

# UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Informe Memoria de Título

## Panel de Luz Uniforme VIS-NIR-SWIR

**Nicolas Eduardo Arratia Fernandez**

*Prof. Guía Sergio Torres*

*Gabriel Saavedra*

*Francisco Pérez*

Concepción, marzo de 2025

# Tabla de Contenidos

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b> .....	<b>4</b>
2.1	INTRODUCCIÓN .....	4
2.2	CONCEPTOS DE RADIOMETRÍA Y FOTOMETRÍA .....	4
2.3	PROPAGACIÓN .....	7
2.4	TIPOS DE DISTRIBUCIÓN DE ILUMINACIÓN .....	10
<b>3</b>	<b>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>12</b>
3.1	INTRODUCCIÓN .....	12
3.2	TRABAJOS PREVIOS .....	12
3.3	DISCUSIÓN .....	17
<b>4</b>	<b>DEFINICIÓN DEL PROBLEMA</b> .....	<b>18</b>
4.1	INTRODUCCIÓN .....	18
4.2	OBJETIVOS .....	18
4.2.1	<i>Objetivo general</i> .....	18
4.2.2	<i>Objetivos específicos</i> .....	18
4.3	ALCANCES Y LIMITACIONES .....	18
4.4	METODOLOGÍA .....	19
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>21</b>
5.1	INTRODUCCIÓN .....	21
5.2	ETAPA DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN .....	21
5.3	ETAPA DE MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	36
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>53</b>
6.1	RESUMEN .....	53
6.2	CONCLUSIONES .....	53
	REFERENCIAS .....	55
<b>7</b>	<b>ANEXO A: CATALOGO GOBANTES S.A</b> .....	<b>58</b>
<b>8</b>	<b>ANEXO B: PORTALÁMPARAS R7S BJB</b> .....	<b>60</b>
<b>9</b>	<b>ANEXO C: FICHA TÉCNICA LUZ DE CALIBRACIÓN XE-2</b> .....	<b>61</b>
<b>10</b>	<b>ANEXO D: FICHA TÉCNICA FIBRA ÓPTICA QP400-2VIS-NIR</b> .....	<b>63</b>
<b>11</b>	<b>ANEXO E: FICHA TÉCNICA LUZ DE CALIBRACIÓN SLS212</b> .....	<b>64</b>
<b>12</b>	<b>ANEXO F: FICHA TÉCNICA AQUROS CQD 1920 ESWIR GIGE CAMERA</b> .....	<b>65</b>

# 1 Introducción

---

En los procesos productivos actuales se están implementando maneras de controlar y monitorear su funcionamiento a través de la recepción de la energía emitida por ellos en sus diferentes etapas, esta energía se puede cuantificar en la forma de radiación electromagnética y, por lo tanto, receptarse de la misma manera que una señal electromagnética. En el campo de la óptica se han logrado diversos avances en la adquisición de señales electromagnéticas en el rango de frecuencia comprendidas del infrarrojo al ultravioleta, lo que ha logrado que sea posible adquirir la energía irradiada por algunos procesos industriales en orden de verificar su correcto funcionamiento, la aplicación más utilizada es en la detección de temperatura. El método óptico para la adquisición de radiación puede ser realizado de manera remota sin alterar el proceso productivo, y por lo tanto, resulta un área de innovación útil para la ingeniería.

Se han desarrollado avances en la medición con sensores ópticos, principalmente utilizando fibras y cámaras que son capaces de recibir radiación en un amplio rango de longitudes de onda, pero la naturaleza de la emisión de radiación, sobre todo en la banda infrarroja, provoca que estos instrumentos reciban radiación de otras fuentes distintas al objetivo de medición. Para evitar una medición incorrecta que perjudique el proceso en cuestión se emplean fuentes de calibración, los cuales consisten en fuentes de radiación que emiten a una intensidad conocida en un amplio rango de longitudes de onda, que al compararlas a lo medido por el sensor se puede determinar que tanto ruido está llegando al dispositivo y así saber la cantidad de radiación que emite un cuerpo y es recibida por el sensor. Existen varios tipos de fuentes de calibración, pero en este trabajo se estudiara la calibración utilizando fuentes de luz que entreguen una superficie iluminada de manera espacialmente uniforme, esto es que cada punto posea la misma intensidad, y temporalmente uniforme, esto es que mantengan una potencia constante a través del tiempo, ya que si bien existen estos tipos de instrumentos en el mercado se buscara realizar un diseño con la estructura de un Edge lit LED panel [1], implementarlo con materiales de relativo fácil acceso y cuantificar el nivel de uniformidad espacial y temporal y el rango de rango de frecuencias que logra emitir.

## 2 Fundamentos Teóricos

---

### 2.1 Introducción

En esta sección se comentarán los aspectos teóricos relevantes a conocer para la debida comprensión del presente informe, abordando definiciones básicas en relación a la emisión de radiación y la naturaleza de su propagación.

### 2.2 Conceptos de Radiometría y Fotometría

Se define radiometría [2] como la ciencia que estudia la recepción y cuantificación de la radiación electromagnética, incluyendo todo el rango de longitudes de onda disponibles, esto comprende la caracterización de fuentes de radiación a través de la emisión de radiación, su relación con el medio y la recepción de las ondas emitidas.

La fotometría [3] por su parte se desprende de la radiometría siendo una rama de esta, la fotometría se encarga particularmente en estudiar la emisión de radiación en el rango de longitud de onda denominado luz visible (300 nm a 700 nm), cuantificando la percepción humana de la luz tomando en cuenta las características propias de la recepción de luz del ojo humano. El ojo humano ha demostrado ser más sensible a longitudes de ondas particulares, es por esto que la cantidad radiométrica recibida es integrada por una función de luminosidad [4], definida por la CIE (Comisión Internacional de Iluminación), existen dos tipos de visión del ojo humano que se emplean según el nivel de iluminación ambiente que a su vez definen dos funciones de luminosidad diferente, la visión escotópica y la visión fotópica.

La visión escotópica [4] se activa cuando el ojo humano está expuesto a poca iluminación (alrededor de  $10^{-3} \text{ cd/m}^2$ ), aquí se activan solo ciertos fotorreceptores del ojo humano, lo que provoca que solo se puedan percibir intensidades de luz, pero los ojos son incapaces de identificar un color en específico sino una escala de grises. La función de luminosidad para la visión escotópica tiene la siguiente forma:

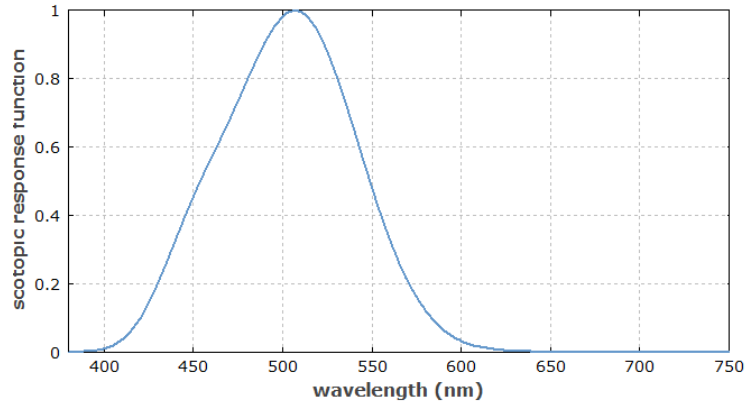


Fig. 2.2.1 Función de Luminosidad para visión escotópica [4]

Se observa un peak de recepción a los 507 nm.

Por otro lado, la visión fotópica [4] se produce cuando hay altos niveles de iluminación ambiente (aproximadamente  $1 \text{ cd/m}^2$ ) en este tipo de visión si se puede identificar color ya que los fotorreceptores encargados del color son activados a la suficiente luz ambiente. La función de luminosidad para la visión fotópica tiene la siguiente forma:

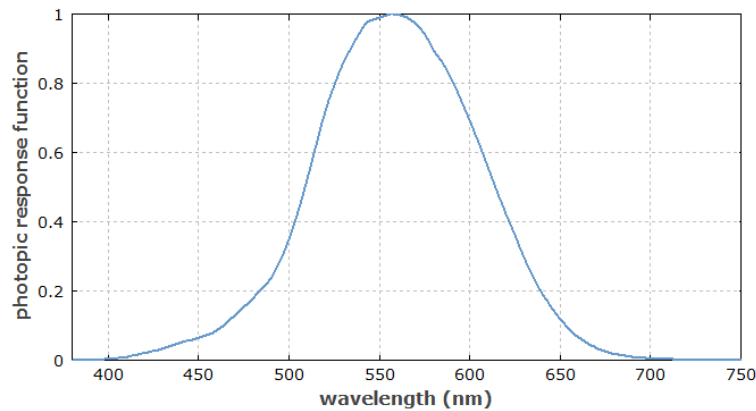


Fig. 2.2.1 Función de Luminosidad para visión fotópica [4]

El peak de recepción de luminosidad se encuentra a los 555 nm.

A continuación, se definirán conceptos de radiometría y fotometría con relación a cantidades a medir.

**Energía radiante:**

La energía radiante [5] es una unidad de la radiometría que se define como la energía transmitida, reflectada o absorbida en un intervalo de tiempo determinado por una onda electromagnética, esta se mide en unidades de energía (J).

Para el área de la fotometría se define la energía luminosa [5], la cual solo toma en cuenta las longitudes de onda comprendidas en la luz visible y pondera según la percepción humana utilizando la función de luminosidad. Su unidad de medida es el lumen segundo (lm s)

### **Flujo radiante:**

El flujo radiante [6] es la energía radiante transmitida, reflejada o absorbida por unidad de tiempo, su unidad de medida es el W (J/s). Una variable que está relacionada es el flujo espectral que está definido como la potencia por unidad de frecuencia (W/Hz) o por unidad de longitud de onda (W/m).

Para la fotometría esta cantidad se denomina Flujo luminoso [7], donde se ponderan los valores según la función de luminosidad, la unidad de medida es el lumen (lm).

### **Intensidad radiante:**

La intensidad radiante [8] es el flujo radiante por unidad de ángulo sólido, lo que nos entrega una medida de intensidad basada en la dirección de observación de la radiación, su unidad de medida es el W/sr. La intensidad espectral se define similarmente a intensidad radiante solo que por unidad de longitud de onda (W/m sr) o por unidad de frecuencia (W/Hz sr).

Para la fotometría se considera la Intensidad Luminosa [9], que es el flujo luminoso por unidad de ángulo sólido, lo que nos entrega como unidad de medida la candela (cd).

### **Irradiancia:**

Irradiancia [10] es el flujo radiante transmitido, reflejado o absorbido por unidad de área, su unidad de medida es W/m<sup>2</sup>. Una cantidad relacionada es la radiancia que mide el flujo radiante por unidad de área, pero además toma en cuenta el ángulo de observación de la superficie luminosa, su unidad de medida es el W/m<sup>2</sup> sr.

Para la fotometría, se considera como iluminancia [11] y está definido como lumen por unidad de área lo cual se denomina lux. También se puede definir según el ángulo de observación de la superficie, esta vez denominado luminancia su unidad de medida es cd/sr.

### **Eficacia lumínica:**

La eficacia lumínica [12] mide la razón entre los lúmenes generados por una fuente de luz respecto a la potencia que se le debe aplicar para producir esta cantidad de luz. Su unidad de medida es el lm/W.

### **Radiación termal [13]:**

Un objeto de una temperatura determinada es capaz de transformar algo de esa energía en radiación manifestada a través de la emisión de ondas electromagnéticas, esto permite la interacción de objetos en forma de traspaso de energía y temperatura.

Un caso excepcional es el cuerpo negro, que se describe como un emisor y absorbedor perfecto de radiación electromagnética, es decir, que independiente de la longitud de onda y dirección absorbe la totalidad de radiación que viaja hacia él y con una longitud de onda y temperatura dada es capaz de emitir la máxima cantidad de radiación posible no dependiente de la dirección.

El físico Mark Planck en el 1900 logro caracterizar la radianza espectral (que es la irradiancia por unidad de longitud de onda) de in cuerpo negro en la Ley de Planck.

$$L_{\lambda}(T)d\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \left( \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}}} \right) d\lambda \quad (2.2.1)$$

Donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío,  $h$  la constante de Planck,  $k_B$  la constante de Boltzman y  $T$  y  $\lambda$  la temperatura en Kelvin y la longitud de onda en la cual esta esta emitiendo el cuerpo.

### **2.3 Propagación**

La propagación de una onda sobre un medio se ve definido a través del índice de refracción, que se define como la razón entre la velocidad de fase de la onda en el vacío y la velocidad en el medio de propagación, con el fin de cuantificar la capacidad de un medio de reducir la velocidad de una determinada onda [14]. Esto se vuelve relevante al estudiar el efecto que tiene sobre una onda la incidencia de esta sobre un medio de índice de refracción diferente, en general se tiene que al incidir en un medio diferente una parte de la onda incidente se reflecta y otra se refracta como se observa en Fig 2.3.1:

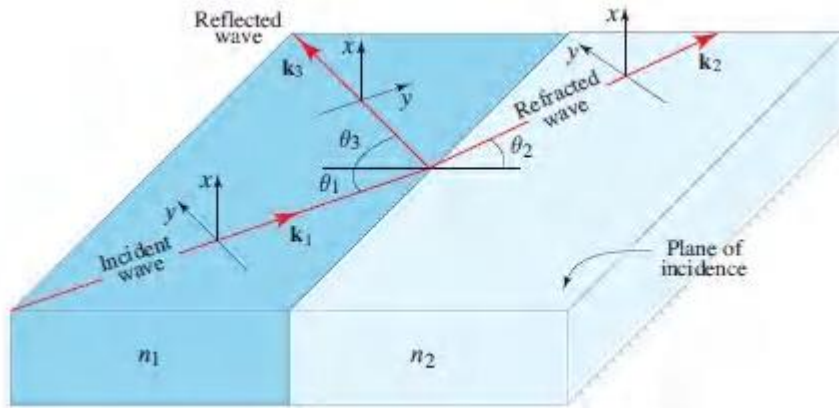


Fig. 2.3.1 Diagrama de comportamiento de onda incidente en medio de diferente índice de refracción [4]

Donde  $n_1$  y  $n_2$  son los índices de refracción de cada medio.

Para satisfacer la ecuación de Helmholtz se necesita que la onda incidente y reflejada tengan el mismo número de onda y por lo tanto el ángulo de incidencia  $\theta_1$  y el ángulo de reflexión  $\theta_3$  serán iguales [15], luego la onda refractada tiene un ángulo  $\theta_2$  que se relaciona con el ángulo de incidencia según la Ley de Snell [15]:

$$n_1 \text{sen}(\theta_1) = n_2 \text{sen}(\theta_2) \quad (2.3.1)$$

La Ley de Snell se desprende del principio de Fermat que sostiene que un rayo de luz se propaga a un punto delimitado a través del camino que le tome menos tiempo, el ángulo que debe tomar esta onda refractada para cumplir este principio es definido por la ley de Snell [15].

La razón entre la cantidad de onda incidente que es reflejada y refractada este dado por los coeficientes de reflexión ( $r$ ) y transmisión respectivamente ( $t$ ), los cuales están definidos por las ecuaciones de Fresnel [15]. Las ecuaciones de Fresnel entregan que parte de la onda incidente se refleja y se refracta a través de los ángulos de incidencia y refracción y los índices de refracción de cada medio siempre y cuando la onda se propague en el modo TE (transversal eléctrico) y TM (transversal magnético), ya que según corresponda la componente eléctrica o magnética es transversal a la dirección de propagación [15]. A continuación, se definen las ecuaciones de Fresnel para cada modo:

$$r_{TE} = \frac{n_1 \cos(\theta_1) - n_2 \cos(\theta_2)}{n_1 \cos(\theta_1) + n_2 \cos(\theta_2)} \quad (2.3.2)$$

$$t_{TE} = 1 + r_{TE} \quad (2.3.3)$$

$$r_{TM} = \frac{n_1 \sec(\theta_1) - n_2 \sec(\theta_2)}{n_1 \sec(\theta_1) + n_2 \sec(\theta_2)} \quad (2.3.4)$$

$$t_{TM} = \frac{(1 + r_{TM}) \cos(\theta_1)}{\cos(\theta_2)} \quad (2.3.5)$$

Los coeficientes van de 0 a 1, siendo 0 una transmisión o reflexión nula y 1 una transmisión o reflexión total. El argumento de cada coeficiente indicará el cambio de fase  $\phi_r$  introducido en la onda al ser reflejada o transmitida [16]. Aquí se analizarán dos casos de interés:

**1)  $n_1 < n_2$ :**

Cuando el índice de refracción del medio por donde incide la onda es menor al del medio donde se transmite la onda se denomina reflexión externa [16]. Para el caso del modo TE se tiene que el coeficiente siempre será real y negativo, por lo tanto, el argumento del coeficiente de reflexión será siempre igual a  $\pi$ , la magnitud por su lado alcanza su punto mínimo en  $\theta_1 = 0$  y alcanza la unidad en  $\theta_1 = 90^\circ$ , esto significa que con un ángulo de incidencia de  $90^\circ$  la totalidad de la onda incidente se refleja. En el caso del modo TM el coeficiente de reflexión es siempre real solo que varía en su signo según el ángulo de Brewster que indica cuando el coeficiente se hace 0, lo que significa que no refleja ninguna parte de la onda incidente [15]. El ángulo de Brewster está definido por:

$$\theta_B = \arctan\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (2.3.6)$$

Para ángulos  $\theta_1 < \theta_B$  el cambio de fase será de  $\pi$  y para  $\theta_1 > \theta_B$  el cambio de fase será de 0, a un ángulo de incidencia de  $90^\circ$  el coeficiente de reflexión tiene amplitud 1 [15].

**2)  $n_1 > n_2$ :**

En este caso se encuentra reflexión interna. Para el caso del modo TE se tiene que para un  $\theta_1$  pequeño el coeficiente de reflexión es real y positivo, eventualmente al aumentar  $\theta_1$  se llega a cierto ángulo que provoca que el coeficiente de reflexión tenga valor 1 [15], este ángulo se denomina ángulo crítico y este dado por la siguiente fórmula:

$$\theta_c = \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (2.3.7)$$

Luego cuando  $\theta_1 > \theta_c$  se está presente ante reflexión interna total (TIR) ya que la totalidad de la onda incidente se refleja, TIR está acompañado por un cambio de fase dado por [15]:

$$\tan\left(\frac{\phi_r}{2}\right) = \sqrt{\frac{\cos^2 \theta_c}{\cos^2 \theta_1} - 1} \quad (2.3.8)$$

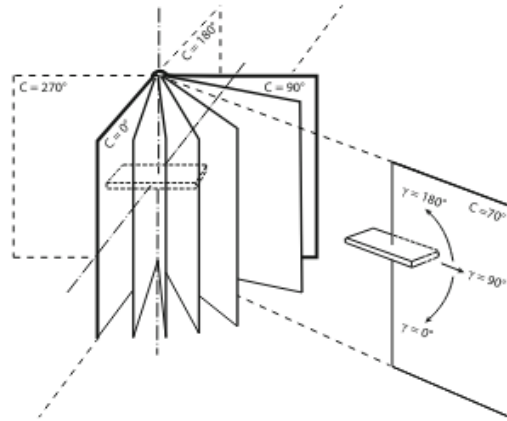
En el caso del modo TM [15] se tiene que para un  $\theta_1 = 0$  el coeficiente de reflexión es positivo al aumentar  $\theta_1$  disminuye hasta llegar a  $\theta_1 = \theta_c$  donde se vuelve nulo. Cuando  $\theta_1 > \theta_c$  el coeficiente de reflexión se vuelve negativo y aumenta hasta llegar a una magnitud 1 cuando  $\theta_1 = \theta_c$ . Luego para  $\theta_1 > \theta_c$  se está tratando con TIR, que induce un cambio de fase  $\phi_r$  dado por:

$$\tan\left(\frac{\phi_r}{2}\right) = \left(-\frac{1}{\sin^2(\theta_c)}\right) \sqrt{\frac{\cos^2 \theta_c}{\cos^2 \theta_1} - 1} \quad (2.3.9)$$

Estos cambios de fase son importantes en el diseño de guías de onda ya que al producirse TIR el cambio de fase introducido interfiere con la misma onda en otros puntos de la guía de onda [15].

