



Sistema Optomecatrónico Portátil para la Comparación de Componentes de Color



Tesis para obtener el grado de Maestro en
Optomecatrónica

**Asesor: M.C. Gustavo Adolfo Acevedo
Ramírez**
**Presenta: Ing. Alan Alejandro Aguirre
Romano**

Noviembre del 2018
Aguascalientes, Aguascalientes,
México

Dedicatoria

A Dios y a mi madre Dora
quienes son los pilares
más importantes de mi vida.

Agradecimientos

A Dios ante todas las cosas

A mis padres Dora y Alejandro por su apoyo incondicional

A mi familia

A Juan Daniel Berrones Guerrero por su apoyo y amistad

A mi asesor, el Maestro Gustavo Acevedo

A mis compañeros y maestros del Centro de Investigaciones en Óptica

En especial al Maestro Gil Arturo Pérez, al Maestro Juan Manuel Bujdud, al Maestro

Juan Sarabia y al Doctor Luis Valentín por el haber apoyado con sus conocimientos y

trabajo a la realización de esta tesis.

Resumen

En esta tesis se presenta el desarrollo, construcción y caracterización de un sistema optomecatrónico, utilizando una cámara como el elemento de adquisición, permitiendo comparar las componentes de color bajo condiciones controladas de iluminación, lo que permite mantener las mismas condiciones durante las mediciones, independientemente del entorno de operación en donde se utilice el sistema.

En el Capítulo uno describe algunos antecedentes y la importancia del color en la vida del ser humano como la medición del mismo mediante dispositivos que permitan medir el color en escalas psicométricas o psicocuantitativas (Martínez Verdú, 2001).

En este trabajo se desarrolla el diseño y construcción desde la parte mecánica para la creación de una luminaria adecuada que permita la correcta iluminación evitando factores internos y externos que puedan afectar las mediciones del sistema.

Se realiza una caracterización espacial de la luminaria diseñada para observar cambios, dentro del área de operación, que podrían ocasionar una variación de intensidad provocando diferencias importantes dentro de la medición.

Se caracteriza la cámara para obtener la respuesta del sensor a las diversas longitudes de onda y con esta información aproximar el espectro de respuesta de la cámara al espectro de respuesta del ojo humano.

Al ser un trabajo de desarrollo tecnológico, se requirió la creación de una interfaz que permita al usuario adquirir la imagen bajo condiciones controladas extraer sus componentes de color y comparar estos valores con valores de referencia. Para ello se utilizó la plataforma de Python en el entorno de Raspbian embebidos de fábrica en el hardware Raspberry.

Para probar el sistema, se midió el color en una tabla con parches de colores ColorChecker® Digital SG utilizada generalmente para las calibraciones colorimétricas de cámaras digitales. Otra prueba realizada al prototipo fue la discriminación de colores, con coordenadas cromáticas cercanas, para comprobar que el sistema pudiera reconocer dichas diferencias colorimétricas.

Índice

Agradecimientos	1
Resumen	2
Índice de figuras	7
Capítulo 1	11
1.1 Introducción.....	11
1.2 Objetivo general.....	15
1.3 Objetivos Particulares.....	15
Capítulo 2	16
Marco teórico.....	16
2.1 Iluminación.....	16
2.1.1 Fuentes de iluminación	20
2.1.2 Tipos de iluminación artificial	23
2.1.3 Técnicas de iluminación.....	23
2.2 Sensores de Captura (Cámaras)	25
2.2.1 Filtro Bayer RGB.....	31
2.3 Color	33
2.3.1 Iluminantes estándar CIE	36
2.3.2 Espacios de color CIE.....	39
2.3.3 Colorimetría	46
Capítulo 3	47
Metodología.....	47
3.1 Selección de la Cámara	48
3.1.1 Selección de óptica.....	50
3.1.2 Caracterización espectral de la cámara	51
3.2 Selección y Caracterización de LEDs	53

3.2.1 Selección de LEDs	53
3.2.2 Caracterización espectral del LED.....	54
3.2.3 Caracterización espacial del LED	55
3.3 Diseño mecánico	56
3.3.1 Diseño mecánico de la luminaria.....	57
3.3.2 Diseño mecánico del encapsulado	61
3.3.3 Piezas complementarias.....	63
3.4 Caracterización espacial de la luminaria	66
3.4.1 Trazo de rayos.....	66
3.4.2 Montaje de LEDs.....	67
3.4.3 Caracterización de distribución espacial.....	69
3.5 Extracción de las componentes de color a partir de una imagen	71
3.5.1 Algoritmo para extraer información de color de una imagen	72
3.5.2 Plataforma del programa	76
3.6 Medición de color con SPOCC.....	78
Capítulo 4	83
Resultados.....	83
4.1 Caracterización espectral de la cámara.....	83
4.2 Caracterización del LED.....	87
4.2.1 Espectro de LEDs y CRI.....	87
4.2.2 Distribución espacial del LED	89
4.3 Diseño mecánico	90
4.3.1 Construcción de la luminaria.....	90
4.3.2 Construcción de piezas complementarias	92
4.3.3 Ensamble del encapsulado	94
4.4 Caracterización espacial de la luminaria	95

4.4.1 Caracterización espacial de la luminaria.....	95
4.4.2 Caracterización espectral de la luminaria	98
4.5 Medición de color con SPOCC.....	100
4.5.1 Escala de grises.....	100
4.5.2 Comparación de colores RGB y CMY	102
4.5.3 Comparación en HUE test.....	105
Capítulo 5	108
5.1 Conclusiones.....	108
5.2 Trabajo Futuro.....	110
Referencias Bibliográficas	112

Índice de figuras

Figura 1.– Representación del flujo luminoso en una bombilla incandescente	17
Figura 2.– Representación de la intensidad luminosa calculada a partir de una bombilla incandescente.....	18
Figura 3.– Representación de la luminancia reflejada por una superficie que cual incide sobre un observador.	19
Figura 4.– Representación del flujo luminoso incidiendo sobre una superficie.	20
Figura 5.– Matriz de filtro de color Bayer	32
Figura 6.– Principio de igualación de color tricromático utilizando la mezcla aditiva de luces regulables R, G y B; C es el color de referencia.....	34
Figura 7.– Respuesta espectral de los conos en las longitudes de onda definidas en r, g y b.....	35
Figura 8.– Espectro electromagnético visible del iluminante A	37
Figura 9.– Espectro electromagnético visible del iluminante D50.....	37
Figura 10.– Espectro electromagnético visible del iluminante D65	38
Figura 11.– Espectro electromagnético visible del iluminante F2	38
Figura 12.– Diagrama de cromaticidad CIE 1931.....	39
Figura 13.– Diagrama de cromaticidad CIE 1976 (OriginLab Technical Support, 2018)	40
Figura 14.– Gama visible en el espacio de color CIELUV con blanco de referencia en D65 (Horvath & Lipka, 2018)	43
Figura 15.– Gama visible en el espacio de color CIELAB con blanco de referencia D65 (Horvath & Lipka, 2018).....	45
Figura 16.– Arreglo óptico utilizado para la caracterización espectral de la cámara. ..	52
Figura 17.– Montaje del arreglo óptico utilizado para medir la intensidad de la fuente de Xénon al cruzar por el monocromador.	53
Figura 18.– Goniómetro LGS1000 de InstrumentSystem.	56
Figura 19.– Dibujo con dimensiones generales del sistema.	57
Figura 20.– Ensamblaje del domo explosionado desde vista superior.	58
Figura 21.– Ensamblaje del domo desde vista isométrica.....	59
Figura 22.– Parte interior del domo, muestra la posición de los LEDs	60

Figura 23.– diagrama eléctrico de LEDs utilizados en la luminaria conectados a la fuente de 24v.	61
Figura 24.– SPOCC encapsulado evitando el paso de luz hacia el interior, operado desde pantalla táctil.	62
Figura 25.–Ensamble del SPOCC con perfiles de aluminio mostrando el interior de la estructura. (1) Cubierta plástica para aislar el sistema de la luz exterior, (2) Ventiladores para refrigerar sistema de captura y procesamiento. (3) Luminaria tipo domo. (4) <i>Cornerblock</i> utilizado para unir estructura de aluminio. (5) Cámara y óptica para captura de imágenes. (6) Batería para suministrar energía al sistema portátil. (7) Estructura de aluminio	63
Figura 26.- Base para cámara diseñada en SOLIDWORKS®.	64
Figura 27.– Trazado de pistas en la interfaz plástica, adherida a la placa de cobre, cortada por laser.....	64
Figura 28.– Método de trazado de pistas en PCB para obtener la geometría deseada.	65
Figura 29.– Mapa de irradiancia absorbida por la superficie colocada bajo la iluminación del domo en la simulación.	67
Figura 30.- Placa de cobre en forma de arco a 90° con LEDs de montaje superficial. ...	68
Figura 31,- Interior del domo con 4 segmentos de LEDs encendidos.	68
Figura 32.- SPOCC montado en goniómetro en el túnel fotométrico del CIO Aguascalientes.	69
Figura 33.-Distribución de irradiancia de la luminaria a una distancia de 25m con unidades en H y V con grados.	70
Figura 34.– Colorímetro WestborPhotonics captando imagen de luminancia de la superficie blanca uniforme sobre la cual se incide luz proveniente del domo. (1) Colorímetro. (2) Lente réflex. (3) Cono de soporte para cámara IDS. (4) Iluminación difusa. (5) Superficie blanca captada por el colorímetro.	71
Figura 35.– Interfaz para comparar componentes de color de una referencia con una muestra.	73
Figura 36.– Selección de la región de interés de una imagen de la tabla ColorChecker	73
Figura 37.– Separación de la imagen en los tres canales RGB.	74

Figura 38. – Cartilla de colores ColorChecker Digital SG: Dentro de la imagen se enmarca la región de parches pertenecientes a ColorChecker Original	78
Figura 39. – Tabla de colores ColorChecker capturada por el SPOCC para extracción de información de color de los parches contenidos.	79
Figura 40. – Medición de parches de colores de la tablilla Colorchecker con colorímetro eye-one	80
Figura 41. – Valores (x, y) de los parches ColorChecker Original medidos con el colorímetro en diagrama CIE 1931.	81
Figura 42. – Fichas de prueba HUE test 100 las cuales van cambiando ligeramente su tonalidad con respecto a sus consiguientes	82
Figura 43. – Espectro de emisión de la fuente de luz del monocromador, medido en la entrada, línea de color negro, y salida del monocromador tomado cada 20nm, denotado como diferentes colores.	84
Figura 44. – Imágenes capturadas por la cámara al irradiar el sensor con luz proveniente del monocromador, adquiridas cada 5 nanómetros.	85
Figura 45. – Comparación de respuesta del sensor (RGB) contra los valores triestímulo (XYZ).	86
Figura 46. – Aproximación del espectro de respuesta del sensor a los valores triestímulo (XYZ).	87
Figura 47. – Espectro de emisión de LEDs D50 marca YujiLeds utilizados como fuente de luz en la luminaria.	87
Figura 48. – Índice de rendimiento de color de LEDs utilizados como fuente de iluminación.	89
Figura 49. – Distribución luminosa de un LED obtenida por el goniómetro. La máxima irradiancia espectral es al ángulo 0°, dirección que es normal a la superficie del LED.	90
Figura 50.- Impresión de las piezas en PLA utilizadas para el ensamble del domo.	91
Figura 51. – Luminaria tipo domo construida utilizando impresión 3D.	92
Figura 52. – Cámara IDS colocada sobre el soporte que la mantendrá sobre la luminaria.	93
Figura 53. – Lámparas LED diseñadas para colocarse en el interior del domo.	93

Figura 54. – Ensamble del SPOCC, se observa la luminaria, la base para la cámara, la pantalla de la Raspberry Pi, la fuente de voltaje acompañada de clemas que sirven para la conexión de los LEDs y la cámara.....	94
Figura 55. –Distribución de irradiancia en geometría 3D.	95
Figura 56. – Representación geométrica en tres dimensiones de la distribución luminosa generada por el domo medido con el luxómetro	96
Figura 57. – Vista superior de la representación de la distribución luminosa generada por el domo medido con el luxómetro.....	97
Figura 58. – Luminancia emitida de la luz del domo reflejada por una superficie blanca.	98
Figura 59. – Medición del espectro de la luminaria medida con un espectrofotómetro dentro del túnel fotométrico, dentro de la información que da el software se observa la iluminancia, irradiancia, coordenadas de color, temperatura de color e índice de rendimiento de color.	99
Figura 60. –Tabla ColorChecker utilizada, con filas enumeradas del 1 al 10 y columnas que van de la A a la N.	100
Figura 61. – Comparación de escala de grises de la tabla ColorChecker en los canales RGB de la cámara; representados de color rojo, verde y azul, mientras que las mediciones del colorímetro son representados de color negro.	101
Figura 62. – Comparación de mediciones en colores neutros entre el colorímetro y el sistema SPOCC.	102
Figura 63. – Comparación de los colores RGB contenidos en la tabla ColorChecker.	103
Figura 64. – Comparación de los colores CMY contenidos en la tabla ColorChecker.	104
Figura 65. – Comparación de las mediciones de los colores RGB+CMY que permiten aproximar la reproducción de color de los sistemas.	104
Figura 66. – Comparación de mediciones del HUE test en el diagrama CIE 1931(x, y)	105
Figura 67. – Comparación de mediciones del HUE test en el espacio de color CIE 1976 L*a*b*.	106
Figura 68. – Comparación de mediciones del HUE test en el espacio de color CIE 1976 L*a*b* con perspectiva para observar L*.	106

Capítulo 1

1.1 Introducción

“Si las puertas de la percepción quedaran depuradas,
todo se habría de mostrar al hombre tal cual es: infinito.”

William Blake

Desde los albores de la historia humana la percepción de los fenómenos ha sido un factor determinante para nuestro acontecer; una comprensión realizada en un inicio a partir del conocimiento empírico, desde el cual, el hombre ha vinculado la experiencia propia como guía de su interpretación del mundo: los fenómenos que nos rodean y aquello que percibimos a partir de ellos; tales elementos han sido los pilares sobre los cuales se ha cimentado nuestra sociedad.

Nuestro acontecer se delimita a través de factores externos, los fenómenos culturales y sociales surgen a raíz de tales manifestaciones y su influencia en el desarrollo de nuestro pensamiento. Nuestros sentidos son la herramienta principal de percepción que poseemos para un ejercicio de comprensión de los fenómenos que nos rodean. La cultura contemporánea se ha constituido a partir de dichas percepciones, siendo el mercado la principal plataforma de enunciación para las manifestaciones culturales y sus interpretaciones.

Entonces la percepción a partir de los colores es una de los factores fundamentales para la comprensión de nuestro mundo, y ha sido sujeto de estudios transversales, pues se han involucrado activamente diversos campos de investigación para la comprensión de sus características.

Durante más de 400 años, destacados investigadores contribuyeron a la comprensión actual de la luz y el color (Gevers, Gijzenij, Weijer, & Geusebroek, 2012). Los trabajos de dichos investigadores han sido importantes para ayudarnos en la comprensión de dichas características de la luz y por tanto el cómo comprendemos el color. Dentro de nuestra comprensión del mundo, la percepción del color es una de los principales elementos de la interpretación del universo contemporáneo.

Destaca su importancia a grado tal, que podemos establecer un cambio en el paradigma cultural a partir de la introducción de la impresión y reproducción de imágenes a color; no fue hace mucho que las fotografías, películas y televisión eran a blanco y negro. Estas imágenes en blanco y negro hacen evidente que el matiz no suele ser necesario para reconocer ciertos objetos. Sin embargo, los colores son importantes por motivos estéticos, de identificación y razones de seguridad. Como resulta al asociar el color con objetos específicos, donde al separar el color de la forma ocurren cosas inusuales (Martínez Verdú, 2001). La relación de la cultura con los colores ha llevado consigo siempre un sentido de referencialidad, la asociación de significados presente en los colores

deviene también en una necesidad mercantil de establecer criterios y estándares de calidad a partir de la percepción de los colores.

En las últimas décadas, con el auge tecnológico y los avances que ha traído consigo, como lo son las pantallas, impresoras, cámaras digitales, entre otros dispositivos, se ha visto un crecimiento en la diversidad de las necesidades en el campo de color computarizado y visión artificial. Poco a poco, los valores imaginarios de grises se sustituyen por sistemas de color (Gevers, Gijzen, Weijer, & Geusebroek, 2012). El hombre moderno ha optimizado los procesos de producción gracias a la tecnología, pero esto ha traído consigo una necesidad por aumentar los estándares de calidad, pues el consumidor al confiar que los procesos industriales son eficientes, genera en ellos cierta expectativa. Los valores estéticos del color insertos en nuestra sociedad contemporánea, así como las exigencias de los consumidores, han generado una problemática para los sistemas de calidad y han producido una necesidad de nuevos procesos que nos permitan adecuar la producción a los estándares sociales y culturales.

En concreto, a raíz de esta necesidad que ha generado una problemática en la industria, se pretende pasar de una inspección cualitativa hecha por una persona a una forma cuantitativa realizada por un sistema confiable, para ello se utilizan los componentes RGB de una cámara comercial. El sistema optomecatrónico portátil para la comparación de componentes de color, tiene la finalidad de disminuir los costos a la vez que optimiza los procesos de control

de calidad, pues a través de la modificación del software y hardware de una cámara comercial, se pretende generar un proceso de análisis que permita una calidad ad hoc al mercado sin necesidad de incrementar los costos en el sistema de producción.

El sistema propuesto, pretende ser una opción viable para la comparación cuantitativa de color en procesos donde el color forma parte de los indicadores de calidad de determinado producto. Aunque este prototipo no mida el color en un espacio estandarizado de color como en el caso del colorímetro, ofrece la ventaja de poder muestrear áreas más grandes de objetos bajo las mismas condiciones de una muestra de referencia ya que los colorímetros miden de manera puntual en forma general; lo que podría optimizar los tiempos y movimientos en el sistema de producción.

1.2 Objetivo general

Se pretende desarrollar un sistema optomecatrónico portátil que compare componentes de color en superficies de 30x30 cm, para mejorar y agilizar los procesos de control de calidad en el sector industrial.

1.3 Objetivos Particulares

- Diseño y fabricación de estructura mecánica para mantener condiciones homogéneas de iluminación durante la adquisición de imágenes.
 - Diseño de luminaria
 - Geometría de luminaria
 - Tipo de iluminación a utilizar.
 - Índice de Rendimiento de color de luminaria.
 - Selección de cámara y hardware
 - Diseño electrónico de luminaria y hardware
 - Diseño y fabricación del arreglo electrónico para montaje de LEDs
 - Conexión para alimentación de la iluminación.
 - Diseño del diagrama eléctrico para alimentación del hardware en general
- Diseño de sistema de adquisición de imagen.
 - Planteamiento matemático para sistemas de color
 - Pruebas de sistema de adquisición de imagen.
 - Respuesta espectral de cámara.
 - Establecimiento del sistema de adquisición definitivo.
- Diseño y desarrollo de software para comparar componentes de color.
 - Diseño de algoritmo y diagrama de flujo
 - Generar plantilla
 - Comparación de color en RGB

Capítulo 2

Marco teórico

2.1 Iluminación

En el diseño de sistemas de visión industriales la iluminación no controlada del entorno no suele ser aceptable ya que se obtienen imágenes con bajo contraste, reflexiones especulares, sombras y destellos. Un sistema de iluminación bien diseñado proporciona luz a la escena de forma que la imagen que se obtiene favorezca el posterior proceso sobre la misma, manteniendo e incluso mejorando la información necesaria para la detección y extracción de los objetos y características de interés.

Para describir las fuentes de iluminación se pueden tomar en cuenta los siguientes parámetros:

Flujo luminoso Φ : El flujo luminoso es la cantidad fotométrica fundamental que describe la cantidad de radiación electromagnética emitida por una fuente (Palmer & Grant, 2009). La unidad básica de medición del flujo luminoso se le conoce como lumen. Como el ojo tiene una sensibilidad variable a lo largo del espectro electromagnético, es necesario considerar la función de luminosidad denotada como $V(\lambda)$, por lo que el flujo luminoso estará dado como:

$$\Phi_v = (683.002 \text{ lm/W}) \int_{\lambda_{visible}} \Phi(\lambda)V(\lambda)d\lambda$$

Donde $\Phi(\lambda)$ es el flujo luminoso en unidades radiométricas y λ es la longitud de onda del espectro electromagnético. Una representación del flujo luminoso se puede apreciar en la Figura 1.

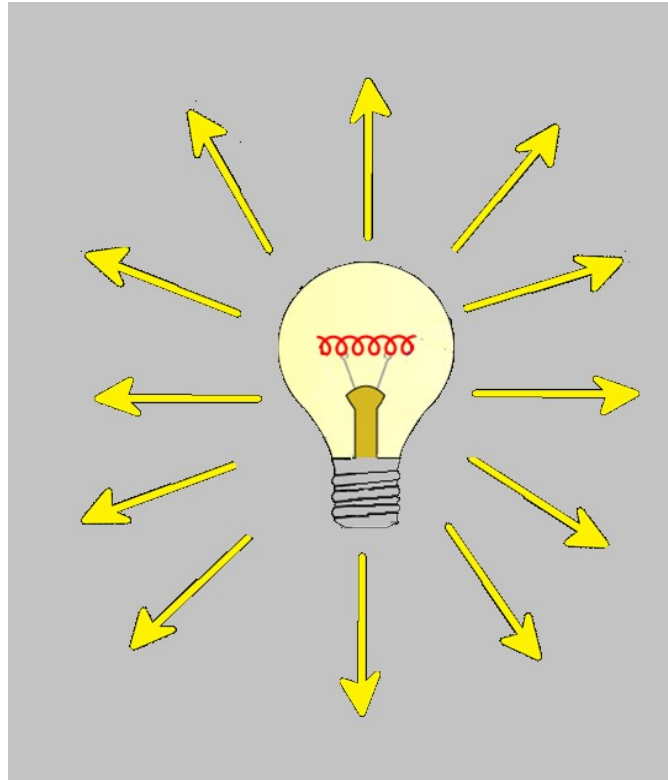


FIGURA 1.- Representación del flujo luminoso en una bombilla incandescente

Existen instrumentos para medir el flujo total de una fuente de luz utilizando una cámara aislada conocida como esfera integradora, dentro de ella se coloca la fuente y un detector (Palmer & Grant, 2009).

Intensidad luminosa I: Se define como el flujo luminoso emitido por una fuente luminosa por unidad de ángulo sólido (Ω), el cual es el ángulo espacial que abarca un objeto visto desde un punto dado. Representado en la Figura 2.

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

El Sistema Internacional de Unidades define la unidad básica como Candela (Cd), el cual es equivalente a 1 lumen sobre estereoradián.

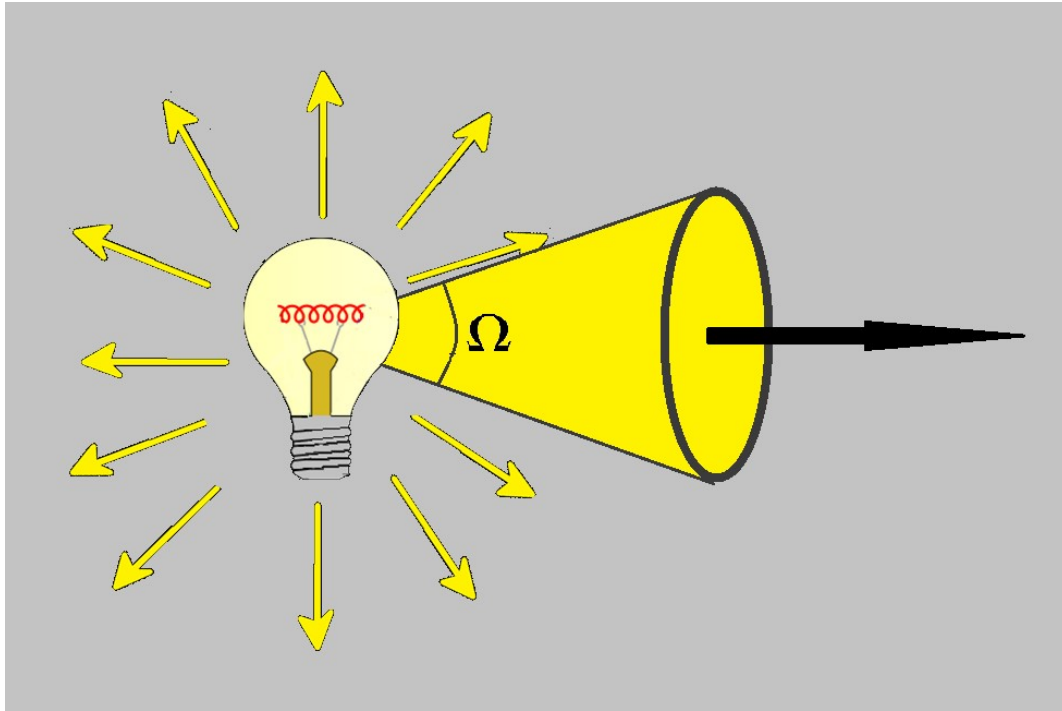


FIGURA 2.- Representación de la intensidad luminosa calculada a partir de una bombilla incandescente.

Luminancia L: La luminancia es igual a la intensidad luminosa por unidad de área, o lo que es igual, describe la cantidad de luz presente en una dirección por la unidad de área de la superficie que encierra un volumen de unidad. Representada en la Figura 3.

La luminancia es una propiedad inherente de una fuente de luz que se mide en lúmenes sobre estereorradián por metro cuadrado o candela sobre metro

cuadrado (cd / m^2). Medir la luminancia en una luminaria o una fuente de luz permite observar la uniformidad del brillo de la fuente (Instrument Systems).

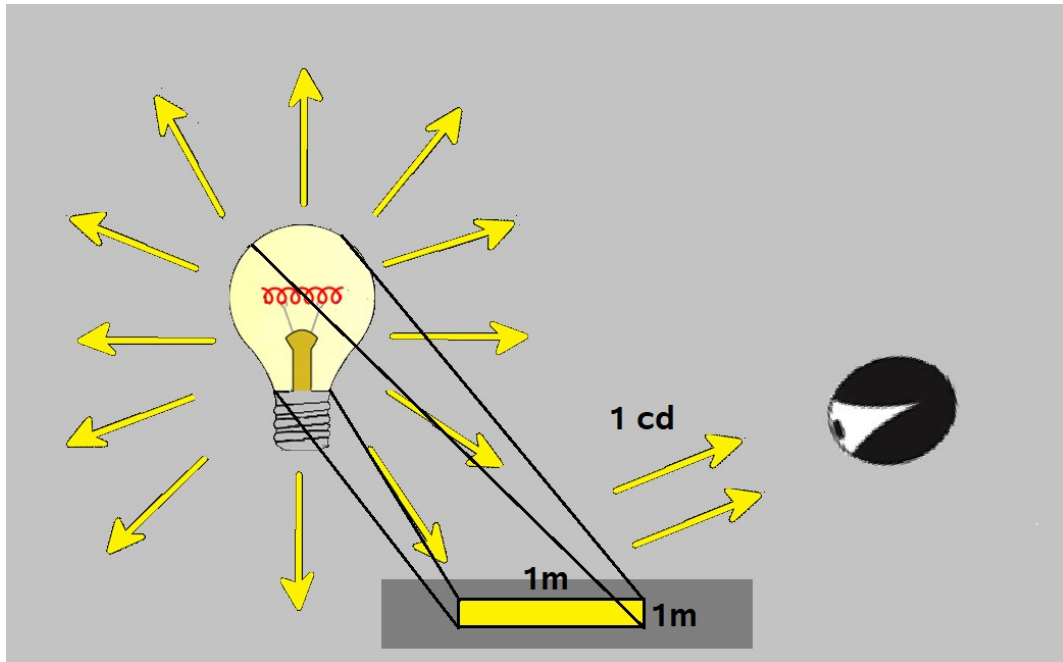


FIGURA 3.- Representación de la luminancia reflejada por una superficie que cual incide sobre un observador.

