

Universidad Autónoma de Baja California

Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño



Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería



Sistema de iluminación LED para la captura de imágenes digitales

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de

MAESTRO EN INGENIERÍA

Presenta

CARLOS ADOLFO VÁSQUEZ ROCHÍN

Ensenada, Baja California, agosto del 2020.

Universidad Autónoma de Baja California
Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño

Sistema de iluminación LED para la captura de imágenes digitales

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de

MAESTRO EN INGENIERÍA

Presenta

Carlos Adolfo Vásquez Rochín

Aprobada por:



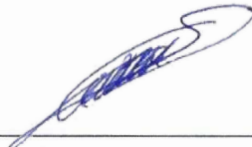
Dr. Manuel Moisés Miranda Velasco
Director de Tesis



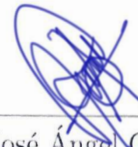
Dr. Miguel Enrique Martínez Rosas
Miembro del Comité



Dr. Humberto Cervantes de Ávila
Miembro del Comité



M.C. Carlos Gómez Agis
Miembro del Comité



Dr. José Ángel González Fraga
Miembro del Comité

Ensenada, Baja California, Agosto del 2020.

Resumen de la tesis de **Carlos Adolfo Vásquez Rochín**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN INGENIERÍA del programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería (MYDCI) de la UABC. Ensenada Baja California, México, agosto del 2020.

Sistema de iluminación LED para la captura de imágenes digitales

Resumen Aprobado por:



Dr. Manuel Moisés Miranda Velasco
Director de Tesis

En este trabajo se presenta el diseño e implementación de la propuesta de rediseño de la etapa de iluminación del Sistema de Adquisición de Imágenes (SAI-v5). Se describe de forma amplia la metodología requerida para obtener un dispositivo de iluminación de fondo regulable, con las características necesarias para la obtención de capturas digitales donde se resalte de manera definida los bordes del objeto de estudio. Se establecen métricas con las cuales se realiza una comparación cuantitativa entre el rendimiento del SAI-v5 y el prototipo desarrollado en cuestiones de uniformidad e iluminancia. De manera adicional, se desarrolló una interfaz gráfica de usuario (GUI) con base a un lenguaje de programación de código abierto, que permite la supervisión y manejo del sistema de iluminación de manera remota a través de la comunicación serie entre el módulo de regulación del sistema y una computadora personal.

Palabras Clave: *Sistema de Adquisición de Imágenes, HB LED, Backlight, Índice U, CV(RMSE)*

Dedicatoria

A mis padres **Ruth** y **Adolfo**, por todo el apoyo y sabiduría que me han proporcionado a través de los años, el cual me ha permitido mejorar día a día tanto de manera personal como de forma académica.

A mis hermanos **Daniel**, **Gustavo** y **Edith**, por los consejos, paciencia y, sobre todo, el soporte que me han concedido desde temprana edad.

A mi novia **Marineé**, por toda la paciencia, apoyo y amor incondicional que me ha brindado durante esta etapa de crecimiento profesional.

Agradecimientos

Quiero expresar mi agradecimiento:

A mi director de tesis **Dr. Manuel Moisés Miranda Velasco**. Su perseverancia, dirección y sobre todo su paciencia fueron factores críticos durante el desarrollo y culminación de este trabajo de investigación.

A mis sinodales **Dr. Miguel Enrique Martínez Rosas**, **Dr. Humberto Cervantes de Ávila**, **M.C. Carlos Gómez Agis** y **Dr. José Ángel González Fraga** por sus consejos, críticas y apoyo durante el desarrollo de esta tesis.

A mis compañeros y amigos, que hicieron de este trabajo de investigación una experiencia agradable, pero sobre todo, enriquecedora a nivel personal y académica.

A todo el personal docente que se encargó de impartir los cursos que contribuyeron al desarrollo de este trabajo de investigación.