## 2.4 Tipos de Distribución de Iluminación

Un dispositivo de iluminación posee un haz de luz característico que indica la distribución de iluminación que esta entrega espacialmente, generalmente se utiliza un sistema de coordenadas C-gamma para graficar el patrón de iluminación [16], como se aprecia en la figura:



Se aprecia que el plano C es el plano vertical que divide la iluminaria transversalmente con un rango de  $0^\circ$  a  $360^\circ$ , el plano gamma va de  $0^\circ$  a  $180^\circ$  y se extiende a través del plano C. La intensidad lumínica se mide en  $\text{cd}/1000 \text{ lm}$  para tener un valor de referencia y no depender solamente de los lúmenes producidos por la fuente de luz. Generalmente se posiciona la iluminaria tal que gamma de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  represente la parte inferior de la iluminaria y gamma de  $90^\circ$  a  $180^\circ$  la parte superior [16], ya que se utiliza este diagrama habitualmente para luces de aplicación cotidiana.

La CIE en 2011 [17], propuso un estándar para clasificar el haz de luz producido por luminaria, a través de la cuantificación del porcentaje de luz dirigido hacia debajo de la luminaria y arriba de la luminaria utilizando los planos C-gamma utilizando C 0°-180°. Los tipos son:

**Directa:** más del 90% del haz de luz se distribuye en la parte inferior de la luminaria.

**Semi-directa:** más del 60% del haz de luz se distribuye en la parte inferior de la luminaria

**Directa-indirecta:** el haz de luz se distribuye en partes relativamente iguales tanto en la sección superior como inferior.

**Indirecta:** más del 90% del haz de luz se distribuye en la parte superior de la luminaria

**Semi-indirecta:** más del 60% del haz de luz producido por la fuente se distribuye en la parte superior de la luminaria.

**Difusa-general:** el haz de luz se distribuye uniformemente de manera espacial a toda dirección.

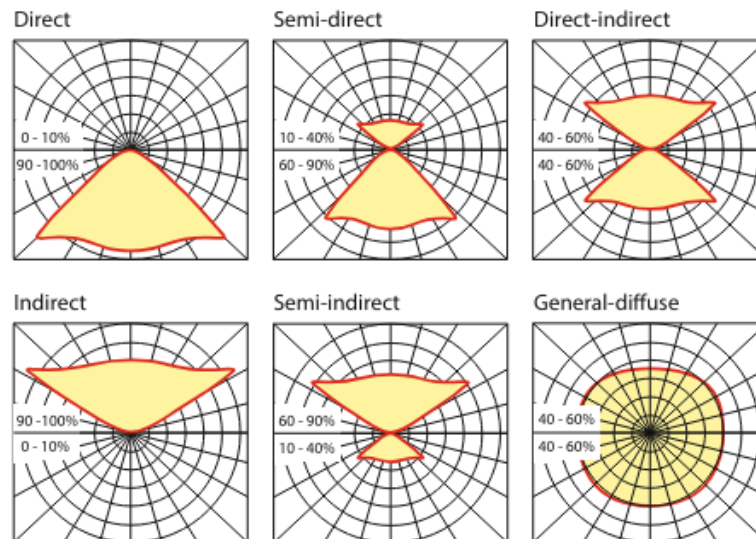


Fig. 2.4.1 Diagrama de los distintos patrones de iluminación según la CIE [16]

## 3 Revisión Bibliográfica

---

### 3.1 Introducción

Actualmente en el mercado existen instrumentos que permiten obtener una superficie con iluminación espacialmente uniforme y/o una luz capaz de emitir en un rango de frecuencia que llegue hasta el infrarrojo, muchas veces se cumple solo una de estas características. En esta sección se discutirán estos dispositivos, su estructura, su funcionamiento y efectividad para lograr su cometido, además se incluirán documentos donde se busca optimizar sus características de modo de ilustrar la lógica de diseño de los dispositivos.

### 3.2 Trabajos Previos

Para analizar el estado del arte de dispositivos similares se va a comenzar con dispositivos que han logrado posicionarse en el mercado como fuentes de luz espacialmente uniforme. Principalmente se mencionarán 2 productos [1]; el back-lit LED panel y el edge-lit LED panel.

Un back-lit LED [1] panel se le denomina a la estructura de iluminación basada en un arreglo LED que irradian hacia una pantalla que difumina la luz en orden que se produzca la sensación de una superficie uniformemente iluminada, en ocasiones también se emplean lentes [18] entre el arreglo de LED y la pantalla para modificar el patrón de iluminación proyectado hacia la pantalla según requiera la aplicación. En la Fig. 3.2.1 se puede observar un diagrama que contiene la estructura del back lit LED panel:

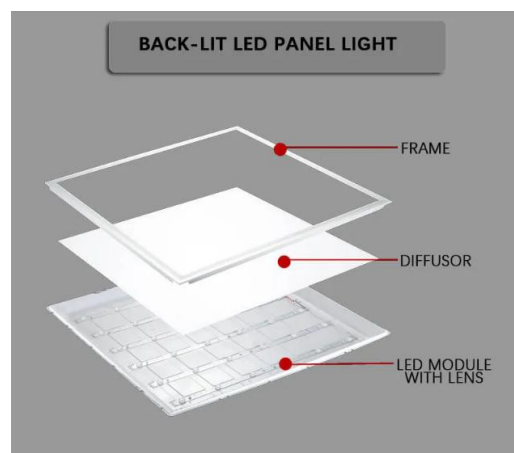


Fig. 3.2.1 Estructura de un Back-lit LED panel [19]

El edge-lit LED panel por su parte [1], en vez de posicionar el arreglo de LED de forma que iluminen por unas de las caras de la pantalla, el arreglo LED se ubica en el perímetro de una Light Guiding Plate (LGP) que se encarga de dirigir y distribuir la luz por toda la superficie de manera espacialmente uniforme, este componente es una placa generalmente hecha de acrílico con una microestructura impresa de forma que logre la correcta distribución de luz, generalmente el patrón impreso distribuye mejor la luz al ser un arreglo de circunferencias [20]. Bajo la LGP se encuentra una superficie reflectante que a su vez tiene a su lado opuesto una placa opaca que tienen como función direccionar la luz incidente hacia donde debería iluminar el panel. En la Fig. 3.2.2 se puede observar la estructura descrita anteriormente:

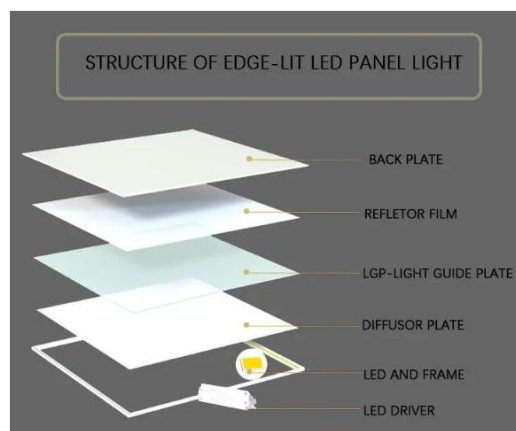


Fig. 3.2.2 Estructura de un Edge-lit LED panel [19]

Ambas tienen la ventaja de utilizar luces LED, por lo tanto, la eficacia lumínica suele ser alta [21]. Donde se diferencian es en la dimensión de ambos ya que el back-lit LED panel al poseer los LED en su parte posterior provoca que el grosor del panel sea mayor respecto a la del edge-lit LED panel. También al estar más espacialmente distribuidos el edge-lit LED panel disipa mejor el calor producido por las luces.

Si bien estos ejemplos de panel de luz proporcionan una superficie iluminada uniformemente, generalmente la luz producida por estos tipos de LED solo emite en la banda de luz visible, es por eso que se observó el espectro de emisión de diferentes tipos de luces que poseen la similitud de poseer un amplio rango de longitudes de onda [22].

### **Bombilla Incandescente:**

La bombilla incandescente es un dispositivo de luz que presenta un filamento de tungsteno que al calentarse emite luz, este filamento está encapsulado por una estructura de vidrio rellena por un gas

inerte que previene la temprana oxidación del filamento. La vida útil puede llegar aproximadamente a las 1000 horas [23]. Es considerada de baja eficacia luminosa [21] ya que la mayoría de la energía utilizada para generar luz se disipa en calor en vez de luz visible.

Su espectro de emisión es:

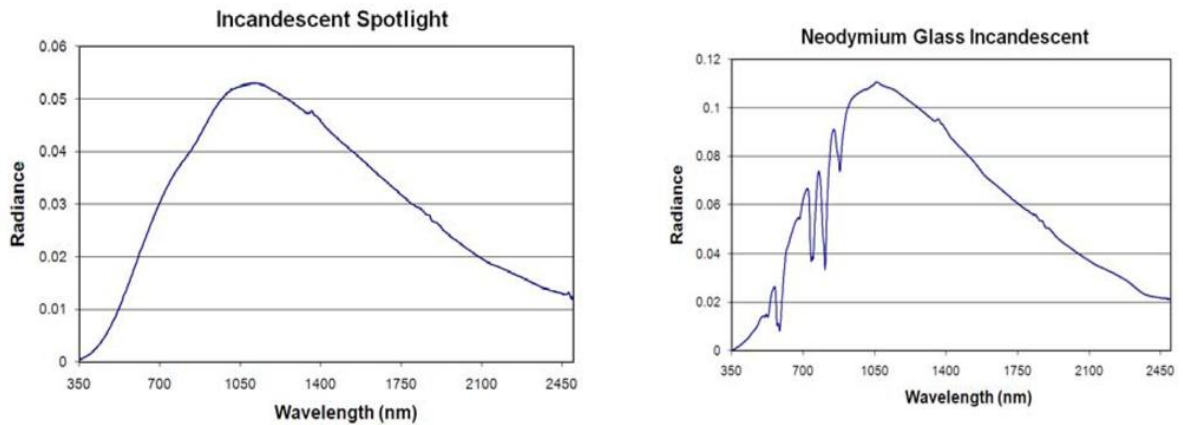


Fig. 3.2.3 Espectro medido de una bombilla incandescente [22]

### Bombilla Halógena Incandescente:

La bombilla halógena utiliza el mismo principio de la bombilla incandescente solo que la ampolla esta rellena por un gas inerte del tipo halógeno tal que el tungsteno liberado por el filamento reaccione con el gas y vuelva al filamento aumentando la vida útil de la bombilla, la ampolla está hecha de cuarzo lo que permite a la bombilla llegar a temperaturas más altas. Aumenta la eficacia luminosa en comparación con la bombilla incandescente normal [21] y tiene más vida útil [23].

Su espectro de emisión es:

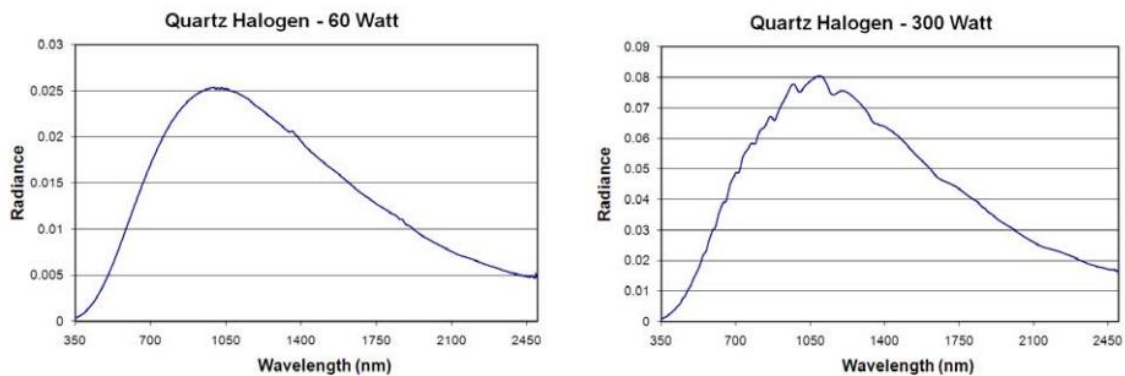


Fig. 3.2.4 Espectro medido de una bombilla de halógena de tungsteno [22]

### Bombilla Vapor de Mercurio:

Esta bombilla utiliza el método de HID (High Intensity Discharge) donde a través de un arco eléctrico se vaporiza mercurio, que previamente estaba en estado líquido, y este emite radiación, todo este proceso se desarrolla en una cámara hecha de cuarzo creada para resistir temperaturas altas y no dejar que se escape el mercurio vaporizado. También generalmente presentan otra cámara exterior recubierta de fosforo para filtrar la radiación UV que emite la bombilla. Esta bombilla presenta mayor eficacia luminosa [21] y vida útil (24 000 horas aproximadamente) [24] que los otros dos ejemplos, pero necesita mayor potencia para funcionar y es más susceptible a daño externo, además de poseer un periodo de prendido de 5 a 7 minutos.

Su espectro de emisión es:

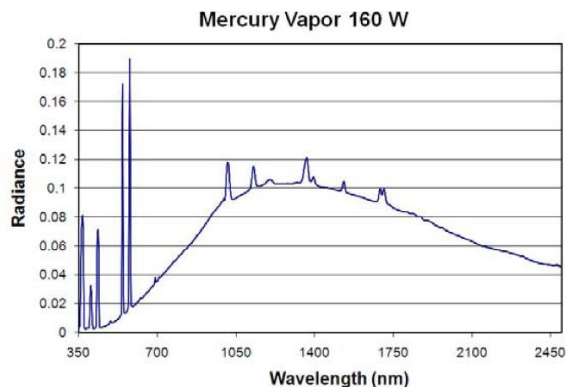


Fig. 3.2.5 Espectro medido de una bombilla de vapor de mercurio [22]

En el mercado actualmente existen fuentes de luz capaces de emitir en un amplio rango de frecuencias, las cuales se utilizan como referencia para la calibración de un instrumento o para obtener mediciones de transmitancia, reflectancia y absorbancia de algún material.

Los microscopios ópticos generalmente utilizan una bombilla incandescente tungsteno-halógeno [25] para iluminación de las muestras, esta se sitúa en la parte inferior del instrumento, cubierto con materiales que disipan el calor, sobre la bombilla se encuentra un lente que se encarga de enfocar la luz hacia la muestra, se observa la muestra desde arriba y se observa la luz que traspasa el objeto, midiendo efectivamente la transmitancia. Las luces empleadas en este instrumento poseen un peak de emisión en los 600 nm a 1200 nm.

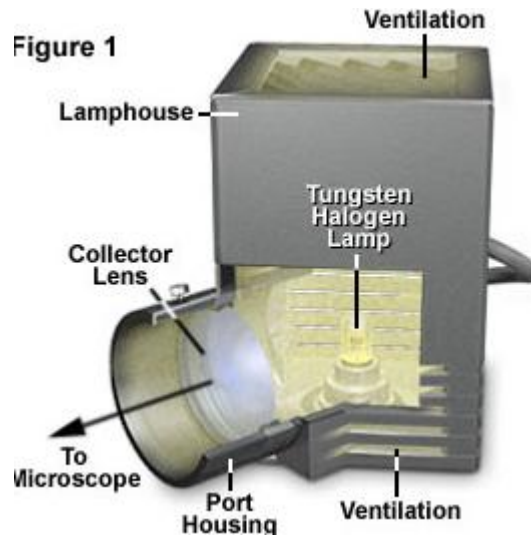


Fig. 3.2.6 Posición de la bombilla de tungsteno halógeno en un microscopio óptico [22]

La fuente de luz tungsteno-halógena estabilizada SLS201L [26] es un dispositivo diseñado por Thorlabs que tiene el atributo de emitir luz en el rango longitud de onda de 300 nm a 2600 nm con una intensidad constante de 10 mW, esta luz puede ser extraída mediante un conector SMA hacia una fibra óptica. Sus funciones abarcan la calibración de equipos de medición a mediciones de transmitancia, reflectancia y absorbancia de materiales. Debido a su pequeño tamaño el área donde irradia el instrumento implica que solo es funcional para aplicaciones que utilicen objetos de menor tamaño. Se recomienda por el fabricante un periodo de estabilización de 45 minutos y una vez estabilizado su intensidad es capaz de variar en los 0.05% [26].



Fig. 3.2.7 Imagen de luz calibradora SLS201L de Thorlabs [18]

La empresa Labsphere ofrece en sus productos, PT-1000-S y PT-1000-W [27], fuentes de calibración de intensidad ajustable que a través de una esfera integradora y una luz de cuarzo halógena (incandescente tungsteno-halógena) ofrecen una superficie uniformemente iluminada que emite radiación en un rango de 300 nm a 2500 nm a máxima intensidad. Esta construido con una estructura en forma de caja negra que a un lado posee una ventana donde se encuentra la esfera integradora.



Fig. 3.2.8 Imagen de luz calibradora PT 1000-S de Labsphere[18]

### 3.3 Discusión

En la actualidad los productos disponibles para obtener una superficie uniformemente iluminada y que emita en un rango de frecuencias amplio son escasos, existen los modelos PT-1000-S y PT-1000-W que si bien cumplen esta función la superficie es esférica y de un área pequeña, las luces vendidas por Thorlabs por otro lado tienen un rango de frecuencias mayor pero una superficie de iluminación más pequeña. Los paneles de luces LED son planos y ofrecen una gran área de iluminación, pero al ser construidos para el uso cotidiano solo emiten en el espectro visible. Por lo tanto, existe la ausencia de un dispositivo que logre iluminar una superficie plana de forma espacialmente uniforme, tal como un panel LED, y emita en amplio rango de frecuencias, como los instrumentos basados en bombillas incandescentes tungsteno-halógena.

## **4 Definición del Problema**

---

### **4.1 Introducción**

Considerando lo recopilado en la sección anterior se presentarán los objetivos y alcances de este proyecto.

### **4.2 Objetivos**

#### **4.2.1 Objetivo general**

Diseño e implementación de un panel de luz que presente uniformidad espacial y temporal, espacial en el sentido que cada punto del panel tenga una intensidad similar y temporal en el sentido que la intensidad de cada punto del panel se mantenga constante al paso del tiempo de operación. También debe tener la capacidad de emitir radiación en las bandas de frecuencia de luz visible e infrarrojo. La estructura a diseñar se basará en la del panel de luz LED disponible en el mercado. El fin de este dispositivo será la calibración de instrumentos de medición en las bandas mencionadas.