Iluminancia E_v : La iluminancia determina la cantidad de flujo luminoso que inciden en una superficie a una determinada distancia de la fuente luminosa. Representada en la Figura 4.

La unidad básica de medición es el lux (lx), que es equivalente a un lumen sobre metro cuadrado.

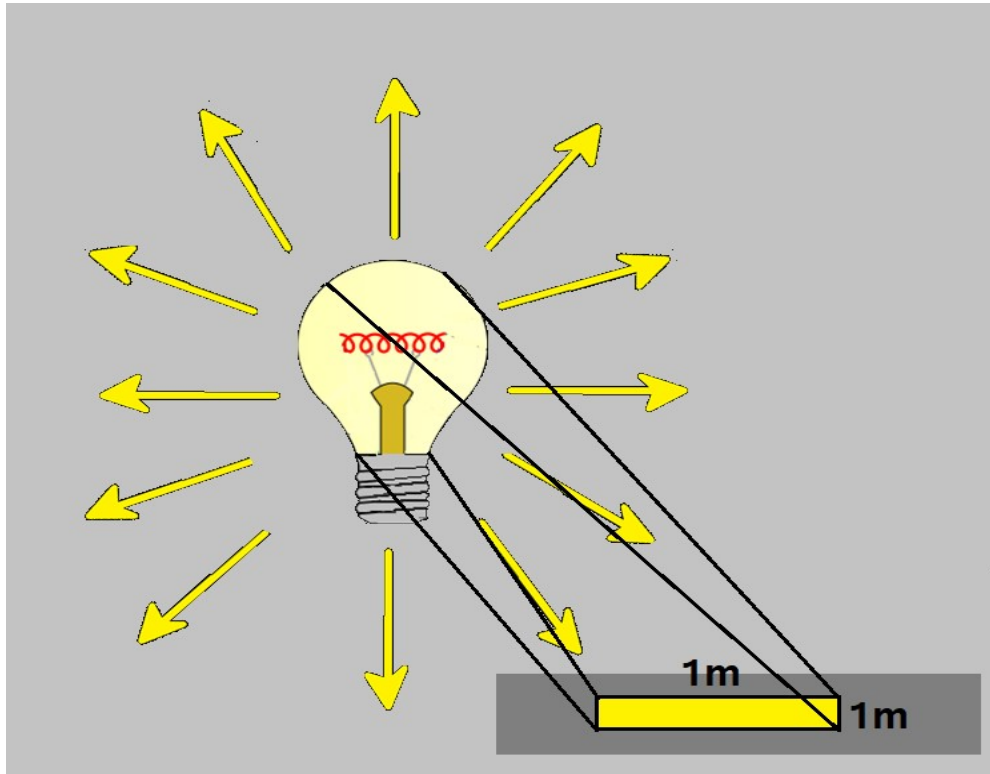


FIGURA 4.- Representación del flujo luminoso incidiendo sobre una superficie.

2.1.1 Fuentes de iluminación

En la actualidad existen una gran variedad de fuentes de iluminación, enunciando algunas:

Lámpara incandescente: Las fuentes de luz incandescentes eléctricas, están basadas en el fenómeno de incandescencia. Su principio no difiere del cuerpo negro, que irradia fotones a medida que se calienta, empezando por el infrarrojo hasta introducirse al espectro visible conforme aumenta la temperatura (Kitsinelis & Spiros, 2011).

Lámparas de descarga eléctrica: Una propiedad importante del plasma es la emisión de luz. Los fotones en un plasma pueden ser producidos ya sea por el

impacto de electrones excitados en el átomo o por la recombinación de partículas cargadas. Cada gas emite radiación de diferentes longitudes de onda, ya que la estructura atómica de cada elemento es diferente (Kitsinelis & Spiros, 2011).

La luz emitida por laser: (amplificación de luz por emisión estimulada de radiación) no se utiliza para la iluminación general, pero tiene una amplia gama de aplicaciones debido a sus características: La luz laser es espacialmente coherente, estrecha, haz de baja divergencia(Kitsinelis & Spiros, 2011).

Las fuentes de luz de estado sólido: Conocidos como LEDs (light-emitting diodes) han sido consideradas por muchos la luz del futuro. Los LEDs muestran ventajas sobre otras tecnologías y ya han dominado algunas aplicaciones. Actualmente hay muchos investigadores buscando optimizar la tecnología LED (Kitsinelis & Spiros, 2011).

Las características espaciales de iluminación tienen un papel muy importante en una amplia variedad de aplicaciones, desde la iluminación general utilizada diariamente, hasta procesos donde se necesitan mantener ciertas características específicas. La tecnología LED desarrollada actualmente utiliza métodos de fabricación, que generan una distribución de campo cercano, que se puede aproximar con un Lambertiano, por lo tanto un uso adecuado para éstos es iluminar superficies cercanas.

Para realizar un buen diseño de una luminaria LED para aplicaciones de inspección de color, se debe conocer los requerimientos sobre el índice de reproducción de color (CRI por sus siglas en inglés) y la temperatura de color correlacionada (CCR por sus siglas en inglés), esto aunado al aprovechamiento del flujo luminoso y la distribución espacial. En una gran cantidad de casos, la mayoría de estos parámetros deben intercambiarse entre sí y por lo tanto, la optimización juega un papel muy importante para obtener las características deseadas para cada luminaria en particular.

El diseño mecánico de una luminaria basada en LEDs es muy importante para el manejo y la durabilidad de la misma, aspectos que van desde el cableado para alimentar los LEDs, las placas de circuito impreso, el sistema de disipación de calor, las fuentes de alimentación, entre otros, son involucrados para determinar una geometría adecuada y los materiales de fabricación que permitan minimizar fallos estructurales en el momento de fabricarse y defectos de operación. Es importante considerar la degradación del producto con el tiempo, la facilidad de reparación en caso de fallos y protección contra el daño del medio ambiente.

2.1.2 Tipos de iluminación artificial

En lo referente a los tipos de iluminación que podemos utilizar para resolver una aplicación de visión artificial, se puede decir que dependiendo del fenómeno físico que produce la transformación de energía eléctrica en fotones existen diferentes tipos de iluminación con características propias. Las características principales que definen un tipo de iluminación son el rango de longitudes de onda en la que emite la luz, la durabilidad de la misma, sus variaciones a lo largo del tiempo y la temperatura de operación que pueda alcanzar.

2.1.3 Técnicas de iluminación

El éxito de una aplicación de visión está altamente condicionado por la iluminación que se utilice. En el caso de no utilizar una iluminación adecuada, aparecen problemas de contrastes, brillos y sombras que complican el algoritmo de inspección o que incluso pueden llegar a que el algoritmo no pueda obtener una solución. Para mejorar notablemente la eficiencia del sistema de visión es necesario utilizar la técnica de iluminación adecuada que permita obtener una imagen correcta para ser procesada. Una imagen correcta para el procesamiento es aquella en la que los píxeles que representan los objetos de interés en la misma tienen características de luminosidad parecida y son muy distintas de los píxeles que no representan objetos de interés. Una

iluminación apropiada es crítica para obtener una imagen correcta en la que no aparecen zonas saturadas o sombras que oculten información dentro de la misma. Además, las sombras causan falsas detecciones de bordes resultando en medidas incorrectas. También, una iluminación pobre puede resultar en una baja relación señal/ruido, lo que puede provocar una imagen con píxeles ruidosos. Igualmente, una iluminación no uniforme puede además dificultar notablemente operaciones de segmentación.

Para elegir una correcta iluminación también es necesario conocer el papel que juega cada componente del sistema de visión en la captura de la imagen. Cada componente influye en la cantidad de luz que llega al sensor y en consecuencia en la calidad de la imagen capturada.

La óptica del sistema juega un papel a considerar dentro de la iluminación, debido a componentes de la misma como el diafragma y las lentes.

La apertura del diafragma de la óptica afecta directamente a la cantidad de luz que llega al sensor. Si el diafragma se cierra debe ser aumentada la cantidad de luz que llega de la escena o aumentar el tiempo de exposición si se quiere conseguir una imagen con los mismos valores de luminosidad. También es importante el área que se está inspeccionando. Un área pequeña refleja menos luz que un área grande y en consecuencia esto debe tomarse en cuenta desde el punto de vista de la iluminación.

La sensibilidad mínima de la cámara también es importante para determinar la cantidad mínima de luz que necesitamos para el sistema. Además, el tiempo de exposición y la ganancia de la cámara también afectan directamente a la sensibilidad del sensor.

2.2 Sensores de Captura (Cámaras)

La cámara es el dispositivo que, utilizando un objetivo formado por un juego de lentes y el diafragma, construye una imagen sobre el plano del sensor compuesto de elementos fotosensibles, la digitaliza y la transmite hacia la tarjeta de adquisición del procesador.

Las cámaras proporcionan una señal de vídeo en un formato estándar para su digitalización (en el caso analógico) o directamente la información en formato digital que constituye la imagen captada por la misma (en el caso de cámaras digitales).

Las cámaras digitales disponen de muchas características, algunas se enlistan a continuación:

Píxeles Horizontales.– Corresponden al número de píxeles que conforman el lado horizontal (generalmente el eje más largo) del sensor de la cámara

Píxeles Verticales.– Corresponden al número de píxeles que conforman el lado vertical (generalmente el eje más corto) del sensor de la cámara.

Tamaño de Píxel.– Longitud teórica correspondiente a un lado del píxel o fotosito, que tiene forma cuadrada. Se denomina teórico debido a que de manera ideal no existe espacio entre píxeles, pero en realidad existe un pequeño espacio entre píxeles para los circuitos del sensor.

Definición o bit de salida.– La cámara almacena el valor de tono o brillantes y de color de una escena por cada píxel en una unidad de memoria. La definición indica la cantidad de diferentes valores con las que puede representar y almacenar esta información. Si habláramos de una definición de 1 bit, significaría que la información de la escena solo puede ser representada con dos valores 1 o 0, blanco o negro respectivamente, en cambio una definición de 8 bits nos permitiría representar la imagen con rango de valores de 0 a 255.

Velocidad de Adquisición.– Se conoce como fps por sus siglas en inglés “Frames Per Second” o imágenes por segundo. Es la medida del número de imágenes por segundo que es capaz de registrar una cámara en modo de captura de video. Entre más alto el valor de fps de una cámara, menor la cantidad de saltos que se producen al visualizar el video, es decir, habrá una mayor fluidez en el video tomado.

Rango de tiempo de exposición.– El obturador es una cortinilla que se abre en el momento de disparar y limita el tiempo que el rayo de luz penetra en la cámara y alcanza el sensor digital. El tiempo que la luz está alcanzando el sensor digital es lo que se llama tiempo de exposición. Dependiendo de la

cámara los tiempo de exposición varían desde segundo (para condiciones luz muy malas) a milésimas de segundo (para fotografías muy rápidas). Tiempo de exposición y velocidad de exposición son lo mismo, ambos términos se utilizan, solo que los órdenes de magnitud están invertidos.

Características de disparo.– En una cámara entender las características o modos de disparo que posee puede hacer la diferencia en la calidad de las imágenes tomadas. Existen distintas formas en que la cámara realiza el disparo entre ellas, el modo automático, el cual permite que la cámara ajuste la apertura, velocidad de obturación e inclusive el balance de blancos de manera automática. El modo programado, el cual permite que el usuario sea quien elija algunas características como el flash o balance de blancos y la cámara siempre ajuste estos parámetros al momento de realizar el disparo. Luego el modo de prioridad de apertura en donde el usuario elige la configuración de diafragma y la cámara la velocidad de obturación, permitiendo controlar la cantidad de luz que le llega al sensor y la profundidad de campo. El modo de prioridad de obturación es similar al modo de prioridad de apertura, sin embargo, en este modo es el usuario quien escoge la velocidad de obturación y la cámara la configuración de la apertura, este modo es ideal para fotografiar objetos en movimiento o en condiciones de poca iluminación. Finalmente, el modo manual, el cual permite al usuario tener el control total de la cámara, pudiendo configurar el diafragma, la velocidad de obturación, balance de blanco entre otros, lo cual da una gran flexibilidad al momento de capturar imágenes.

Entradas y salidas de control.– Son interfaces que permiten tomar control y ajustar parámetros de la cámara desde un dispositivo remoto, con lo cual el usuario puede manipular características de la cámara como el zoom, la ganancia, el formato de los datos adquiridos entre otros utilizando un interfaz visual externa a la cámara.

Salida de video.–Indica el tipo o estándar de conexión entre la cámara y un dispositivo de adquisición u observación de las imágenes o video que se capturan. Las cámaras antiguas poseían salidas analógicas lo que les permitía conectarse a pantallas, televisores, etc. de manera directa. Actualmente estas salidas de video son digitales por lo que a veces se requiere de interfaces especiales para poder transferir los datos de la cámara a un dispositivo. Algunas interfaces son comparadas a continuación.

TABLA 1.– Comparación de interfaces para cámaras digitales.

<i>Nombre</i>	<i>Taza de transferencia de datos</i>	<i>Longitud máxima del cable</i>
FireWire 1394.a	400Mb/s	4.5m
FireWire 1394.b	800Mb/s	100m
Camera Link®	3.6Gb/s	10m
USB 2.0	480Mb/s	5m
USB 3.0	5Gb/s	5m
GigE	1000Mb/s	100m

Sensibilidad.– Los sensores de las cámaras pueden trabajar a diferentes sensibilidades. De este modo, a mayor sensibilidad, mayor cantidad de luz es capaz de captar el sensor. Este parámetro usualmente se maneja según el

estándar ISO. Un nivel de sensibilidad alto implica mayor ruido en la imagen tomada, así también en una pérdida de definición.

Ganancia.– Incrementa la señal eléctrica recibida por el sensor de la cámara, lo cual permite tomar o capturar imágenes en condiciones pobres de luz, sin embargo, al ser un proceso electrónico, la cantidad de ruido presente en la imagen también es amplificada lo cual disminuye la calidad y nitidez de la imagen. Generalmente se maneja bajo el estándar ISO.

Reloj de Píxel.– Es un tren de pulsos de alta frecuencia que determina cuando hay datos en la línea de datos. Este parámetro determina la tasa de píxeles que se adquieren.

Temperatura de operación.– Rango de temperatura proporcionado por el fabricante en el cual la cámara puede operar sin que se dañe el sensor o el circuito electrónico o cause problemas con el procesamiento y transferencia de información capturada. También suele incluirse un rango de temperatura que la cámara soporta cuando no está funcionando.

Vibración.– Parámetro que indica la capacidad del sistema mecánico o electrónico/digital de la cámara para estabilizar el sistema en el momento de tomar imágenes o video, y así mantener la calidad de la imagen o video ante movimientos externos no deseados.

Consumo eléctrico.– Indica el nivel de voltaje de alimentación de la cámara, las características eléctricas de la batería que la alimenta, o también el consumo ampere por hora que posee.

Montaje de lente.– Indica el tipo de montaje para la óptica que posee la cámara, es decir, el tipo de interfaz mecánica que une a la cámara con el objetivo/lente Solo lentes u óptica que correspondan al tipo de montaje que posee la cámara serán compatibles con esta. Existen diversos tipos de montajes y pueden clasificarse según su aplicación por ejemplo cámaras de cine, industriales, científico, entre otros.

Dimensiones.– Indica las dimensiones de la cámara (ancho, largo, alto), sin tomar en cuenta la óptica u objetivo que utilice. Estos datos son muy importantes en especial si son para aplicaciones específicas de carácter científico o industrial.

Sensores CMOS

CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor): Cada celda de la matriz del sensor es independiente, la principal diferencia respecto al CCD es que en el CMOS, la digitalización de los pixeles se realiza internamente en unos transistores que lleva cada celda, por lo que todo el trabajo se lleva a cabo dentro del sensor y no se hace necesario un chip externo que se encargue de esta función. Con esto se consigue reducir el costo y los equipos son más pequeños.

- Los sensores CMOS son más sensibles, por lo tanto, se comportan mucho mejor en condiciones pobres de iluminación.
- Debido a que el procesamiento se realiza dentro del propio sensor, ofrecen una mayor velocidad.
- El *blooming* se presenta cuando un sensor se satura por la luz que incide sobre él y a continuación comienza a saturar a los que están a su alrededor, esto en el CMOS no se presenta.
- Lentes las cuales permiten formar la imagen de la escena en el sensor de la cámara, las lentes pueden presentar aberraciones cromáticas, las cuales pueden afectar la calidad de la imagen, teniendo diferentes puntos de enfoque en las diversas longitudes de onda.

2.2.1 Filtro Bayer RGB

La mayoría de las cámaras digitales comerciales utilizan matrices de filtraje de color, de esta manera se reduce el espacio y el número de componentes necesarios para adquirir una imagen de color, de lo contrario se tendría que contar con tres sensores, que a través de divisores de haz ópticos capturarían la imagen de forma simultánea en distintas longitudes de onda. (Jee, Song, & Kang, 2018).

La matriz de filtraje de color Bayer, que utiliza los colores rojo, verde y azul, denotados como RGB, es un patrón ampliamente utilizado en los sensores de captura (Bayer, 1976). La distribución de esta matriz se muestra en la Figura 5.

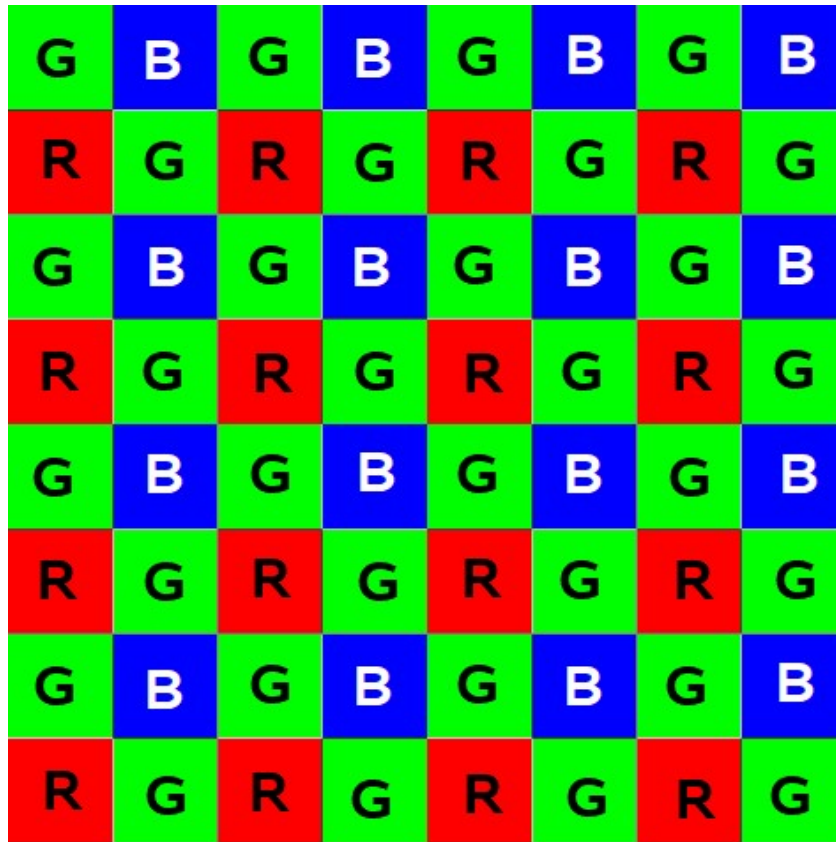


FIGURA 5.- Matriz de filtro de color Bayer

Debido a que la respuesta del sensor depende tanto de la respuesta a la luz del semiconductor a cada longitud de onda como a la modificación del espectro incidente en cada celda al pasar por el filtro, la cantidad de colores que son capaces de reproducir se ve limitada dentro de estas condiciones. (Monno, Kikuchi, Tanaka, & Okutomi, 2015)

2.3 Color

El color es un atributo de la sensación visual y el aspecto de color de los objetos depende de la interacción de tres elementos: Fuentes de iluminación, objetos y el sistema de visión humano.

Primero se necesita una fuente de luz visible, para iniciar el proceso sensorial de visión. La energía de la fuente de luz es modulada por propiedades físicas y químicas del objeto. La energía modulada es captada por el ojo y procesada por mecanismos de sistema de visión humana, así produciendo la percepción del color. (Fairchild, 2006)

La visión del color es básicamente una función de tres variables debido a que existen tres tipos de conos diferentes, que son células fotosensibles situadas en la retina, los cuales son representados como ρ , γ y β . Los bastones, que son otras células fotorreceptoras dentro de la retina, no son tomados en cuenta dentro de esta evaluación debido a que es bien conocido que no proporcionan información extra en la adición de color. A niveles de iluminación elevadas tales que el color pueda ser medido de manera eficiente, la respuesta de los bastones se vuelve inefectiva. A niveles donde los conos y los bastones trabajan en conjunto, el color no puede ser evaluado de una manera correcta. (Palmer, 1981) .

Debido a que las curvas de respuesta de los conos no se conocen con la suficiente precisión, se realizó un experimento, donde el arreglo experimental es mostrado en la Figura 6.

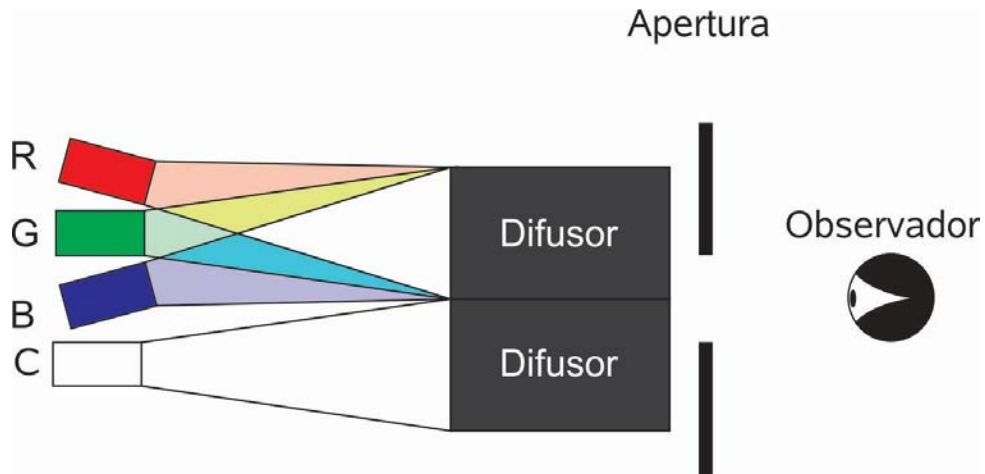


FIGURA 6.- Principio de igualación de color tricromático utilizando la mezcla aditiva de luces regulables R, G y B; C es el color de referencia.

En este experimento se le muestran dos difusores a un observador, a través de una apertura que permite observar una sección de cada difusor. En un difusor se proyectan tres luces, roja verde y azul, reguladas por el observador, en el otro se muestra una iluminación de referencia a la cual se tienen que ajustar el sistema RGB. El hecho que permite lograr las combinaciones de color utilizando solo tres luces en la mezcla es una consecuencia del hecho que tenemos solo tres tipos diferentes de conos en la retina. (Burch, 1958)

Para realizar el experimento se deben considerar diversos factores como el ángulo de observación, donde los estándares indican dos diferentes ángulos, 10° y 2° , también se debe especificar los colores rojo azul y verde que se utilizarán.

En trabajos conocidos (Guild, 1932) se utilizó una lámpara de mercurio y un arreglo óptico para obtener espectros luminosos monocromáticos en las longitudes de onda enunciadas en la Tabla 2:

TABLA 2.- Longitudes de onda por el Laboratorio Nacional de Física como referencia estándar para obtener espectros luminosos.

<i>Rojo (R)</i>	<i>700nm</i>
<i>Verde (G)</i>	<i>546.1nm</i>
<i>Azul (B)</i>	<i>435.8nm</i>

La Figura 7 representa una gráfica que muestra las funciones de igualación de color en RGB determinadas para el observador de color estándar por el CIE 1931.

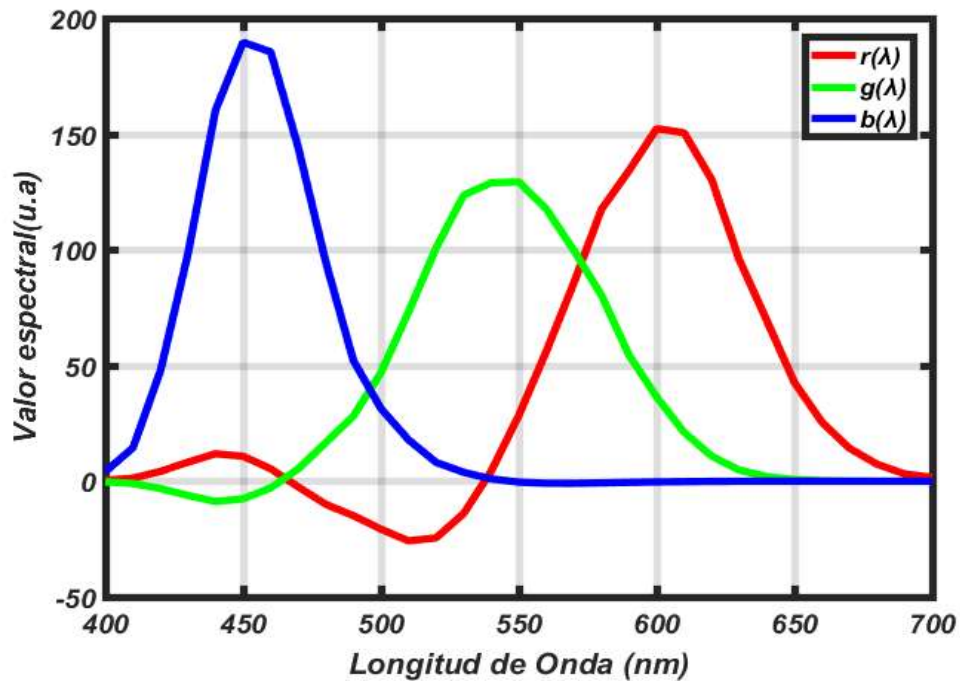


FIGURA 7.- Respuesta espectral de los conos en las longitudes de onda definidas en r, g y b.

Donde las cantidades de R, G y B son representaciones de la respuesta de los conos ρ , γ y β en las longitudes de onda enunciadas en la Tabla 2. Estas curvas son llamadas las funciones de igualación de color. En la Figura 7 la curva de representada por $r(\lambda)$ es positiva a lo largo de los 540nm hasta 700nm pero en los colores que van de 460nm a 540nm es negativa y una pequeña parte positiva de 460nm a 400nm. De igual manera la curva $g(\lambda)$ tiene altos valores espectrales en la región que va de 500nm a 600nm, en la región de 400nm a 460nm es negativa y la azul tiene altos valores espectrales en la región de 420nm a 480nm, en el resto del espectro se mantiene positiva o igual a cero (Wright, 1928).