Al personal de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) de la Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño, por su atención, amabilidad y disposición para ayudarme.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico brindado y a la Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) por las facilidades otorgadas para la realización de éste trabajo.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo general	4
1.2.2. Objetivos específicos	4
1.3. Justificación	4
2. Antecedentes	6
2.1. Visión artificial	6
2.2. Sistemas de adquisición de imágenes	7
2.2.1. Técnicas de iluminación	9
2.3. Fuentes de iluminación	12
2.4. Uniformidad de la iluminación	15
2.5. Manejo de tecnología LED	20
2.5.1. Características I-V del LED	21
2.5.2. Aspectos de manejo térmico en LEDs	23
2.6. Técnicas de regulación de corriente	24
2.6.1. Reguladores lineales	25
2.6.2. Convertidores de Potencia Conmutados (CPCM)	26
3. Desarrollo	30
3.1. Selección de tecnología LED	30
3.1.1. Manejo de temperatura en el sistema	32
3.2. Comparación y selección de Reguladores de corriente	35
3.3. Propuesta de diseño mecánico	42
3.4. Propuesta de diseño del módulo de control	47
3.4.1. Interfaz para uso con computadora	50
3.5. Algoritmo de regulación de corriente (i_L)	51

4. Resultados	56
4.1. Integración del equipo	56
4.2. Caracterización del prototipo	58
4.2.1. Iluminancia de salida del sistema	59
4.2.2. Análisis de uniformidad	63
5. Conclusiones generales	76
5.1. Discusiones	77
5.2. Conclusiones	77
5.3. Trabajo a futuro	79

Índice de figuras

1.1. Sistema de Adquisición de Imágenes (SAI)-v1.	3
1.2. Sistema de Adquisición de Imágenes (SAI)-v5.	3
2.1. Esquema básico del esquema básico del proceso de PDI en los trabajos de CACIE.	8
2.2. Técnicas de iluminación industriales que se emplean con mayor frecuencia en la actualidad.	10
2.3. Técnicas de iluminación directa	10
2.4. Configuración Iluminación de fondo.	11
2.5. Configuración Iluminación estructurada (<i>Structured</i>).	12
2.6. Espectro de diferentes fuentes de iluminación. (a) Lámpara de xenón, (b) Lámpara incandescente, (c) Lámpara fluorescente, (d) Lámpara de halógeno, (e) Lámpara LED (Luz fría), (f) Lámpara LED (Luz cálida), (g) Espectro correspondiente a la sensibilidad del ojo humano, (h) Superposición del espectro AM 1.5G con la respuesta espectral de distintos dispositivos fotovoltaicos.	15
2.7. Esquema de posicionamiento para asegurar máxima uniformidad posible empleando LEDs como fuente de iluminación. a) Representación del esquema de iluminación de fondo con un arreglo lineal (1×2) de LEDs. b) Gráfico donde se describe la distribución de irradiancia de cada una de las fuentes del esquema presentado en a) (curvas naranjas), y la contribución del nivel de irradiancia total que se obtiene al respetar la restricción de diseño d_{max} (curva azul). c) Gráfico describiendo el caso donde se establece una separación LED a LED mayor a d_{max}	17
2.8. Rendimiento de iluminación con LEDs tradicionales sobre plano objetivo con base a simulación de trazado de rayos [17]. (a) $DHR = 1$, $U = 0,902$, $CV(RMSE) = 0,0167$; (b) $DHR = 2$, $U = 0,446$, $CV(RMSE) = 0,2201$; (a) $DHR = 3$, $U = 0,155$, $CV(RMSE) = 0,5688$	20