#### **4.2.2 Objetivos específicos**

- 1- Selección de componentes para la implementación del panel de luz.
- 2- Selección de materiales y diseño de la estructura física soporte a los componentes.
- 3- Medición de iluminancia de componentes en diferentes configuraciones.
- 4- Construcción de estructura física y ensamblaje de componentes.
- 5- Medición radiométrica de rango de frecuencia del dispositivo.
- 6- Medición de iluminancia del panel de luz.
- 7- Comparación de uniformidad espacial con dispositivo de calibración similar.
- 8- Medición de uniformidad temporal del dispositivo

### **4.3 Alcances y Limitaciones**

Las luces a utilizar y los materiales de la estructura física deben estar disponibles en el mercado y su costo debe ser relativamente accesible.

La estructura se diseñará en base a una superficie reflectante de teflón de 51x51 cm de área y 0.6 mm de espesor que está disponible en el laboratorio.

Las herramientas para la construcción de la lámpara serán las disponibles en las dependencias de la Universidad de Concepción.

No se considerará la uniformidad espectral, entendido como la constancia intensidad de la radiación emitida a lo largo del espectro, como un objetivo relevante para el trabajo, solo la capacidad de emitir radiación.

#### **4.4 Metodología**

**Objetivo:** Selección de componentes para la implementación del panel de luz.

Selección de componentes, buscando en el mercado productos que cumplan el objetivo principal, principalmente se buscarán las luces capaces de emitir radiación en la banda visible y la banda de infrarrojo cercano, accesibles en términos de disponibilidad, costo monetario, costo energético, intensidad lumínica y dimensiones físicas, se deberá considerar que tipo de componente se requiere para el circuito necesario para energizar el dispositivo.

**Objetivo:** Selección de materiales y diseño de la estructura física soporte a los componentes

Se seleccionará el material que compondrá la estructura, teniendo en cuenta disipación de calor, costo, facilidad de trabajo y disponibilidad. Luego de seleccionado el material se procederá a delimitar las dimensiones físicas que tendrá el dispositivo en su totalidad

**Objetivo:** Medición de intensidad de iluminación de componentes en diferentes configuraciones.

Una vez adquiridos los componentes lumínicos se caracterizará su distribución de iluminación utilizando el luxómetro Hitester 3423, se buscará medir la iluminancia tanto de las luces individuales como en combinaciones que se asemejen a la posición que se presenta en la estructura del edge lit LED panel.

**Objetivo:** Construcción de estructura física y ensamblaje de componentes.

Junto con el diseño del circuito eléctrico se implementará el diseño propuesto en los objetivos anteriores creando una estructura física desde cero.

**Objetivo:** Medición radiométrica de rango de frecuencia del dispositivo.

Utilizando el espectrómetro NIRvascan f1 se verificará que la lámpara construida emita radiación en los rangos de longitudes de onda que comprenden las bandas de luz visible e infrarrojo cercano.

**Objetivo:** Medición de iluminancia del panel de luz.

Utilizando en luxómetro Hitester 3423 se medirá la iluminancia de la lámpara teniendo en consideración diferentes ángulos de observación y distancia entre el detector y el panel de luz.

**Objetivo:** Comparación de uniformidad espacial con dispositivo de calibración similar.

Se capturará una imagen utilizando la cámara infrarroja Aquros 1920 GigE de la superficie de la lámpara y a partir de su histograma se comparará con la imagen capturada por la misma cámara en la luz de calibración PT 1000. Se comparará que tanto difieren el valor de los píxeles obtenidos en cada imagen con la media en cada imagen y así determinar cuál es la capacidad de uniformidad espacial que posee el instrumento

**Objetivo:** Medición de uniformidad temporal del dispositivo

Utilizando la cámara Aquros 1920 GigE se comprobará la uniformidad temporal de la lámpara diseñada. En primera instancia se capturará en un periodo de tiempo de 600 segundos una imagen cada 30 segundos y se compara la potencia presente en la imagen capturada en cada instante de tiempo observando el cambio que presenta. Luego se comprobará la estabilidad de la lámpara obteniendo 40 imágenes seguidas en un periodo de tiempo de aproximadamente 35 segundos comparando la potencia medida y observando su cambio en el tiempo. El carácter de uniformidad temporal presente se comprobará en el sentido de que tanto varía la potencia medida a través del tiempo.

## 5 Resultados

---

### 5.1 Introducción

En esta sección se mostrarán los resultados del proyecto del presente trabajo, se ira presentado la labor hecha guiándose por los objetivos previamente descritos en la sección anterior. Para esto también se dividieran los objetivos en términos de: Etapa de diseño y construcción y Etapa de medición y análisis de resultados.


### 5.2 Etapa de diseño y construcción



**Objetivo:** Selección de componentes para la implementación del panel de luz.

Para este objetivo se recurrió primero al conocimiento del rango de frecuencias del espectro de emisión de diferentes tipos de instrumentos de iluminación [21], como también de productos en el mercado que cumplen esta finalidad. Se concluye en este análisis que las bombillas de luz halógena de tungsteno incandescente son la opción indicada para este proyecto, ya que en términos de espectro emite hasta los 2400 nm [21], en vida útil supera a la bombilla incandescente [23] y en comparación a la bombilla de vapor de mercurio utiliza menos potencia [24], también los productos en el mercado utilizan principalmente luces halógenas de tungsteno para lograr emitir en un rango de frecuencias alto.

Una vez seleccionado el tipo de luz a utilizar se recurrió a un catálogo de ventas de la empresa de materiales eléctricos Ekoline perteneciente al grupo Gobantes S.A para así obtener la visión de que productos de este tipo se venden en el mercado chileno. Para esto se utilizó el catálogo 2023-2024 (Anexo A: Catalogo Gobantes S.A.) de Ekoline donde se vislumbraron 3 tipos de luces halógenas de tungsteno la BIPIN G4, R7S y G9 FROST. En la siguiente tabla se presentan sus principales características:

Tabla 5.2.1 Comparación entre las diferentes luces halógenas disponibles en Ekoline

Tipo de Luz	Imagen	Voltaje	Potencia	Dimensión
BIPIN G4		12 V	10-20 W	Largo: 42 mm Diámetro: 11.5 mm

R7S		220-240 Vac	100-1500 W	Largo: 118 mm Diámetro: 7 mm
G9 FROST		220 V	40 W	Largo: 42 mm Diámetro: 11.5 mm

Las luces G9 y G4 son similares en su forma cilíndrica, sus pines de alimentación se encuentran en la base y están separados en 9 mm y 4 mm respectivamente [28], la bombilla en ambos casos es del tipo capsula y solo se diferencian en el voltaje de alimentación necesario. La ampolleta R7s tiene sus pines de alimentación en cada uno de sus extremos, su diámetro como es de 7 mm y mide 118 mm [28]. Se debe mencionar que toda bombilla de tungsteno halógena alcanza temperaturas altas llegando a tener una temperatura de 600 °C en la superficie de la ampolla [29].

En este proyecto se estableció que el diseño de este instrumento se iba a tener en considerado seguir la estructura del edge lit LED panel, este dispositivo que se caracteriza principalmente por su grosor reducido en comparación con otros paneles de luz y su iluminación lateral, esto sugiere que sería mejor utilizar las luces R7S por su diámetro menor a los otros tipos de luces. Otra consideración es que se utilizara por defecto una placa de teflón de área 51x51 cm<sup>2</sup> como material reflectante, por lo tanto, se requerirá que la bombilla ilumine la mayor área posible, la R7S tiene una mayor longitud, entonces sería capaz de iluminar espacialmente un área mayor de la superficie del instrumento.

Debido a las razones anteriores y tomando en cuenta la estructura tentativa del instrumento se utilizarán luces halógenas de tungsteno tipo R7S de 150 W de potencia, los portalámparas para estas bombillas se deben comprar por separado y se discutirá en el objetivo siguiente.

Lo próximo a definir es que tipo de LGP se utilizara, si bien generalmente se usan acrílicos de gran capacidad de transmisión de luz este material tiene una temperatura de transición de vidrio, esto es cuando deja de ser sólido y adquiere consistencia viscosa, de 108 °C [30] para el caso de PMMA, muy por debajo de la temperatura que puede alcanzar la ampolla de una luz halógena de tungsteno. Debido a la fragilidad de las LGP se utilizará el aire como medio de transmisión ya que presenta alta transmisión en las bandas de frecuencia de NIR y SWIR [31].

Luego como placa difusora se utilizará otra placa de teflón del mismo tamaño que la placa reflectante,

la idea es que la luz se refleje entre las dos placas de teflón formando así un área iluminada en toda la superficie del instrumento, como las luces estarán en todo el perímetro entre las dos placas el dispositivo estará uniformemente iluminado y la luz que logre escapar por la placa difusora se utilizara para la calibración.

**Objetivo:** Selección de materiales y diseño de la estructura física soporte a los componentes

Para diseñar la estructura física del instrumento se debe elegir que material se utilizara como armatoste que contenga las luces y el teflón, este material debe ser resistente al calor.

El aluminio es un metal moldeable, barato y fácilmente obtenible en el mercado, tiene una temperatura de fusión de 660 °C [32], debido a esto resulta ser una buena elección como material para la estructura del dispositivo ya que la ampolla de luz de tungsteno llega a una temperatura de 600°C [27]. Se comprarán perfiles de aluminio del tipo ángulo, esto es dos placas rectangulares de aluminio unidas entre si formando un ángulo recto en su dimensión alargada.

Para dimensionar la estructura del instrumento se deben tener en cuenta las medidas de los portalámparas de las bombillas R7s, para esto se utilizarán Halogen twin lampholders de la marca BJB (Anexo B: Portalámparas R7S BJB) que pueden deben ocupados a un voltaje de 220 V y una potencia de 150 W, en la Fig 5.2.1 se observa un diagrama obtenido del datasheet del producto.

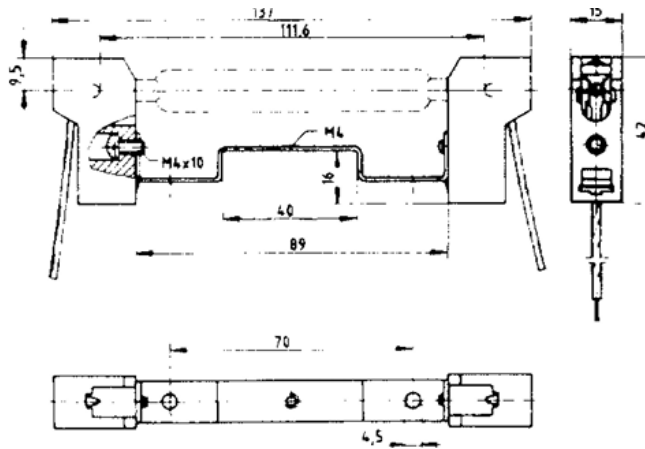


Fig. 5.2.1 Diagrama de Halogen twin lampholders de BJB [33]

Las medidas más relevantes son: largo de 137 mm, ancho de 42 mm y altura de 15 mm. La estructura del portalámparas está compuesta de dos terminales que se conectan a la fuente de volteje, unidos entres si por un puente de metal cuya función consiste en mantener la estructura unida, el puente

consta de 3 agujeros señalados en el diagrama de la fig 5.3. Los conectores laterales se pueden separar de la placa de metal.

Considerando la medida del portalámparas y la de la placa de teflón (510 mm de ancho, 510 mm de largo y 7 mm de espesor) se puede estimar el largo máximo que debería tener la estructura de aluminio, ya que según la estructura de un panel LED edge lit, las luces deben estar en el perímetro del área reflectante (la placa de teflón) así que en cada lado debe haber por lo menos un portalámparas, por lo tanto, la medida del instrumento será:

$$L_{max} = 2 \cdot L_p + L_t \quad (5.1.A)$$

Donde  $L_p$  es el largo del portalámparas (42 mm),  $L_t$  el largo del teflón (510 mm) y  $L_{max}$  el largo máximo de la estructura de metal. Entonces se tendría que:

$$L_{max} = 2 \cdot L_p + L_t = 2 \cdot 42 + 510 = 594 \text{ mm} \quad (5.1.B)$$

Ahora para definir la altura del instrumento se debe verificar que separación entre las placas de teflón para que no exista interferencia que perjudique la transmisión de luz dentro del instrumento, esto se debe a que la luz se transmite al reflejarse en las placas de teflón, cada reflexión introducirá un cambio de fase en la onda transmitida y ese cambio de fase interferirá con la onda en diferentes partes de la guía de onda, en este caso la lampara. La naturaleza de la interferencia dependerá de los índices de refracción de los medios que interactúan con la luz transmitida y el ángulo de incidencia de la luz en las superficies reflectantes, en este caso se tiene el diagrama visto en la Fig 5.2.2.

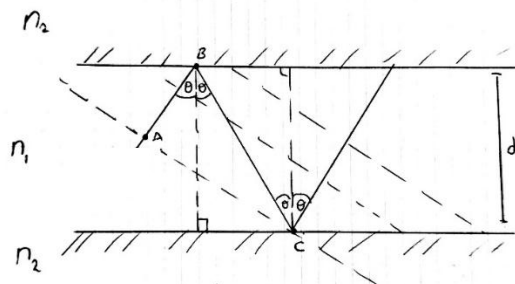


Fig. 5.2.2 Modelo de propagación de la luz a través del instrumento

Se puede observar una onda que viaja desde el punto A se refleja en el punto B con ángulo de incidencia  $\theta$  y se introduce un cambio de fase  $\varphi$ , luego ocurre lo mismo del punto B hacia el C el

ángulo de incidencia sigue siendo  $\theta$  y el cambio de fase al reflectarse en el mismo medio que se refracta la onda original es de  $\varphi$ , esto quiere decir que existirán dos cambios de fase iguales.  $n_1$  y  $n_2$  son los índices de refracción de sus respectivos medios.

La onda en el punto C interfiere con la del punto A y para que la interferencia sea constructiva la fase introducida en el punto C debe ser igual a la fase de la onda en el punto A, lo cual solo sucede si el cambio de fase en el punto C es un múltiplo entero de  $2\pi$ . Esto se puede escribir como que la diferencia entre la fase de la onda después de viajar desde A hasta C debe ser de un múltiplo entero de  $2\pi$  como se expresa en la siguiente ecuación:

$$k_1(\overline{AC}) - 2\varphi = 2m\pi \quad (5.2)$$

Donde  $k_1$  es el número de onda de la onda al propagarse por el medio  $n_1$ .  $m$  un número entero no negativo y  $\overline{AC}$  la distancia entre A y C. Luego se tendrá que:

$$k_1(\overline{AB} + \overline{BC}) - 2\varphi = 2m\pi \quad (5.2)$$

Como  $\angle BCA = 90^\circ$  se tendrá que  $\overline{AB}$ :

$$\overline{AB} = \cos(2\theta) \cdot \overline{BC} \quad (5.3)$$

Y  $\overline{BC}$  se expresa en (5.4):

$$\overline{BC} = \frac{d}{\cos(\theta)} \quad (5.4)$$

Luego se reemplaza (5.4) en (5.3) y se tendría:

$$\overline{AB} = \cos(2\theta) \cdot \frac{d}{\cos(\theta)} \quad (5.5)$$

Reemplazando (5.4) y (5.5) en la ecuación (5.2) se tiene que:

$$k_1 \left( \cos(2\theta) \cdot \frac{d}{\cos(\theta)} + \frac{d}{\cos(\theta)} \right) - 2\varphi = 2m\pi \quad (5.6)$$

Considerando  $\cos(2\theta) = \cos^2(\theta) - \text{sen}^2(\theta)$  se tendrá que:

$$k_1 \left( (\cos^2(\theta) - \text{sen}^2(\theta)) \cdot \frac{d}{\cos(\theta)} + \frac{d}{\cos(\theta)} \right) - 2\varphi = 2m\pi$$

$$k_1 \left( \frac{d}{\cos(\theta)} (\cos^2(\theta) - \text{sen}^2(\theta) + 1) \right) - 2\varphi = 2m\pi$$

Luego con  $\cos^2(\theta) = -\text{sen}^2(\theta + 1)$  se tendrá que:

$$k_1 \left( \frac{d}{\cos(\theta)} (\cos^2(\theta) + \cos^2(\theta)) \right) - 2\varphi = 2m\pi$$

$$k_1 \left( \frac{d}{\cos(\theta)} (2 \cos^2(\theta)) \right) - 2\varphi = 2m\pi$$

$$k_1(2d\cos(\theta)) - 2\varphi = 2m\pi. \quad (5.6)$$

Luego como,

$$k_1 = k_0 n_1, \quad (5.7)$$

Donde  $k_0$  es el número de onda en el vacío. A su vez  $k_0$  es igual a:

$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \quad (5.8)$$

Se reemplaza (5.8) en la ecuación (5.7) e inmediatamente (5.7) en (5.6):

$$\frac{2\pi}{\lambda_0} (2d\cos(\theta)) - 2\varphi = 2m\pi \quad (5.9)$$

El cambio de fase estará dado por los respectivos índices de refracción de cada medio, en el caso particular del dispositivo diseñado, las ondas se propagarán a través del aire, que tiene un índice de refracción  $n_1 = 1.003$  [33] y el índice de refracción del teflón es  $n_2 = 1.35$  [34], de acuerdo con la sección 2.3 cuando  $n_1 < n_2$  existe reflexión interna y eso implica para modos TE y TM que el cambio de fase introducido  $\varphi$  en cada reflexión será de solo podrá tomar valores de  $\pi$  (TE y TM) o 0 (solo TM). Por lo tanto (5.9) para el caso  $\varphi = \pi$  de quedaría como:

$$\frac{2\pi}{\lambda_0} (2d\cos(\theta)) - 2\pi = 2m\pi,$$

$$\frac{2\pi}{\lambda_0} (2d\cos(\theta)) = 2m\pi + 2\pi,$$

$$\frac{2\pi}{\lambda_0} (2d\cos(\theta)) = 2\pi(m + 1). \quad (5.9.1)$$

Y para  $\varphi = 0$ :

$$\frac{2\pi}{\lambda_0} (2d\cos(\theta)) - 2 \cdot 0 = 2m\pi$$

$$\frac{2\pi}{\lambda_0}(2d\cos(\theta)) = 2m\pi \quad (5.9.2)$$

Lo que indica (5.9.1) y (5.9.2) es que la fase de la onda al llegar al punto C desde el punto A siempre tendrá una fase de un número entero por  $2\pi$  y por lo tanto solo existirá interferencia constructiva.

Este resultado nos indica que la correcta transmisión de las ondas por el dispositivo no depende de la separación entre las placas de teflón ya que independiente de la distancia el cambio de fase introducido por las reflexiones entre ambos medios siempre provocara interferencia constructiva, así que el valor solo dependerá del diseño que se proponga.

