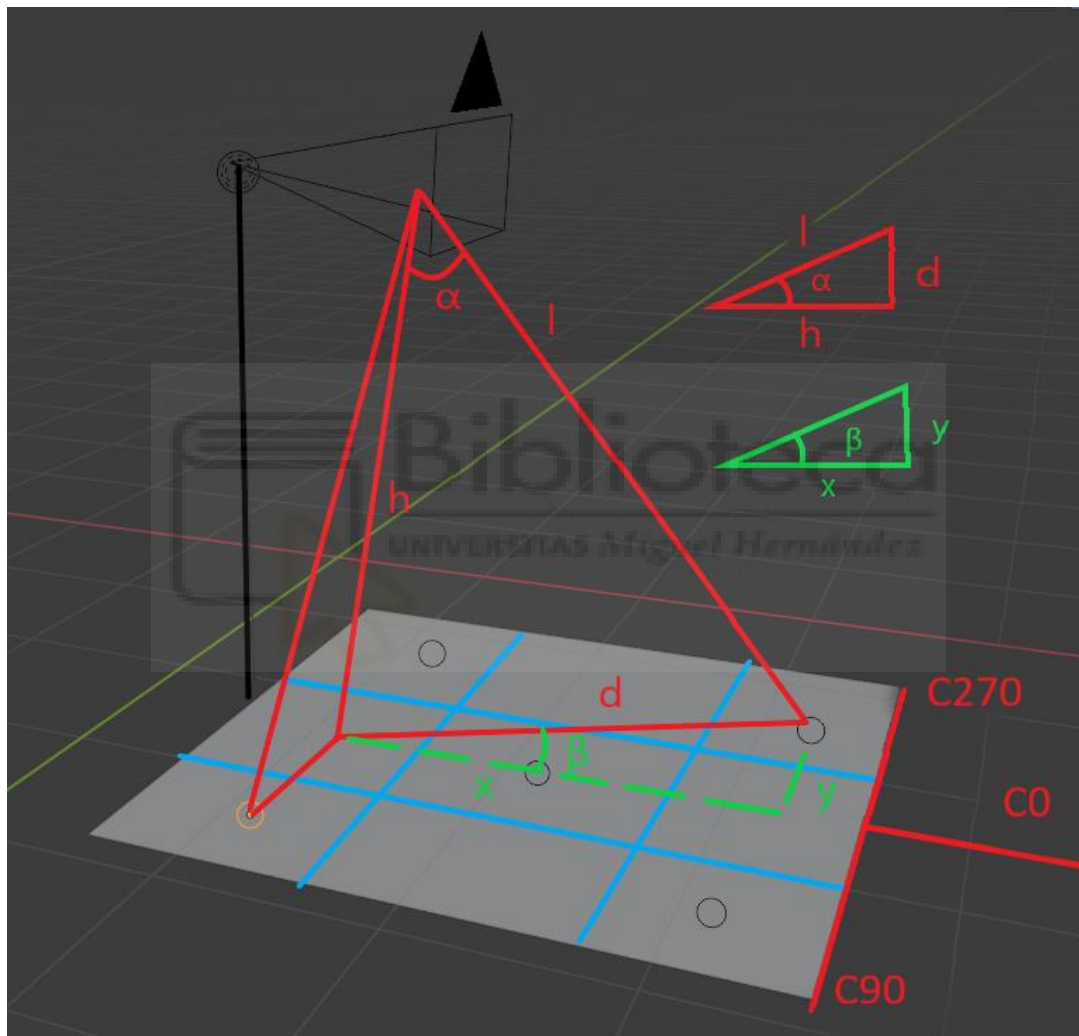


Figura 46: Esquema de ángulos y rayos a sensores.

También tenemos que calcular la distancia a la que se encuentra cada sensor del rayo vertical que traza la luminaria hacia abajo. Llamaremos a esta distancia “d” y la calculamos, mediante el teorema de Pitágoras como:

$$d = \sqrt{x^2 + y^2}$$

En base a la distancia (d) y la altura de la luminaria (h), podremos calcular el ángulo α como:

$$\alpha = \arctg \frac{d}{h}$$

Y también podremos calcular β como:

$$\beta = \arctg \frac{y}{x}$$

Cabe mencionar que β debe corregirse restando su valor a 90° .

Por último, podremos calcular la longitud del rayo que va desde la luminaria hasta el sensor como l:

$$l = \sqrt{h^2 + d^2}$$

6.7.2. SISTEMA DE CÁLCULO EN EXCEL:

Nuestro sistema de cálculo es bastante sencillo, pero no obstante, obtiene resultados muy similares comparados con los resultados ofrecidos por el fabricante, que calculamos anteriormente con LDT Editor.