2.3.1 Iluminantes estándar CIE

Ya que el color de un objeto depende de la forma de iluminarlo con una fuente de luz, la clasificación de los colores del objeto requiere tener una fuente de luz caracterizada, por lo que el CIE definió ciertas fuentes de luz de referencia como estándares colorimétricos los cuales se nombran iluminantes los cuales se ilustran con las Figuras 8, 9, 10 y 11.

Entre los principales iluminantes están: el Iluminante estándar CIE A, que está definido por la radiación del cuerpo negro relacionado a la temperatura de color (CCT) de 2850K, Figura 8.

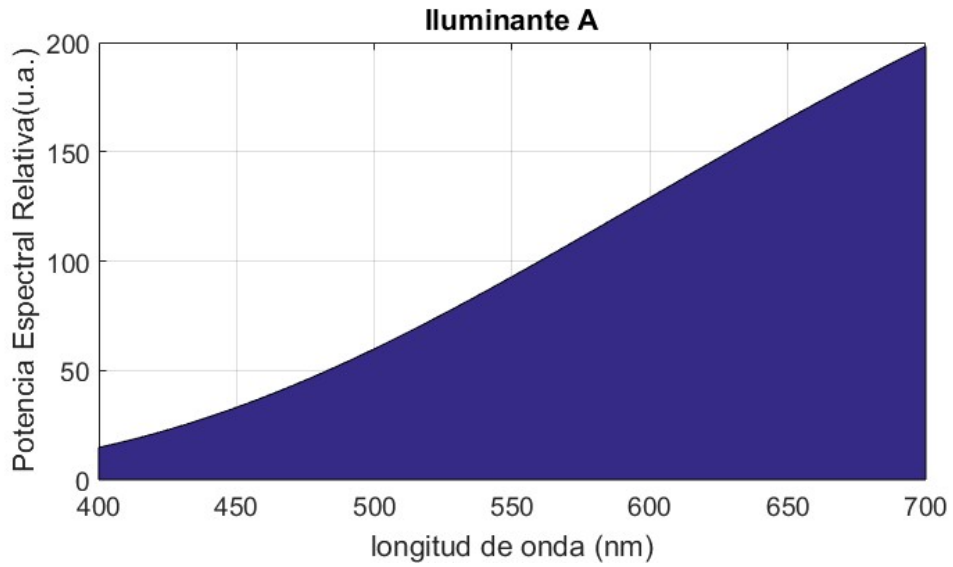


FIGURA 8.- Espectro electromagnético visible del iluminante A

Los iluminantes de fuente no artificial *D* que representa la luz de día, (*daylight*), a diferentes temperaturas de color, tales como: D65 donde el CCT es de 6500K o D50 con 5000K de temperatura de color, Figuras 9 y 10.

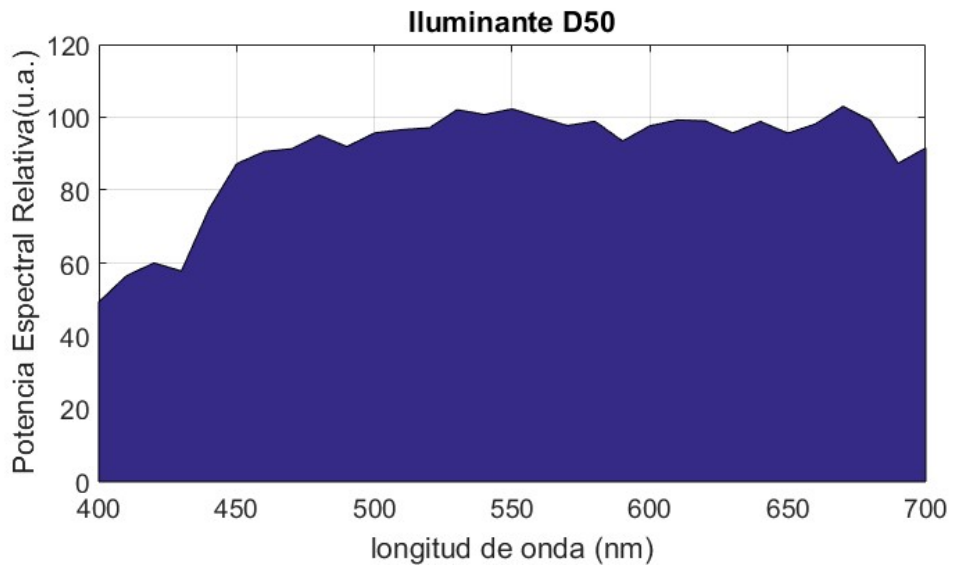


FIGURA 9.- Espectro electromagnético visible del iluminante D50

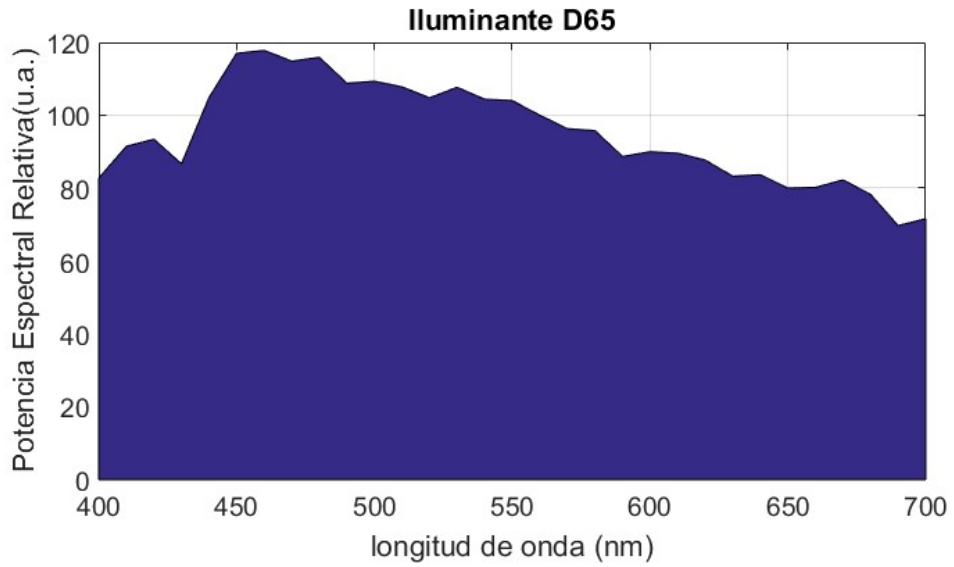


FIGURA 10.- Espectro electromagnético visible del iluminante D65

También existen iluminantes de tipo F que representan la emisión de lámparas fluorescentes donde las más utilizadas son los iluminantes tipo F2 y F7 (Shanda, 2007).

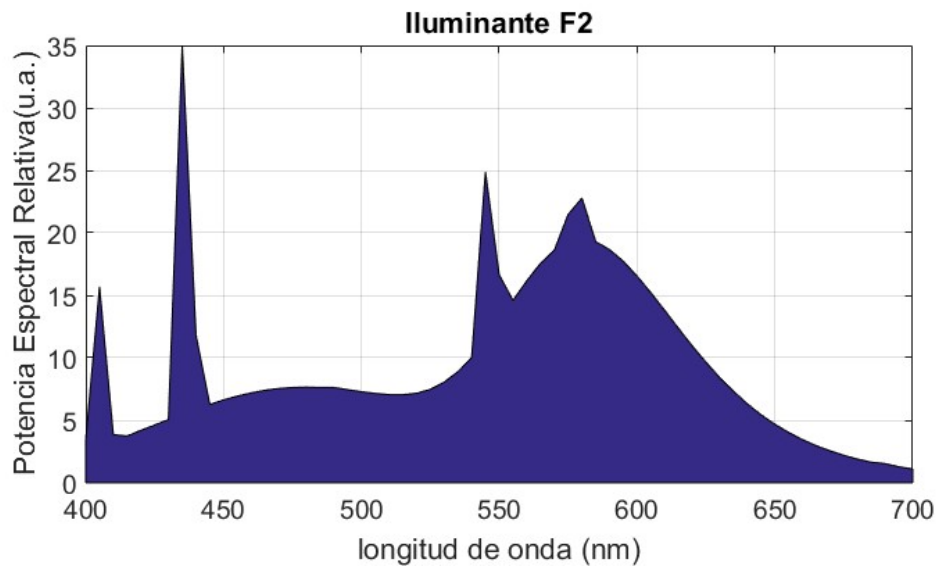


FIGURA 11.- Espectro electromagnético visible del iluminante F2

2.3.2 Espacios de color CIE

El espacio de color CIE 1931 XYZ en tres dimensiones proporciona tres valores triestímulo que representan todas las posibles percepciones de color. En este espacio Y proporciona el valor de la luminancia mientras que X y Z son parámetros derivados apropiadamente de los colores triestímulo. Una representación bidimensional de esto, conocido como diagrama de cromaticidad en un plano (x, y) CIE 1931, representado en la Figura 12, es suficiente para la mayoría de las aplicaciones. Para calcular las coordenadas x y y a partir de los valores triestímulo XYZ se puede utilizar (Fairman, M, & H, 1997):

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad y = \frac{Y}{(X+Y+Z)}$$

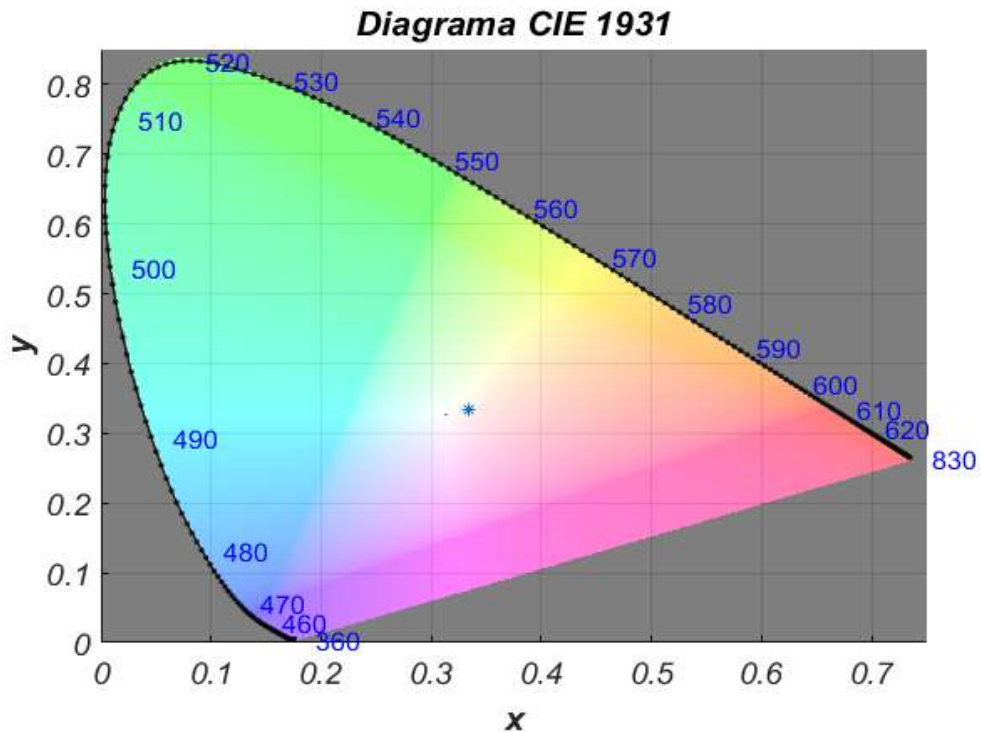


FIGURA 12.- Diagrama de cromaticidad CIE 1931

El plano CIE 1931 tiene una desventaja significativa debido a que existe una no linealidad en el plano (x, y) , a consecuencia, la distancia geométrica entre dos puntos coordenados dentro del plano no corresponde a la diferencia de color percibida entre otros dos puntos en el mismo plano. Para corregir esto, en 1976, el CIE introduce una escala cromática uniforme (u', v') donde para encontrar sus coordenadas se define como:

$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} \quad y \quad v' = \frac{9Y}{(X + 15Y + 3Z)}$$

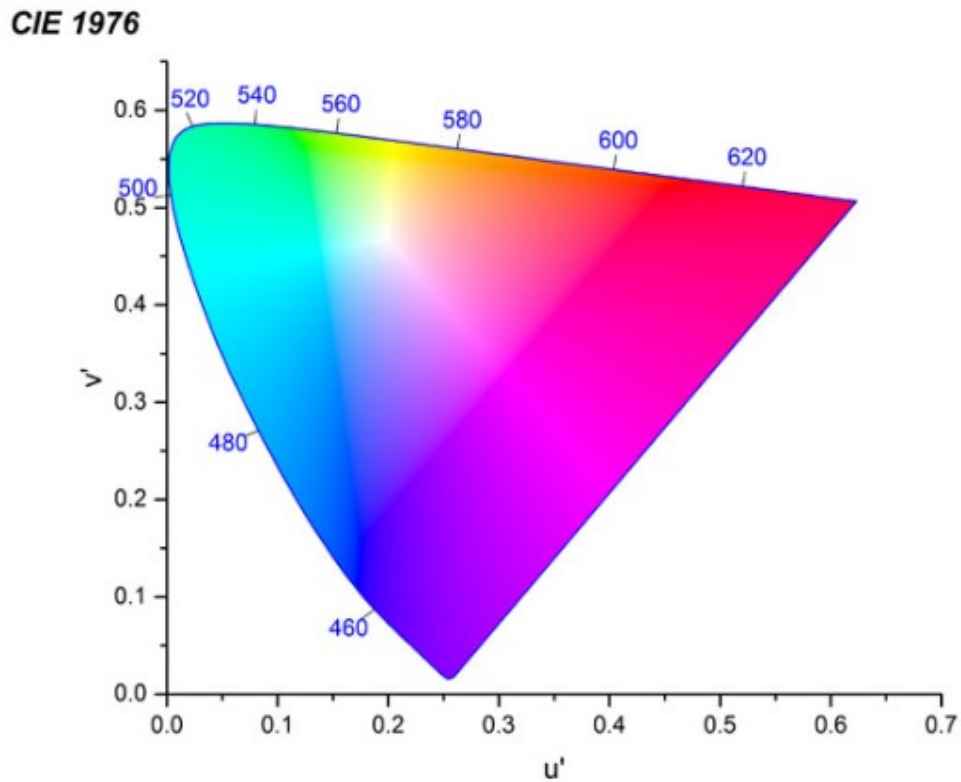


FIGURA 13.- Diagrama de cromaticidad CIE 1976 (ORIGINLAB TECHNICAL SUPPORT, 2018)

El diagrama mostrado en la Figura 13 es usado en aplicaciones cuya finalidad es la discriminación de los colores en condiciones de observación normales donde se mantienen constantes las distancias en las variaciones de color.

Como en estos diagramas no se toma en cuenta la luminosidad, en 1976 el CIE propuso un método para calcularla en términos del triestímulo Y, a partir del color medido y del blanco de referencia:

$$L^* = 116f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16$$

donde:

$$\left\{ \begin{array}{ll} f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) = \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}} & \text{sí } \frac{Y}{Y_n} > \left(\frac{6}{29}\right)^3 \\ f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) = \left(\frac{841}{108}\right)\left(\frac{Y}{Y_n}\right) & \text{sí } \frac{Y}{Y_n} \leq \left(\frac{6}{29}\right)^3 \end{array} \right.$$

donde el blanco de referencia es denotado como Y_n . Si Y toma el valor máximo, que es el mismo blanco de referencia, entonces $Y_n = Y$, por lo cual el valor máximo de L^* es igual a 100.

Por otro lado, un negro perfecto es cuando $Y = 0$, por lo tanto $\frac{Y}{Y_n} = 0$ tiene un valor de $L^* = 0$, por lo cual no existen valores negativos para L^* .

Lo que da lugar a un espacio de color tomando en cuenta tanto las coordenadas de color y la luminosidad. Es nombrado espacio de color LUV, ilustrado en la Figura 14, trazado en un espacio de tres ejes los cuales dependen de u', v' y L^* :

$$L^* = 116f\left(\frac{Y}{Yn}\right) - 16$$

$$u^* = 13L^*(u' - u'_n)$$

$$v^* = 13L^*(v' - v'_n)$$

donde:

$$\left\{ \begin{array}{ll} f\left(\frac{Y}{Yn}\right) = \left(\frac{Y}{Yn}\right)^{\frac{1}{3}} & \text{sí } \frac{Y}{Yn} > \left(\frac{6}{29}\right)^3 \\ f\left(\frac{Y}{Yn}\right) = \left(\frac{841}{108}\right)\left(\frac{Y}{Yn}\right) & \text{sí } \frac{Y}{Yn} \leq \left(\frac{6}{29}\right)^3 \end{array} \right.$$

donde u'_n y v'_n son valores de u^* y v^* evaluadas en el blanco de referencia.

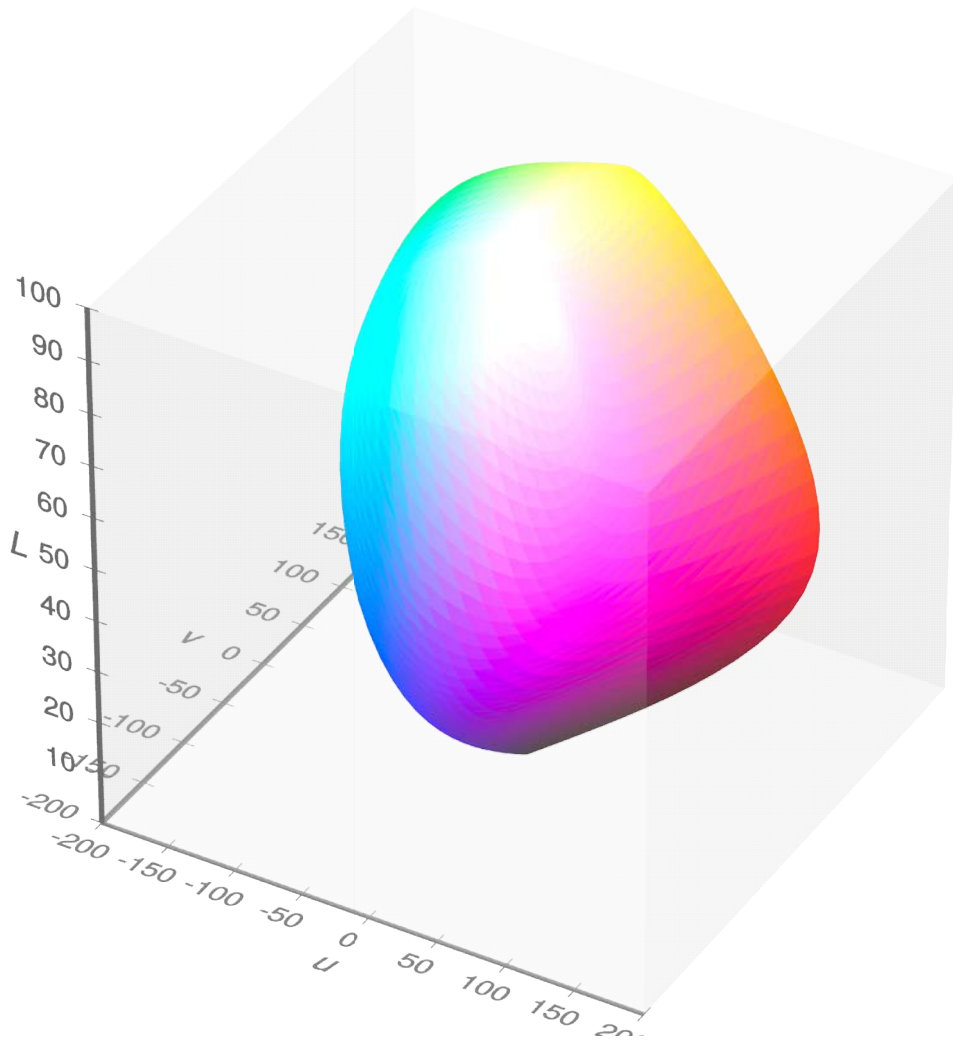


FIGURA 14.- Gama visible en el espacio de color CIELUV con blanco de referencia en D65
(HORVATH & LIPKA, 2018)

Otro espacio que toma en cuenta la luminosidad es el espacio de color CIE 1976 ($L^*a^*b^*$) también conocido como CIELAB, ilustrado en la Figura 15, donde una vez más es un espacio de color que busca la linealización de la perceptibilidad en las diferencias de color (Roberts, 1998). De igual manera se calcula a partir de los valores triestímulo X, Y, Z:

$$L^* = 116f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16$$

$$a^* = 500\left(f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right)\right)$$

$$b^* = 200\left(f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right)\right)$$

donde:

$$\left\{ \begin{array}{ll} f\left(\frac{X}{X_n}\right) = \left(\frac{X}{X_n}\right)^{\frac{1}{3}} & \text{si } \frac{X}{X_n} > \left(\frac{6}{29}\right)^3 \\ f\left(\frac{X}{X_n}\right) = \left(\frac{841}{108}\right)\left(\frac{X}{X_n}\right) & \text{si } \frac{X}{X_n} \leq \left(\frac{6}{29}\right)^3 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) = \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}} & \text{si } \frac{Y}{Y_n} > \left(\frac{6}{29}\right)^3 \\ f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) = \left(\frac{841}{108}\right)\left(\frac{Y}{Y_n}\right) & \text{si } \frac{Y}{Y_n} \leq \left(\frac{6}{29}\right)^3 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) = \left(\frac{Z}{Z_n}\right)^{\frac{1}{3}} & \text{si } \frac{Z}{Z_n} > \left(\frac{6}{29}\right)^3 \\ f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) = \left(\frac{841}{108}\right)\left(\frac{Z}{Z_n}\right) & \text{si } \frac{Z}{Z_n} \leq \left(\frac{6}{29}\right)^3 \end{array} \right.$$

donde los valores X_n, Y_n y Z_n son valores de X, Y y Z evaluados en el blanco de referencia.

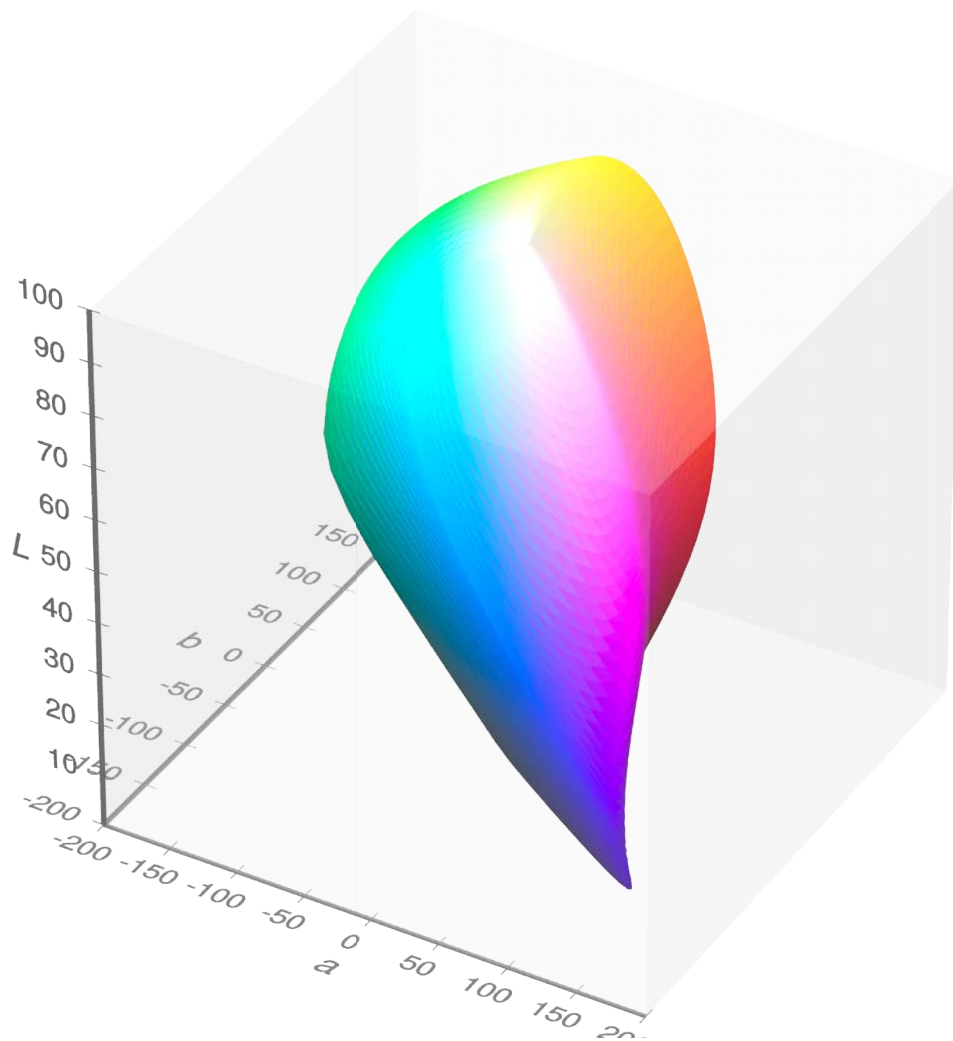


FIGURA 15.- Gama visible en el espacio de color CIELAB con blanco de referencia D65
(HORVATH & LIPKA, 2018)

El CIE recomienda utilizar el espacio de color CIELAB para medición de color en superficies mientras que el sistema CIELUV es recomendado para medir el color en pantallas y monitores. (Ohta, 2018)

Para calcular la diferencia entre dos colores en espacio de color CIELAB, la diferencia total de color se evalúa como:

$$\Delta E_{ab}^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$$

Por lo tanto ΔE_{ab}^* es igual a la distancia entre los dos puntos representados en el espacio de color CIELAB.

2.3.3 Colorimetría

La colorimetría hace referencia a la medición del color. Wyszecki (1973) divide la colorimetría en dos tipos, colorimetría básica y avanzada.

- Colorimetría básica: “La colorimetría en sentido estricto es una herramienta utilizada para hacer predicción sobre si dos luces de diferentes distribuciones de potencia espectral coincidirán en color para ciertas condiciones dadas de observación. La predicción se realiza determinando los valores tricromáticos de los dos estímulos visuales. Si los valores triestímulos de un estímulo son idénticos a los del otro estímulo, se observará una concordancia de color por el observador promedio con la visión de color normal” (Fairchild, 2013).
- Colorimetría avanzada: “La colorimetría en su sentido más amplio incluye métodos para evaluar la aparición de estímulos de color presentados al observador en entornos complicados como pueden ocurrir en la vida cotidiana, Esto se considera el objetivo final de la colorimetría” (Fairchild, 2013).

Capítulo 3

Metodología

3. Introducción

En esta sección se presenta la propuesta de un método para la construcción y caracterización de un dispositivo que permita comparar componentes de color.

A lo largo de este Capítulo se hablará del desarrollo del Sistema Optomecatrónico Portátil para Comparar Componentes de Color (SPOCC) en diferentes áreas de trabajo, segmentadas como:

1. Selección de la Cámara: Se mencionan las características pertinentes de la cámara por las cuales se consideró para este trabajo, a su vez se habla de la selección de la lente y en conjunto, se presenta una metodología para la caracterización espectral del detector.
2. Selección y Caracterización de LEDs: Al seleccionar la tecnología LED como fuente de iluminación del dispositivo, es necesario considerar las características específicas del LED que impactan directamente en las variables que definen la apreciación del color para determinado objeto y material.
3. Diseño mecánico: describe la parte fundamental del sistema construido utilizando diversas herramientas. Dentro de este apartado se considera el diseño mecánico para la luminaria, el diseño mecánico para el

encapsulado y el diseño de piezas complementarias que formaron parte del ensamble final.