Por lo tanto, se propone el siguiente diseño ilustrado en las figuras 5.2.3(a) y 5.2.3(b), consiste en hacer un marco cuadrado con perfiles de aluminio tipo ángulo de dimensión, este marco cubrirá un área de 594x594 mm, al ser perfiles tipo ángulo formarán una especie de caja sin superficie basal y con un hueco cuadrado en la cara superior, las caras laterales serán usadas para fijar los portalámparas a la estructura mientras que la cara superior para soportar el teflón difusor. Luego para mantener los portalámparas apuntando hacia el centro se fijará un perfil de aluminio debajo a la cara lateral del marco en cada lado por debajo de los portalámparas, estos perfiles inferiores también cumplen la función de soporte del teflón reflector.

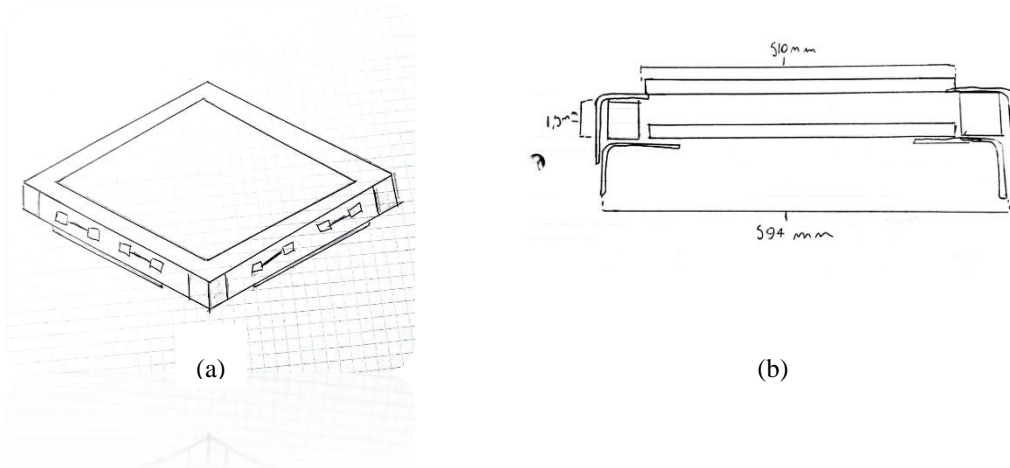


Fig. 5.2.3 Diseño propuesto para Lampara VIS-NIR-SWIR

(a) vista superior, (b) vista de elementos al interior de estructura

El diseño anterior será el diseño que se implementará en los siguientes objetivos.

**Objetivo:** Medición de intensidad de iluminación de componentes en diferentes configuraciones.

En este objetivo se probará que posición deben estar las luces halógenas para iluminar de manera más uniforme la superficie reflectora, para cuantizar el área iluminada se utilizará un dispositivo de fotometría que si bien, solo mide intensidad en el rango visible entregará una idea de cómo se distribuye la iluminación de cada lámpara. Se realizaron medidas de iluminación utilizando un fluxómetro Lux Hitester que mide iluminancia, el siguiente diagrama ilustra el modo de medición:

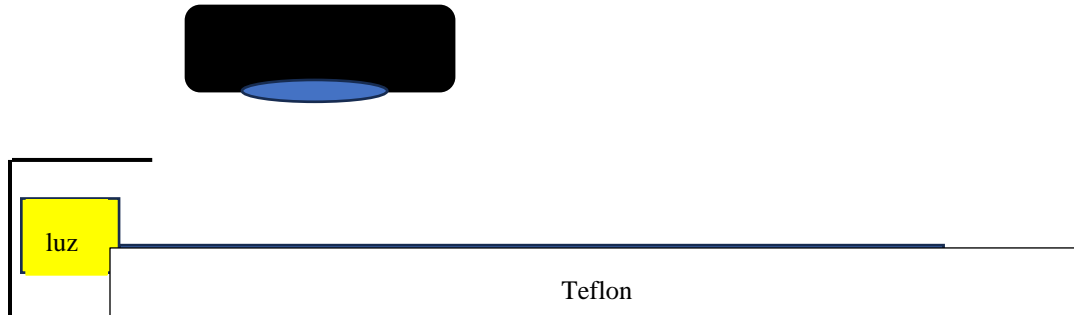


Fig. 5.2.4 Diagrama de medición con luxómetro.

Este experimento busca probar cuál es la iluminancia producida por las luces halógenas de forma de estimar y prever cómo iluminarían en el instrumento terminado, en los edge lit LED panel las luces se encuentran en el perímetro del dispositivo todas apuntando al centro, de esto se desprende que hay dos tipos de interacción entre pares de luces, a los lados del dispositivo las luces se ubican en forma de línea apuntando a la misma dirección y en las esquinas interactúan las luces siguiendo la forma de un ángulo recto donde ambas luces se ubican a cada lado y ambas apuntan hacia dentro del ángulo, estas dos interacciones serán las pruebas de iluminación que se experimentarán. Para las pruebas de interacción entre luces en línea se utilizarán solamente dos ya que el lado de la superficie reflectora es 51 cm y cada portalámpara mide 13.7 cm en teoría pueden caber 3 portalámparas por lado se elige no sobrecargar con materiales ya que puede provocar problemas para luego implementar el circuito eléctrico o en un imprevisto que provoque el cambio del diseño en el momento de la implementación es preferible tener espacio para la corrección y solución.

Se agregará el estudio de iluminancia de la luz individual ya que también es valioso saber la distribución de iluminación de la luz por sí misma. Aparte de para las mediciones se harán 3 pruebas diferentes:

- Luz individual.
- Luz doble lineal.

- Luz doble en ángulo recto.

Además, en cada prueba se harán mediciones con la luz al lado del teflon y sobre el teflon, cabe mencionar que para que se asemeje al diseño propuesto se colocara un perfil de aluminio sobre la luz y así direccionar la luz al teflón. A continuación, se explicará con detalle cada tipo de prueba.

### Luz individual:

Para caracterizar y cuantizar la iluminación de una luz individualmente se medirá en primera instancia la luz a un lado del teflón (Fig 5.3.5(a)) en tres puntos diferentes (Fig 5.3.5(b)) el fluxómetro se posicionará con su sensor apuntando perpendicular al teflon a las alturas de 3 y 7 cm. En la Fig. 5.3.5(b). se muestra las áreas de medición relativa a las partes del portalámparas (representado por el recuadro amarillo) posición 1, posición C y posición 2, la posición 1 y 2 a cada lado y C al centro. Aquí se registran dos tipos de mediciones, a una distancia de 2 cm de la luz (Tabla 5.3.1) y a 10 cm de la luz (Tabla 5.3.2).

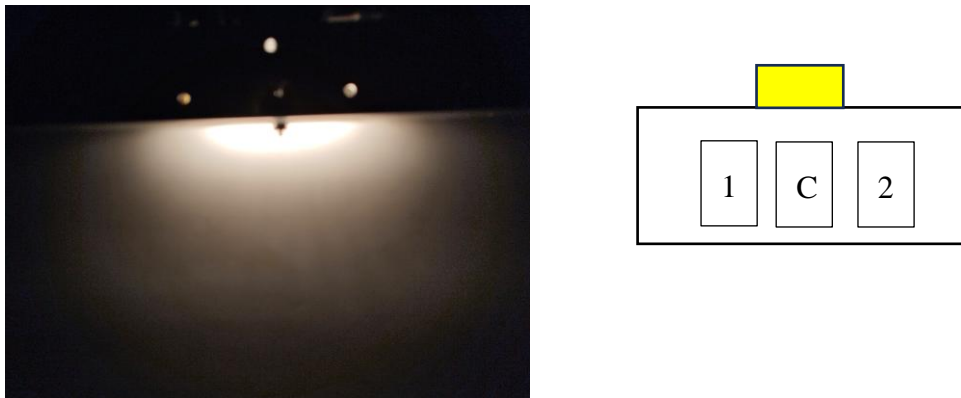


Fig. 5.2.5 Setup de medición para experimento de luz individual sin teflón inferior

(a) Imagen de setup real, (b) Diagrama de áreas de medición de setup

Tabla 5.2.2: Medición iluminancia (lux) luz halógena individual al borde de teflón medido a 2 cm de distancia

Altura	C	1	2
3 cm	58300	12180	12790
7 cm	11700	5300	6200

Tabla 5.2.3: Medición iluminancia (lux) luz halógena individual al borde de teflón medido a 10 cm de distancia

Altura	C	1	2
3 cm	5070	5840	3680
7 cm	7500	6600	6160

Para la prueba de luz sobre teflón se apuntará el sensor del fluxómetro perpendicular hacia la superficie del teflón. Se aprecia el setup de la luz en la Fig. 5.2.6(a) y en la Fig. 5.2.6(b). se ven las posiciones que se pondrá el fluxómetro, se utilizaran alturas de 3 y 7 cm, y distancias de 2 (Tabla 5.3.4)) y 10 cm (Tabla 5.3.5) del fluxómetro a las luces.

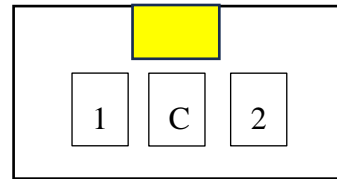


Fig. 5.2.6 Setup de medición para experimento de luz individual con teflón inferior

(a) Imagen de setup real, (b) Diagrama de áreas de medición de setup

Tabla 5.2.4: Medición iluminancia (lux) luz halógena individual sobre el teflón medido a 2 cm de distancia

Altura	C	1	2
3 cm	77600	27900	26500
7 cm	5470	2730	2950

Tabla 5.2.5: Medición iluminancia (lux) luz halógena individual sobre el teflón medido a 10 cm de distancia

Altura	C	1	2
3 cm	11760	3430	3780
7 cm	2800	1950	1849

**Luz doble:**

Se posicionaron dos luces formadas en línea ambas apuntando hacia el teflon, como en la prueba anterior se va a medir a una altura de 3 y 7 cm con el sensor del fluxómetro perpendicular a la superficie del teflon. En la Fig 5.2.7(a) se encuentra el setup de la posición de ambas luces y en la Fig. 5.3.7(b) se puede observar las posiciones donde se medirá con el fluxómetro. Se obtuvieron dos tipos de mediciones; con el fluxómetro a una distancia de 2 cm (Tabla 5.2.7) y una distancia de 10 cm (Tabla 5.2.7).

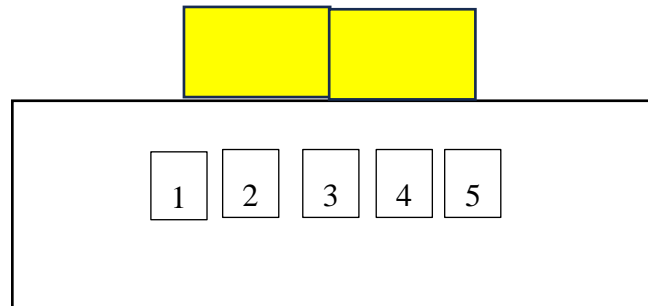
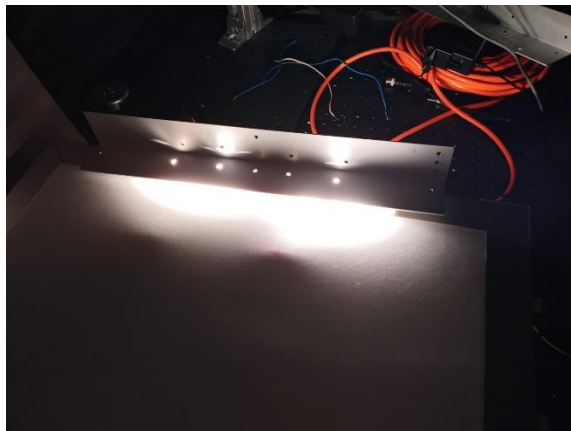


Fig. 5.2.7 Setup de medición para experimento de luz doble sin teflón inferior

(a) Imagen de setup real, (b) Diagrama de áreas de medición de setup

Tabla 5.2.6: Medición iluminancia (lux) de dos luces halógenas adyacentes formadas en línea al borde de teflón medido a 2 cm de distancia

Altura	1	2	3	4	5
3 cm	11740	48700	18500	38200	23700
7 cm	1679	3400	3100	24200	2160

Tabla 5.2.7: Medición iluminancia (lux) de dos luces halógenas adyacentes formadas en línea al borde de teflón medido a 10 cm de distancia

Altura	1	2	3	4	5
3 cm	1821	3850	3490	2850	3000
7 cm	2220	3300	3180	2970	2090

Luego para el siguiente experimento se colocaron ambas luces en línea sobre el teflón como se ve la Fig. 5.8.2(a) se medirá cada zona indicada en la Fig. 5.8.2(b) con el fluxómetro apuntando su sensor de manera perpendicular a la superficie del teflón. Luego se muestran en la Tabla 5.2.8 la medición de iluminancia con el fluxómetro a una distancia de 2 cm de las luces y en la tabla 5.2.9 la iluminancia con el fluxómetro a 10 cm de las luces.

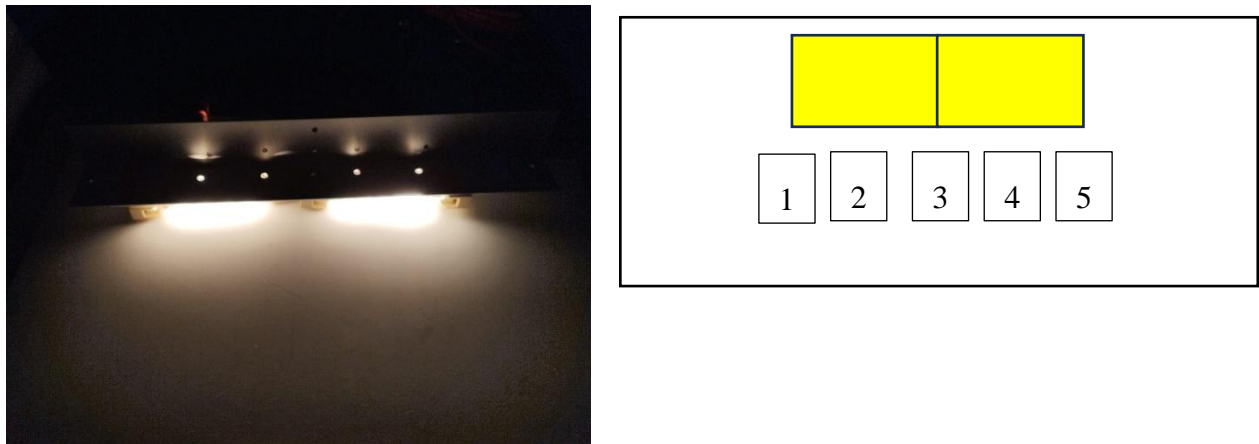


Fig. 5.2.8 Setup de medición para experimento de luz doble con teflón inferior

(a) Imagen de setup real, (b) Diagrama de áreas de medición de setup

Tabla 5.2.8: Medición iluminancia (lux) de dos luces halógenas adyacentes formadas en línea al sobre el teflón medido a 2 cm de distancia

Altura	1	2	3	4	5
3 cm	23600	85400	27500	86000	25300
7 cm	3400	5820	5750	5480	3530

Tabla 5.2.9: Medición iluminancia (lux) de dos luces halógenas adyacentes formadas en línea al sobre el teflón medido a 10 cm de distancia

Altura	1	2	3	4	5
3 cm	3850	5050	5420	5240	3220
7 cm	4100	7750	7470	7260	4430

**Luz doble en ángulo recto:**

Se posicionaron dos luces adyacentes en forma de ángulo recto (Fig 5.3.9(a)), las posiciones que se ubicara el fluxómetro se pueden observar en la Fig. 5.3.9(b) y la altura del fluxómetro a la superficie variara entre 3 y 7 cm. Se presentan las mediciones en la tabla 5.2.10.

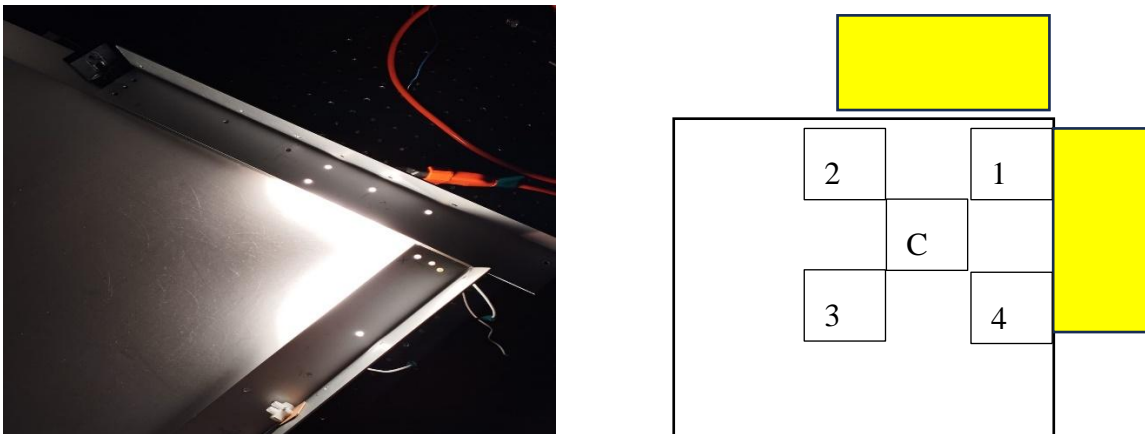


Fig. 5.2.9 Setup de medición para experimento de luz doble en ángulo recto sin teflón inferior

(a) Imagen de setup real, (b) Diagrama de áreas de medición de setup

Tabla 5.2.10: Medición iluminancia (lux) de dos luces halógenas en una esquina al borde de teflón

Altura	C	1	2	3	4
3 cm	17200	52600	15070	4590	15690
7 cm	3700	26380	10841	5060	9731

En el siguiente experimento se ubicaron dos luces posicionadas en forma de angulo recto sobre el teflon como se muestra en la Fig. 5.2.10(a) y se midio con el fluxometro las areas indicadas en la Fig. 5.2.10(b) con el fluxometro a una altura de 3 cm y 7 cm y las mediciones se señalan en la Tabla 5.2.11.

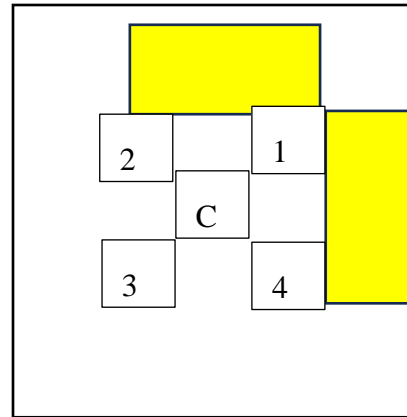


Fig. 5.2.10 Setup de medición para experimento de luz doble en ángulo recto sin teflón inferior

(a) Imagen de setup real, (b) Diagrama de áreas de medición de setup

Tabla 5.2.11: Medición iluminancia (lux) de dos luces halógenas en una esquina sobre el teflón

Altura	C	1	2	3	4
3 cm	40400	66200	14420	9190	30300
7 cm	15260	19160	9890	8490	11610

En primer lugar, en las figuras 5.3.5(a) y 5.3.6(a) se observa la distribución del patrón de iluminación de las luces, que según se mostró en la Sección 2.4 de este trabajo, sería de naturaleza semidirecta ya que la mayor parte de luz se irradia en la dirección delantera y solo una parte más reducida en la parte posterior de la luminaria.