2.9. Circuito eléctrico representativo del modelo no ideal considerando juntura p-n con el efecto de la resistencia interna, y representación gráfica del efecto térmico en las características I-V del diodo, donde V_{f_H} representa el nivel de V_f cuando la temperatura interna del LED es mucho mayor a la recomendada por el fabricante, y V_{f_C} presenta el caso contrario. . . .	23
2.10. Esquema básico de los múltiples factores que producen variaciones en la intensidad lumínica de un LED.	24
2.11. Regulación de corriente por medio de resistencia eléctrica.	25
2.12. Esquema de regulación lineal de corriente.	26
2.13. Construcción básica de CPCM tipo BUCK para regulación de corriente.	27
3.1. Modelo de LEDs que se implementaron en el rediseño del módulo de iluminación, correspondientes a los LEDs de alta potencia ilustrados en la tabla 3.1.	32
3.2. Visualización del montaje típico de un HB LED y su representación a partir de una red de resistencias térmicas [31].	33
3.3. a) Representación de las dimensiones del disipador original que se adquirió, b) Proyección de las modificaciones para hacer uso del disipador como base de los HB LEDs, con las respectivas perforaciones para el ensamble representadas por los círculos oscuros.	34
3.4. Esquema del proceso de medición empleado para realizar la tarea de monitoreo de T_{sp} en el sistema de iluminación.	35
3.5. Dispositivos de regulación de corriente comparados. a) Regulador lineal basado en TLV2372 y TIP31, b) CPCM 1A comercial (DLD-C100LW).	36
3.6. Equipo empleado en la medición de cada uno de las técnicas de regulación de corriente. a) Fuente de alimentación programable PST-3202 (GW INSTEK), b) Osciloscopio DS1064B (RIGOL), c) Módulo Amplificador AM503B (TEKTRONIX), d) Punta de corriente A6302 (TEKTRONIX).	37
3.7. Diagrama de las configuraciones empleadas para las mediciones de comparación entre ambos métodos de regulación de corriente. a) Método de regulación lineal, b) Método de regulación basado en PWM.	38
3.8. (a) Relación entre voltaje de ajuste (V_{DIMM}) y corriente de salida (I_L) por medio de regulación lineal. (b) Error entre mediciones del método de regulación al polinomio calculado en base a un ajuste de curvas.	40
3.9. (a) Relación entre voltaje de ajuste (V_{DIMM}) y corriente de salida (I_L) por medio de PWM. (b) Error entre mediciones del método de regulación al polinomio calculado en base a un ajuste de curvas.	41

3.10. Esquema general de la configuración interna de la etapa de iluminación del SAI-v5.	42
3.11. Representación gráfica del área que se logra iluminar con el SAI-v5 y su comparación con respecto al área de interés en las capturas digitales. . .	43
3.12. Diseño de marcos elaborados con foamboard como primera aproximación experimental al rediseño del módulo de iluminación.	44
3.13. Esquema 2D del diseño propuesto para el montaje de HB LEDs. a) Dimensiones de las paredes del sistema, y b) Dimensiones del sistema ensamblado y panel difusor (vista superior).	45
3.14. Ensamble mecánico del módulo de iluminación propuesto. a) Etapas de ensamble del diseño propuesto. b) Figura representativa del aspecto del módulo de iluminación ensamblado.	46
3.15. Descripción esquemática de (a) contenido interno del módulo de control propuesto y (b) interfaz manual presente en el panel frontal. Basado en el microcontrolador Teensy LC y el sensor de corriente ACS70331. . . .	48
3.16. Descripción esquemática de puertos I/O del módulo de control. (a) Entrada de ventilación, conector de alimentación principal e interruptor de alimentación eléctrica general. (b) Salida de ventilación y puertos de comunicación y regulación.	49
3.17. GUI para el control de forma remota del sistema de iluminación.	50
3.18. Diagrama de flujo correspondiente al algoritmo para regular i_L en base a V_{ctrl}	52
3.19. Continuación del diagrama de flujo correspondiente a la figura 3.18. . .	53
3.20. Continuación del diagrama de flujo correspondiente a la figura 3.19. . .	54
4.1. Captura del sistema de iluminación en funcionamiento. 1) Panel de iluminación de fondo basado en HB LEDs. 2) Módulo de interconexión entre panel de iluminación y módulo de control. 3) Módulo para regular intensidad en panel de iluminación. 4) Interfaz de computadora para monitorizar y regular la intensidad lumínica del sistema de forma remota. . .	57
4.2. (a) Esquema conexión entre módulos y computadora personal: 1) Conexión establecida entre módulo de electrónica relacionada al sensor MAX31855 y cableado de alimentación para HB LEDs por medio de un conector DIN 45329, 2) Conexión entre módulo de regulación y computadora personal a través de puertos USB tipo A. (b) Contenido interno en módulos empleados en el sistema de iluminación: 3) Sensor de temperatura MAX31855, 4) Sensor de corriente ACS70331, 5) Electrónica de regulación de corriente y 6) Etapa de conversión CA/CD y ventilación. . .	58