4. Caracterización espacial de la luminaria: habla de la propagación de la luz debido a la geometría de la luminaria, utilizando simulación de trazo de rayos y caracterizando la distribución radiante del sistema mediante diversas técnicas.
5. Extracción de las componentes de color a partir de una imagen: Describe el procedimiento planteado para obtener evaluaciones de color a partir de una imagen.
6. Medición de color con SPOCC: Describe las muestras que se van a comparar y el procedimiento para ser comparadas con el sistema.

3.1 Selección de la Cámara

Como se mencionó anteriormente es importante tener el control de las variables de una cámara para poder mantener las mismas condiciones de la escena durante la captura de las imágenes, por lo cual se optó por utilizar una cámara que permitiera manipular las variables de su configuración. Se utiliza una cámara IDS UI-5250SE-C-HQ con las siguientes características:

TABLA 3. Características de cámara

Modelo	UI-5250SE-C-HQ Rev.4: AB02315
Nombre	UI-5250SE Rev.4
Familia	SE
Interfaz	GigE
Tipo de sensor	CMOS

Mano factura	e2v
Tomas por segundo	52.0 fps
Resoluci 3n (h x v)	1600 x 1200
Área óptica	7.200 mm x 5.400 mm
Obturador	<i>Global Shutter, RollingShutter</i>
Clase óptica	1/1.8"
Resoluci 3n	1.92 Mpix
Tama 3o de pixel	4.5 um

Esta cámara permite modificar diversas variables como el balance de blancos, la ganancia, el factor gamma, el tiempo de exposici3n del sensor, la saturaci3n del color, entre otros. El ajuste de estos parámetros permite controlar y mantener la escena de manera similar a lo largo de las pruebas, por lo que favorece la comparaci3n del color de imágenes diferentes.

Una vez seleccionada la cámara, ésta se caracterizará para encontrar el espectro de respuesta del sensor (*secci3n 3.1.2*), por lo cual es necesario seleccionar la lente a utilizar, evitando variaciones en el espectro debido a la óptica.

Para calcular la resoluci3n espacial se puede utilizar la relaci3n entre el campo de visi3n y la resoluci3n de la cámara con la siguiente ecuaci3n:

$$Resolucion\ espacial = \frac{Campo\ de\ visi3n}{Resoluci3n\ de\ la\ c3mara}$$

Con las características descritas anteriormente sobre la selección de la cámara y la lente se obtiene una resolución de:

$$\text{Resolución espacial} = \frac{270\text{mm}}{1200\text{pixeles}} = 0.225 \left(\frac{\text{mm}}{\text{pixel}} \right)$$

Para evitar el solapamiento de objetos en la captura digital de la escena real, considerando el teorema de Nyquist, se debe tener al menos dos pixeles midiendo el área del objeto más pequeño, por lo tanto el sistema puede resolver espacialmente tamaños de al menos 0.450mm (Hornberg, 2006).

3.1.1 Selección de óptica

Es importante la selección de la óptica para un sistema de visión artificial, debido a que se tiene que considerar desde un inicio para contemplar las características de la misma en el diseño mecánico.

La óptica del sistema se seleccionó basándose en la relación que existe entre la distancia focal y el campo de visión a una determinada área de trabajo, como se muestra en la siguiente ecuación.

$$\frac{\text{Distancia focal}}{\text{Tamaño del sensor}} = \frac{\text{Distancia de trabajo}}{\text{Campo de visión}}$$

Debido a que la óptica con menor distancia focal con la cual se cuenta en el laboratorio de Visión Artificial es de 6mm de distancia focal, marca RICOH, modelo FL-HC0614-2M.

Se realizaron los cálculos de la distancia necesaria del objeto a la óptica utilizando esta información y considerando el lado más pequeño del sensor que

es de 5.4mm. El interior cuenta de 270mm x 270 mm de área efectiva para el campo de visión que será observado por la cámara, por lo tanto:

$$Distancia\ de\ trabajo = \frac{(6mm)(270mm)}{(5.4mm)} = 300mm$$

3.1.2 Caracterización espectral de la cámara

Es importante conocer cómo responde el sensor a cada longitud de onda del espectro visible, ya que la reproducción de color depende de cómo responde el sensor a la interacción con el espectro electromagnético, es conveniente probar la respuesta espectral del sensor cuando atraviesa por la matriz de filtro de color Bayer.

Para encontrar la respuesta espectral del sensor CMOS que utiliza la cámara, a cada longitud de onda, se propuso utilizar un monocromador e incidir luz monocromática a diferentes longitudes de onda haciendo un barrido por el espectro visible capturando imágenes con la cámara, como se ilustra en la Figura 16.

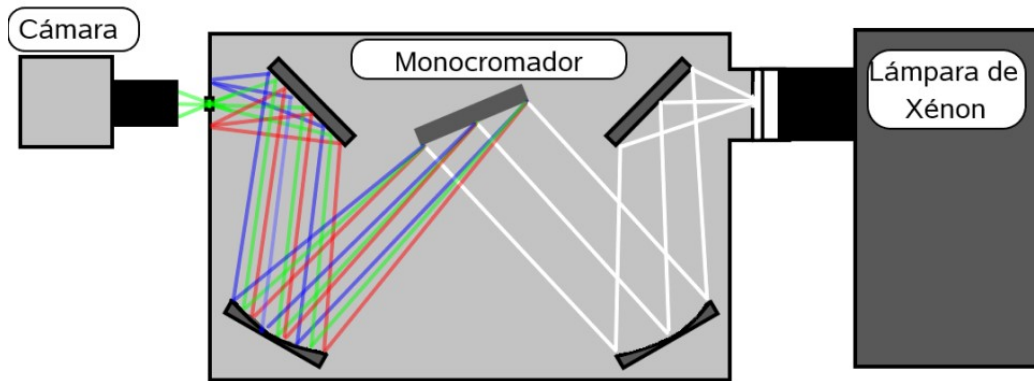


FIGURA 16.- Arreglo óptico utilizado para la caracterización espectral de la cámara.

Al incidir luz monocromática a diferente longitud de onda sobre el sensor y de esta manera capturar imágenes. Se puede medir el nivel de intensidad capturada por el sensor observando los valores RGB dentro de la imagen en esa región del espectro.

Los parámetros de la cámara se acomodaron como: gamma igual a uno, sin ganancia ni *blacklevel*, se desactivaron todos los autoajustes de parámetros para mantener las mismas condiciones en todas las pruebas(Martínez Verdú, 2001).

Se realizó el mismo procedimiento cambiando la cámara por un espectrofotómetro marca METRUE modelo SIM-plus, para observar el ancho espectral de cada banda que ayuda a determinar el intervalo entre longitudes de onda utilizado para las mediciones y a su vez, midiendo la irradiancia espectral emitida por la fuente de Xénon, que es una fuente de espectro amplio de alta potencia, debido a que en la salida del monocromador se tendrá

solamente una fracción de la potencia de entrada, de la forma que es ilustrada en la Figura 17.

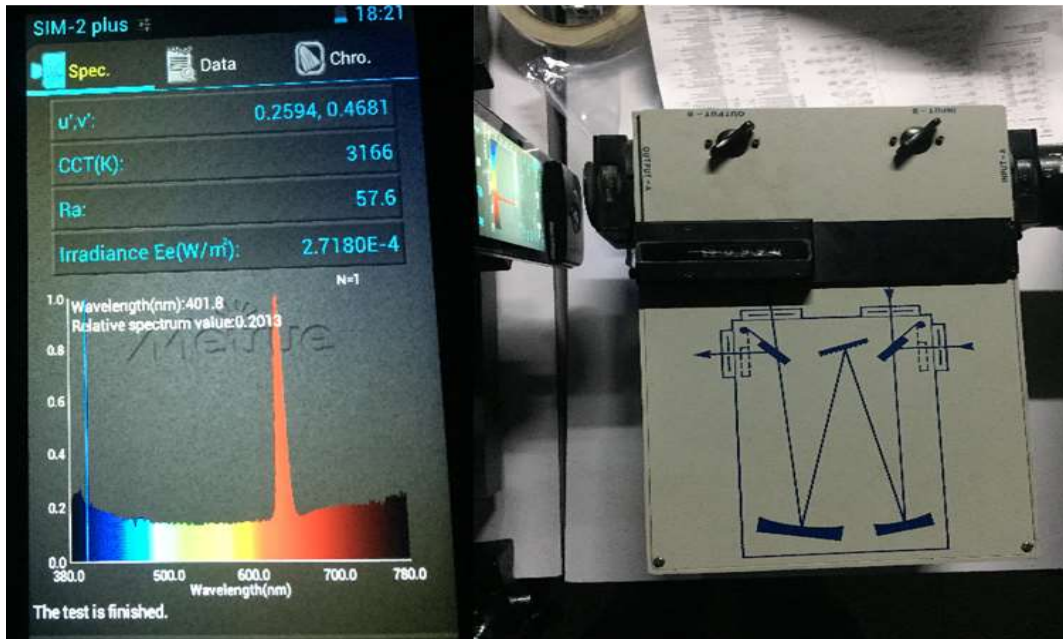


FIGURA 17.- Montaje del arreglo óptico utilizado para medir la intensidad de la fuente de Xénon al cruzar por el monocromador.

Bajo estas condiciones y con base en la literatura se realizó un muestreo cada 5 nanómetros lo cual permite tener una aproximación relevante del espectro de respuesta del sensor.

3.2 Selección y Caracterización de LEDs

3.2.1 Selección de LEDs

Al elegir la fuente de luz para la luminaria, se decidió trabajar a partir de la tecnología LED, por sus amplios beneficios en comparación del resto de fuentes de iluminación. Entre los principales es su tamaño reducido, que permite formar geometrías luminosas de acuerdo a la necesidad que se

presenta. Otras grandes ventajas de esta tecnología son: La temperatura de operación, las horas de vida útil y la eficiencia luminosa (Yuji International Co., Ltd., 2017).

Al elegir como opción la tecnología LED se consideraron algunas características como: El índice de rendimiento de color (CRI), la temperatura de color de la fuente (CCT), debido a que éstas características permiten la correcta visualización del color.

Se encontró la tecnología Yuji VTC D50 LED, que cumple parcialmente con la norma ISO3664:2009 en los parámetros de cromaticidad (Yuji International Co., Ltd., 2017). Esta tecnología cuenta con LEDs que simulan el iluminante D50, apegándose más al iluminante estándar CIED50 que las lámparas fluorescentes D50. También cuenta con un alto CRI, con valores Ra del 98 y una temperatura de color de 5000K.

3.2.2 Caracterización espectral del LED

Debido a la importancia del espectro de emisión de la fuente de iluminación con la cual se va a trabajar, es importante garantizar las especificaciones de la fuente. Por lo que se caracterizó la emisión de los LEDs en el laboratorio de Fotometría y Radiometría del Centro de Investigaciones en Óptica a cargo del M.C. Gil Arturo Pérez Herrera, comprobando el espectro de respuesta de los LEDs utilizando un medidor de irradiancia espectral direccionando la emisión del LED hacia el detector. Las mediciones realizadas para obtener el espectro

integrado se realizó con un iluminante de referencia tipo E, considerando un observador a 2° en un rango de análisis de 358.8nm a 832.4nm.

3.2.3 Caracterización espacial del LED

Para la implementación de una fuente luminosa, es importante caracterizar la distribución espacial para aprovechar la distribución de luz en beneficio de la aplicación, optimizando la luz requerida en relación a la emisión generada por la fuente.

Al implementar la tecnología LED, es normal utilizar distribuciones de arreglos o matrices, por lo que comprender la distribución espacial permite disminuir el número de elementos necesarios para cumplir el objetivo de iluminación.

Para caracterizar los LEDs propuestos, se utilizó un goniómetro modelo LSG 1000 de la marca InstrumentSystems, mostrado en la Figura 18, con el cual cuenta el laboratorio de Fotometría y Radiometría para obtener la distribución espacial del LED.



FIGURA 18.- Goniómetro LGS1000 de InstrumentSystem.

Las mediciones se realizaron utilizando una distancia del sensor a la fuente de 915mm para considerar el emisor como una fuente puntual, se utilizaron 18 planos cada 20° y en cada plano se midió de -90° a 90° en pasos de 10° .

3.3 Diseño mecánico

En este proyecto, un elemento fundamental para el buen funcionamiento del prototipo es el sistema de iluminación, por lo cual es necesario considerar diversos aspectos para seleccionar la luminaria de forma conveniente, tales como el peso, tamaño, forma, color, tiempo y costos de fabricación. En este apartado es importante tomar en cuenta dos aspectos, la construcción de la luminaria (sección 3.3.1) y la encapsulación de la misma (sección 3.3.2).

3.3.1 Diseño mecánico de la luminaria

Tomando en cuenta los parámetros mencionados en las secciones 3.1 y 3.2, además de considerar la disponibilidad de una impresora 3D, se decidió realizar el diseño con las dimensiones que se observan en la Figura 19 y características descritas en esta sección, las cuales se validaron utilizando trazo de rayos (sección 3.4.1) aplicados en la geometría del diseño.

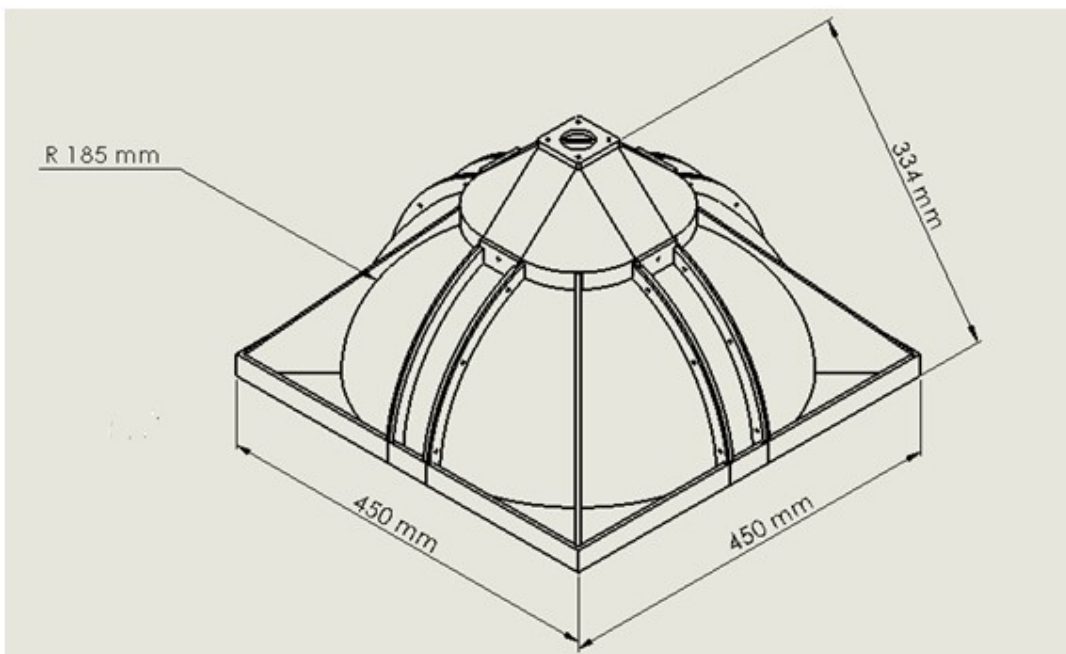


FIGURA 19.- Dibujo con dimensiones generales del sistema.

Utilizando el software SOLIDWORKS® se diseñó una luminaria tipo domo, mostrada en la Figura 20, para iluminación difusa, minimizando los reflejos de superficies de alta reflectancia. Debido al tamaño del domo y tomando en cuenta las dimensiones máximas de la impresora 3D que se dispone, el diseño se realizó como un ensamble de 9 piezas.

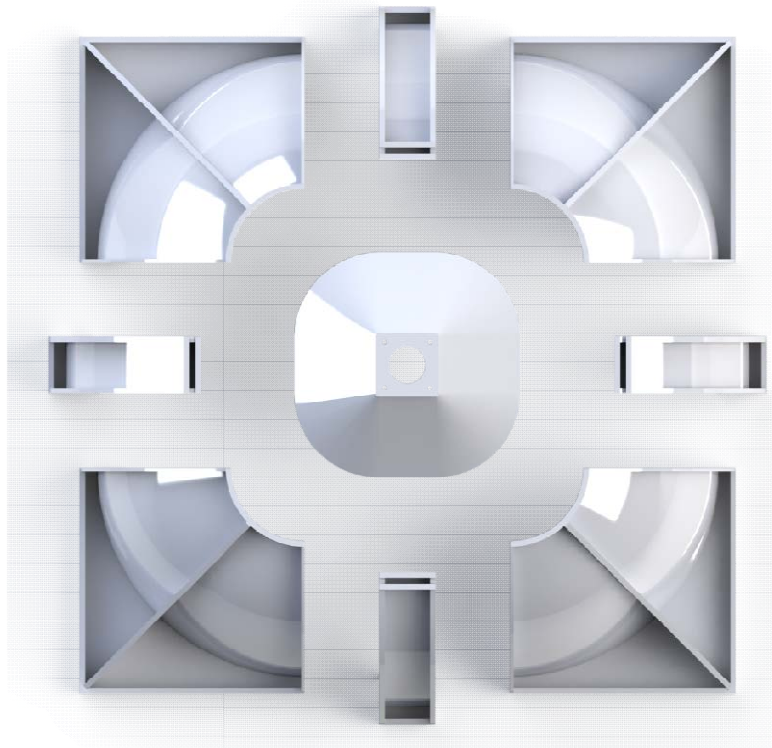


FIGURA 20.- Ensamblaje del domo explosionado desde vista superior.

Siendo 4 semiesferas con un radio exterior de 185mm, una base de 200mm x 200mm, las cuales se unieron a la estructura de aluminio, un nervio a 45°, el cual proporciona mayor soporte y contornos laterales con propósito de superficie de contacto con las otras piezas.

Las 4 geometrías intermedias se utilizan para tener una mayor área del campo de visión sin necesidad de tener que aumentar el tamaño total del domo, las dimensiones de estas piezas son 50mm de largo ya que esta longitud no afecta de manera contundente la distribución luminosa de la semiesfera, la pared es un semicilindro de 185mm de radio exterior contando con dos laterales que se

utilizan para unir las semiesferas, además la parte superior cuenta con una ceja para sujetar el cono.

El cono es una geometría auxiliar que aísla la luz exterior y sirve como soporte a la cámara, la altura y el cono de apertura se diseñaron para una lente montura C de 8mm de distancia focal.

Esta pieza se coloca sobre el domo embonando en la ceja superior y sujeta con tornillos en los laterales. El ensamble es mostrado en la Figura 21.

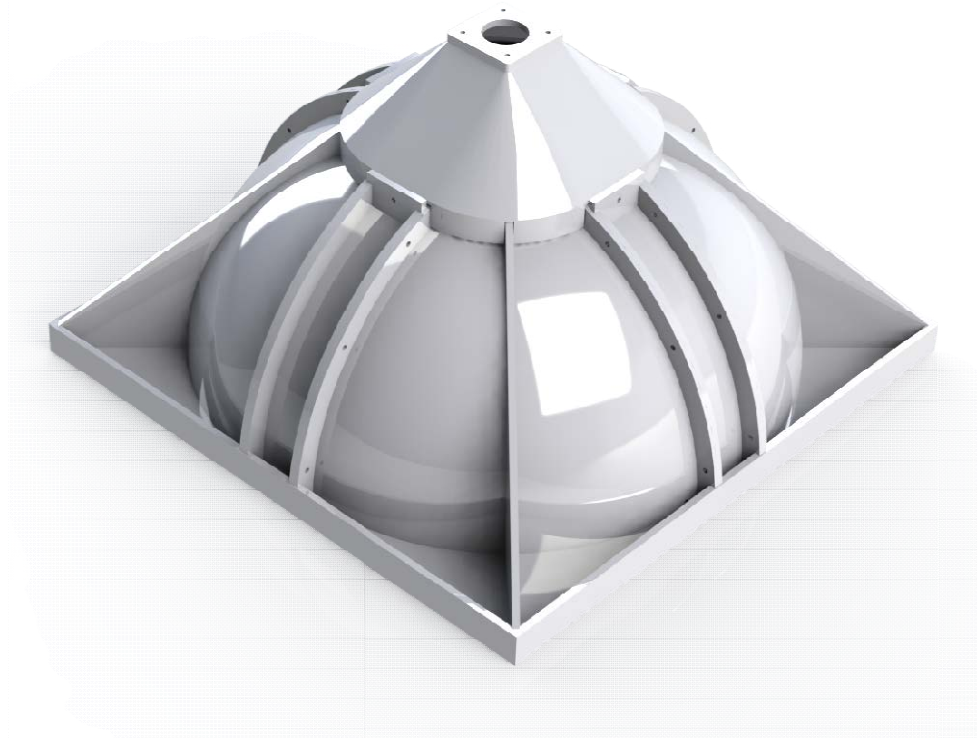


FIGURA 21.- Ensamblaje del domo desde vista isométrica.

El ensamble cuenta de unos rieles en la parte interna de la base del domo donde se colocarán los LEDs de manera vertical dirigiendo la luz hacia las paredes obteniendo el efecto de luz indirecta tal como se muestra en la Figura 22.

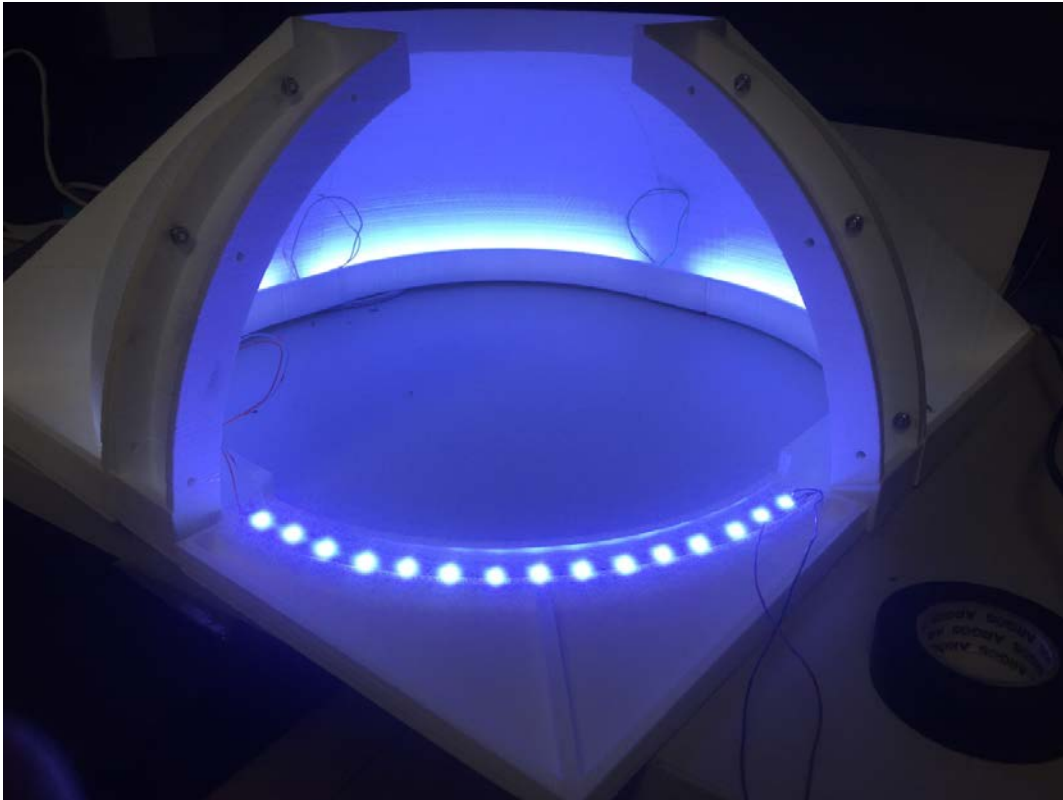


FIGURA 22.- Parte interior del domo, muestra la posición de los LEDs

El diagrama eléctrico de los LEDs es mostrado en la Figura 23.

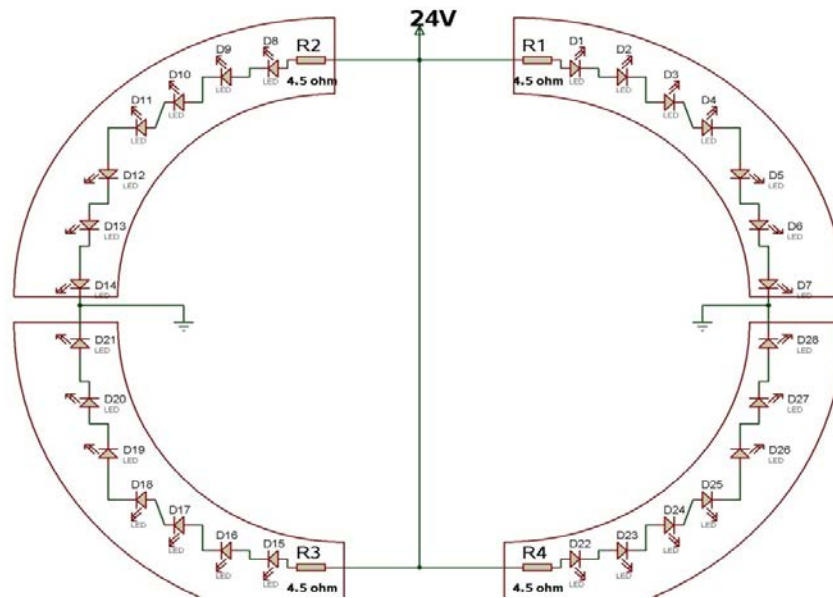


FIGURA 23.- diagrama eléctrico de LEDs utilizados en la luminaria conectados a la fuente de 24v.

3.3.2 Diseño mecánico del encapsulado

Se utilizó estructura de aluminio como base para encapsular la luminaria del SPOCC evitando que variables de entorno afecten directamente a los elementos del sistema como el funcionamiento del mismo, colocando plafones de un material que impida el paso de la luz hacia el interior. En la Figura 24 se muestra el diseño mecánico realizado propuesto como prototipo.