Hay que indicar que si bien los setup con las luces halógenas sobre el teflón presentan más iluminancia se notó que el teflón al estar mucho tiempo expuesto a la luz halógena prendía sobre el sufrió ligeras alteraciones en su superficie que no sucedieron en los setup con la luz a su lado, es por esto, que de modo de resguardar la seguridad de los materiales y del operador es preferible utilizar las luces al lado del teflón.

El resultado más importante en estas mediciones se obtiene en los experimentos con las luces dobles, ya que según se puede observar en la Tabla 5.2.6 la iluminancia producida por las luces halógenas en las posiciones 2, C y 3 tienden a ser similar a una distancia de 10 cm, cosa que no pasa a los 2 cm de distancia, como se ve en la Tabla 5.2.7 ya que en punto C la iluminancia suele ser más baja que en los puntos 2 y 3. Esto sugiere un buen resultado para la uniformidad espacial de iluminación, ya que a

medida que se aleje de la fuente de luz se obtendrá una iluminación más uniforme espacialmente.

Esto sugiere que si hubiera dos luces en línea en cada lado en el perímetro de la superficie cuadrada (8 luces en total) al centro de esta superficie se lograra una zona de iluminancia uniforme espacialmente, que es lo que se busca para una lámpara de calibración de dos dimensiones.

**Objetivo:** Construcción de estructura física y ensamblaje de componentes.

Se implementó el diseño propuesto en el Taller de Mantenimiento de Maquinaria de Alta Potencia del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Concepción. Para la implementación se utilizó el siguiente esquema del circuito eléctrico para energizar las luces:

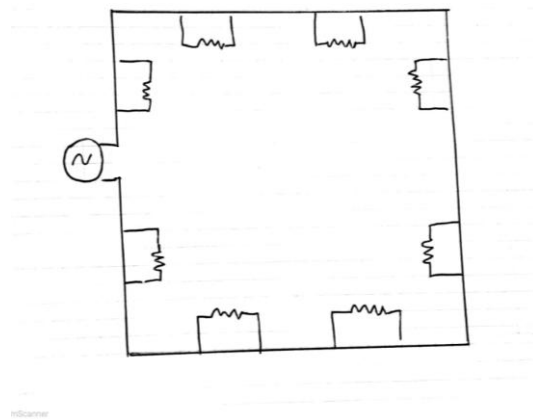


Fig. 5.2.11 Circuito eléctrico de dispositivo diseñado

Cada resistencia simboliza una de las luces. Cada luz utiliza una potencia de 150 W a un voltaje de 220 V de corriente alterna, para alimentar cada luz se utiliza un circuito paralelo. La corriente por lo tanto estaría dada por:

$$I = \frac{n \cdot P}{V}. \quad (5.3.10)$$

Donde  $I$  es la corriente del circuito,  $V$  el voltaje de alimentación,  $P$  la potencia utilizada por una fuente de luz y  $n$  el número de luces en total. Entonces se tiene:

$$I = \frac{n \cdot P}{V} = \frac{8 \cdot 150}{220} = \frac{1200}{220} = 5.45 \text{ A} \quad (5.3.10)$$

El circuito utilizará 5.45 A para alimentar todos los elementos, este resultado debe considerarse en el momento de elegir que tipo de cable se ocupa para la implementación, ya que debe ser lo

suficientemente grueso para no producirse daños en el circuito.

Con lo último en consideración y utilizando el diseño que se propuso en los objetivos anteriores se implemento la propuesta de Lámpara VIS-NIR-SWIR.

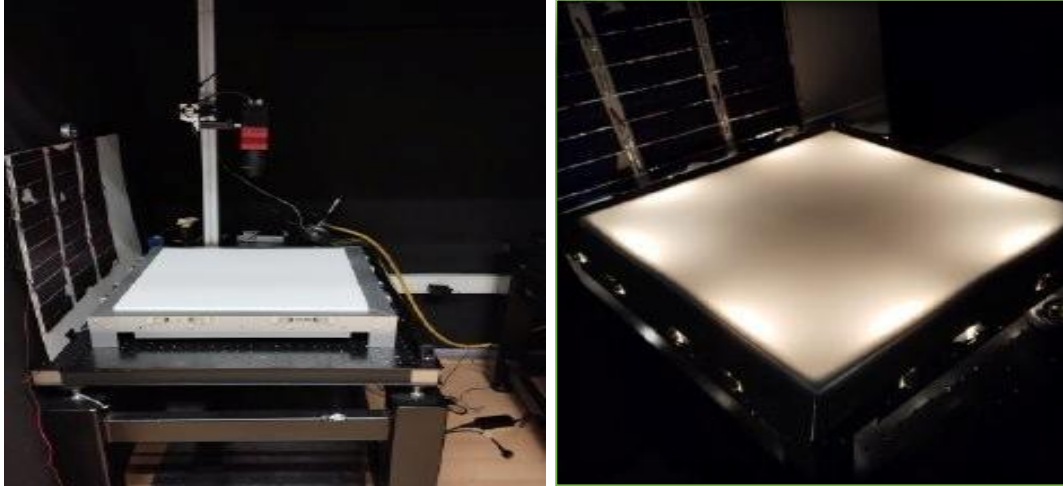


Fig. 5.2.12 Lámpara VIS.NIR.SWIR implementada

(a) Imagen de Lámpara VIS-NIR-SWIR, (b) Lámpara VIS-NIR-SWIR encendida

### 5.3 Etapa de medición y análisis de resultados

**Objetivo:** Medición radiométrica de rango de frecuencia del dispositivo.

Para verificar que se cumpla el objetivo de que la Lámpara VIS-NIR-SWIR emita en un rango de frecuencias que se extienda desde la luz visible al infrarrojo cercano (300 nm a 2500 nm), se medirá a través de una fibra óptica el centro de la lámpara, que según la prueba de iluminancia presentaría una mayor uniformidad, y al otro extremo de la fibra se conectara un espectrómetro NIRvascan modelo f1 de la empresa Allied Scientific Pro, que utiliza el método de scanner para medir en el rango de frecuencia de los 700 nm a los 1700 nm.

En primer lugar, se debe comprobar que el rango de longitudes de onda lo que acorde al fabricante el espectrómetro mide, para esto se utilizara una fuente de luz que tenga un espectro de emisión conocido y que al medir a través del espectrómetro debería entregar el mismo espectro indicado por el fabricante. Para esto se utilizará la fuente de luz Xe-2 (Anexo C: Ficha técnica luz de calibración Xe-2) que estaba basada en el elemento químico Xenón y sus líneas de emisión características. El setup de medición se muestra en la Fig. 5.3.1 consiste en conectar un extremo de una fibra óptica, modelo QP400-2-VIS-NIR con un ancho de banda de 400 nm a 2100 nm y un núcleo de 400  $\mu\text{m}$  de diámetro,

a la fuente de luz Xe-2 y al otro el espectrómetro NIRvascan f1y se observa en la Fig. 5.3.2. El experimento arrojó el siguiente resultado observado en la Fig. 5.3.2.:



Fig. 5.3.1 Setup de medición de luz Xe-2

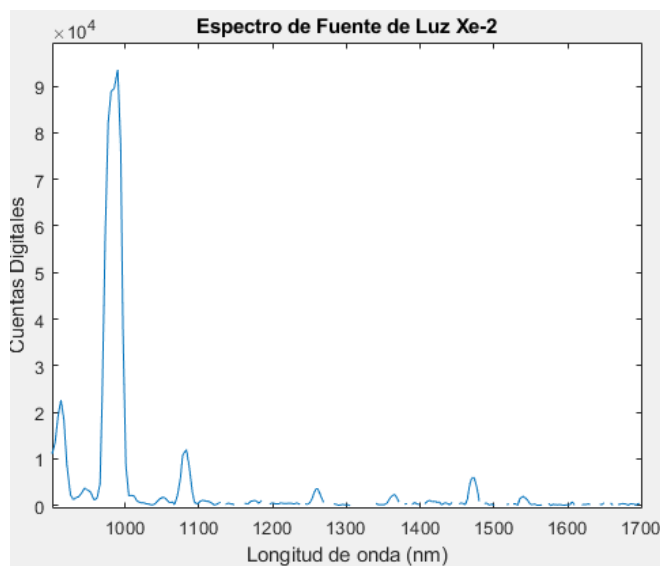


Fig. 5.3.2. Medición de luz Xe-2 sin calibrar

Se debe indicar que esta medición no está calibrada, por lo tanto, para obtener una medición fidedigna se hará el proceso de calibración con la fuente de luz de Thorlabs SLS202 que emite radiación de cuerpo negro y que por lo tanto su espectro de emisión puede ser obtenido a través de la Ley de Planck. Como se sabe el espectro de emisión de la fuente SLS202 al medirla a través del espectrómetro deberíamos obtener una curva igual a la curva teórica de la Ley de Planck, así que toda alteración se asumirá que es por los componentes propios del espectrómetro. Para obtener la medición de la luz SLS202 se conecta una fibra óptica QP400-2-VIS-NIR (Anexo D: Ficha técnica fibra óptica QP400-

2VIS-NIR) al terminal de salida de la luz y el extremo de la fibra restante al espectrómetro NIRvascan f1 como se observa en la Fig.5.3.3 obteniendo el espectro observado en Fig. 5.3.4:



Fig. 5.3.3 Setup de medición de luz SLS202

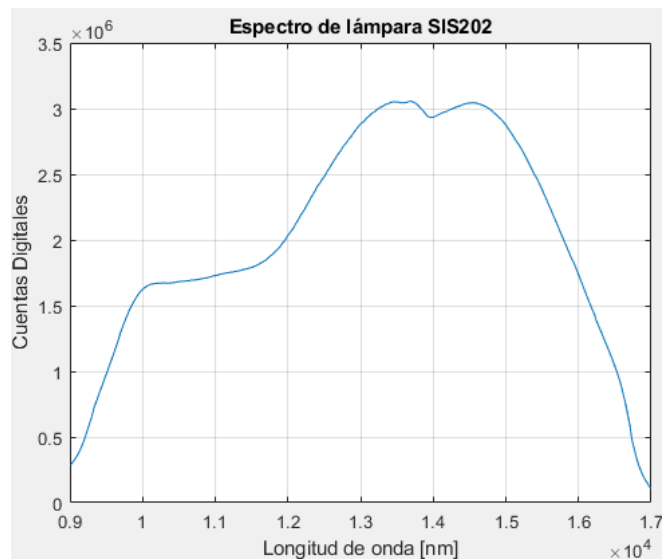


Fig. 5.3.4 Medicion de luz SLS202

Este espectro está en cuentas digitales y debe ser normalizado por el área de recepción de la fibra óptica y el tiempo de integración del espectrómetro.

Luego para obtener el espectro teórico para este rango de longitud de onda se utilizará la Ley de Planck utilizando la ecuación (2.3.1), donde se considerará una temperatura de operación de 1900 K indicado por el fabricante (Anexo E: Ficha técnica Aquros CQD 1920 eSWIR GigE Camera), luego se obtiene la siguiente curva teórica (Fig. 5.3.5) de la radianza espectral producida para la luz de SLS202:

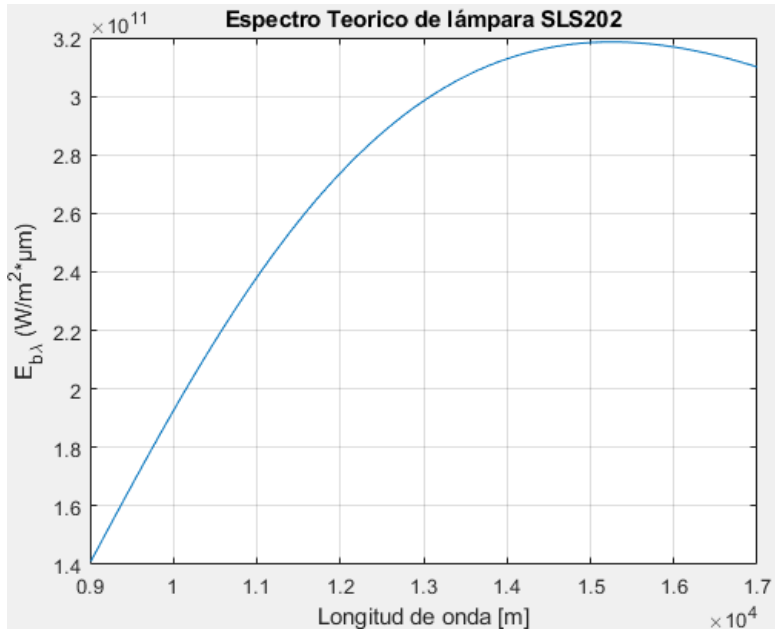


Fig. 5.3.5 Radianza espectral teórica de la luz SLS202

Luego se debe obtener la función de transferencia que describirá la cantidad de ruido que adquiere las señal al atravesar el espectrómetro, para esto se hace la siguiente operación:

$$H = \frac{E_t}{\frac{E_m}{A_e \cdot T_i}}$$

Donde;  $E_t$  es el espectro teórico de la luz SLS202,  $E_m$  el espectro medido de la lámpara SLS202,  $A_e$  es el área de recepción de la fibra óptica que de  $50.27 \mu m^2$  y  $T_i$  el tiempo de integración empleado por el espectrómetro NIRvascan f1 de 635 ms.

Solo basta multiplicar la función de transferencia con el espectro a calibrar y normalizarlo por el tiempo de integración y la apertura de recepción para obtener el espectro calibrado. Se procede a realizar este procedimiento con el espectro obtenido con la luz Xe-2 y se muestra el espectro calibrado de la luz Xe-2 en la Fig. 5.3.6:

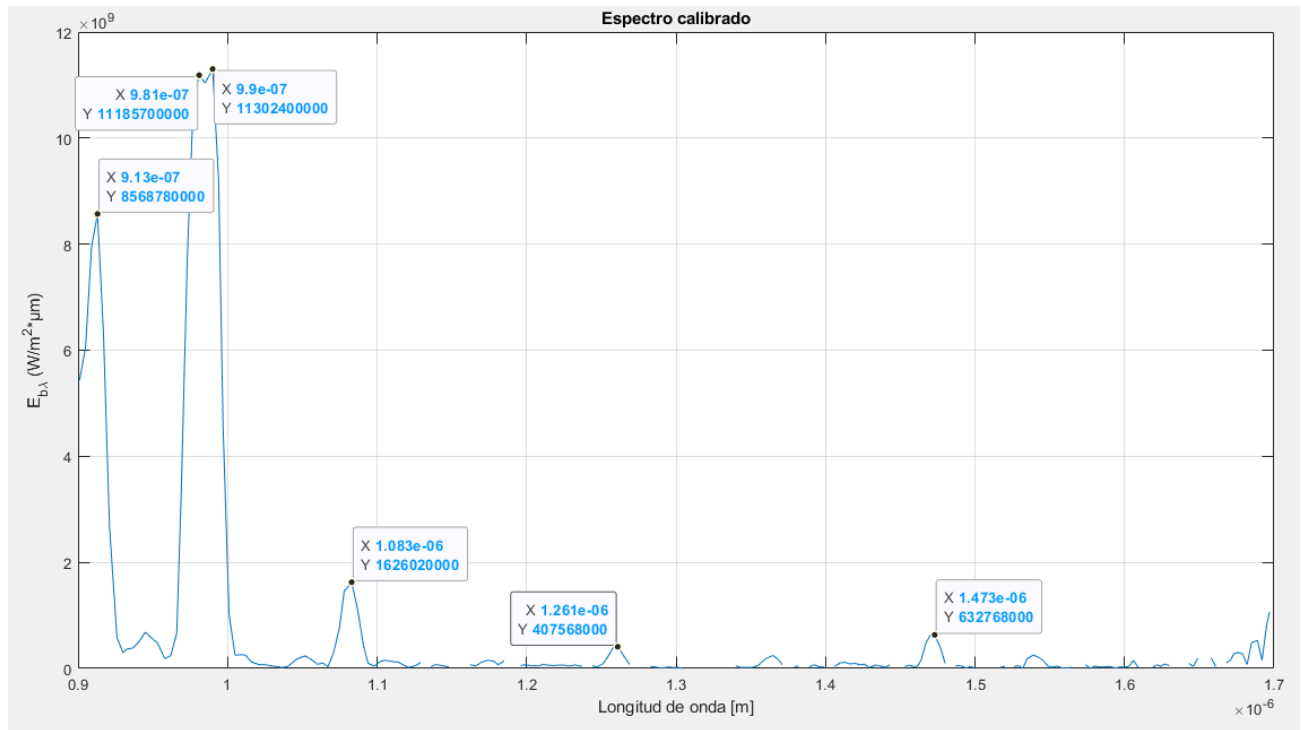


Fig. 5.3.6 Medición de luz Xe-2 calibrada

En la figura anterior se indican 6 líneas de emisión: 913 nm, 981 nm, 990 nm, 1083 nm, 1261 nm y 1473 nm. Si se compara con el espectro entregado por el fabricante de la luz Xe-2:

### XE Spectral Output

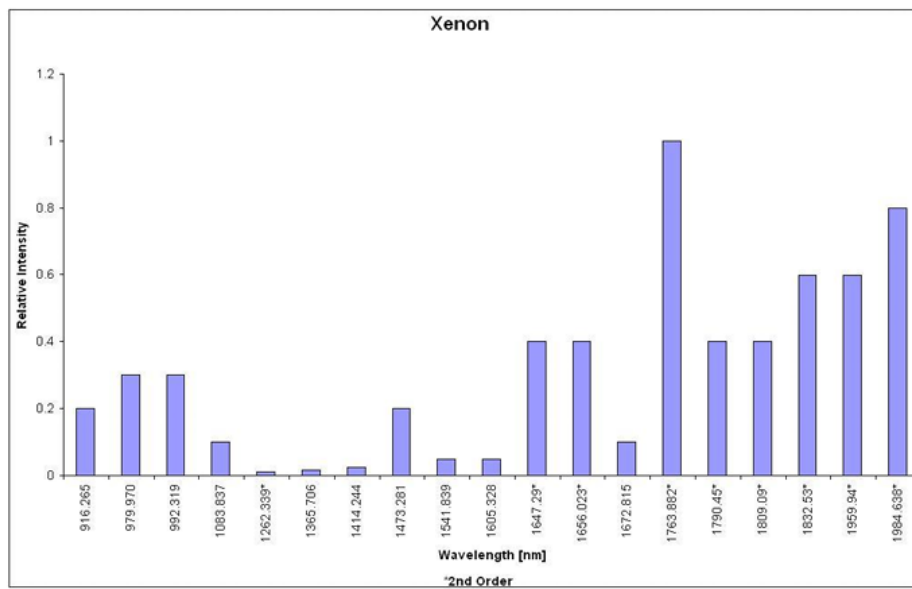


Fig. 5.3.7 Líneas de emisión de Luz Xe-2 (Anexo C)

Se pueden observar 6 líneas de emisión comparables con las medidas e indicadas en el experimento:

en 916 nm, 979 nm, 992 nm, 1063 nm, 1262 nm y 1473 nm. Por lo tanto, en el peor de los casos hay una diferencia entre lo medido y lo entregado por el fabricante de 2 nm lo cual no es una cantidad de error significativa para las mediciones que se deben hacer.