Primero, introducimos la altura a la que hemos fijado la luminaria en metros, el flujo total emitido por la luminaria en lm, el rendimiento de la misma y la corrección del diagrama - Flujo en cd/1000lm.

A continuación, introducimos los datos en una tabla para la primera medición (P1): el sensor en cuestión E_{ij} , las coordenadas x, y, la distancia d, el ángulo α , β , la longitud l del rayo que va desde la luminaria hasta el sensor y la Iluminancia horizontal (plano) captada por los sensores en luxes. En base a todos estos datos (introducidos o calculados mediante sus pertinentes ecuaciones), podemos

calcular la intensidad lumínica para la curva polar 1 metro, en candelas (cd). Como hemos dicho antes, se calcula geoméricamente mediante las ecuaciones de 4.2.3:

$$E_H = \sum_{i=1}^n \frac{I_i \cdot \cos^3 \alpha_i}{h_i^2}$$

$$E_V = \sum_{i=1}^n \frac{I_i \cdot \cos^2 \alpha_i \cdot \text{sen } \alpha_i}{h_i^2}$$

Pero como en este caso solo tenemos una fuente de luz, eliminamos el sumatorio.

Adjuntamos una captura de la lectura de P1 para los 5 primeros sensores, es decir, para la primera de las 5 placas. Como Iluminancia recibida en el plano horizontal, hemos introducido 42 lux, dato que nos proporciona nuestra simulación de DIALux justo debajo de la luminaria, a falta de nuestras propias mediciones.

Altura luminaria [m]	4,3				
Flujo total emitido por la luminaria [lm]	3090				
Rendimiento	99,94%				
Corrección diagrama -Flujo [cd/1000lm]	3,088146				
		P1			
Lectura	E11	E12	E13	E14	E15
X	0,1666667	0,8333333	0,1666667	0,8333333	0,5
Y	0,3333333	0,3333333	-0,3333333	-0,3333333	0
d	0,372678	0,8975275	0,372678	0,8975275	0,5
Ángulo Alpha °	4,9534073	11,789922	4,9534073	11,789922	6,6325146
Ángulo Beta °	26,565051	68,198591	153,43495	111,80141	90
Longitud l [m]	4,3161197	4,3926707	4,3161197	4,3926707	4,3289722
Iluminancia horizontal (plano) [lux]	42	42	42	42	42
Intensidad luminica curva polar 1m [cd]	251,47132	251,48082	251,47132	251,48082	251,47157

Figura 47: Ejemplo del sistema de cálculo de excel para P1.

Si ahora comparamos con los resultados que nos da el fabricante:

The screenshot shows the LDT Editor interface with a table titled 'BETA'. The table has columns for 'General', 'Luminaire', 'Lamps', 'Luminous intensities', and 'Light distribution'. The 'Luminous intensities' column is expanded to show values for various angles (C0° to C81°). The values range from approximately 259 to 264 cd/1000lm. A red oval highlights the data for angles 4.5°, 5°, 5.5°, 6°, 6.5°, and 7°. The word 'ALPHA' is written in red next to the angle labels on the left side of the table.

General	Luminaire	Lamps	Luminous intensities					Light distribution				
	C0°	C15°	C30°	C40°	C45°	C50°	C55°	C60°	C65°	C70°	C75°	C81°
0°	259.08	259.08	259.08	259.08	259.08	259.08	259.08	259.08	259.08	259.08	259.08	259.08
0.5°	259.72	259.73	259.73	259.4	259.25	259.4	259.24	259.41	259.4	259.24	259.24	259.24
1°	260.04	260.06	259.89	259.89	259.89	259.73	259.57	259.57	259.73	259.4	259.57	259.57
1.5°	260.68	260.54	260.38	260.05	260.38	260.05	259.89	259.57	259.73	259.4	259.4	259.4
2°	260.68	260.87	260.86	260.54	260.54	260.21	260.22	259.89	260.21	259.73	259.73	259.73
2.5°	261.96	261.19	261.35	260.7	261.19	260.7	260.54	260.22	260.54	259.89	260.05	259.89
3°	262.28	261.52	261.68	261.18	261.35	261.02	260.86	260.7	260.7	260.21	260.21	259.89
3.5°	262.93	261.84	261.84	261.51	261.67	261.18	261.19	261.03	261.02	260.7	260.54	260.54
4°	263.25	262.33	262.16	261.83	262.16	261.66	261.68	261.35	261.51	260.86	261.02	260.86
4.5°	263.57	262.66	262.65	262.48	262.64	262.15	262	261.68	261.67	261.18	261.35	260.86
5°	263.89	262.98	262.97	262.64	262.97	262.47	262.32	262	262.15	261.51	261.83	261.35
5.5°	264.21	263.31	263.46	263.13	263.29	262.96	262.81	262.49	262.64	261.99	261.83	261.35
6°	264.53	263.47	263.78	263.29	263.78	263.12	263.13	262.81	263.12	262.32	262.32	261.35
6.5°	264.53	263.96	264.11	263.94	263.94	263.44	263.62	263.3	263.28	262.64	262.48	261.35
7°	264.85	263.96	264.42	264.1	264.59	264.09	263.94	263.78	263.89	263.13	263.13	262.32

Figura 48: Comparación de resultados.