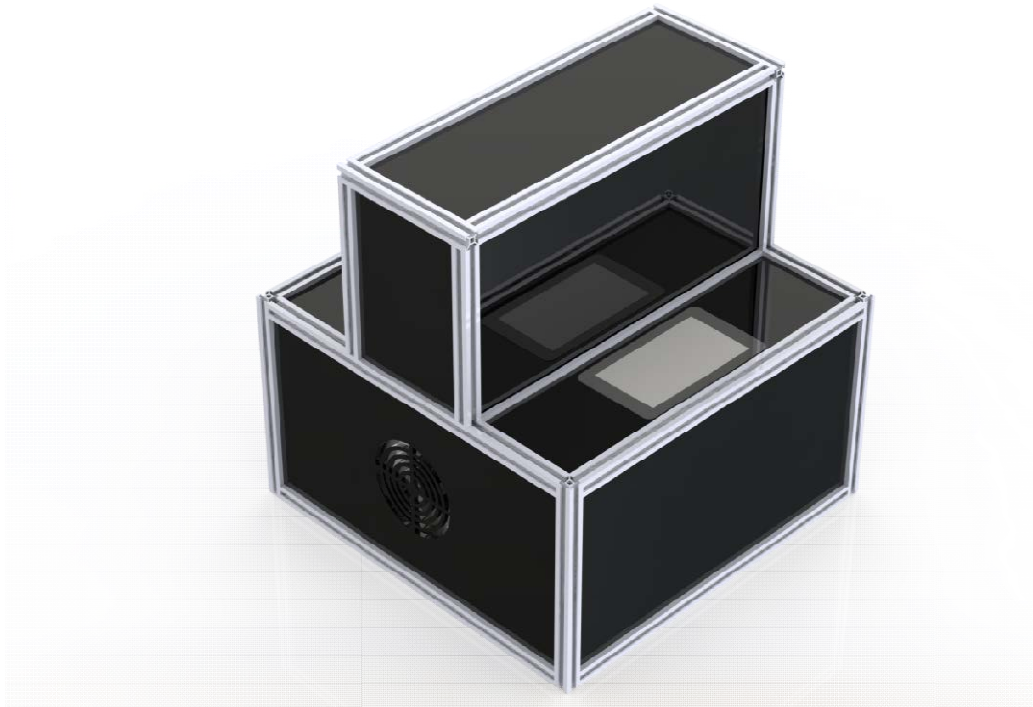


FIGURA 24.- SPOCC encapsulado evitando el paso de luz hacia el interior, operado desde pantalla táctil.

En la base del domo se colocó el perfil de aluminio de 20mm de grosor que sirve como soporte a la fuente de iluminación integrada con la cámara, el hardware utilizado para procesar de las imágenes capturadas, una pantalla, el sistema de ventilación, una fuente de poder de 24v y la distribución eléctrica para el funcionamiento del prototipo, con una batería para la portabilidad. En la Figura 25 se muestra un esquema general del diseño del SPOCC.

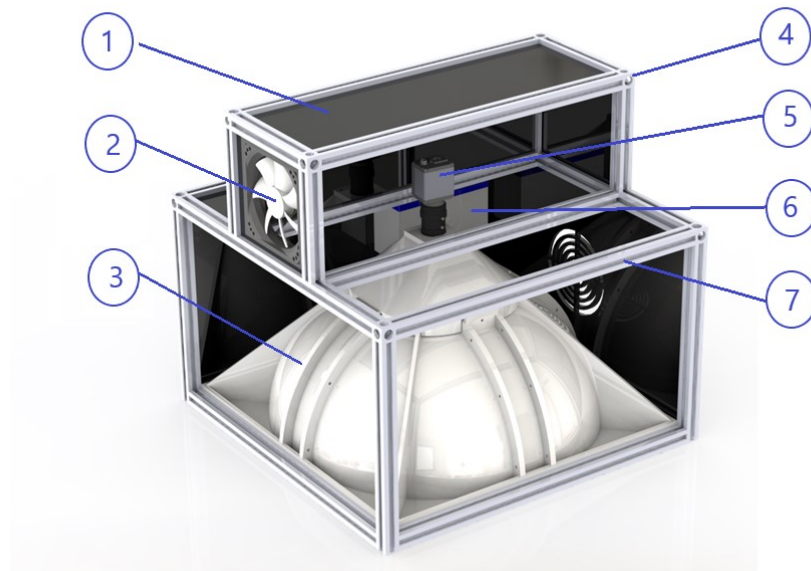


FIGURA 25.-Ensamblaje del SPOCC con perfiles de aluminio mostrando el interior de la estructura. (1) Cubierta plástica para aislar el sistema de la luz exterior, (2) Ventiladores para refrigerar sistema de captura y procesamiento. (3) Luminaria tipo domo. (4) *Cornerblock* utilizado para unir estructura de aluminio. (5) Cámara y óptica para captura de imágenes. (6) Batería para suministrar energía al sistema portátil. (7) Estructura de aluminio

3.3.3 Piezas complementarias

Se diseñó e imprimió una base para sujetar la cámara, como se muestra en la Figura 26, y a su vez se ensambló a la parte superior del cono y permitiera el movimiento libre del SPOCC sin modificar la distancia o posición de la lente y la cámara.



FIGURA 26.- Base para cámara diseñada en SOLIDWORKS®.

Para colocar los LEDs dentro de la luminaria se diseñaron unas placas de circuito impreso con una geometría que ensamble dentro del domo. Para esto, se utilizó la cortadora láser que se tiene a disposición en el Centro de Investigaciones en Óptica unidad Aguascalientes, diseñando las pistas con la geometría deseada para colocar los LEDs y ensamblarlo dentro del domo.

Primero se coloca una interfaz plástica para que la cortadora laser pueda cortarla, como se muestra en la Figura 27.



FIGURA 27.- Trazado de pistas en la interfaz plástica, adherida a la placa de cobre, cortada por laser

Después de cortar y retirar los espacios donde se desea mantener el cobre, se inserta una capa de pintura, al retirar el resto de la cubierta plástica quedará el cobre marcado como en (1) de la Figura 28.

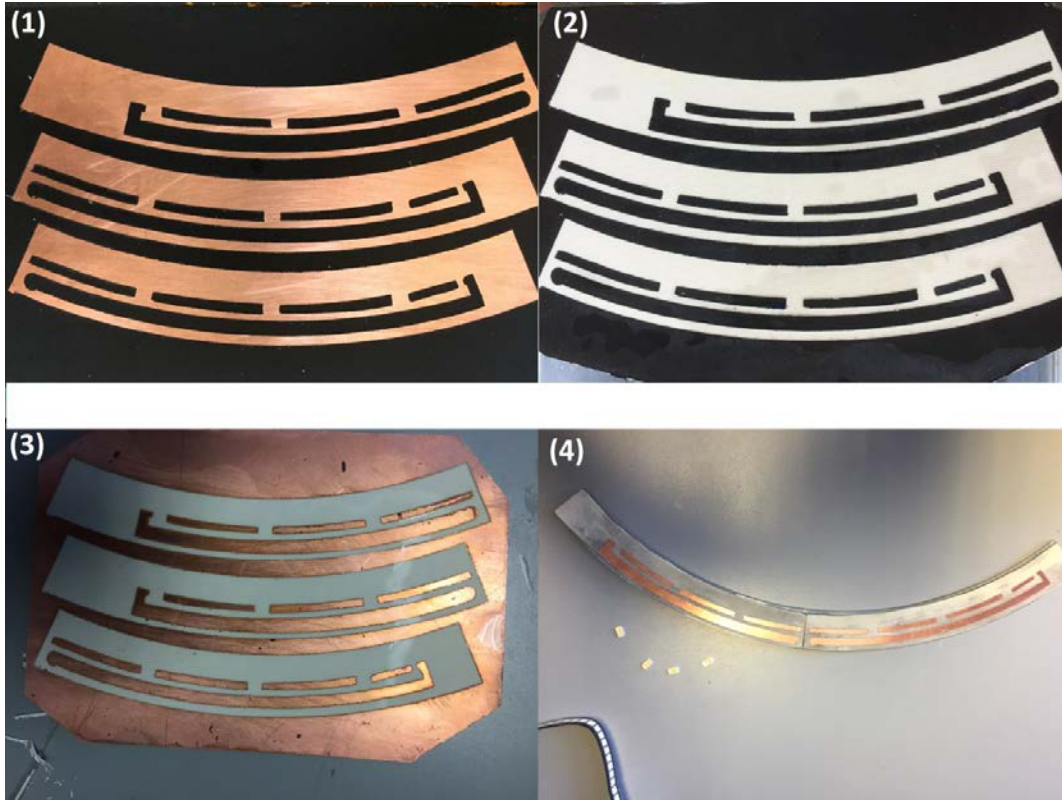


FIGURA 28.- Método de trazado de pistas en PCB para obtener la geometría deseada.

Se les retira el cobre utilizando cloruro férrico Figura 28 (2) y después se retira la capa de pintura utilizando acetona Figura 28 (3), las piezas se cortan y se colocan sobre una base de acrílico de la misma geometría de las placas ocupando dos placas para cada segmento, donde en dichas placas se colocarán los LEDs Figura 28 (4).

3.4 Caracterización espacial de la luminaria

Para la caracterización espacial de la luminaria se realizó una prueba de trazo de rayos en la fase de diseño y de esta manera comprobar la uniformidad en el área de interés, posteriormente una vez implementado el diseño se realizó la prueba.

3.4.1 Trazo de rayos

Se realizó una simulación en el programa *TracerProExpert* de un trazo de rayos definiendo las fuentes de luz como las superficies donde se plantea colocar los LEDs, y se colocó una superficie de prueba a una distancia de 10mm de la superficie inferior del domo para observar las distribuciones en irradiación y luminancia.

A continuación se muestran los gráficos de irradiancia y candela generados por dicho programa al correr la simulación.

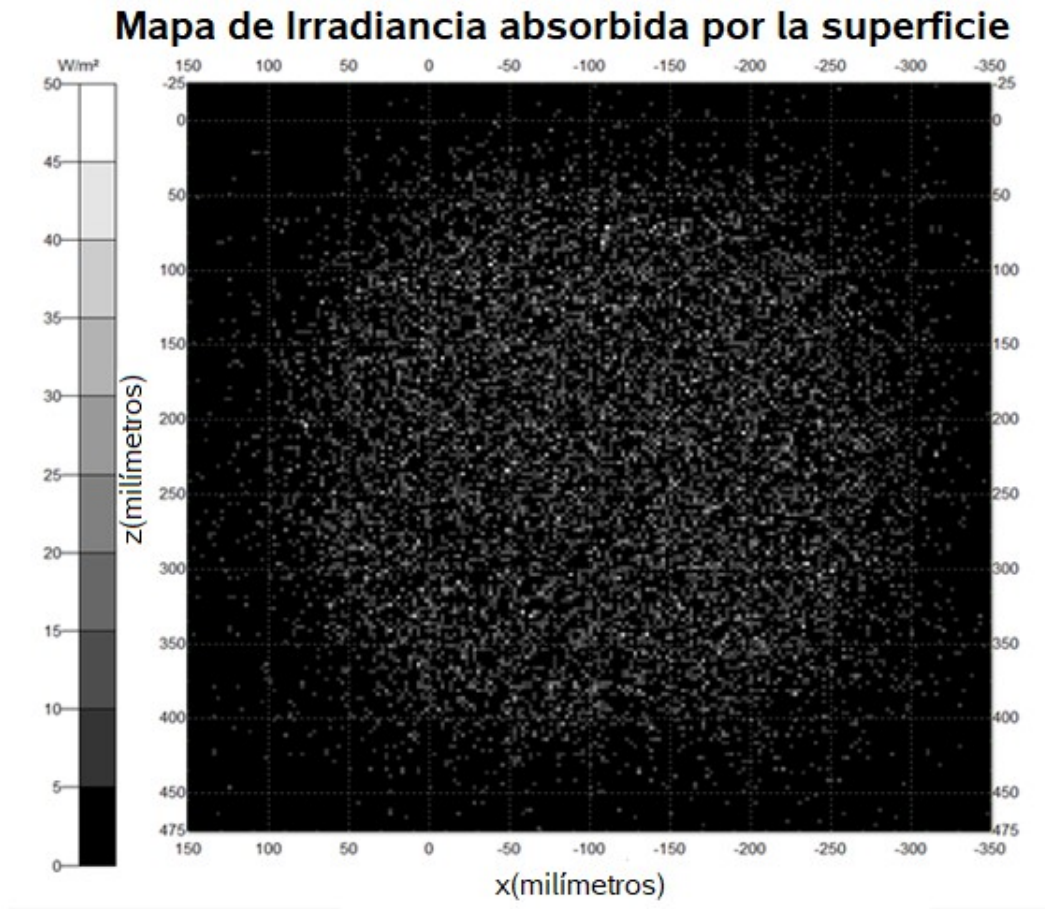


FIGURA 29.- Mapa de irradiancia absorbida por la superficie colocada bajo la iluminación del domo en la simulación.

En la Figura 29 se logra apreciar una distribución uniforme de luz a lo largo del plano colocado a una distancia cercana, lo cual permite suponer que la geometría propuesta generará una iluminación uniforme a lo largo del plano dentro del área de trabajo.

3.4.2 Montaje de LEDs

Para el montaje de los LEDs en el interior del domo se diseñan placas de cobre en forma de arco y se pegan sobre las tiras de acrílico anteriormente cortadas,

teniendo 7 LEDs por segmento de 90° como se muestra en la Figura 30, se requirieron 4 segmentos para colocarse al interior del domo.



FIGURA 30.- Placa de cobre en forma de arco a 90° con LEDs de montaje superficial.



FIGURA 31,- Interior del domo con 4 segmentos de LEDs encendidos.

3.4.3 Caracterización de distribución espacial

Se montó el sistema en un goniómetro situado en el túnel fotométrico del CIO Aguascalientes a cargo del M.C. Gil Arturo Pérez Herrera para la caracterización de distribución luminosa del prototipo, como se muestra en la Figura 32. La caracterización se realizó utilizando un luxómetro a una distancia de 10 metros de distancia para considerar la luminaria como una fuente puntual (Ryer, 1998).



FIGURA 32.- SPOCC montado en goniómetro en el túnel fotométrico del CIO Aguascalientes.

Los LEDs fueron alimentados a 24V, consumiendo una corriente de 500mA, el domo fue centrado tomando como referencia los perfiles de aluminio.

El barrido se realizó de -20° a 20° de manera vertical y -20° a 20° de manera horizontal en pasos de 1° teniendo el valor mínimo en $(20^\circ, 20^\circ)$ con 0.149 lx y

un máximo en $(-1^\circ, -7^\circ)$ con 0.173 lx con una distribución como se muestra en la Figura 33.

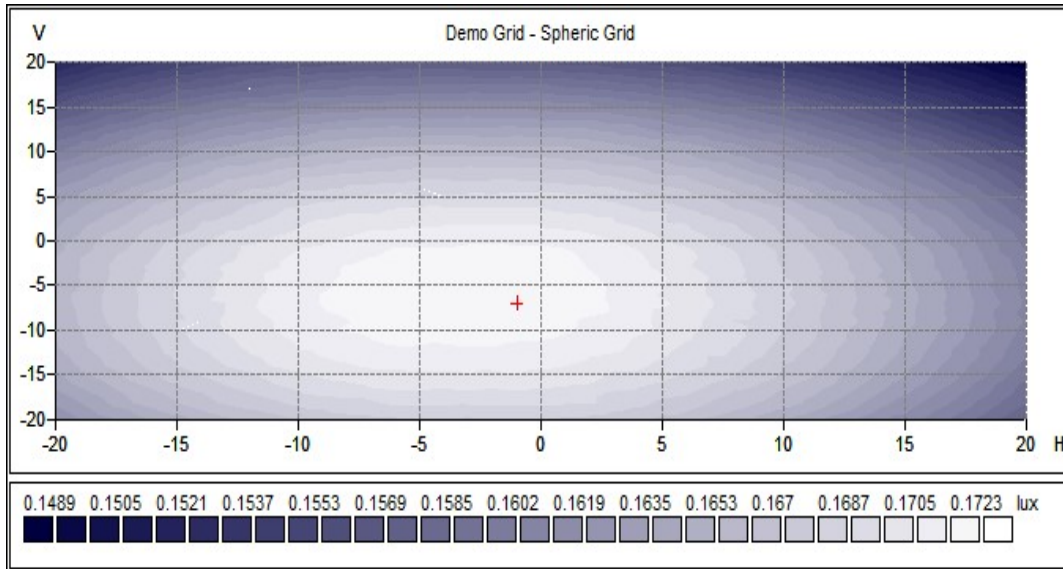


FIGURA 33.-Distribución de irradiancia de la luminaria a una distancia de 25m con unidades en H y V con grados.

En el laboratorio de Fotometría y Radiometría se midió la luminancia de una superficie blanca iluminada por el SPOCC colocando un colorímetro de la marca WestborPhotonics modelo WP690, montada sobre la apertura superior del domo reemplazando la cámara IDS para observar el flujo luminoso que emerge de la superficie hacia la dirección de la lente como se ejemplifica en la Figura 34. Esta prueba permite constatar el alcance del sistema utilizando una cámara de un precio muy por debajo de un colorímetro especializado.

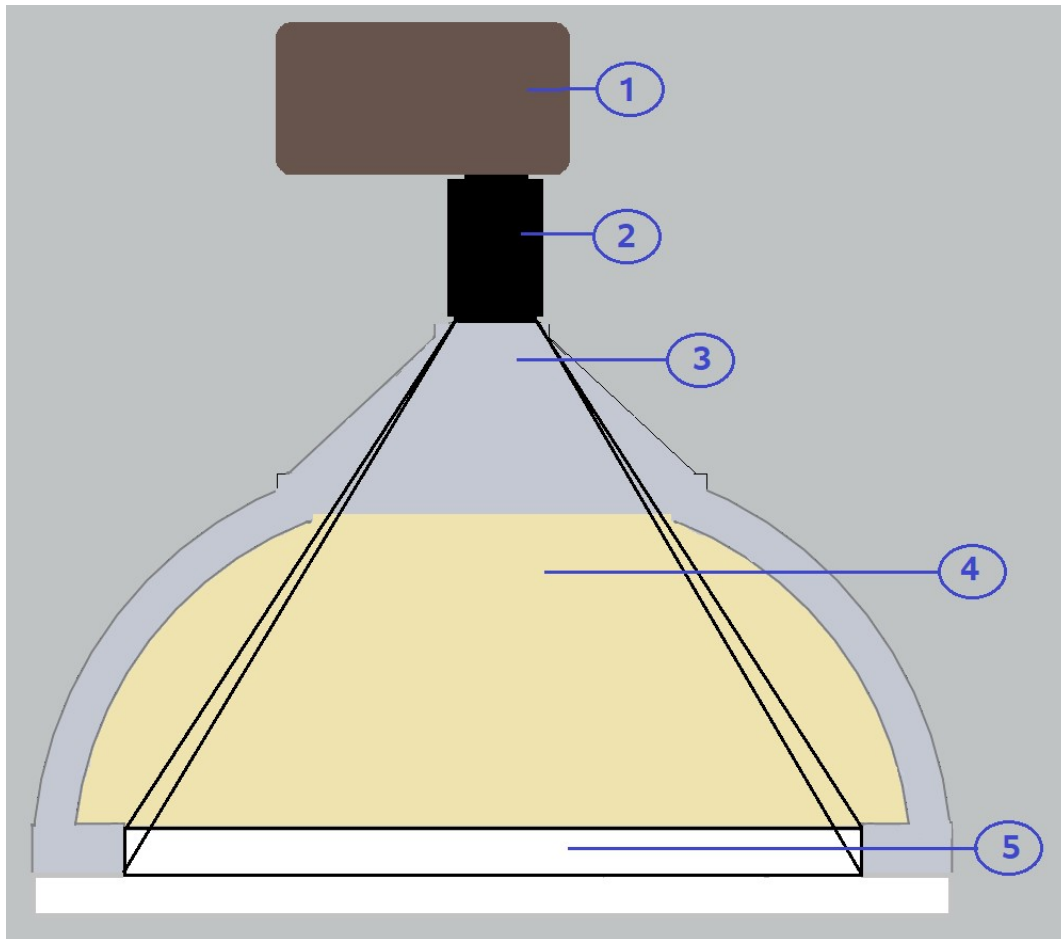


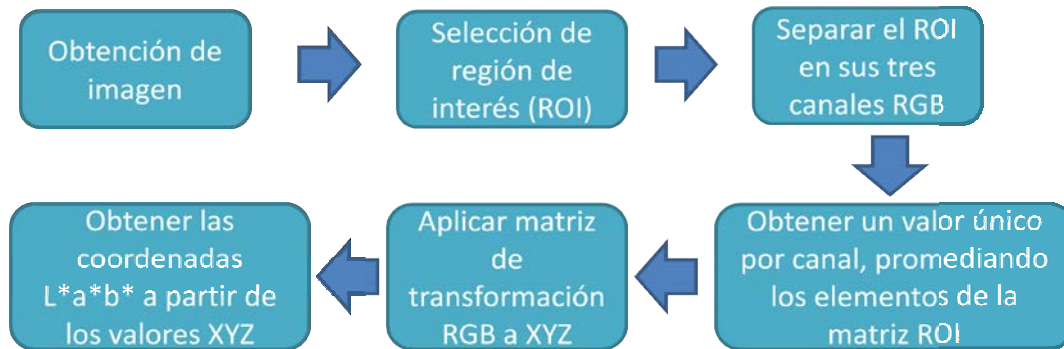
FIGURA 34.- Colorímetro Westboro Photonics captando imagen de luminancia de la superficie blanca uniforme sobre la cual se incide luz proveniente del domo. (1) Colorímetro. (2) Lente réflex. (3) Cono de soporte para cámara IDS. (4) Iluminación difusa. (5) Superficie blanca captada por el colorímetro.

3.5 Extracción de las componentes de color a partir de una imagen

Para extraer la información sobre el color de una región, total o parcial, dentro de la imagen, existen diversos algoritmos para calcular los valores triestímulo o las coordenadas cromáticas en los diferentes espacios de color (Pearson & Yule, 1973) (Hunt R., 2004) (Martinez, Pujol, & Vilaseca, 2004).

3.5.1 Algoritmo para extraer información de color de una imagen

Para obtener la información de color de una imagen, se plantea el siguiente esquema general:



A partir del esquema anterior se puede desarrollar un programa en el cual, se pueden encontrar los valores $L^*a^*b^*$ con base en las ecuaciones de transformación de espacios de color CIE (Roberts, 1998); tanto para una imagen que sirva de referencia como para las imágenes de muestra que se comparan con la imagen ya mencionada. Esto utilizando una interfaz desarrollada en Python, mostrada en la Figura 35, colectando dos imágenes, y comparando las componentes de color como es mostrado en el siguiente: partiendo de la selección de la región de interés de la imagen como se ilustra en la Figura 36.



FIGURA 35.- Interfaz para comparar componentes de color de una referencia con una muestra.

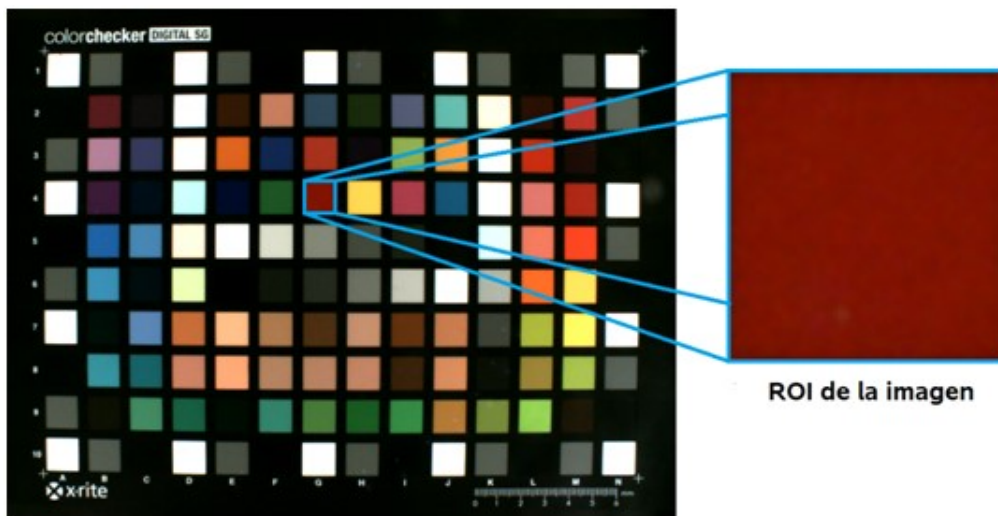


FIGURA 36.- Selección de la región de interés de una imagen de la tabla ColorChecker

A continuación se separa la sección de la imagen en los canales RGB como se muestra en la Figura 37.

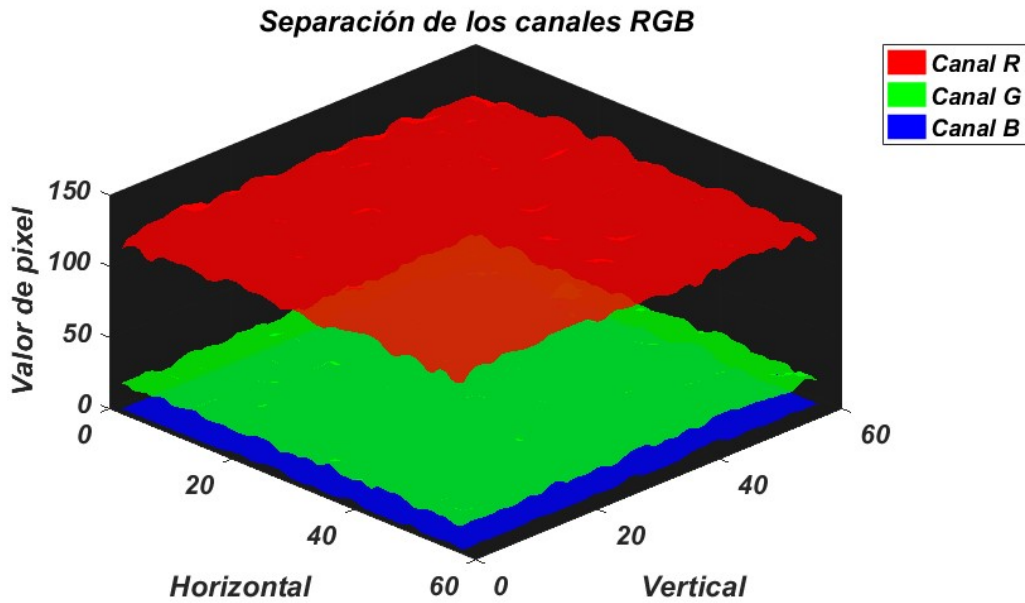


FIGURA 37.- Separación de la imagen en los tres canales RGB.

Al separar los canales RGB, se puede promediar la selección para obtener un valor medio por lo que el promedio de cada canal tiene como resultado:

$$\bar{R}_{8bit} = 127.37$$

$$\bar{G}_{8bit} = 19.23$$

$$\bar{B}_{8bit} = 1.48$$

Estos valores contienen información en un nivel de 8 bits de profundidad, por lo que es necesario normalizarlos entre 0 a 1, siguiendo la especificación IEC-61966-2-1 (Commission International Electrotechnical, 1998):

$$R'_{RGB} = \bar{R}_{8bit} / 255$$

$$G'_{RGB} = \bar{G}_{8bit} / 255$$

$$B'_{RGB} = \bar{B}_{8bit} / 255$$

Si $R'_{SRGB}, G'_{SRGB}, B'_{SRGB} \leq 0.04045$:

$$R_{RGB} = R'_{RGB}/12.92$$

$$G_{RGB} = G'_{RGB}/12.92$$

$$B_{RGB} = B'_{RGB}/12.92$$

De lo contrario:

$$R_{RGB} = \left(\frac{R'_{RGB} + 0.055}{1.055} \right)^{2.4}$$

$$G_{RGB} = \left(\frac{G'_{RGB} + 0.055}{1.055} \right)^{2.4}$$

$$B_{RGB} = \left(\frac{B'_{RGB} + 0.055}{1.055} \right)^{2.4}$$

Y utilizando la matriz de transformación:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4361 & 0.3851 & 0.1431 \\ 0.2225 & 0.7169 & 0.0606 \\ 0.0139 & 0.0971 & 0.7141 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{RGB} \\ G_{RGB} \\ B_{RGB} \end{bmatrix}$$

Utilizando los valores de la imagen se encuentran los valores triestímulo XYZ:

$$X = 0.0905$$

$$Y = 0.0502$$

$$Z = 0.0053$$

Donde se puede calcular las coordenadas de color para el espacio CIE 1931:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} = 0.6198$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} = 0.3438$$

Y para el espacio de color CIE L*a*b bajo un iluminante D50, donde $X_n=0.9631$, $Y_n=1.0$, $Z_n=0.8240$:

$$L^* = 116f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16 = 26.79$$

$$a^* = 500\left(f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right)\right) = 42.86$$

$$b^* = 200\left(f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right)\right) = 37.30$$

Al aplicar el procedimiento por separado a cada imagen, obteniendo la información de color, se puede calcular un ΔE , el cual indicará la diferencia de color entre las imágenes comparadas.