Con el correcto funcionamiento verificado se procede a realizar la medición radiométrica de la Lámpara VIS-NIR-SWIR, se obtuvo una medición del centro de lámpara y se procedió a calibrar lo obtenido del mismo método empleado para la luz de calibración SLS202. El setup se observa en la Fig. 5.3.8, que consiste en conectar la fibra óptica QP400-2-VIS-NIR en el espectrómetro NIRvascan f1 y ubicar el otro extremo en el centro de la lámpara. Con esto en mente se presenta el espectro de emisión de la Lámpara VIS-NIR-SWIR para el rango de 900 nm a 1700 nm en la Fig. 5.3.9:



Fig. 5.3.8 Setup de medición espectro de emisión lámpara VIS-NIR-SWIR

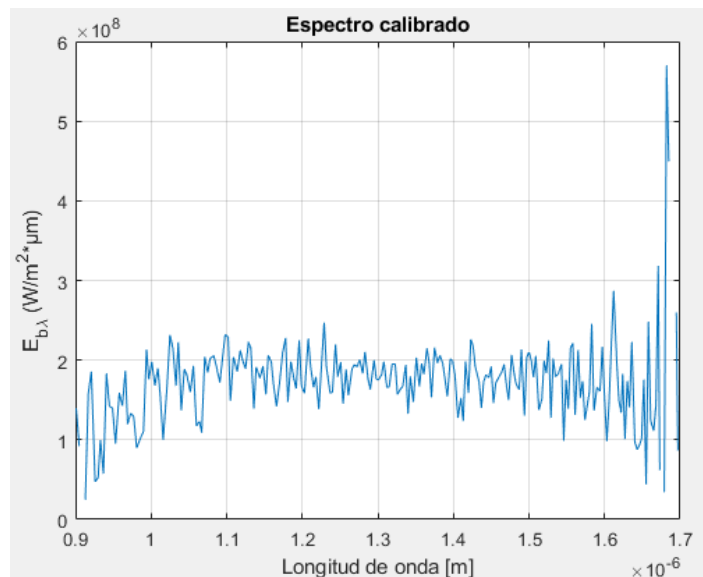


Fig. 5.3.9 Medición calibrada de espectro de emisión lámpara VIS-NR-SWIR

El espectro parece no variar mucho teniendo una apariencia plana, es necesario mencionar que los extremos del espectro se distorsiona la señal ya que los espectrómetros suelen ser menos confiables en sus límites de su rango de frecuencia. En conclusión, se comprueba que la Lámpara VIS-NIR-SWIR emite en el NIR y parte del SWIR.

**Objetivo:** Medición de iluminancia del panel de luz.

En el siguiente experimento se medirá la iluminancia emitida por el panel de luz completo utilizando el fluxómetro Lux Hitester 3423, para esto se ubicará el fluxómetro apuntando su detector al centro de la Lámpara VIS-NIR-SWIR, y se probará midiendo la iluminancia a diferentes distancias del centro y a diferentes ángulos respecto a la superficie de la lámpara, como se observa en la Fig. 5.3.10.

Se utilizarán ángulos de  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  y  $90^\circ$ , y distancias de 3 cm, 7 cm, 10 cm y 20 cm. Además, es necesario medir en diferentes partes de la superficie de la lámpara para asegurarse que cada lado ilumina de la misma manera para esto se dividió la superficie en 8 zonas de medición que se muestran en la Fig. 5.3.11 enumeradas y representadas por una línea, cabe mencionar que para cada zona de medición se recopilara la iluminancia para ángulos de  $30^\circ$  y  $60^\circ$  y distancias de 3 cm, 7 cm, 10 cm y 20 cm.

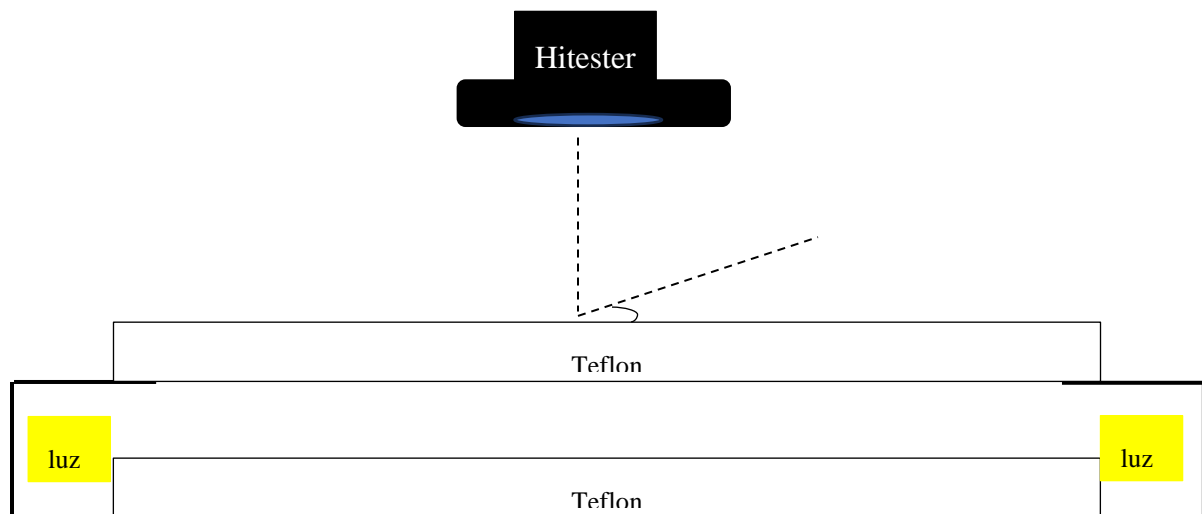


Fig. 5.3.10 Setup de medición de fluxómetro en lámpara VIS-NIR-SWIR

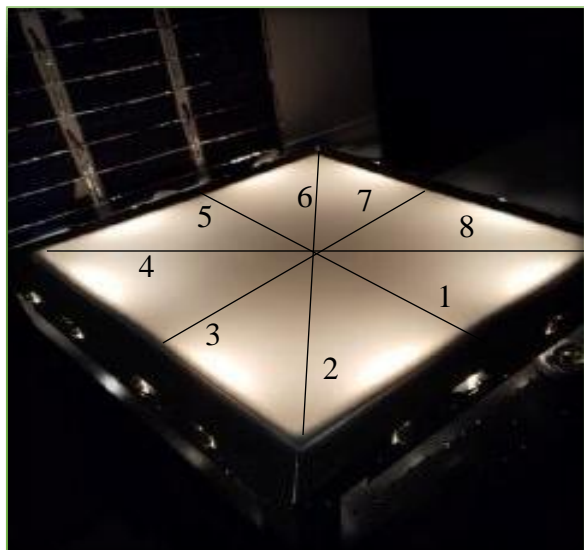


Fig. 5.3.11 Zonas de medición en lámpara VIS-NIR-SWIR.

En la Tabla 5.3.1 se muestran las mediciones de iluminancia para al centro de la superficie para un ángulo de  $90^\circ$ , como se mide directamente al centro no se considerarán las 8 zonas mostradas en la Fig. 5.3.11. En la Tabla 5.3.2 se indican las mediciones de iluminancia en las diferentes zonas, distanciado en 3 cm, 7cm, 10 cm y 20 cm del centro a un ángulo de  $30^\circ$  de la superficie, por otra parte, en la Tabla 5.3.3 se tabulan las mediciones que se hicieron en las 8 zonas de la Fig. 5.3.11 a las distancias de 3 cm, 7 cm, 10 cm y 20 cm, pero esta vez para el ángulo de  $60^\circ$ .

Tabla 5.3.1 Mediciones de iluminancia (lux) en el centro de lámpara VIS-NIR-SWIR a distintas distancias a su superficie.

Distancia (cm)	3	5	10	20
Iluminancia (lux)	686	826	1149	1164

Tabla 5.3.2 Mediciones de iluminancia (lux) en el centro de lámpara VIS-NIR-SWIR a distintas distancias a su superficie a un ángulo de 30°.

Distancia (cm)	3	7	10	20
Iluminancia zona 1 (lux)	461	534	620	810
Iluminancia zona 2 (lux)	414	522	620	893
Iluminancia zona 3 (lux)	314	428	422	750
Iluminancia zona 4 (lux)	463	465	468	629
Iluminancia zona 5 (lux)	577	569	590	765
Iluminancia zona 6 (lux)	346	352	439	525
Iluminancia zona 7 (lux)	453	500	527	807
Iluminancia zona 8 (lux)	485	508	545	790

Tabla 5.3.2 Mediciones de iluminancia (lux) en el centro de lámpara VIS-NIR-SWIR a distintas distancias a su superficie a un ángulo de 60°.

Distancia (cm)	3	7	10	20
Iluminancia zona 1 (lux)	646	725	810	1007
Iluminancia zona 2 (lux)	530	663	714	856

Iluminancia zona 3 (lux)	487	678	754	862
Iluminancia zona 4 (lux)	605	751	737	868
Iluminancia zona 5 (lux)	618	850	865	1007
Iluminancia zona 6 (lux)	484	596	546	642
Iluminancia zona 7 (lux)	518	610	676	744
Iluminancia zona 8 (lux)	494	590	610	792

Al analizar los datos se puede notar que si bien se están midiendo una lampara que según su geometría debería ser simétrica, esto es, poseer la misma iluminancia en cada lado y esquina opuesta en la superficie, en las mediciones se demuestra que este no es el caso, ya que las zonas 1, 3, 5 y 7 deberían poseer la misma iluminancia al ser zonas laterales supuestamente simétricas, pero en mediciones las mediciones de la Tabla 5.3.3 las zonas 1 y 5 poseen mayor iluminancia que las zonas 3 y 7. Otro caso específico es el de la zona 6 que en las pruebas de medición a 30° y 60° posee una iluminancia mucho menor a las demás zonas teniendo 102 lux de diferencia con la zona 7 y 365 lux a la zona 5, ambas adyacentes a la zona 6.

Las razones de estas disparidades en la iluminancia se deben a la construcción del dispositivo, ya que la distancia de las luces entre ellas y cada una hacia la esquina no es totalmente simétrica para cada lado. En la esquina 6 por ejemplo las luces adyacentes a ellas se encuentran mas alejadas a la esquina que en las zonas 2,4 y 8 por lo tanto la medición poseerá menos iluminancia. En el lado 5 y 7 las luces están a menos distancia, por lo tanto, estas zonas poseen mayor iluminancia. También influye que el teflón inferior no esta fijo, esto provoca que en ciertas zonas la luz interactúa con el teflón de manera diferente que otras por lo que puede alterar la forma en que se propaga la luz. Los errores provocados

son meramente consecuencia de la manera en que se construyó el dispositivo y podrían ser solventados con una forma más precisa en hacer la arquitectura.

**Objetivo:** Comparación de uniformidad con dispositivo de calibración similar.

Para esta comparación se utilizará la fuente de luz PT-1000 de Labsphere, este instrumento consiste en una caja con una cavidad por uno de sus lados donde se ubica una esfera de integración cuya función es producir un área iluminada con intensidad uniforme en todos los puntos (uniformidad espacial) de la cavidad por donde se escapa la luz, la intensidad de la luz puede ser controlada variando a la corriente suministrada al dispositivo. Como este es un instrumento de calibración en dos dimensiones es similar a la Lámpara VIS-NIR-SWIR creada en el presente proyecto.

Con este en mente se utilizará la cámara Aquros CQD 1920 GigE (Anexo F: Ficha técnica Aquros CQD 1920 eSWIR GigE Camera), cámara con un rango de longitud de onda de 350 nm a 2000 nm, para capturar una imagen y comparar la uniformidad de la intensidad de los píxeles obtenidos con la luz de calibración PT-1000 y la Lámpara VIS-NIR-SWIR analizando el histograma de cada. El setup de la medición con la luz PT-1000 se muestra en la Fig. 5.3.12:

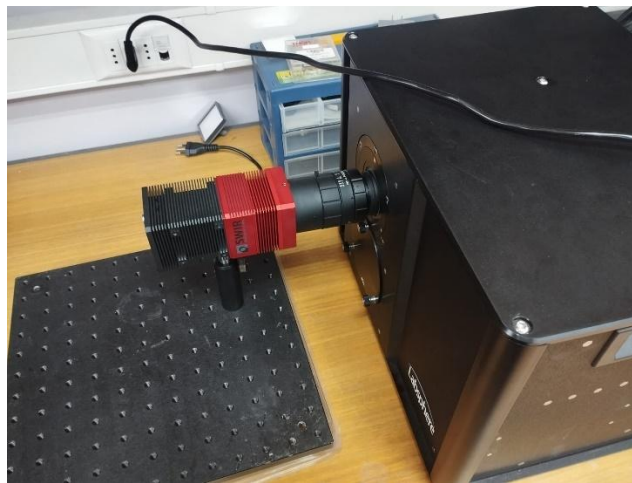


Fig. 5.3.12 Setup de medición de luz de calibración PT-1000

Para el setup de la Lámpara VIS-NIR-SWIR se posiciono la cámara sobre la lámpara a una distancia de 13.5 cm de la superficie apuntando al centro de la lámpara, ya que en orden de que los resultados sean comparables entre si la cámara debe estar a la misma distancia de la superficie que produce la luz, como la esfera integradora de la luz PT-1000 tiene un diámetro de 13.5 cm esta será la distancia que se posicionara la cámara de la Lámpara VIS-NIR-SWIR, el setup se muestra en la Fig. 5.3.13.

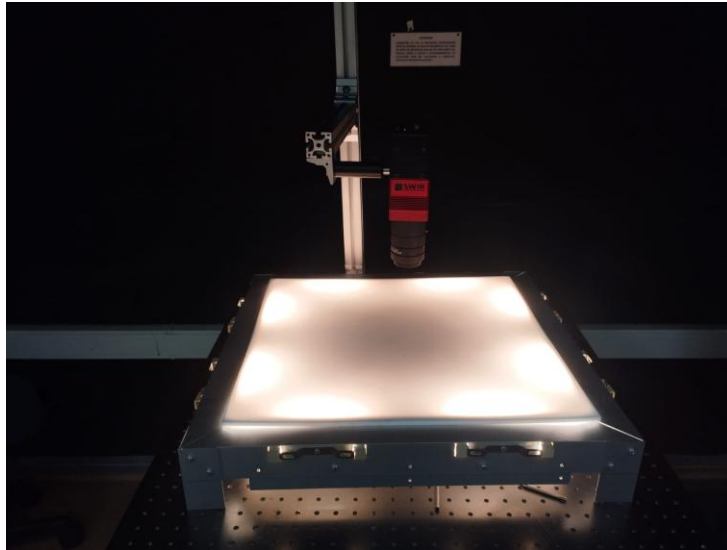


Fig. 5.3.13 Setup de medición de Lampara VIS-NIR-SWIR

A continuación, la imagen obtenida del PT-1000 (Fig. 5.3.14) junto al histograma correspondiente (Fig.5.3.15):



Fig.5.3.14 Imagen obtenida de luz de calibración PT-1000

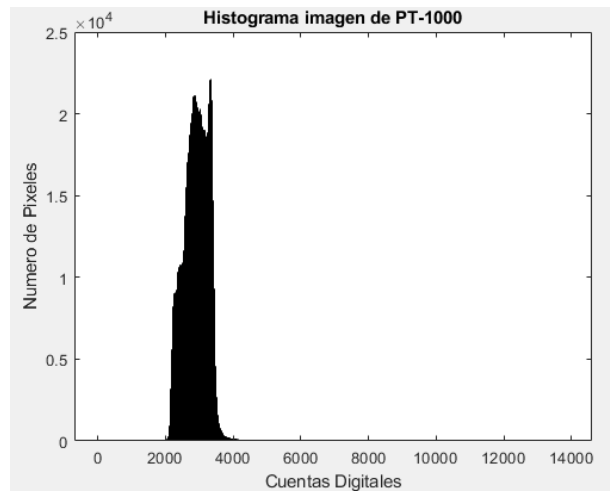


Fig. 5.3.15 Histograma de imagen Fig. 5.3.14

Posee una media de 2900 cuentas digitales y una varianza de  $1.201 \cdot 10^5$ . A continuación, se muestra en la Fig. 5.3.16 la imagen capturada en la Lámpara VIS-NIR-SWIR junto a su respectivo histograma (Fig. 5.3.17):



Fig. 5.3.16 Imagen obtenida de Lámpara VIS-NIR-SWIR

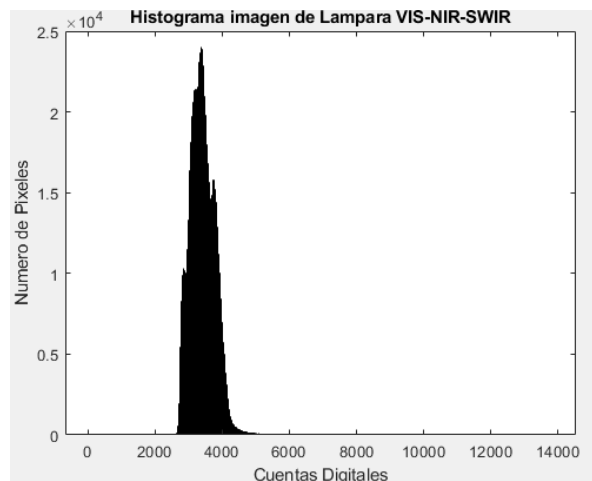


Fig.5.3.17 Histograma de imagen de Fig. 5.3.17

Esta imagen posee una media de 3414 cuentas digitales y una varianza de  $1.266 \cdot 10^5$ .

Se desprende de estos resultados que la distribución de la intensidad de los pixeles en torno a la media es similar en ambos instrumentos, ya que la varianza es similar para ambas imágenes.

Se puede concluir para esta prueba que al centro de la Lámpara VIS-NIR-SWIR existe una uniformidad en la superficie de la lámpara bastante similar a la obtenida al usar un instrumento de calibración similar disponible del mercado, por lo tanto, cumple con el requisito que debiera tener

un instrumento de calibración para sensores de dos dimensiones que es poder transmitir la misma intensidad a cada pixel que recibe luz.

**Objetivo:** Medición de estabilidad en el tiempo del dispositivo

Para determinar la estabilidad en el tiempo del dispositivo se tomarán en cuenta la variación de intensidad de los pixeles en una captura fotográfica de la superficie de la lampara en el centro, es necesario medir la variación de intensidad en un plazo de tiempo corto y un plazo de tiempo extendido.