4.3.	Esquema representativo de los puntos donde se realizaron mediciones de iluminancia, donde (a) diseño propuesto, (b) segmento de interés en SAI-v5. Las figuras rectangulares rojas representan la ubicación del sensor TSL2561 sobre cada una de las superficies a 1cm de distancia.	59
4.4.	Gráfica del promedio de las mediciones realizadas en cinco diferentes puntos de la superficie iluminada por el diseño propuesto.	61
4.5.	Gráficas correspondientes al cálculo de polinomio de aproximación de lux con base a una determinada corriente en la carga. (a) Relación lux de salida - corriente en carga, (b) Error absoluto entre la media de las mediciones de lux de salida y el ajuste de curvas.	62
4.6.	Representación gráfica del área iluminada por el SAI-v5 (área verde) y las regiones de interés en las que se basó el diseño del panel de iluminación (área amarilla y azul).	64
4.7.	Representación gráfica de la distribución de iluminación en el panel difusor del SAI-v5. (a) Gráfico 3D de la distribución en el área iluminada, (b) Histograma del gráfico en (a) en el que se muestra la distribución de los niveles de intensidad presentes en la imagen analizada.	66
4.8.	Representación gráfica de la distribución de iluminación en el área de captura de interés del SAI-v5. a) Gráfico 3D de la distribución en el área iluminada, (b) Histograma del gráfico en (a) en el que se muestra la distribución de los niveles de intensidad presentes en la imagen analizada.	67
4.9.	Representación gráfica de la distribución en el área iluminada por el prototipo desarrollado al 30 % del nivel de iluminación. (a) Representación 3D de la distribución de intensidades detectadas sobre superficie iluminada, (b) Histograma del gráfico en (a) en el que se muestra la distribución de los niveles de intensidad presentes en la imagen analizada.	68
4.10.	Representación gráfica de la distribución en el área iluminada por el prototipo desarrollado al 70 % del nivel de iluminación. (a) Representación 3D de la distribución de intensidades detectadas sobre superficie iluminada, (b) Histograma del gráfico en (a) en el que se muestra la distribución de los niveles de intensidad presentes en la imagen analizada.	69
4.11.	Representación gráfica de la distribución en el área iluminada por el prototipo desarrollado al 100 % del nivel de iluminación. (a) Representación 3D de la distribución de intensidades detectadas sobre superficie iluminada, (b) Histograma del gráfico en (a) en el que se muestra la distribución de los niveles de intensidad presentes en la imagen analizada.	70

4.12. Representación gráfica de la distribución en región central del área iluminada por el prototipo desarrollado al 30 % del nivel de iluminación. (a) Representación 3D de la distribución de intensidades detectadas sobre superficie iluminada, (b) Histograma del gráfico en (a) en el que se muestra la distribución de los niveles de intensidad presentes en la imagen analizada.	71
4.13. Representación gráfica de la distribución en región central del área iluminada por el prototipo desarrollado al 70 % del nivel de iluminación. (a) Representación 3D de la distribución de intensidades detectadas sobre superficie iluminada, (b) Histograma del gráfico en (a) en el que se muestra la distribución de los niveles de intensidad presentes en la imagen analizada.	72
4.14. Representación gráfica de la distribución en región central del área iluminada por el prototipo desarrollado al 100 % del nivel de iluminación. (a) Representación 3D de la distribución de intensidades detectadas sobre superficie iluminada, (b) Histograma del gráfico en (a) en el que se muestra la distribución de los niveles de intensidad presentes en la imagen analizada.	73