3.5.2 Plataforma del programa

Para conseguir que el sistema sea portátil se planteó utilizar una Raspberry Pi Modelo B con las siguientes características (The Raspberry Pi Foundation).

- QuadCore 1.2GHz Broadcom BCM2837 64bit CPU
- 1 GB de RAM
- BCM43438 LAN inalámbrica y Bluetooth LowEnergy (BLE) a bordo
- 100 Base Ethernet
- GPIO extendido de 40 pines
- 4 puertos USB 2

- Salida de 4 polos estéreo y puerto de video compuesto
- HDMI de tamaño completo
- Puerto de cámara CSI para conectar una cámara Raspberry Pi
- Puerto de pantalla DSI para conectar una pantalla táctil Raspberry Pi
- Puerto micro SD para cargar su sistema operativo y almacenar datos
- Fuente de alimentación Micro USB conmutada actualizada de hasta 2.5A

De estas características se encontró la posibilidad de utilizar la cámara propuesta con entrada GigE Ethernet, la pantalla táctil Raspberry Pi como interfaz hombre máquina y como trabajo futuro se podría utilizar la cámara Raspberry Pi como el sistema de adquisición de imagen.

Teniendo en cuenta el procesador y la memoria RAM se planteó realizar un programa que permita procesar las imágenes obtenidas por la cámara y extraer la información de color sobre una región de interés, para así adquirir los valores triestímulo XYZ y en base a eso obtener las coordenadas en el espacio de color deseado.

Para ello se planteó crear una interfaz de usuario utilizando Python, el cual es un lenguaje de programación instalado por defecto en el sistema operativo de Raspbian con el cual trabaja normalmente la Raspberry PI. Python es un proyecto de código abierto y cuenta con una serie de características que facilitan su programación por lo que se decidió utilizarlo en este proyecto.

3.6 Medición de color con SPOCC

Utilizando el SPOCC se realizan capturas de imágenes de la tabla ColorChecker® Digital SG utilizando los 24 parches ColorChecker Original, como se observa en la Figura 38, que son los parches mínimos necesarios para calibrar el RGB de las cámaras fotográficas, los cuales son medidos a su vez con un colorímetro para la comparación de las mediciones de color entre el SPOCC y un colorímetro comercial.

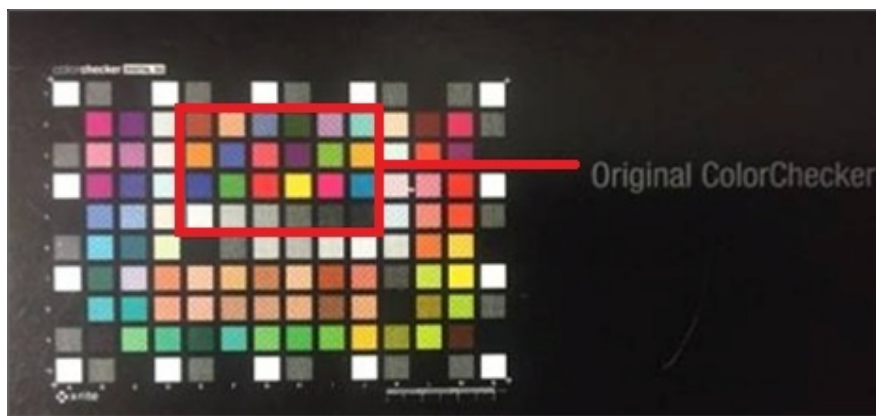


FIGURA 38.- Cartilla de colores ColorChecker Digital SG: Dentro de la imagen se enmarca la región de parches pertenecientes a ColorChecker Original

Se tomaron diversas capturas de la tabla ColorChecker utilizando un fondo negro, para evitar la contribución no neutra reflejada de la superficie en las paredes del domo, como se muestra en la Figura 39.

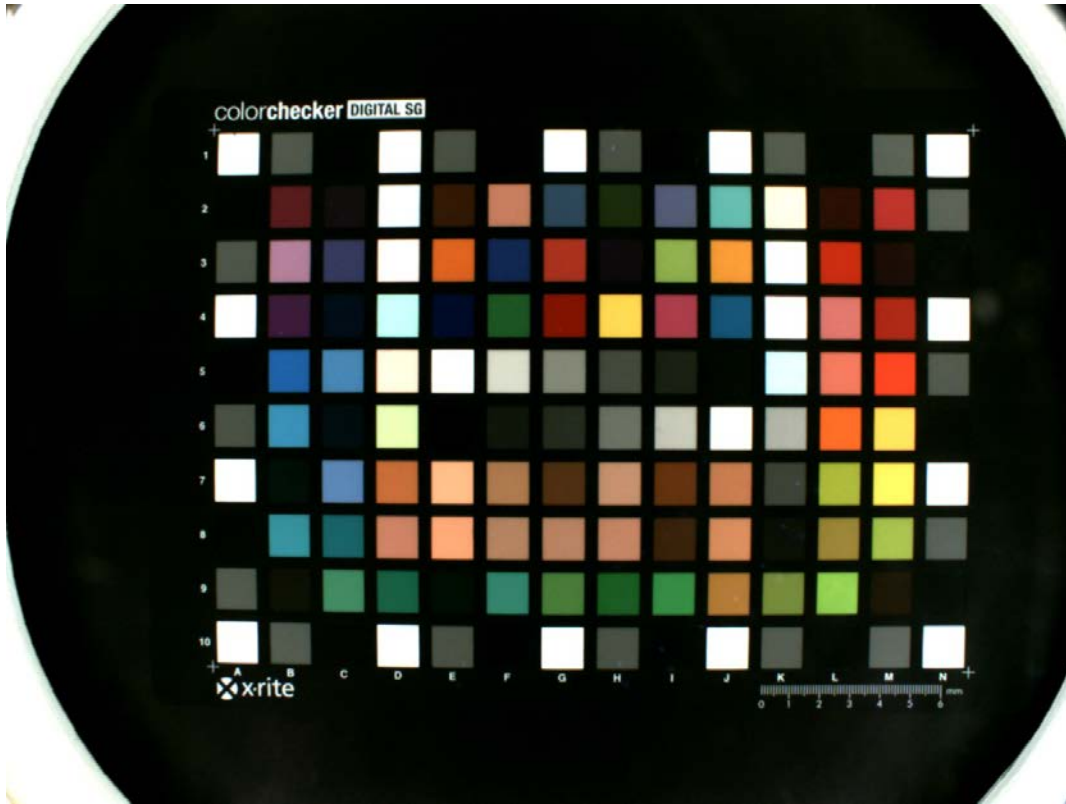


FIGURA 39.- Tabla de colores ColorChecker capturada por el SPOCC para extracción de información de color de los parches contenidos.

Al obtener la imagen se establecen las regiones de interés de los 24 parches que se van a utilizar para obtener los colores de manera individual de cada parche.

Se utilizó un colorímetro eye-one de GretagMcbeth para obtener el espectro de cada parche, como se muestra en la Figura 39, y obtener los valores $L^*a^*b^*$ y

las coordenadas (x, y) , de esta manera comparar los resultados con los obtenidos por el SPOCC.

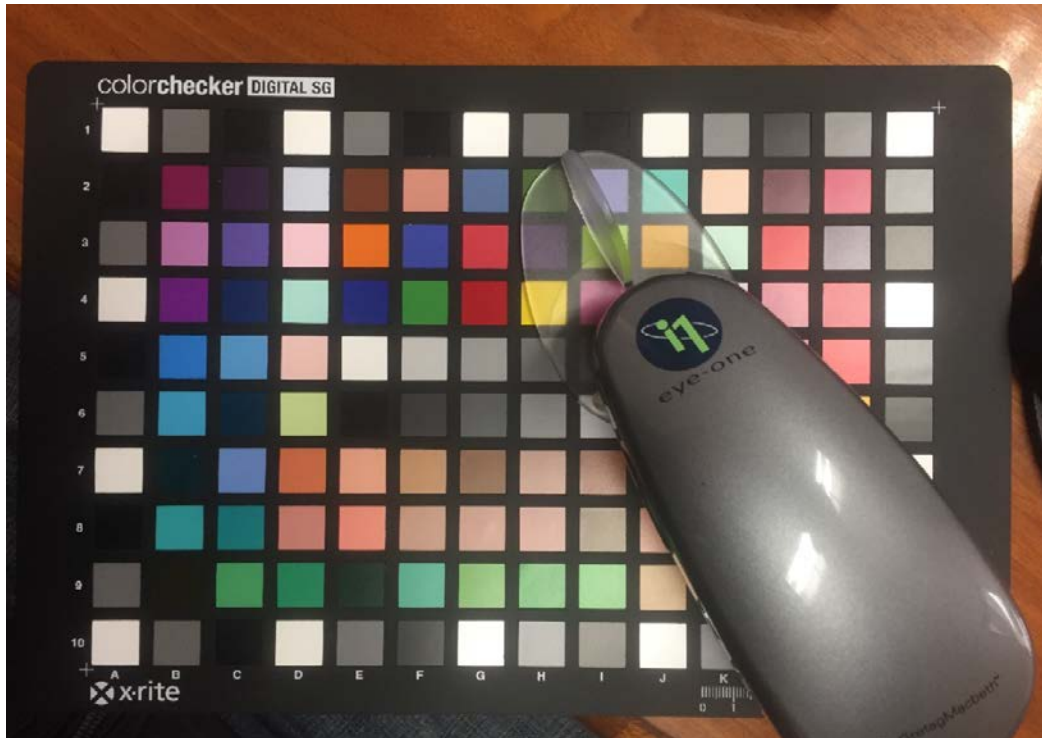


FIGURA 40.- Medición de parches de colores de la tablilla Colorchecker con colorímetro eye-one

Al obtener el espectro de reflexión de cada parche se pueden calcular los valores triestímulo XYZ utilizando un iluminante D50. De esta forma se pueden encontrar las coordenadas (x, y) de cada uno de los parches para poderlos graficar en el diagrama CIE 1931, estos resultados son ilustrados en la Figura 41.

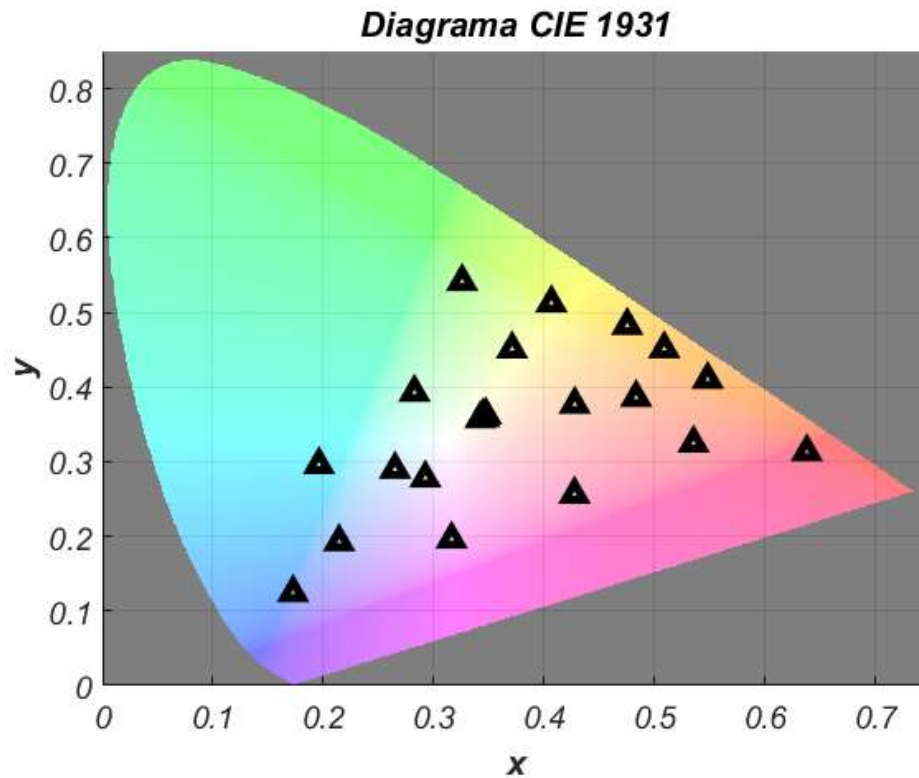


FIGURA 41.- Valores (x, y) de los parches ColorChecker Original medidos con el colorímetro en diagrama CIE 1931.

También se realizó una prueba utilizando un *Farnsworth–Munsell 100 Hue Color Vision test*, que es una prueba del sistema de visión humano para la discriminación de colores con valores constantes, abarcando todos los tonos visuales descritos por el sistema color Munsell, para probar la capacidad del sistema de aislar los colores con una ligera variación en los tonos visuales (Farnsworth, 1943).

Esta prueba consiste en acomodar 85 fichas en orden, mostradas en la Figura 42, las cuales tienen una ligera variación en la tonalidad, cada ficha está numerada para poder identificar el orden de los colores después de realizar la prueba, esto para evaluar la capacidad del usuario de discriminar colores.



FIGURA 42.- Fichas de prueba HUE test 100 las cuales van cambiando ligeramente su tonalidad con respecto a sus consiguientes

Capítulo 4

Resultados

En este capítulo se enunciarán los resultados respectivos al diseño y construcción del SPOCC en cada aspecto relacionado al sistema mecánico, óptico y electrónico. De igual manera se describen los resultados obtenidos utilizando el sistema integrado, que permite la medición y comparación de color utilizando el algoritmo propuesto para el cálculo de las coordenadas en los espacios $L^*a^*b^*$ y CIE 1931 (x, y) .

4.1 Caracterización espectral de la cámara

Para encontrar el espectro de respuesta del sensor de la cámara utilizada como sistema de captura, se midió el espectro de emisión de una fuente de luz de espectro amplio utilizando el medidor de irradiancia espectral METRUE utilizado para la caracterización espectral de la luminaria.

En la Figura 43 se muestra una comparación del espectro dado por la fuente de luz y la salida del monocromador.

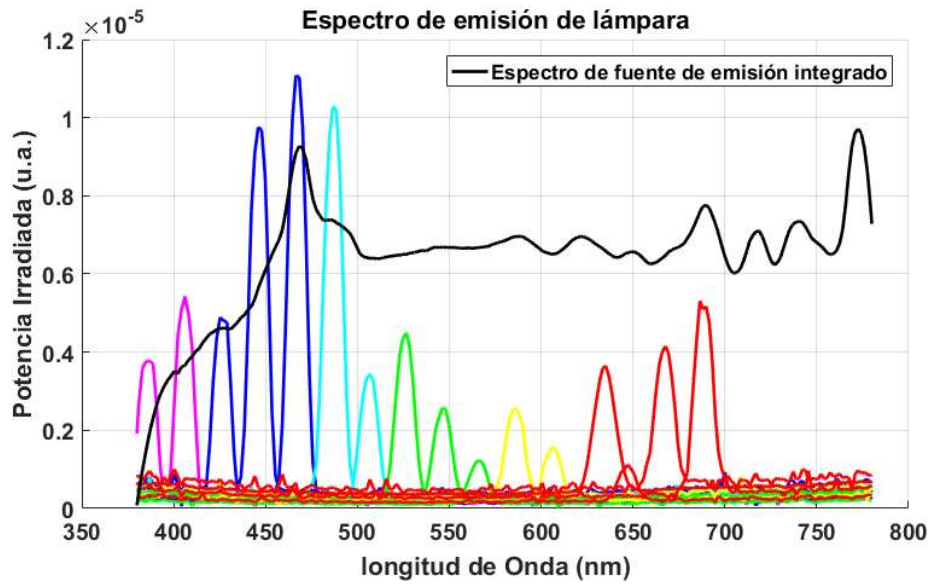


FIGURA 43.- Espectro de emisión de la fuente de luz del monocromador, medido en la entrada, línea de color negro, y salida del monocromador tomado cada 20nm, denotado como diferentes colores.

De la misma manera se capturaron imágenes a la salida del monocromador utilizando la cámara. Las imágenes obtenidas por la cámara se muestran en la Figura 44.

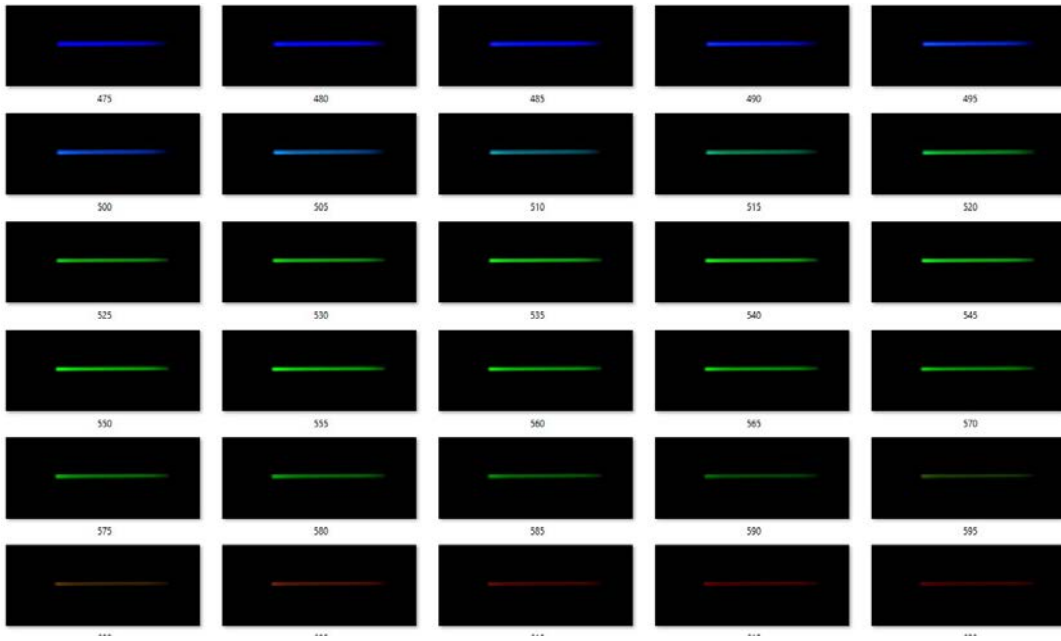


FIGURA 44.- Imágenes capturadas por la cámara al irradiar el sensor con luz proveniente del monocromador, adquiridas cada 5 nanómetros.

Tomando un promedio de los valores RGB de cada imagen y teniendo en cuenta el espectro de emisión de la fuente de iluminación, a la salida del monocromador, se puede realizar una estimación del espectro de respuesta en cada uno de los canales RGB.

Al normalizar la respuesta de la cámara respecto a la intensidad de luz incidente en el detector se puede encontrar una aproximación al espectro de respuesta.

La Figura 45 hace la comparación entre la respuesta del sensor y la respuesta triestímulo normalizada.

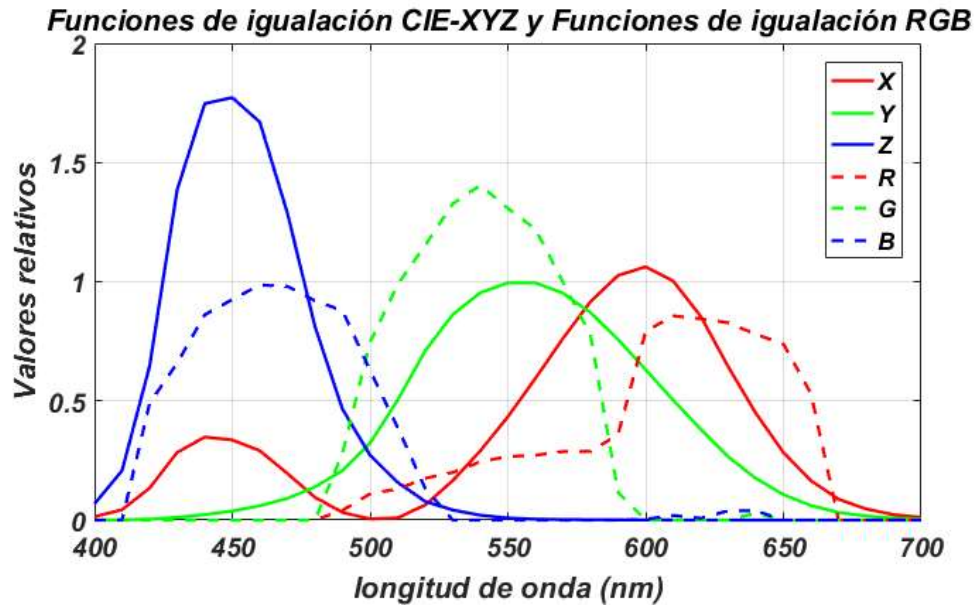


FIGURA 45.- Comparación de respuesta del sensor (RGB) contra los valores triestímulo (XYZ).

Donde con los datos mostrados en la gráfica representada en la Figura 46 se pueden encontrar los valores necesarios para aproximar la igualación de color al CIE-XYZ a partir del RGB de la respuesta de la cámara, obteniendo así una pseudo igualación de color XYZ, es decir, esta igualación de color no corresponderá exactamente a los valores triestímulo normalizados CIE-XYZ, si no que será una aproximación, como se ilustra en la Figura 45, que servirá para transformar nuestros datos obtenidos por el SPOCC a un espacio de color CIE-L*a*b*.

Funciones de igualación CIE-XYZ y Funciones de igualación PseudoXYZ

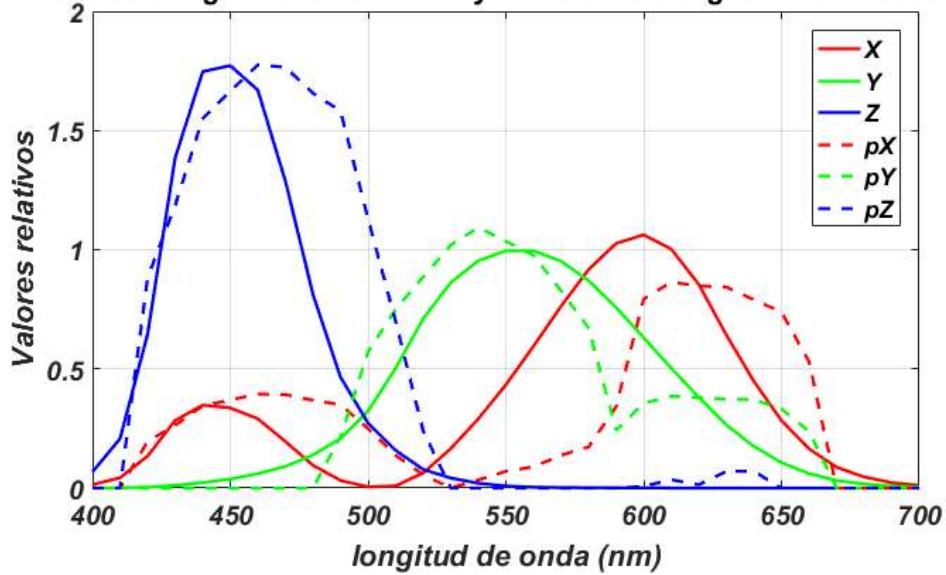


FIGURA 46.- Aproximación del espectro de respuesta del sensor a los valores triestímulo (XYZ).

4.2 Caracterización del LED

4.2.1 Espectro de LEDs y CRI

A continuación se muestra un gráfico, en la Figura 47, con el espectro de emisión y una tabla de características de un solo YujiLED obtenidos con un medidor de irradiancia espectral METRUE modelo SIM-2 Plus.

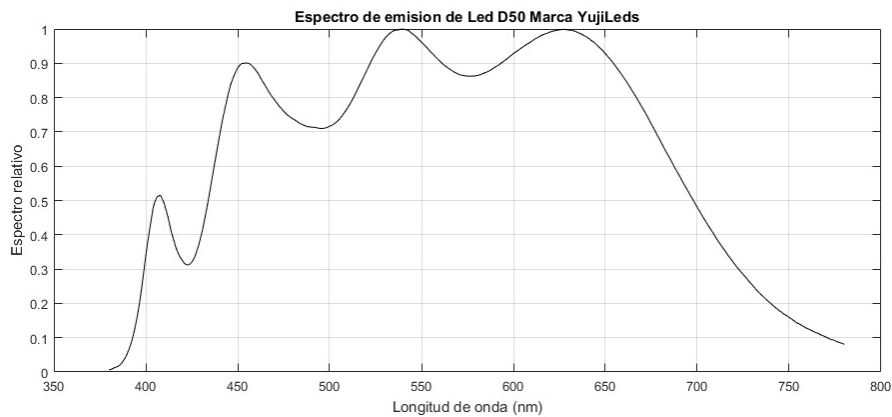


FIGURA 47.- Espectro de emisión de LEDs D50 marca YujiLeds utilizados como fuente de luz en la luminaria.

TABLA 4. Características De los LEDs medidas por un medidor de irradiancia espectral METRUE

Nombre	Medición	Nombre	Medición	Nombre	Medición
E (lx)	1064.78	CIE y	0.3622	R2	99
Ee(W/m2)	4.17556	CIE u'	0.2141	R3	95
S/P	2.04	CIE v'	0.4912	R4	99
Eb(W/m2)	1.04	Tc (K)	4683	R5	99
Ey(W/m2)	1.44	Lp (nm)	539	R6	97
Er(W/m2)	1.37	HW (nm)	264	R7	99
Ep(W/m2)	3.32	Ld (nm)	574.6	R8	98
PAR(W/m2)	4.18	Pur (%)	15.2	R9	98
Eq($\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	17.97	Duv	0.00138	R10	95
Erb_Ratio	1.31	Ratio_R(%)	18.7	R11	98
E(fc)	98.958	Ratio_G(%)	75.8	R12	86
SDCM	5.9(F5000)	Ratio_B(%)	5.5	R13	99
White Class	OUT	Ra	98.2	R14	96
CIE x	0.3551	R1	99	R15	98

Una consideración importante es el índice de rendimiento de color de la fuente de iluminación, ya que a mayor CRI permite reproducir mayor cantidad de colores. Al medir el espectro irradiante de los LEDs arrojan la información presentada en la Figura 48 en cuanto al índice de rendimiento de color.