En primer lugar, se evaluará su comportamiento en plazo de tiempo extendido, se considerará una ventana de tiempo de 0 a 600 segundos, capturando una imagen cada 30 segundos. Debido a la elevada temperatura que puede llegar a tener la lampara se acotara el tiempo a 600 segundos, esto por razones de seguridad y para evitar que el circuito eléctrico de la lampara se dañe. En un instrumento de calibración profesional la potencia debería ser constante en cada instante de tiempo, aunque algunos requieren tiempo de estabilización para asegurar una potencia constante. El objetivo de este experimento es caracterizar la potencia transmitida por la superficie de la lampara, cuanto varia en cada instante de tiempo y si logra estabilizarse, es importante para este experimento que el dispositivo este totalmente en reposo al comenzar la medición, es decir, que el instrumento no se haya utilizado en un tiempo que asegure que la superficie de la lampara este a temperatura ambiente.

El setup de medición se repite al de la Fig. 5.3.13 empleando la cámara Aquros CQD 1920 GigE y utilizando la misma distancia entre la cámara y la superficie de la lampara. A continuación, se mostrará la curva de potencia total de la imagen respecto al tiempo de captura de la imagen.

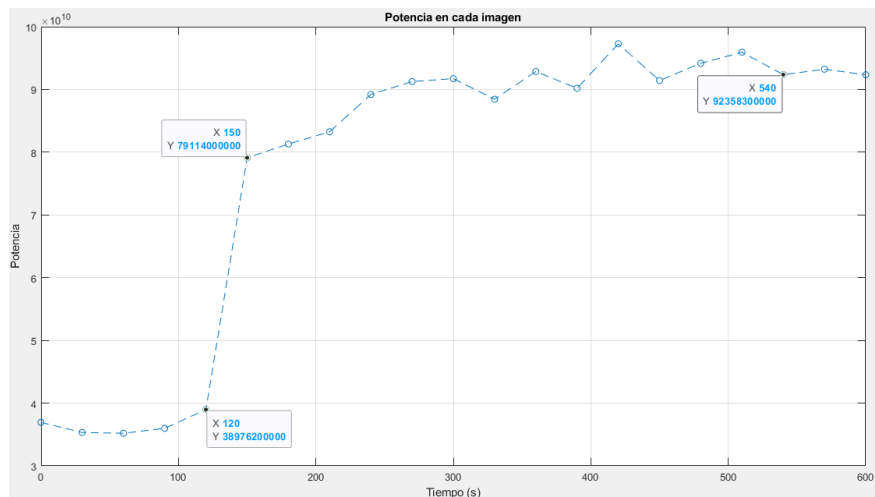


Fig. 5.3.18 Potencia de imagen de Lampara VIS-NIR-SWIR según instante de tiempo

Se observa en la medición que efectivamente la lampara necesita un tiempo de preparación para transmitir la mayor cantidad de potencia posible, mas en específico y como se indica en la fig(¿?), la escalada mas alta de potencia es en el intervalo del segundo 120 al 150 aumentando prácticamente el doble. Luego se destaca que a partir del segundo 540, observando la Fig. 5.3.19 denota un cambio de potencia similar entre el segundo 540 y el segundo 570 y el segundo 570 y el 600.

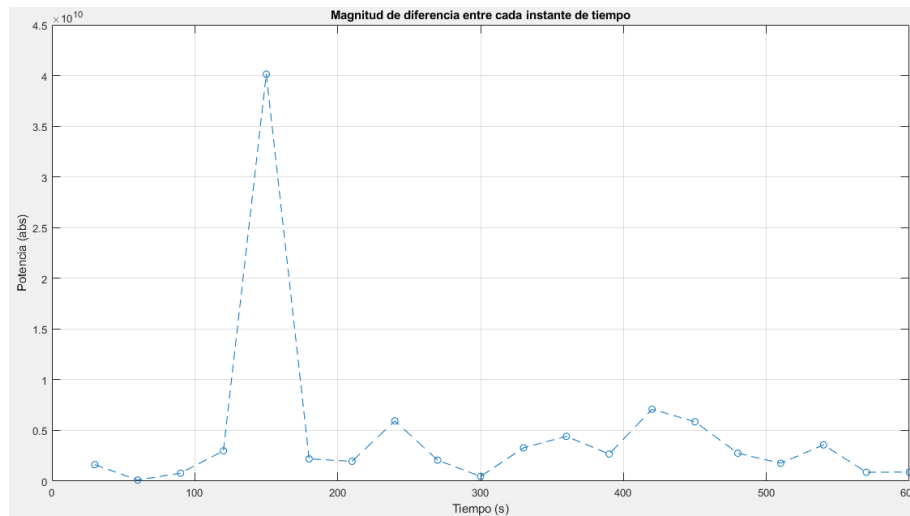


Fig. 5.3.19 Diferencia de potencia de imagen entre instante de tiempo de Lampara VIS-NIR-SWIR

Según la Fig. 5.3.20 la varianza parece aumentar a medida que aumenta la potencia, lo que disminuye la uniformidad. Si bien en el segundo 600 llega a un nivel bajo, en comparación al peak de que llega en el segundo 420, no se puede concluir que la varianza no vaya a aumentar nuevamente debido a la naturaleza aleatoria de las luces empleadas.

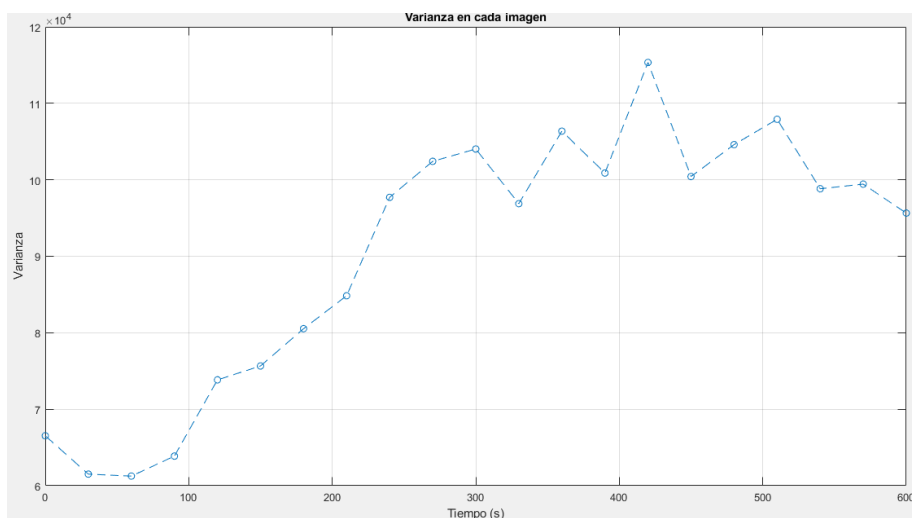


Fig.5.3.20 Varianza de imagen de lampara VIS-NIR-SWIR según instante de tiempo

En conclusión, si bien parece, a simple vista, estabilizarse al segundo 540 según la Fig.5.3.18 no se puede hablar de estabilidad sin antes haber comprobado que la tendencia se mantiene a partir del segundo 600, pero debido a las consecuencias que esto podría traer al instrumento no se comprobó. No obstante, se puede afirmar que necesita un tiempo de calentamiento para poder transmitir la potencia máxima que es capaz de transmitir el instrumento, aunque esto signifique una baja en la uniformidad espacial de la superficie medida.

Ahora, se hará el experimento para medir la estabilidad en un corto plazo de tiempo, se capturarán 40 imágenes seguidas que corresponde a un tiempo de 35 segundos. Se desprende del experimento de estabilidad a un largo plazo de tiempo que la lámpara necesita un tiempo de calentamiento para transmitir su máxima potencia, es por esto que se medirá en el corto plazo justo después de terminar el experimento anterior, esto es con la lámpara prendida hace 600 segundos

El setup de medición es el mismo observado en la Fig. 5.3.13 empleando la cámara Aquros CQD 1920 GigE y utilizando la misma distancia entre la cámara y la superficie de la lampara. A continuación, se mostrará la curva de potencia total de la imagen respecto al tiempo de captura de la imagen.

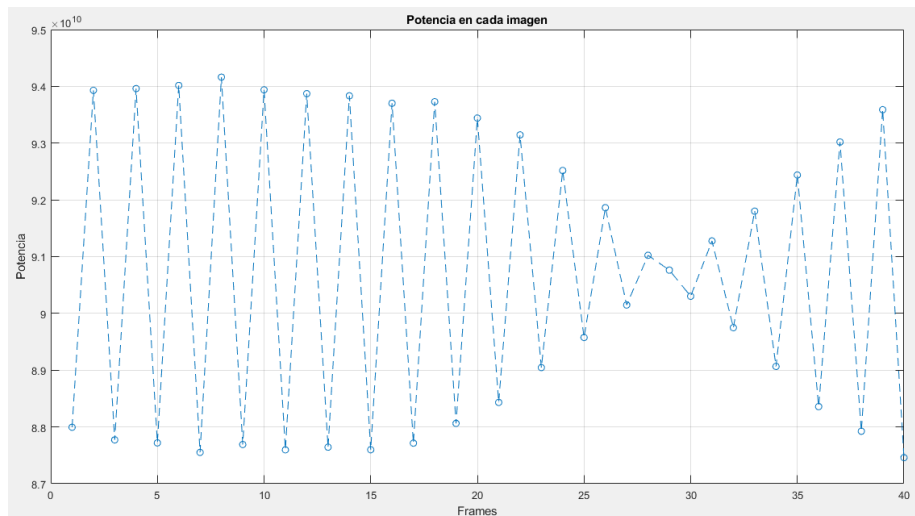


Fig. 5.3.21 Potencia de imagen de Lámpara VIS-NIR-SWIR según frame capturado

La potencia varía de manera alternada entre un nivel bajo de potencia y un nivel alto, se observa la magnitud de las diferencias en la Fig.5.3.22, los niveles altos y bajos parecen mantenerse en un rango parecido entre cada frame, esto hasta llegar al frame 15 que la potencia empieza a alternar cada vez con menos diferencia entre el nivel bajo y el alto hasta llegar al periodo entre el frame 27 y el 30 que presentan una diferencia bastante menor, donde posteriormente parece seguir la tendencia que se observaba hasta antes del frame 15 que seguía una alternación entre un nivel alto y uno bajo sostenida.

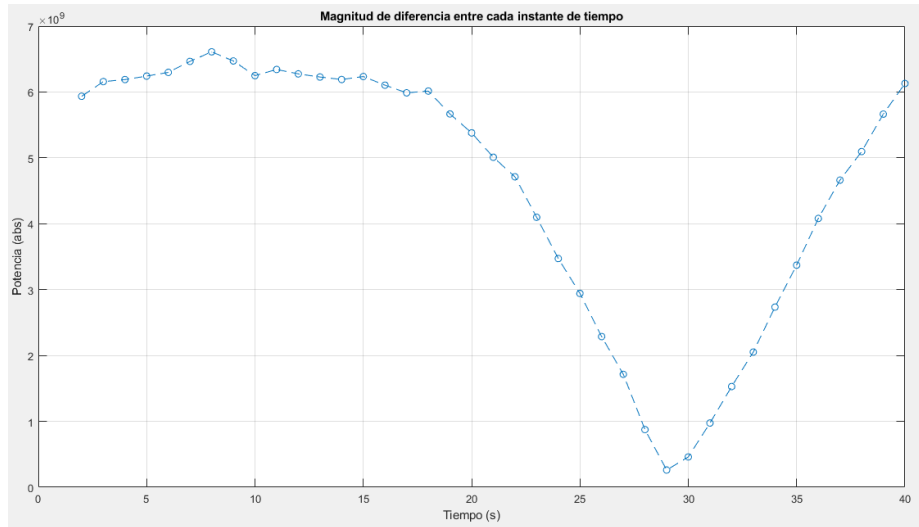


Fig. 5.3.22 Diferencia entre potencia de imagen de Lampara VIS-NIR-SWIR según frame capturado

La varianza sigue el comportamiento del experimento pasado, ya que experimenta un aumento cuando aumenta la potencia y viceversa, se observa en la Fig. 5.3.23:

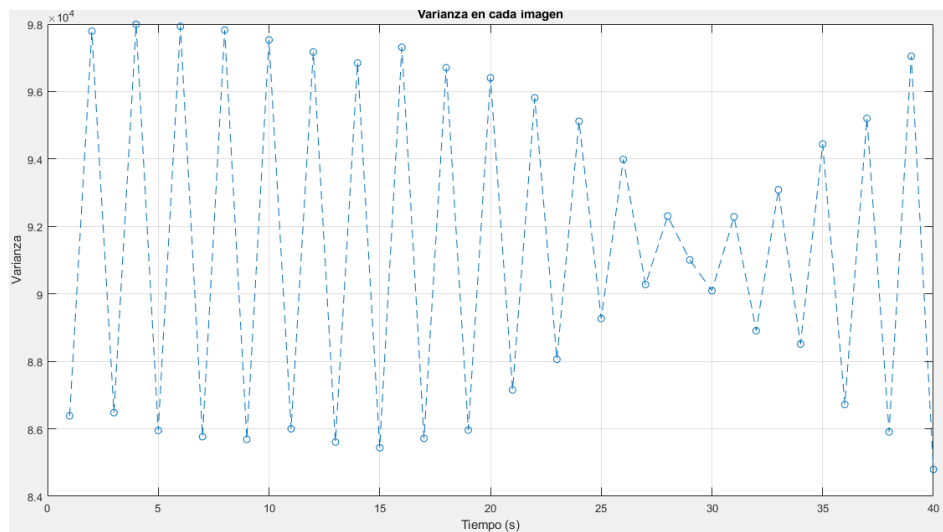


Fig. 5.3.23 Varianza de imagen de Lampara VIS-NIR-SWIR según frame capturado

En este experimento se concluye que en el corto plazo la lampara va a variar su potencia casi de manera alternada entre un nivel bajo y uno alto, no produciéndose una potencia constante que logre comprobar su estabilidad para una captura de frames seguidos de una cámara. Si tomara  $9.2 \cdot 10^4$  de valor medio y una variación máxima de  $9.8 \cdot 10^4$ , la potencia variaría en un 6.5% aproximadamente

## 6 Conclusiones

---

### 6.1 Resumen

En el presente trabajo se diseñó una lámpara de calibración basándose en la estructura de un edge lit LED panel que sea capaz de emitir ondas electromagnéticas en la banda que comprende la luz visible hasta el infrarrojo cercano de manera espacialmente uniforme a través de una superficie plana y que sea capaz de mantener esta uniformidad espacial a través del tiempo produciendo uniformidad temporal. Para esto se tomó la consideración de producir el producto a un bajo costo, utilizando materiales ya disponibles en el laboratorio (planchas de teflón) y disponibles en el comercio local a bajo costo (estructura de aluminio y luces halógenas). Se estudió el comportamiento de las ondas que se propagan en el instrumento determinando que no se produzca interferencia destructiva entre las diferentes longitudes de onda y se estudió el patrón de distribución de iluminación de las luces halógenas obtenidas para determinar su correcta posición para lograr una iluminación uniforme. Por último, se determinó el circuito eléctrico necesario para el correcto funcionamiento de la lámpara.

Luego de terminado el diseño se implementó la lámpara VIS-NIR-SWIR y se verificaron aspectos importantes para el cumplimiento del objetivo del dispositivo. En primer lugar, la medición radiométrica de las ondas emitidas por el instrumento utilizando un espectrómetro para comprobar que emite de la luz visible hasta el infrarrojo cercano. Luego se midió la iluminancia del centro de la lámpara utilizando un fluxómetro a diferentes ángulos respecto a la superficie y distancia entre la superficie y el fluxómetro. Se comparó la lámpara implementado con una luz de calibración de carácter comercial para comparar la uniformidad espacial de una imagen capturada con la misma cámara infrarroja. Por último, uniformidad temporal de la potencia transmitida por la lámpara al ser encendida dentro de un periodo de tiempo definido.

### 6.2 Conclusiones

La lámpara VIS-NIR-SWIR debe cumplir la función de calibrar cámaras infrarrojas, lo que se buscaba lograr creando una superficie plana con uniformidad espacial y temporal, por lo tanto, la medición del rango de frecuencia que emite, la uniformidad de la superficie y la estabilidad en el tiempo son los factores más importantes para comprobar el éxito del cumplimiento del objetivo. El estudio de rango de longitudes de onda en la cual emite la lámpara nos permite indicar que efectivamente emite desde

los 700 nm a los 1700 nm que cubre parte del infrarrojo cercano, no se pudo comprobar si emitía en la totalidad de la banda ya que no se disponía con espectrómetros que permitieran tener una lectura fidedigna de las ondas emitidas. La uniformidad espacial de la superficie de la lámpara se comparó con la transmitida por esfera de integración de la luz de calibración PT 1000, donde la lámpara VIS-NIR-SWIR entregó una varianza de  $1.266 \cdot 10^5$  y la luz de calibración PT 1000 varianza de  $1.201 \cdot 10^5$ , si bien en el último se presenta una varianza menor, el hecho que tengan valores similares indica que el grado de uniformidad de la lámpara diseñada es similar al de un producto profesional, sin embargo, el experimento de iluminancia hace ver que según la parte de la lámpara que se mida y el ángulo en el que se mida se entregan diferentes valores de iluminancia, si bien una es una medida radiométrica y otra fotométrica cabe mencionar que es necesario caracterizar hasta qué punto el centro de la lámpara es uniforme ya que al aumentar el área de captura de la cámara pueda arrojar que a ciertas distancias pierda la uniformidad. La uniformidad temporal no se pudo comprobar si la lámpara logra estabilizarse lo suficiente en torno a una potencia determinada ya que la temperatura que esta alcanza hace peligroso su uso por un periodo de más de 10 minutos, pero si se comprobó que debe tener un tiempo de calentamiento donde la potencia aumenta y luego varía en un rango de potencia más adecuado, de todos modos para afirmar estabilidad requiere ser medida más tiempo, en un plazo más corto luego del calentamiento alterna su potencia entre un valor bajo y un valor alto, variando en cada instante de tiempo, por ejemplo la luz de calibración estabilizada SLS201L de Thorlabs tiene un tiempo de estabilización de 45 minutos y una estabilidad de la potencia de 0.05%, el panel uniforme VIS-NIR-SWIR a los 10 minutos se observó una estabilidad de potencia del 6,2%v aproximadamente, mucho menos a la lámpara de Thorlabs, por lo tanto no cumple los estándares industriales actuales.

En conclusión, si bien la lámpara VIS-NIR-SWIR cumple con emitir en el rango de longitudes de onda deseado y al centro de esta se comprueba una uniformidad comparable con productos del mercado, el hecho que no se pueda comprobar el punto de estabilización de la potencia transmitida ya que la lámpara se calienta debido a las luces halógenas con el riesgo de dañar el instrumento y la seguridad del usuario hace que su función y su utilización con fines de calibración no sea muy factible. Si se lograra con seguir luces halógenas más estables en términos de potencia e implementar un sistema de ventilación que evite que la lámpara lleguen a temperaturas peligrosas se lograría cumplir con una luz de calibración apta para el uso industrial y de investigación.