Vemos que el resultado es bastante aproximado ($251 \text{ lx} \approx 260 \text{ lx}$).

Si hubiéramos podido medir realmente la iluminancia, podríamos comparar más datos: comparamos los diagramas de curvas isolux medidos con los simulados (comparamos lux con lux), la matriz de intensidades del fabricante con la que hemos obtenido con el método de excel y, por último, la representación de la matriz de intensidades, el diagrama polar, que proporciona el fabricante con el que obtenemos nosotros a partir de la matriz de intensidades calculada por el método excel.

En los anexos, adjuntamos la hoja de excel completa.

7. CONCLUSIONES, PROBLEMAS Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

7.1. CONCLUSIONES

Como conclusión, podemos decir que nuestro prototipo, a diferencia de un goniofotómetro, es un sistema de medición estático adaptable, ya que permite comprobar cualquier instalación. La diferencia radica en que los resultados se obtienen en condiciones reales de funcionamiento, y no bajo condiciones de laboratorio las cuales no tienen en consideración las singularidades y condiciones reales.

Nuestro sistema es fiable, adaptable y escalable, debido a que permite simular luminarias de cualquier dimensión y geometría simplemente cambiando la distribución de las placas con los sensores.

Otra de las diferencias principales y más importantes de nuestro sistema, al compararlo con un goniofotómetro es, por supuesto, el coste. Mientras que un goniofotómetro cuesta desde los 10.000 a los 60.000 dólares, nuestro sistema no sobrepasa los 150\$, un precio muy pragmático académicamente para el estudio de la caracterización de alumbrado tanto público como de interior. Además de contar con la ventaja mencionada anteriormente de que no hace falta contar con un laboratorio.

Por otro lado, no requerimos de ningún software externo para el cálculo de las curvas fotométricas que queramos calcular. Con nuestro sistema diseñado en excel, se pueden obtener los resultados aproximados.

7.2. PROBLEMAS

El principal problema al que nos hemos enfrentado en la realización de este proyecto ha sido, como en muchos otros ámbitos, la situación global debida al virus COVID-19. Habiendo pedido los 25 sensores en febrero, cuando se empezó a planear el proyecto, no fue hasta junio que tuvimos noticias de que no llegarían. De nuevo, hicimos un nuevo pedido y, a principios de septiembre, cuando contábamos con unas dos semanas de margen para recibirlos y montar el sistema, recibimos la noticia de que tampoco llegarían a tiempo. Es por ello que decidimos acortar la extensión del proyecto y que contuviera sólo el diseño del sistema, dejando para futuras líneas de investigación, la fase de implementación. Por esta razón, no nos hemos encontrado con muchos más problemas, al haberse convertido en un proyecto más teórico y de investigación, sentando las bases que servirán de apoyo para la realización del sistema.

El único problema, por así decirlo, es que el sistema diseñado en excel comete un pequeño error y nos interesa medirlo.

Aplicaremos el método del error cuadrático medio para las medidas que hemos obtenido en el anterior ejemplo, el de P1:

$$ECM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2$$

$$ECM = 10,52483029$$

El cálculo lo hemos realizado también en la hoja de excel, usando como media el valor 260.

7.3. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Como decíamos, dejamos abierta una línea de investigación para llevar a cabo el montaje del sistema descrito en este proyecto. Realmente no hace falta

recabar mucha más información, lo único que será necesario es programar la rutina de recogida de información del sistema en general.

En el apartado 6.5.1. se ha resumido el código base del sistema, tanto del sensor como el procesado en Matlab. La futura línea de investigación deberá indagar en cómo escalar ese programa al sistema completo: 25 sensores, 5 multiplexores y 5 Arduinos UNO o bien, diseñar algún sistema más eficiente, llevando la salida de los 5 multiplexores a un multiplexor maestro, conectado a un solo Arduino UNO.