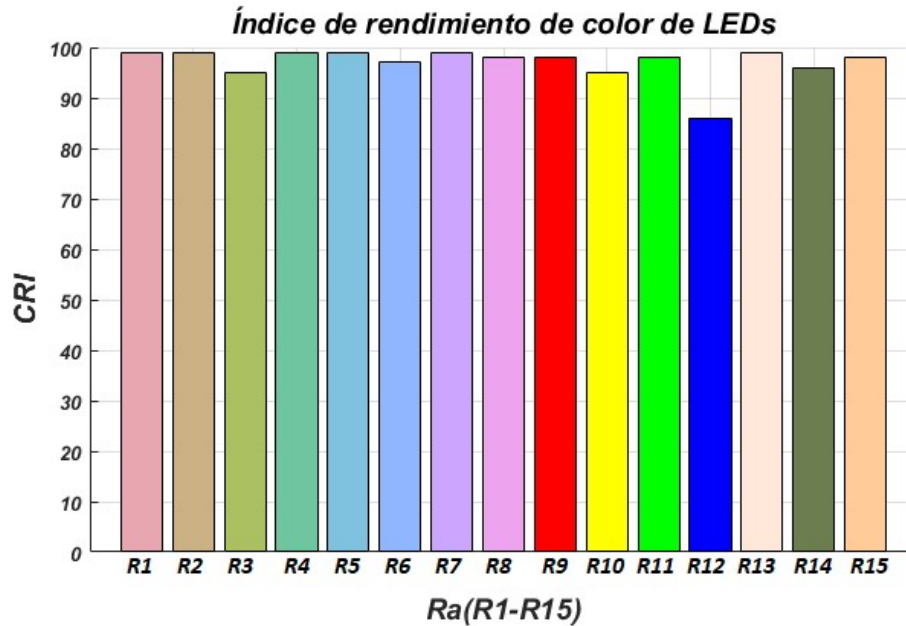


FIGURA 48.- Índice de rendimiento de color de LEDs utilizados como fuente de iluminación.

Los LEDs utilizados en la luminaria presentan un alto índice de rendimiento de color, de 98.2, lo cual permite reproducir una mayor cantidad de colores que lamparas fluorescentes utilizadas como iluminantes, con valores tipicos de 85 de CRI.

4.2.2 Distribución espacial del LED

De acuerdo con la caracterización de distribución espacial del LED, obtenida por el goniometro en el Laboratorio de Fotometría y Radiometría, se observa que la mayor cantidad de luz emitida es propagada verticalmente, en dirección normal a la superficie del LED, como se muestra en la Figura 49. Por lo que se utilizan los LEDs en esta dirección tomando la mayor contribución luminosa en dirección a las paredes del domo, que las reflexiones de las mismas permiten el efecto de iluminación difusa.

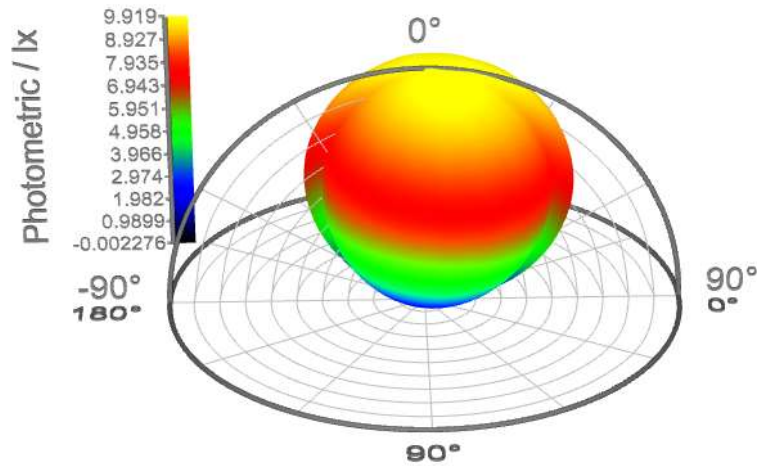


FIGURA 49.- Distribución luminosa de un LED obtenida por el goniómetro. La máxima irradiancia espectral es al ángulo 0° , dirección que es normal a la superficie del LED.

4.3 Diseño mecánico

4.3.1 Construcción de la luminaria

De acuerdo con el diseño e impresión 3D de la luminaria propuesta, la impresión del domo se realizó pieza por pieza debido a las dimensiones, como se muestra en la Figura 50, ya que el área de impresión máxima de la impresora es de 22x22x24 cm. La impresión de la luminaria se realizó en 140 horas aproximadamente debido al tamaño y la resolución del ensamble.

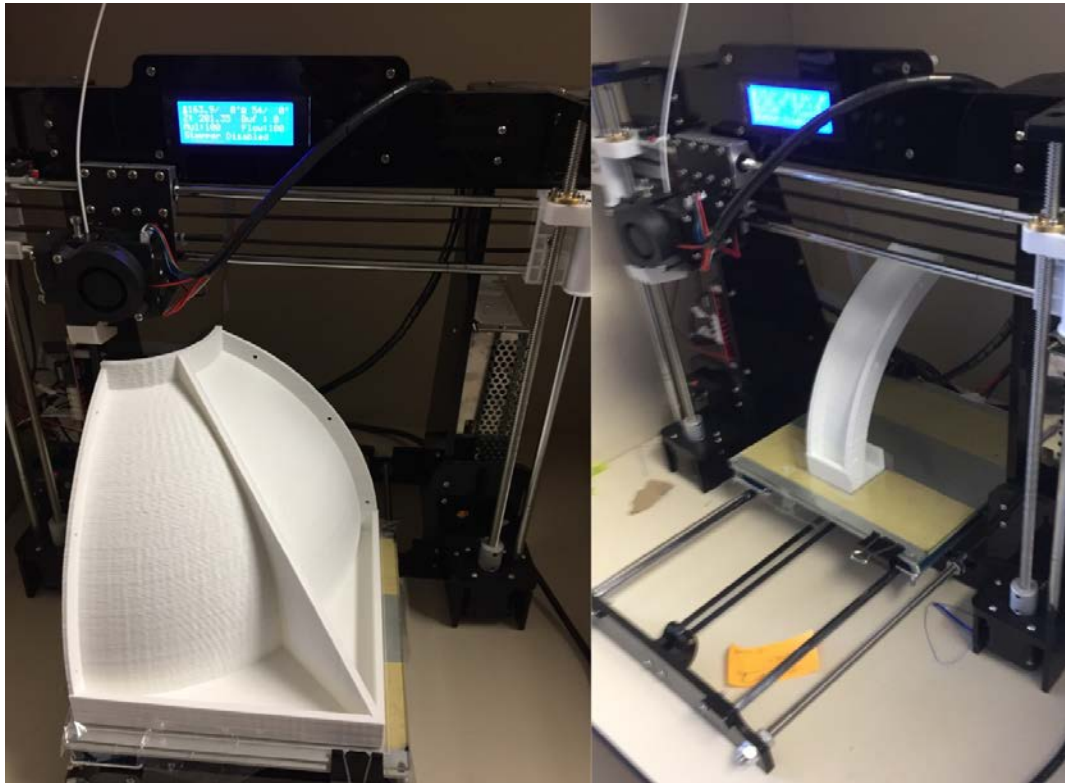


FIGURA 50.- Impresión de las piezas en PLA utilizadas para el ensamble del domo.

El domo se construyó con las siguientes características: hecho de material de ácido poliláctico (PLA por sus siglas en inglés) blanco, utilizado típicamente en las impresiones 3D, que es un material biodegradable, de rápida solidificación y baja deformación por tensión térmica. Con 5mm de grosor en las paredes y 30 por ciento de densidad de relleno, el peso aproximado de la luminaria es de 2kg contando solo el material impreso.

Se ensamblaron las piezas utilizando tornillos logrando una estructura sólida, la pieza superior se ensambló a presión ya que no se requiere una sujeción tan fuerte. El ensamble de la luminaria se puede observar en la Figura 51.

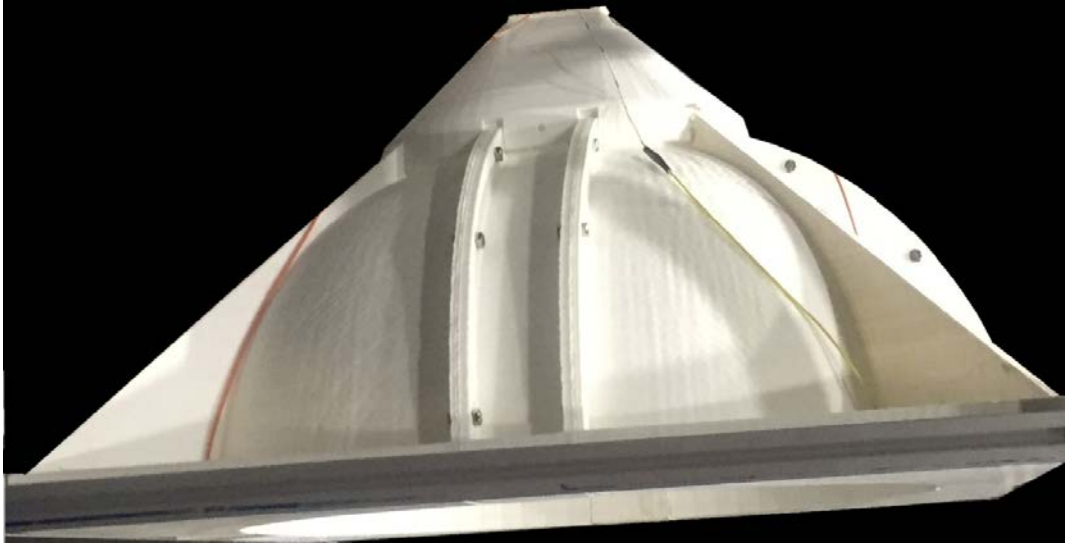


FIGURA 51.- Iluminaria tipo domo construida utilizando impresi3n 3D.

4.3.2 Construcci3n de piezas complementarias

Para colocar la c3mara en la parte superior se imprimi3 el soporte antes mencionado, mostrado en la Figura 52. 3ste fue colocado sobre el domo utilizando cuatro tornillos en las esquinas para tener una buena fijaci3n con el resto de la luminaria evitando variaciones en la escena de la imagen a capturar por la c3mara.



FIGURA 52.-Cámara IDS colocada sobre el soporte que la mantendrá sobre la luminaria.

Se soldaron los LEDs sobre la placa de cobre para así poder tener nuestra fuente de luz de la luminaria como se ilustra en la Figura 53.



FIGURA 53.- Lámparas LED diseñadas para colocarse en el interior del domo.

Para seleccionar la posición y orientación de los LEDs se tomó en cuenta el resultado de la distribución luminosa del LED, observando que,

colocados de esta forma, se aprovecharía mejor la intensidad emitida por el LED.

4.3.3 Ensamble del encapsulado

Se ensambló la estructura de aluminio con la luminaria mediante la base, teniendo la suficiente área de contacto entre los elementos para lograr manipular el peso de la luminaria mediante la estructura. También se agregaron elementos como la Raspberry Pi con la pantalla y la fuente de voltaje, como se observa en la Figura 54.

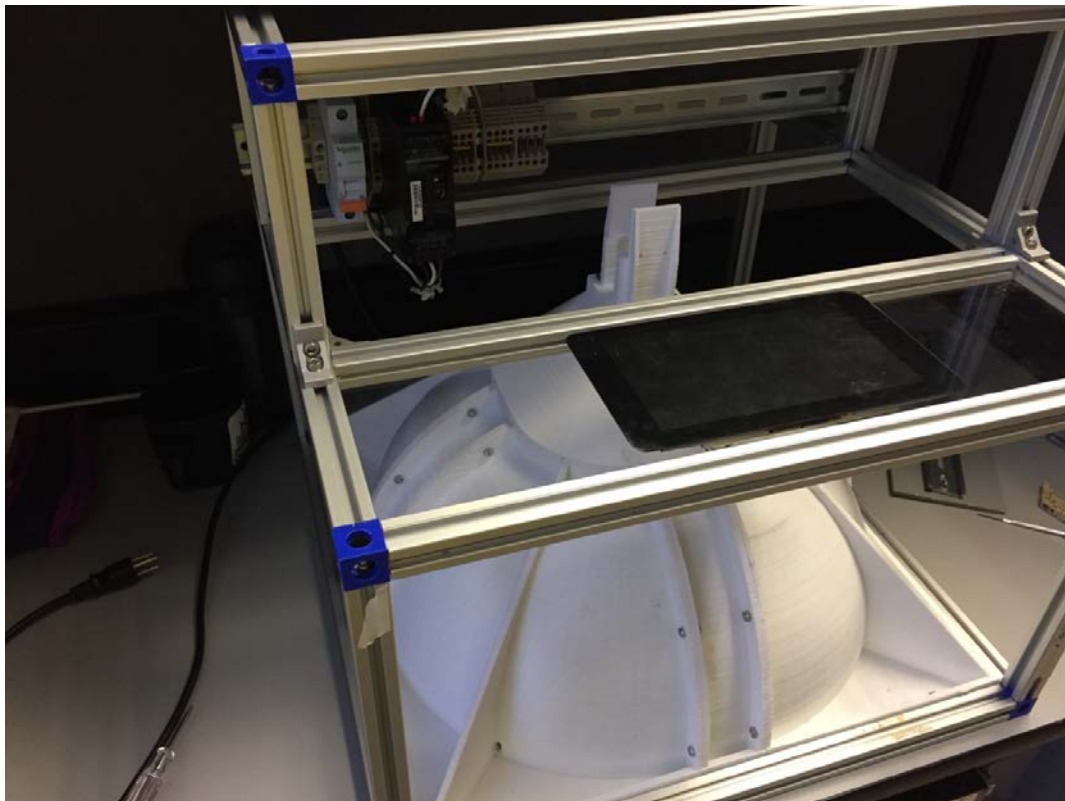


FIGURA 54.- Ensamble del SPOCC, se observa la luminaria, la base para la cámara, la pantalla de la Raspberry Pi, la fuente de voltaje acompañada de clemas que sirven para la conexión de los LEDs y la cámara.

Se cortaron y colocaron plafones de policarbonato celular de 6mm de espesor, pintados de color negro por el interior para evitar el paso de la luz del exterior, auxiliando al aislamiento de la luminaria.

4.4 Caracterización espacial de la luminaria

4.4.1 Caracterización espacial de la luminaria

Los datos generados por el goniómetro fueron graficados en una malla para dar una geometría de referencia que se muestra en la Figura 55.

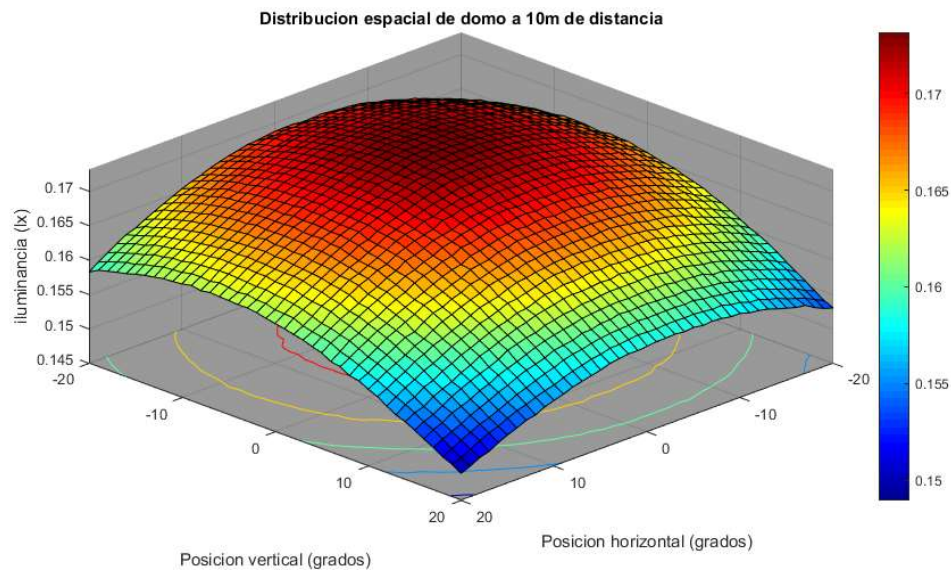


FIGURA 55.-Distribución de irradiancia en geometría 3D.

De igual manera se realizó otra prueba colocando un luxómetro Minolta a una distancia de 5 centímetros de la base del domo para obtener un muestreo de intensidad a una distancia aproximada aplicable en el prototipo.

El muestreo se realizó tomando datos directamente del luxómetro y haciendo un barrido en los ejes horizontal y vertical recorriendo la zona de iluminación del domo con un espacio de 10 milímetros.

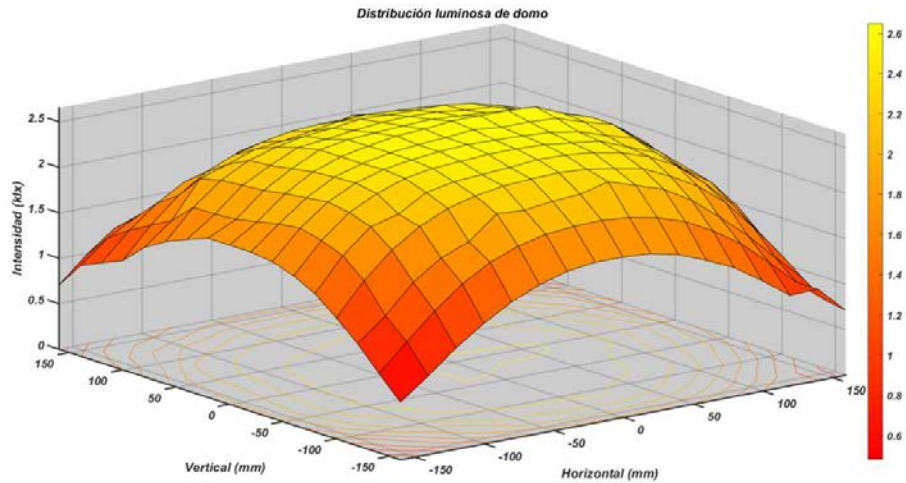


FIGURA 56.- Representación geométrica en tres dimensiones de la distribución luminosa generada por el domo medido con el luxómetro

Observando la Figura 56, se puede denotar que en el centro de la luminaria hay una leve variación en la intensidad irradiada, al observar la Figura 57, se puede percibir que el área útil del sistema, o el área que observa la cámara a través de la lente, se encuentra alrededor de los 20 cm (Vertical) x 20 cm (Horizontal) donde se puede encontrar mayor uniformidad en la iluminación.

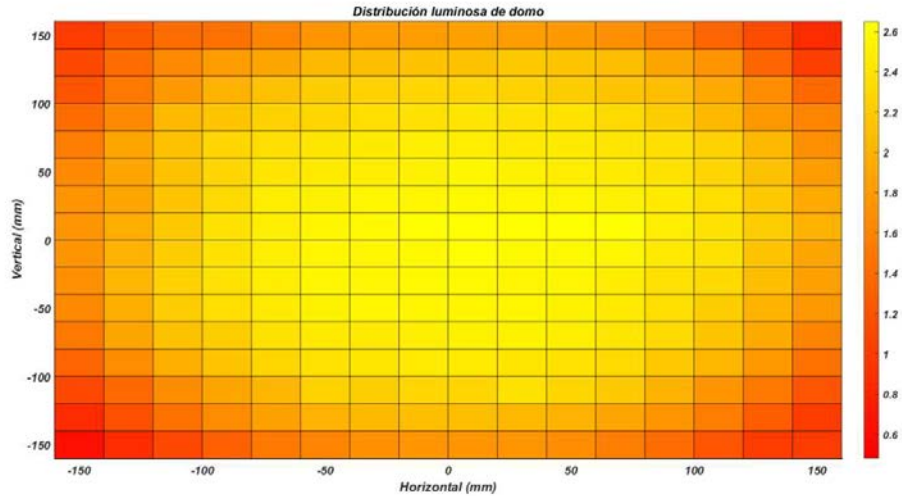


FIGURA 57.- Vista superior de la representación de la distribución luminosa generada por el domo medido con el luxómetro.

Durante la medición de luminancia utilizando el colorímetro WestborPhotonics, el software del colorímetro muestra la Figura 58, que representa una imagen de falso color arrojando la luminancia de la superficie donde se observa una relativa uniformidad con un valor mínimo de 1817cd/m² y un máximo de 1889 cd/m². El promedio de la luminancia en candelas sobre metro cuadrado es de 1841.

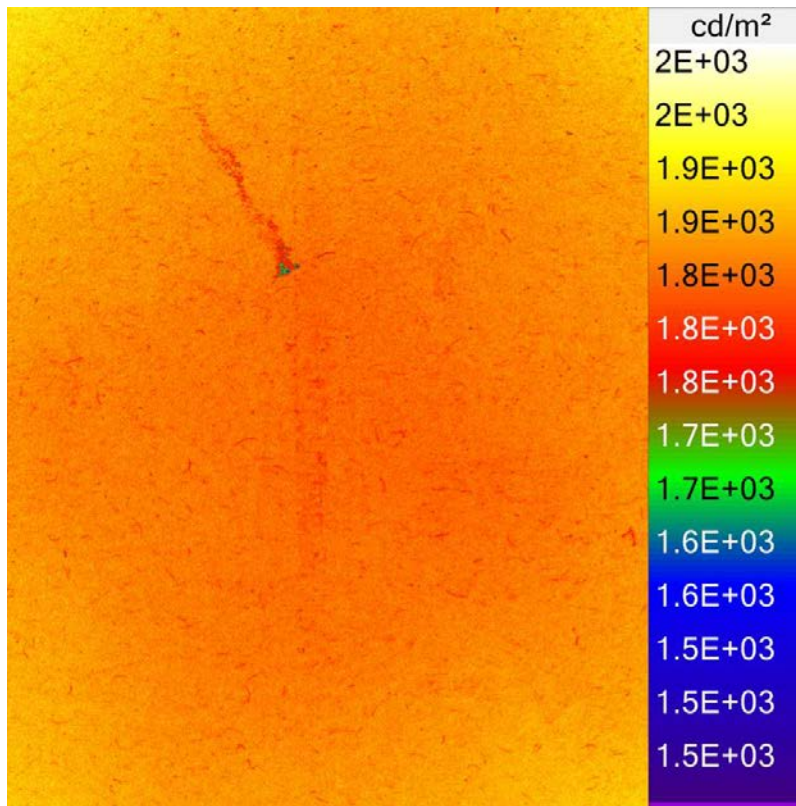


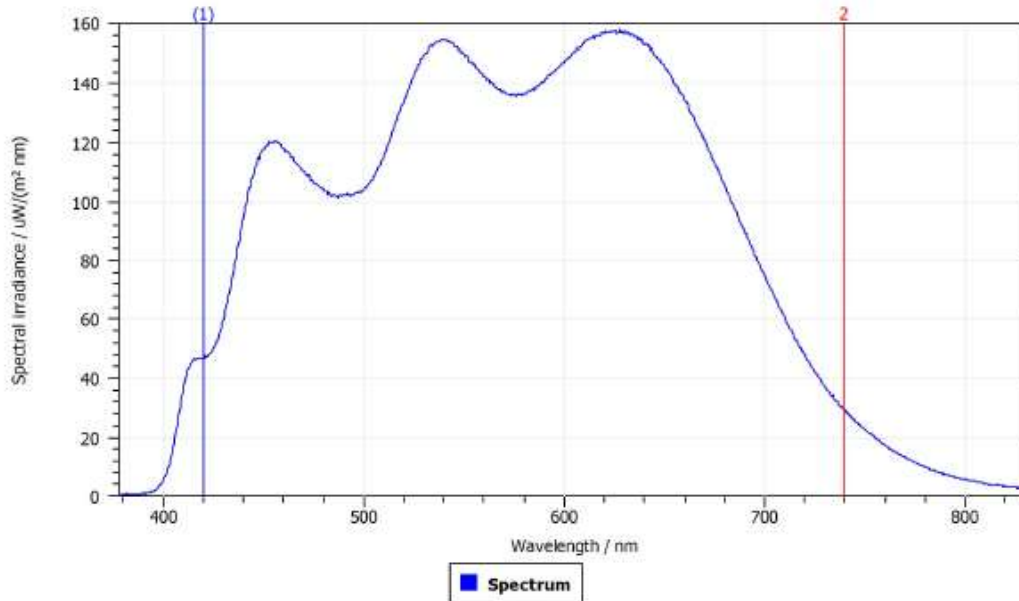
FIGURA 58.- Luminancia emitida de la luz del domo reflejada por una superficie blanca.

4.4.2 Caracterización espectral de la luminaria

Se comparan los resultados del LED con el espectro del domo en el cual se observa un cambio en la temperatura de color como en el índice de rendimiento de color a consecuencia de la interacción con la superficie no neutra de las paredes del domo.

Measurement Conditions

Analysis range: 378.2 - 831.9 nm
Integration time: 1000 ms
Averages: 1
Density filter: none
Signal Level: 47 % 14538 Counts



Results

Integrals

Illuminance 10.24 lx
Irradiance 38.6 mW/m²

Color Coordinates

x: 0.36642 u: 0.21675 u': 0.21675
y: 0.37458 v: 0.33236 v': 0.49855

Peak WL: 625.89 nm
Centroid WL: 577.34 nm
Dominant WL: 575.37 nm
Purity: 0.224
width50%: 261.55 nm
CCT: 4388 K
CRI: 97.2

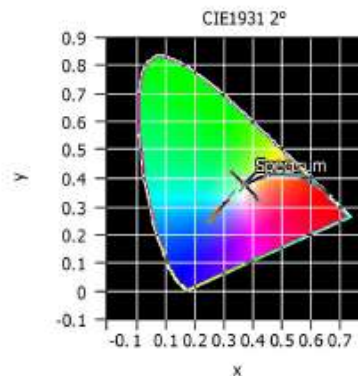


FIGURA 59.- Medición del espectro de la luminaria medida con un espectrofotómetro dentro del túnel fotométrico, dentro de la información que da el software se observa la iluminancia, irradiancia, coordenadas de color, temperatura de color e índice de rendimiento de color.

Al ser afectado el espectro de la fuente de luz, se afecta directamente la temperatura de color (CCT) y el índice de rendimiento de color (CRI), lo que

permite suponer una ligera variación en la medición de color para algunos colores orientados a la región azul del espacio de color.

4.5 Medición de color con SPOCC

4.5.1 Escala de grises

Una de las pruebas pertinentes de la medición del color está asociada a la luminosidad, por lo que se considera la escala de grises de la tabla ColorChecker ilustrada en la Figura 60 como asociación al rango dinámico de la cámara que es comparada con el colorímetro.