## Referencias



- [1] N. Shepard, "Edge-lit versus back-lit LED flat panels," Regency Supply, <https://insights.regencysupply.com/edge-lit-versus-back-lit-led-flat-panels>.
- [2] R. Paschotta, article on "Radiometry" in the RP Photonics Encyclopedia, retrieved 2024-06-27, <https://doi.org/10.61835/774>
- [3] R. Paschotta, article on "Photometry" in the RP Photonics Encyclopedia, retrieved 2024-06-27, <https://doi.org/10.61835/50u>
- [4] R. Paschotta, article on "Luminosity Functions" in the RP Photonics Encyclopedia, retrieved 2024-06-27, <https://doi.org/10.61835/ngk>
- [5] R. Paschotta, article on "Radiant Energy" in the RP Photonics Encyclopedia, retrieved 2024-06-27, <https://doi.org/10.61835/w3r>
- [6] R. Paschotta, article on "Radiant Flux" in the RP Photonics Encyclopedia, retrieved 2024-06-27, <https://doi.org/10.61835/rkw>
- [7] R. Paschotta, article on "Luminous Flux" in the RP Photonics Encyclopedia, retrieved 2024-06-27, <https://doi.org/10.61835/k39>
- [8] R. Paschotta, article on "Radiant Intensity" in the RP Photonics Encyclopedia, retrieved 2024-06-27, <https://doi.org/10.61835/l7c>
- [9] R. Paschotta, article on "Luminous Intensity" in the RP Photonics Encyclopedia, retrieved 2024-06-27, <https://doi.org/10.61835/kpa>
- [10] R. Paschotta, article on "Irradiance" in the RP Photonics Encyclopedia, retrieved 2024-06-27, <https://doi.org/10.61835/utj>
- [11] R. Paschotta, article on "Illuminance" in the RP Photonics Encyclopedia, retrieved 2024-06-27, <https://doi.org/10.61835/nzj>
- [12] R. Paschotta, article on "Luminous Efficacy and Efficiency" in the RP Photonics Encyclopedia, retrieved 2024-06-27, <https://doi.org/10.61835/mua>
- [13] K. Vollmer, K.-P. Mollman (2013). "Fundamentals of Infrared Thermal Imaging" In *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications*, Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2010, ch. 1, sec. 1.3.2, pp. 21-22.

- [14] R. Paschotta, article on "Refractive Index" in the RP Photonics Encyclopedia, retrieved 2024-06-27, <https://doi.org/10.61835/10y>
- [15] "Fundamentals of Photonics", Bahaa E. A. Saleh and Marvin Carl Teich, Wiley, 2019
- [16] "Interior Lighting Fundamentals, Technology and Application", Wout Van Bommel, Springer 2019
- [17] "International Lighting Vocabulary", CIE Standard S017/E:2011, CIE, 2011)
- [18] Ding, Zhanghao & Liu, Yingli & Ma, Yaoguang & Zheng, Zhenrong & Wang, Min & Zeng, Ping & She, Jun & Wu, Rengmao. (2021). Direct Design of Thin and High-quality Direct-lit LED Backlight Systems. IEEE Photonics Journal. PP. 1-1. 10.1109/JPHOT.2021.3068746.
- [19] "Useful guides to know the structure of Led Panel Light", iquarklighting, <https://www.iquarklighting.com/useful-guides-to-know-the-structure-of-led-panel-light/>
- [20] Zongzhao Jiang, Yun Ye, Ju Guo, Jianhao Pan, Xianghong Cao, Tailiang Guo, and Enguo Chen, "Optimal dimension of edge-lit light guide plate based on light conduction analysis," Opt. Express 29, 18705-18719 (2021)
- [21] The Engineering ToolBox (2016). Luminous Efficacy. [online] Available at: [https://www.engineeringtoolbox.com/luminous-efficacy-d\\_1932.html](https://www.engineeringtoolbox.com/luminous-efficacy-d_1932.html) [Accessed Day Month Year].
- [22] Elvidge, Christopher & Keith, David & Tuttle, Benjamin & Baugh, Kimberly. (2010). Spectral Identification of Lighting Type and Character. Sensors (Basel, Switzerland). 10. 3961-88. 10.3390/s100403961.
- [23] N. Walker, "Light Bulb Average Rated Lifetime Hours," The Light Bulb Company, [https://www.thelightbulb.co.uk/resources/light\\_bulb\\_average\\_rated\\_life\\_time\\_hours/](https://www.thelightbulb.co.uk/resources/light_bulb_average_rated_life_time_hours/).
- [24] J. Irvine, "Mercury Vapor vs. LED," Action Service Group, <https://actionservicesgroup.com/blog/mercury-vapor-vs-led/>.
- [25] M. Abramowitz and M. W. Davidson, "Light Sources for Optical Microscopy," Florida State University, <https://micro.magnet.fsu.edu/primer/index.html>.
- [26] Thorlabs, Inc, "Tungsten-Halogen Stabilized Light Source", Available at: [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=7269](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=7269).
- [27] Labsphere, Inc, "Spectra-PT Power Tunable Spectral Calibration Sources", PT-1000-S ,PT1000-W datasheet, Available at: <https://www.labsphere.com/wp-content/uploads/2022/06/Spectra-PT.pdf>

- [28] “Guide to Light Fittings, Caps and Bases”, [blog.lightbulbs-direct.com](https://blog.lightbulbs-direct.com/your-guide-to-light-fittings-caps-and-bases), <https://blog.lightbulbs-direct.com/your-guide-to-light-fittings-caps-and-bases>, Accedido 26 de Junio 2024
- [29] “On Light Sources used in Visual Aids to Navigation”, IALA Guideline No. 1043, International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities, Saint Germain en Laye, Francia, Diciembre 2004
- [30] C. Porter and F. Blum, “Thermal Characterization of PMMA Thin Films Using Modulated Differential Scanning Calorimetry”, *Macromolecules*, vol. 33, no 19, pp 7016-7020, Aug. 2000, [doi.org/10.1021/ma0003021](https://doi.org/10.1021/ma0003021)
- [31] American Meteorological Society, “Atmospheric window”, [glossary.ametsoc.org](https://glossary.ametsoc.org), Accessed: Oct. 10. 2024 [Online], Available: [https://glossary.ametsoc.org/wiki/Atmospheric\\_window](https://glossary.ametsoc.org/wiki/Atmospheric_window)
- [32] D. Jungert, K. Sateesh and B. Minner, “What is the Melting Point of Aluminum, and Why is it Significant?”, [www.gabrian.com](http://www.gabrian.com), Accedido: 27 de junio 2024, Disponible en: <https://www.gabrian.com/melting-point-of-aluminum>
- [33] R. H. French et al., "Optical properties of materials for concentrator photovoltaic systems," 2009 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Philadelphia, PA, USA, 2009, pp. 000394-000399, doi: 10.1109/PVSC.2009.5411657.
- [34] Polyanskiy, M.N. (2024), “Refractiveindex.info database of optical constants”. *Sci Data* **11**, 94. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02898-2>

## 7 ANEXO A: Catalogo Gobantes S.A

# AMPOLLETAS

AMPOLLETAS HALÓGENAS BIPIN G4	
	

CÓDIGOS	POTENCIA	LÚMENES	VOLTAJE	T° DE COLOR
606835	10 W	120 lm	12 V	3000 K
606836	20 W	240 lm	12 V	3000 K

AMPOLLETAS HALÓGENAS R7S	
	

CÓDIGOS	POTENCIA	LARGO	T° DE COLOR
405053	100 W	78 mm	2800 K
405054	150 W	78 mm	2800 K
606171	150 W	118 mm	2800 K
606172	200 W	118 mm	2800 K
430001	300 W	118 mm	2800 K
430002	500 W	118 mm	2800 K
430003	1000 W	189 mm	2800 K
430005	1500 W	254 mm	2800 K

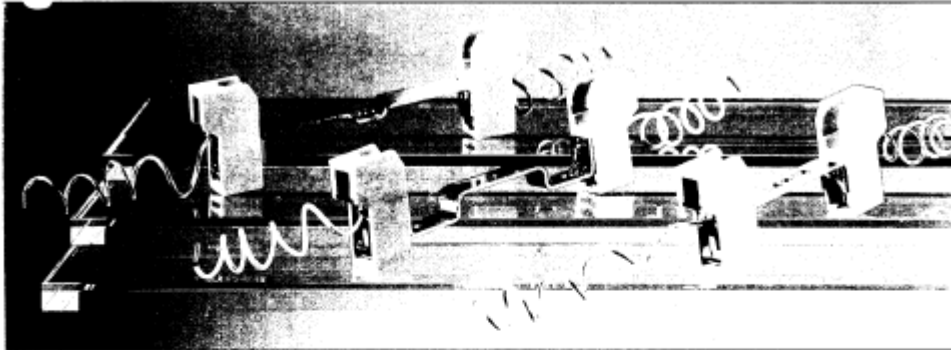
### AMPOLLETA HALÓGENA G9 FROST



CÓDIGO	POTENCIA	LÚMENES	VOLTAJE	T° DE COLOR	LARGO	Ø DIÁMETRO
608130	40 W	680 lm	220 V	2800 K	35 mm	14 mm

## 8 ANEXO B: Portalámparas R7S BJB

### Halogen twin lampholders R 7 s



**25.803**

These products have been designed according to the appropriate national and international specifications. The choice of product and correct technical embodiment is the responsibility of the user. More precise information available on request. We reserve the right to modify products.

**Rating 6 A; 250 V**

**Housing steatite  
Contact pin copper with brazed silver cap**

**To ensure the correct spacing between contacts, the lampholders must be fixed.**

Wires: nickel plated copper 0.75 mm<sup>2</sup>, insulation PTFE 250°C or FEP 200°C, with terminals free cable length 220 mm

The wires used with the tab terminal types must be suitable for the application.

		<p><b>Screw fixing</b> contact centre 114.2 mm</p> <p>pkg wt part no.</p> <p><b>cable insulation PTFE</b> length approx. 220 mm 125.63g <b>25.803.3821.00</b></p> <p><b>cable insulation FEP</b> length approx. 220 mm 125.63g <b>25.803.3812.00</b></p>
		<p><b>Screw fixing</b> contact centre 114.2 mm</p> <p><b>cable insulation PTFE</b> length approx. 220 mm 125.63g <b>25.803.3814.00</b></p> <p style="text-align: center;"><b>RS 171-001</b></p>
		<p><b>Screw fixing</b> contact centre 74.9 mm</p> <p><b>cable insulation PTFE</b> 125.56g <b>25.803.3609.00</b> length approx. 220 mm</p> <p><b>cable insulation FEP</b> 125.56g <b>25.803.3603.00</b> length approx. 220 mm</p>

521

# 9 ANEXO C: Ficha técnica luz de calibración Xe-2

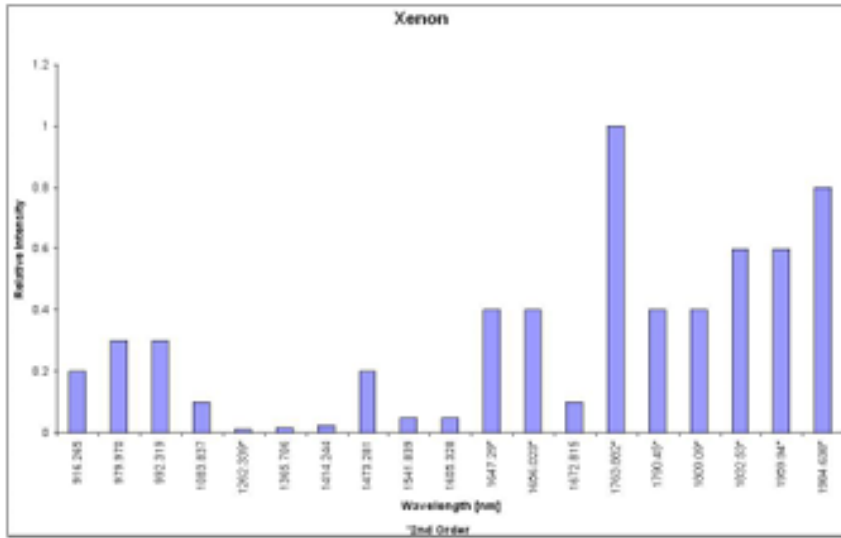


## 2: Specifications

### XE-2 Specifications

The following sections detail the specifications of the XE-2 xenon calibration light source.

### XE Spectral Output



## Strong XE Emission Lines by Wavelength (nm)

There are more emission lines shown below than printed on the label on the XE-2 housing. The label is intended as a quick, convenient reference and does not list every XE emission line that exists. Below is a list of wavelengths for Xenon. Wavelengths displayed in blue are listed on the calibration lamp's label.

452.186
462.420
466.849
469.097
469.804
473.415
479.262
480.702
482.971
484.329
491.651
492.315
733.930
738.600
739.379
740.040

755.979
758.468
764.391
780.265
788.132
796.734
805.726
806.134
823.163
826.652
881.941
904.545
916.265
979.970
992.319
1083.837

1262.339
1365.706
1414.244
1473.281
1541.839
1605.328
1647.290
1656.023
1672.815
1763.882
1790.450
1809.090
1832.530
1959.940
1984.638

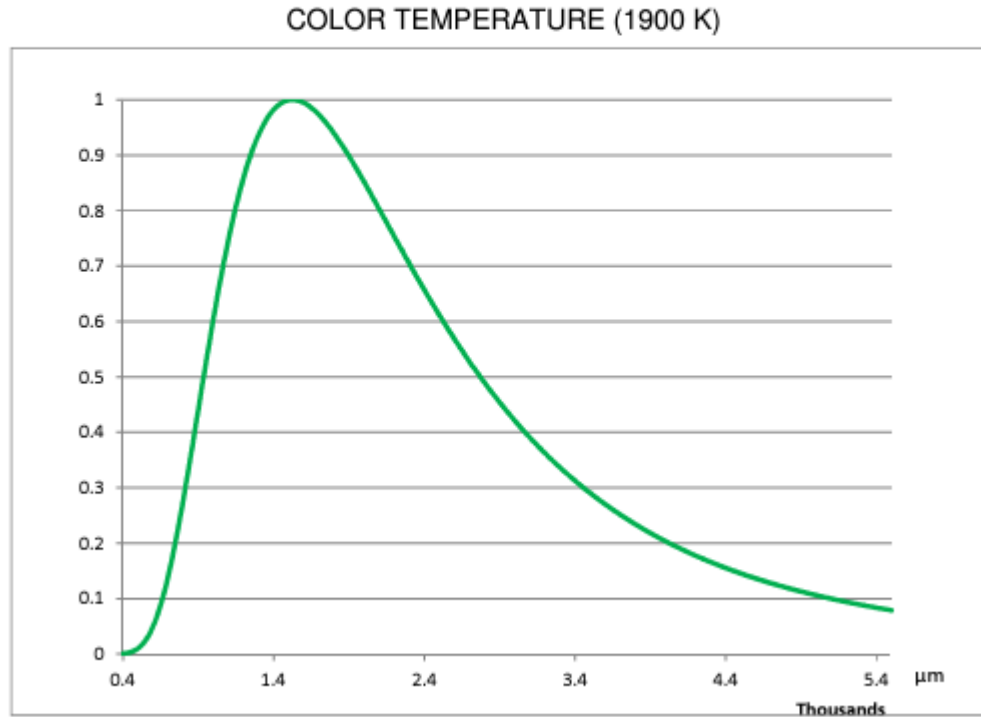
## 10 ANEXO D: Ficha técnica fibra óptica QP400-2VIS-NIR

VIS-NIR Low OH content 400-2100 nm	QP6-2-VIS-NIR	8 µm	Acrylate				X	X			4 cm	2 cm
	QP50-2-VIS-NIR QP50-2-VIS-BX	50 µm	Polyimide				X X	X	X		4 cm	2 cm
	QP100-2-VIS-NIR QP100-2-VIS-BX	100 µm	Polyimide				X X	X	X		4 cm	2 cm
	QP200-2-VIS-NIR QP200-2-VIS-BX	200 µm	Polyimide				X X	X	X		8 cm	4 cm
	QP400-1-VIS-NIR QP400-1-VIS-BX QP400-2-VIS-NIR QP400-2-VIS-BX	400 µm	Polyimide			X X	X X X	X X X	X X X		16 cm	8 cm
	QP600-025-VIS-NIR QP600-025-VIS-BX QP600-1-VIS-NIR QP600-1-VIS-BX QP600-2-VIS-NIR QP600-2-VIS-BX	600 µm	Polyimide	X X		X X	X X X X	X X X X	X X X X		24 cm	12 cm
	QP1000-2-VIS-NIR QP1000-2-VIS-BX	1000 µm	Acrylate				X X	X	X		40 cm	20 cm

## 11 ANEXO E: Ficha técnica luz de calibración SLS202

### 3.5. Spectral Power Density

The SLS202 Stabilized Infrared Light Source is ideal for the NIR-IR (400 nm-5500 nm) application. Its spectral power density is depicted as below.



**Figure 2 SLS202 Spectral Power Density**

#### Chapter 4 Specifications

Item	Specifications
Center Wavelength	1500 nm
Output Power at Fiber Interface	>100 mW
Fiber Interface	SMA
Light Power Stability	0.05%
Drift per Hour	0.01%
Color Temperature Stability	$\pm 15$ K
Dimension	55 mm x 57.5 mm x 194.1 mm
Bulb Power	7.2 W
Lifespan	10,000 h
Compatible Filter Size	$\varnothing$ 1" Diameter, up to 0.31" (8.0 mm) thick

## 12 ANEXO F: Ficha técnica Aquros CQD 1920 eSWIR GigE Camera



High Definition. SWIR Vision.



### Acuros® CQD® 1920 GigE eSWIR Camera

The Acuros® CQD® extended SWIR (eSWIR) cameras have sensitivity from 350nm to 2000nm. This novel wide bandwidth capability opens up new applications for chemical sensing, surveillance imaging, plastic sorting, thermal imaging and more. All Acuros cameras are GeniCam compliant and designated EAR-99 for requiring no license for lawful export. Acuros cameras have up to 10db higher SNR than competitive 5µm pitch InGaAs cameras.

#### Specifications:

##### Electro-Optical Specifications:

Sensor	Acuros® CQD® sensor
Temperature stabilization	Single-stage thermo-electric cooler
Sensor array format	1920 x 1080
Resolution	2.07 megapixels
Spectral band	350 nm - 2000 nm
Array size	28.8 mm x 16.2 mm, 33 mm diagonal
Pixel pitch	15 µm x 15µm
Max frame rate at full resolution	58 fps (8 bit), 27fps (10, 12, 14 bit)
Pixel operability	99.9% typical, 99.75% min
Bit depth	8, 10, 12, 14 bit selectable
Integration type	Snapshot global shutter
Trigger	External TTL
Integration time	10 µsec to 4 sec
Dynamic range	65 dB typical
Windowing	Array centered
Windowing frame rate	Scales inversely with window size
Binning arrays	2 x 2, 4 x 4
Non-uniformity correction	2-point non-uniformity correction
Temporal dark noise	65e- typical (high gain)
Detectivity	See typical detectivity curve.

#### Features:

- Full HD resolution
- TEC cooling
- Low noise
- Fast frame rate
- Visible-eSWIR
- GigE Vision
- EAR-99

#### Applications:

- Hydrocarbon detection
- Chemical sensing
- Medical imaging
- Plastic sorting
- Hyperspectral
- High resolution
- Thermal imaging
- Surveillance
- Machine vision
- Silicon inspection
- Instrumentation

Acuros-1920-GigE-002

[www.swirvisionsystems.com](http://www.swirvisionsystems.com)