Con el fin de facilitar el trabajo, hemos incluido en las referencias [8], [9], [10], [11], [12] mucha información acerca de cómo resolver los problemas de direccionamiento I2C para los sensores, cómo programar los multiplexores TCA9548A, etc. Resumiendo, para los multiplexores, se debe estudiar muy bien cómo asignar direcciones, tanto para ellos mismos como para los sensores que actuarán como entrada de datos. Un ejemplo de pseudocódigo de lo que debería ser la programación en arduino de los multiplexores es el siguiente:

```
1
2 rutina multiplexores:
3
4     definir multiplexor 1, definir multiplexor 2, ..., definir multiplexor 5
5
6     bucle while:
7
8         seleccionar multiplexor 1:
9             seleccionar sensor 1:
10                registrar temperatura (en modo one time)
11                delay(1000)
12            seleccionar sensor 2:
13                registrar temperatura (en modo one time)
14                delay(1000)
15            ...
16            ...
17            seleccionar sensor 5:
18                registrar temperatura (...)
19                delay(1000)
20
21        seleccionar multiplexor 2:
22            seleccionar sensor 1:
23                registrar temperatura (en modo one time)
24                delay(1000)
25
26        ...
27        ...
28        seleccionar multiplexor 5:
29            seleccionar sensor 1:
30                registrar temperatura (en modo one time)
31                delay(1000)
32    end
33
34
```

Figura 49: Pseudocódigo para programar la recogida de datos.

Seguidamente, en Matlab, se deberá diseñar un programa que recoja los datos y los almacene en matrices de 5 vectores. Dichas matrices corresponden a cada placa de $1m^2$. Se grabarán las matrices que sean necesarias para cada tipo de situación, por ejemplo, para el caso expuesto en este proyecto son necesarias 20 mediciones para abarcar los $100m^2$ de superficie. Todas las matrices se unirán para formar una matriz de intensidades como las que ofrece el fabricante. Finalmente, ya sea mediante el propio matlab o con software especializado como el mencionado LDT Editor, se obtendrán las curvas isolux y diagramas polares.



8. ANEXOS

El proyecto en su totalidad se entrega comprimido en un .zip. Dicho comprimido contendrá carpetas con diferentes anexos a los que se ha aludido durante la memoria, para la consulta de cualquier lector interesado:

- ANEXO I - CÓDIGOS.
- ANEXO II - MODELO CÁLCULO EXCEL.
- ANEXO III - DATASHEETS.
- ANEXO IV - DATOS DEL FABRICANTE DE LA LUMINARIA.

9. REFERENCIAS

[1] Asale & Rae. (s.f.). Radián: Diccionario de la lengua española. Recuperado a partir de <https://dle.rae.es/radián>

[2] ¿Qué es un radián? (2014, October 30). Recuperado a partir de <https://www.gaussianos.com/que-es-un-radian/>

[3] Morente Montserrat, Cristina. (s.f). Curso on-line de iluminación. Recuperado a partir de: <https://grlum.dpe.upc.edu/manual/index.php>

[4] Asale & Rae. (s.f.). Estereorradián: Diccionario de la lengua española. Recuperado a partir de: <https://dle.rae.es/radi%C3%A1n>

[5] Cem, & Cem. (2018, November 27). Radiometría y fotometría: Magnitudes y leyes básicas - Revista e. Recuperado a partir de <https://www.e-medida.es/numero-9/radiometria-y-fotometria-magnitudes-y-leyes-basicas/>

[6] Fernandez, J. G., & Oriol Boix. (s. f.). Magnitudes y unidades de medida. Recuperado a partir de <https://recursos.citcea.upc.edu/llum/fotometria/magnitud.html>

[7] Manual de Luminotecnia Indalux. (2002). Recuperado a partir de <https://es.scribd.com/document/93410108/Manual-de-Luminotecnia-Indalux-2pp>

[8] SOLUCIONADO: 6 sensores BH1750. (2020). Forum.arduino.cc. Recuperado 22 September 2020, a partir de <https://forum.arduino.cc/index.php?topic=509521.0>

[9] Conectar 2 multiplexores TCA9548a. (2020). Forum.arduino.cc. Recuperado 22 September 2020, a partir de <https://forum.arduino.cc/index.php?topic=523345.0>

[10] Arduino Uno R3, Qué es, Características, Precio, Programación. (2020). Descubrearduino.com. Recuperado 22 September 2020, a partir de <https://descubrearduino.com/arduino-uno/>

[11] DroneBot Workshop. (2020). Solving I2C Address Conflicts - TCA9548A I2C Multiplexer. Recuperado a partir de https://www.youtube.com/watch?v=vV42fCpmCFg&ab_channel=DroneBotWorkshop

[12] Wu, C. (2020). Tutorial – Using the TCA9548A 1-to-8 I2C Multiplexer Breakout with Arduino. tronixstuff.com. Recuperado 22 September 2020, a partir de <https://tronixstuff.com/2019/10/29/tutorial-using-the-tca9548a-1-to-8-i2c-multiplexer-breakout-with-arduino/>