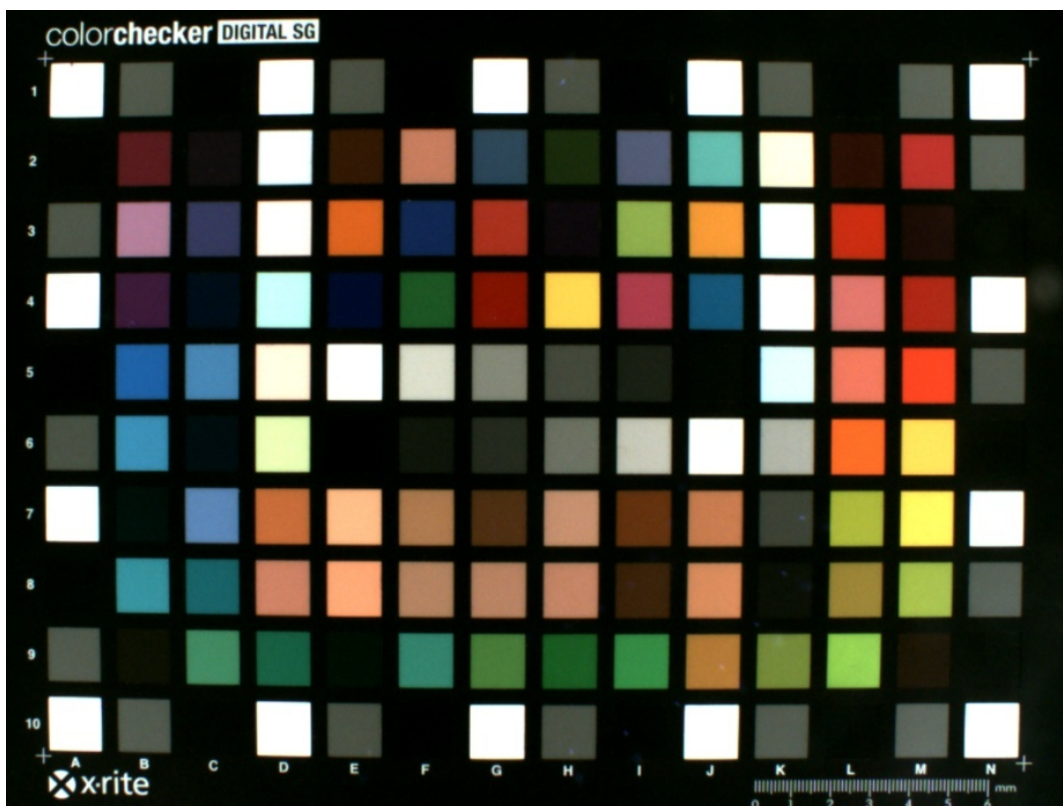


FIGURA 60.-Tabla ColorChecker utilizada, con filas enumeradas del 1 al 10 y columnas que van de la A a la N.

La primera comparación se realiza obteniendo los valores RGB de los parches del renglón 5 de las columnas E a la J de la tabla ColorChecker y comparándola con un RGB obtenido a partir de la medición del colorímetro utilizando una conversión considerando un sRGB (standard RGB).

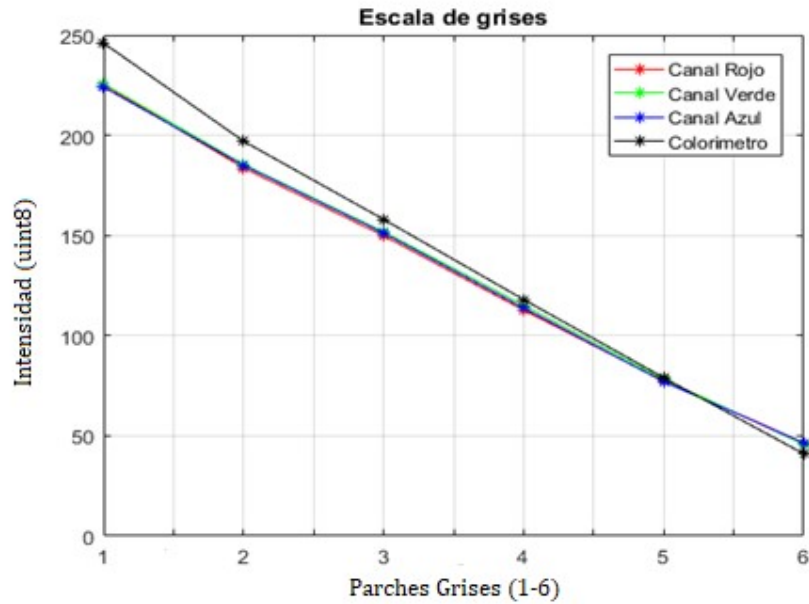


FIGURA 61.- Comparación de escala de grises de la tabla ColorChecker en los canales RGB de la cámara; representados de color rojo, verde y azul, mientras que las mediciones del colorímetro son representados de color negro.

En la Figura 61 se observa una relación de incremento lineal para los parches de tonalidades neutras para ambos sistemas. Por lo cual se trabaja con esta información y se utiliza las transformaciones de RGB al espacio de color CIE $L^*a^*b^*$ para realizar otra comparación.

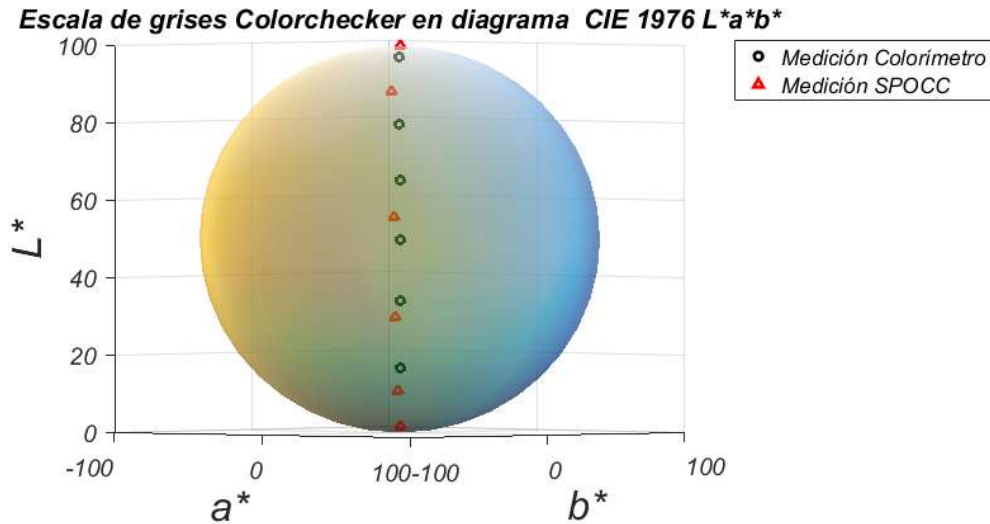


FIGURA 62.- Comparación de mediciones en colores neutros entre el colorímetro y el sistema SPOCC.

De la Figura 62, la diferencia de medición en los colores neutros se puede asociar directamente al rango dinámico de la cámara, ya que la medición con el colorímetro da como resultado valores asociados a una percepción relacionada al ojo humano y este a su vez tiene un mayor rango dinámico, por lo tanto la cámara tiene menor resolución entre las diferencias de intensidad.

4.5.2 Comparación de colores RGB y CMY

Otra prueba realizada consiste en la medición de la reproducción de color para el conjunto de colores RGB y otro para el CMY, que son ternas de colores usados generalmente como colores primarios en sistemas de reproducción de color. Los colores se encuentran ubicados en la tabla ColorChecker fila 4 columnas de la E a la J, las cuales se miden con ambos sistemas y son comparados a continuación.

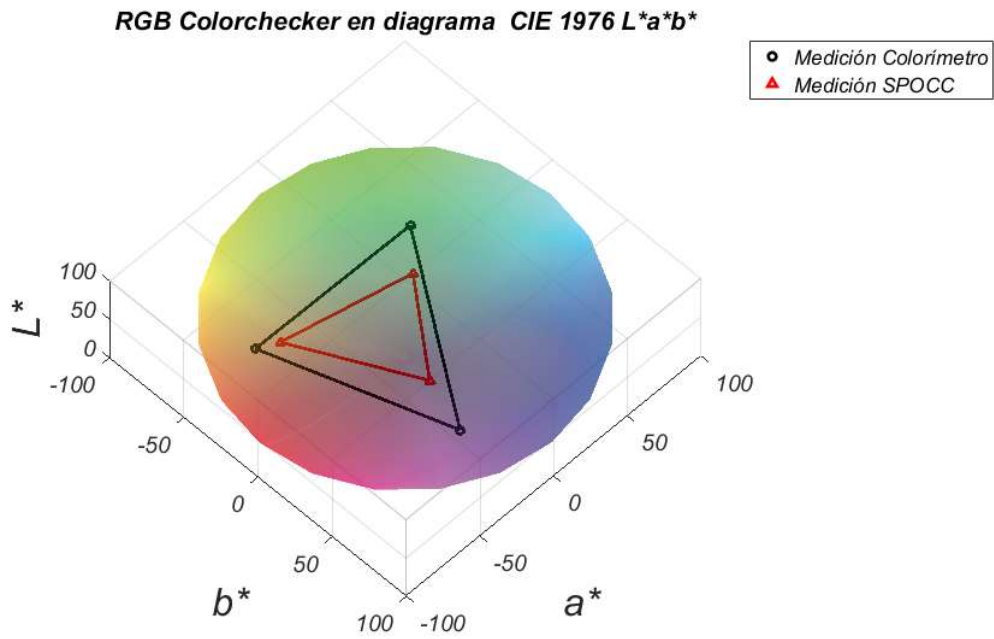


FIGURA 63.- Comparación de los colores RGB contenidos en la tabla ColorChecker.

En la Figura 63 se observa que el área contenida en el triángulo formado por los puntos RGB de la medición del SPOCC es menor al área del triángulo formado por el Colorímetro, con lo que se comprueba que la reproducción de color por la cámara es menor a la del ojo humano.

Repitiendo la prueba para la terna CMY, siendo ilustrada en la Figura 64:

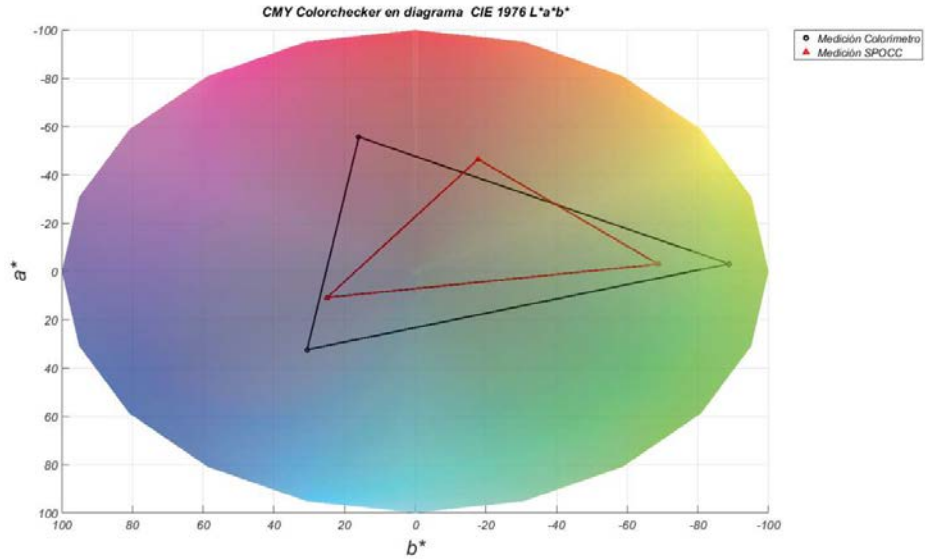


FIGURA 64.- Comparación de los colores CMY contenidos en la tabla ColorChecker.

Para obtener una aproximación del área de reproducción de color del sistema se considera como contorno la geometría formada alrededor de los colores RGB+CMY, por lo que cualquier color contenido dentro de dicha geometría será reproducible por el sistema.

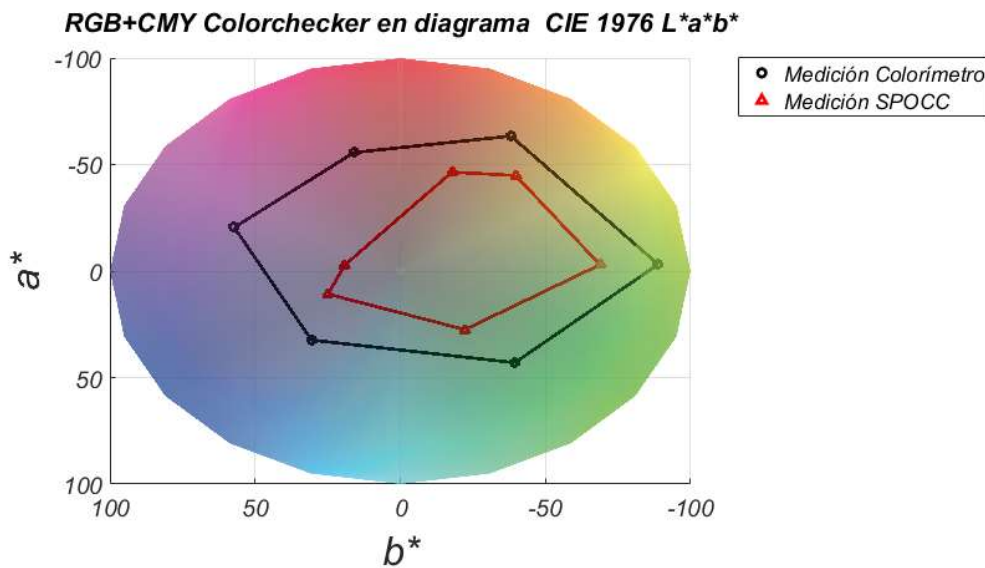


FIGURA 65.- Comparación de las mediciones de los colores RGB+CMY que permiten aproximar la reproducción de color de los sistemas.

Al observar la Figura 65, la comparación del área contenida dentro del Colorímetro a comparación de la contenida por el SPOCC da una idea de la diferencia de reproducción de color en ambos sistemas.

4.5.3 Comparación en HUE test

Al medir las fichas del HUE test con un colorímetro y compararlas con el SPOCC se aprecia una diferencia entre los valores medidos en cada uno. La tolerancia perceptual del color nos permite considerar estos resultados como aproximados.

La Figura 65 muestra las mediciones de color tomadas por el colorímetro en comparación con las mediciones realizadas a través del SPOCC, las mediciones son representadas en el diagrama de color CIE1931 como se observa en la Figura 66.

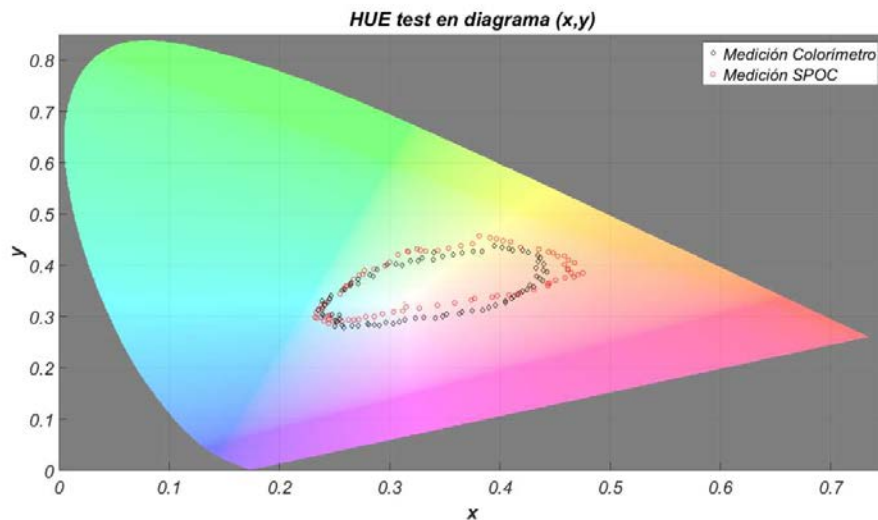


FIGURA 66.- Comparación de mediciones del HUE test en el diagrama CIE 1931(x, y)

Para considerar la luminosidad de las mediciones, los resultados de las mediciones de color del HUE test también son transformadas al espacio de color CIE L*a*b* y son mostrados en las Figuras 67 y 68.

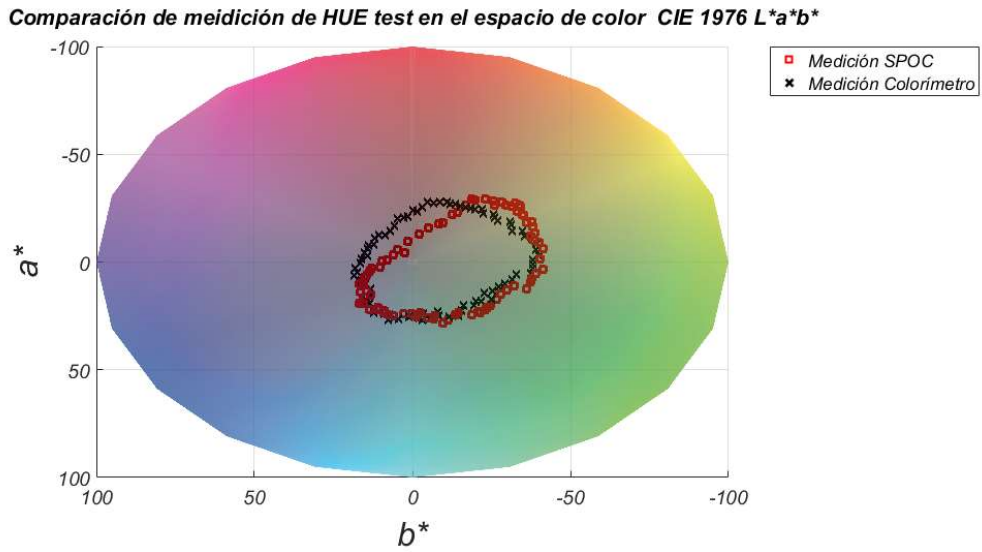


FIGURA 67.- Comparación de mediciones del HUE test en el espacio de color CIE 1976 L*a*b*.

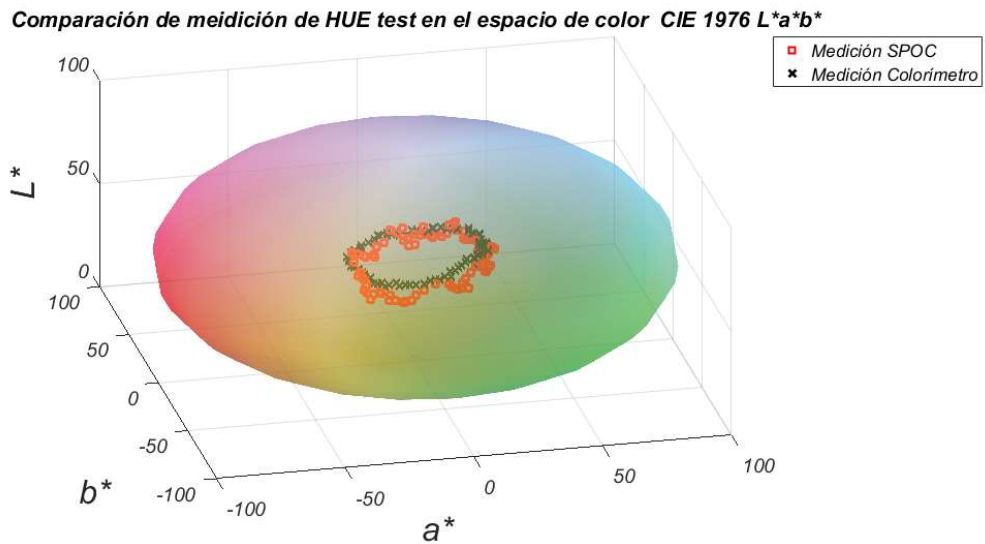


FIGURA 68.- Comparación de mediciones del HUE test en el espacio de color CIE 1976 L*a*b* con perspectiva para observar L*.

Debido a los colores que se pueden reproducir utilizando una matriz de filtro de color tipo Bayer y las variaciones de la recepción del espectro electromagnético en los tres canales RGB, el prototipo está enfocado para poder diferenciar tonalidades de color cercanas que permiten discriminarlas en variaciones de tonos.

Capítulo 5

5.1 Conclusiones

Se diseñó y construyó un prototipo portátil de bajo costo el cual permite comparar componentes de color de manera repetible debido a que mantiene las condiciones de iluminación evitando factores que pudieran afectar las mediciones como el sombreado por regiones, el brillo, la luz exterior, entre otros.

El tamaño del área efectiva fue menor a lo planteado debido al costo y tamaño total que resultaría hacer el prototipo para esas medidas, ya que por una parte se busca hacer un sistema portátil y al incrementar el tamaño del prototipo se pierde la portabilidad y por otro lado, al probar la prueba de concepto en un prototipo determinado permite suponer que a otras escalas el dispositivo siga funcionando correctamente.

Se encuentra satisfactorio el diseño propuesto para la luminaria ya que se mantienen las condiciones deseadas de iluminación, evitando interfaces ópticas como prismas o películas delgadas utilizadas en otras técnicas, ya que al agregar interfaces ópticas; se agregan procesos de caracterización espectral, se aumenta el peso del prototipo y se pierde robustez en el sistema.

La caracterización espacial de la luminaria permite asegurar que las condiciones de iluminación, dentro del área eficiente, serán adecuadas en cualquier situación acorde a las necesidades de la operación.

El diseño propuesto de la luminaria permite una iluminación uniforme que a su vez bloquea la luz exterior evitando interferencia que pudiera afectar el color de un objeto pudiendo invalidar la correcta medición de la muestra.

Al comparar los colores reales de objetos medidos con un colorímetro y los resultados del SPOCC se encuentran diferencias de manera directa entre ellas, pero mantienen una diferencia de color (ΔE) de forma similar, detectando así variaciones de color entre muestras que podrían resultar iguales a percepción de la vista.

Las mediciones en la región de los colores violetas, magentas y la región bajo el blanco de referencia en el plano CIE1931 presentan una diferencia significativa al compararla con las mediciones reales, pero se logra capturar una diferencia entre tonalidades cercanas dentro de esta región.

El prototipo se probó para superficies color mate, y superficies brillantes, capturando el color que proporciona la reflexión de la luz al interactuar con la superficie del objeto, en dichas comparaciones se observó que el acabado de la superficie no afecta en la funcionalidad del sistema.

Al utilizar LEDs de alto rendimiento de color, mayor incluso al de lámparas fluorescentes utilizadas en cabinas de iluminación, permite la discriminación de diferencias de color con una mayor precisión obteniendo a su vez las ventajas de utilizar la tecnología LED, por ejemplo el tamaño, el peso, el acceso a geometrías complicadas, horas de vida, estabilidad luminosa, entre otros.

Para la comparación de color utilizando el sistema SPOCC es necesario considerar el área de la muestra, debido que si el área es menor que el campo de visión se recomienda utilizar el mismo fondo, preferentemente neutro para evitar variaciones en la comparación del color de las muestras.

Al comparar muestras de diferentes tamaños, es recomendable utilizar un fondo neutro, preferentemente negro para evitar contribuciones tanto colorimétricas como lumínicas, las cuales modificarán la medición en cada muestra por lo que la comparación no sería la más acertada.

Se considera que el sistema es portátil ya que puede utilizarse en cualquier área de trabajo sin necesidad de una previa instalación ni modificación del entorno.

5.2 Trabajo Futuro

Como trabajo futuro se plantean las siguientes mejoras para el prototipo:

- Implementar la interfaz hombre maquina. Para lograr una interfaz amigable, con una serie de funciones que permitan al usuario obtener una mayor información de las mediciones realizadas y una fácil obtención de los datos capturados.
- Se plantea utilizar un sistema de adquisición de imagen más barato tratando de conservar los alcances en medición de color. Planteando la opción de utilizar la cámara de la Raspberry PI, caracterizándola y plantear mejoras para una mejor captación del color.

- Caracterizar la relación de luminosidad de la luminaria en relación a la captura de la imagen, que permita realizar un control de intensidad luminosa en base a la saturación o niveles negros de la cámara tomando esta información en cuenta para las coordenadas de color resultantes.
- Recubrir las paredes internas del domo utilizando alguna pintura blanca totalmente neutral permitiendo la conservación total del espectro de emisión de los LEDs aproximándose al D50, esto ayudando a mejorar la calidad de iluminación del sistema.

Referencias Bibliográficas

- OriginLab Technical Support. (2018). *OriginLab Corporation*. Retrieved 2018 from <https://www.originlab.com/fileexchange/details.aspx?fid=168>
- Bayer, B. C. (1976). *Patent No. US3971065A*. Estados Unidos.
- Burch, W. S. (1958). N. P. L. Colour-matching Investigation: Final Report . *International Journal of Optics* .
- Commission International Electrotechnical. (1998). *Technical CCommittee NO. 100: Audio, Video and Multimedia Systems and Equipment*.
- Fairchild, M. D. (2013). *Color Appearance Models*. John Wiley & Sons.
- Fairman, H., M, H., & H, H. (1997). How the CIE 1931 color-matching functions were derived from the Wright-Guild data. *Color Research and Application* , 11-23.
- Farnsworth, D. (1943). The Farnsworth-Munsell 100-Hue and Dichotomous Tests for Color Vision*. *JOURNAL OF THE OPTICAL SOCIETY OF AMERICA* , 568-578.
- Gevers, T., Gijzenij, A., Weijer, J. v., & Geusebroek, J.-M. (2012). *Color in computer vision: Fundamentals and Applications* . New Jersey: John Wiley & Sons.
- Guild, J. (1932). The Colorimetric Propieties of the spectrum. *The Royal Society of London* , 149-187.
- Hornberg, A. (2006). *Handbook of Machine Vision*. WILEY-VCH Verlag GmbH.
- Horvath, M., & Lipka, C. (2018, Agosto 12). *Wikimedia Commons*. Retrieved 2018 from <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=57306754>
- Hunt, R. 6. (2004). *The Reproduction of Colour*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Hunt, R., & M.R., P. (2011). *Measuring Colour*. Jhon Wiley & Sons .
- Instrument Systems. *Integrating Spheres - luminous flux measurement for LEDs and lamps*.
- Jee, S., Song, K. S., & Kang, M. G. (2018). Sensor, Sensitivity and Resolution Improvement in RGBW Color Filter Array. *Sensors* .
- Kitsinelis, & Spiros. (2011). *Light Sources Technologies and Applications*. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis.
- Martínez Verdú, F. M. (2001). *Diseño de un Colorímero Triestímulo a partir de una cámara CCD-RGB*. Terrassa.
- Martinez, F., Pujol, J., & Vilaseca, M. (2004). Comparison of the Primary Spectra and Color Triangles Associated to Several Digital Cameras. *The Second European Conference on Colour Graphics, Imaging and Vision* .

- Monno, Y., Kikuchi, S., Tanaka, M., & Okutomi, M. (2015). A Practical One-Shot Multispectral Imaging System. *IEEE TRANSACTIONS ON IMAGE PROCESSING* .
- Ohta, N. (2018). Correspondence Between CIELAB and CIELUV Color Differences. *Color research and application* .
- Palmer, D. (1981). Nonadditivity in color matches with four instrumental stimuli. *The Optical Society of America* , 966-969.
- Palmer, J., & Grant, B. (2009). *The art of Radiometry* . Cupertino, California.
- Pearson, M., & Yule, A. (1973). Transformation of color Mixture Functions Without Negative Portions . *Journal of Color & Apperance* , 30-35.
- Roberts, A. F. (1998). *Colour Space Conversions*.
- Ryer, A. (1998). *Light Measurement Handbook*.
- Shanda, J. (2007). *Colorimetry: Understanding the CIE system*. New York: Jhon Wiley & Sons.
- The Raspberry Pi Foundation. (n.d.). *Raspberry Pi*. Retrieved 10 23, 2018 from <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>
- Wright, W. (1928). A re-determination of the trichromatic coeficients of the spectral colours. *Transactions of the Optical Society* 30 , 141-164.
- Yuji International Co., Ltd. (2017). *YUJILED[®] High CRI LED Webstore*. Retrieved 2018 from <https://store.yujiintl.com/collections/frontpage/products/vtc-sereis-d50-5000k-high-cri-led-smd-5730-100pcs>