Índice de tablas

2.1.	Eficiencia de diferentes fuentes de iluminación.	14
2.2.	Comparación entre las diferentes técnicas de regulación estudiadas. . .	29
3.1.	Comparativa entre los tipos de encapsulados para LED que se usan con mayor frecuencia en la industria.	31
4.1.	Resultado de las mediciones de iluminancia que se realizaron en cada uno de los puntos de interés del prototipo desarrollado, tal y como se establece en la figura 4.3(a).	60
4.2.	Resultado de las mediciones de iluminancia que se realizaron en cada uno de los puntos de interés del SAI-v5, tal y como se establece en la figura 4.3(b).	63
4.3.	Comparativa de nivel de uniformidad por sistema y región analizada. .	75

Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se realiza una descripción general del trabajo relacionado al rediseño de un sistema de iluminación tipo backlight (iluminación de fondo), basado en tecnología LED para su aplicación en tareas relacionadas al Procesamiento Digital de Imágenes (PDI), p. ej. la detección de bordes, la cual es una de las líneas investigación de interés del Cuerpo Académico de Comunicaciones e Instrumentación Electrónica (CACIE) perteneciente a la Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño (FIAD) de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC). En el trabajo de investigación propuesto se realiza un análisis de las características de iluminación requeridas durante el preprocesado de una imagen digital y a partir de ellas se construye un equipo de iluminación que permita realzar los rasgos de interés del objeto de estudio, considerando y compensando las características tanto eléctricas como ópticas del Sistema de Adquisición de Imágenes (SAI) [1] que se utiliza actualmente en las actividades de investigación de dicho cuerpo académico.

1.1. Planteamiento del problema

A través de los años, la industria ha implementado sistemas optoelectrónicos derivados del área de Visión Artificial (VA), para realizar tareas críticas tanto de inspección como de medición, en los cuales, resulta esencial que dichas mediciones sean precisas y reproducibles, debido a que cualquier variación, ya sea interna o externa al sistema, pueden producir discrepancias entre los resultados esperados y los que nos proporciona dicho sistema.

Dado que en un sistema basado en VA, el punto de interés es una imagen digital del objeto a evaluar y no el objeto *per se*, la primera etapa que toma importancia en el proceso general es la selección del sistema de iluminación, el cual dependerá de la

aplicación deseada, de esta forma se asegura que el dispositivo de captura entregue una imagen con las características necesarias para el análisis requerido en la aplicación. Además de esto, la manera en que la luz interactúa con el objeto de estudio también juega un factor importante en el realce de los diferentes detalles que la toma fotográfica es capaz de proporcionar, lo que ha dado lugar a diversas técnicas tales como la iluminación de fondo, iluminación *Dark field* (Campo Oscuro) o *Bright field* (Campo Brillante), por mencionar algunas. Otro factor a considerar en este aspecto, es el tipo de fuente de iluminación que la aplicación requiere. Existen diversos tipos de fuentes de iluminación y todas cuentan con diferentes características (p. ej., tipo de alimentación eléctrica, patrón de radiación y espectro de emisión, entre otras). Entre las más populares se encuentran las lámparas de filamento incandescentes, las lámparas fluorescentes y aquellas basadas en tecnología LED, sin embargo, esta última categoría ha tomado mayor presencia como la fuente de iluminación en aplicaciones industriales, debido principalmente a su versatilidad de configuración, pero sobre todo a su facilidad para controlar la intensidad lumínica deseada.

Distintos trabajos de investigación dentro del CACIE, donde se desarrollan herramientas (o algoritmos computacionales) para PDI, han hecho uso de diversas configuraciones en el ensamble del equipo para la adquisición de escenas 2D particulares. La estructura base ha pasado por diversas revisiones debido a las necesidades de otros trabajos de investigación que se han desarrollado anteriormente [1, 2].

Como reporta Martínez en su trabajo [1], el SAI actualmente se encuentra en su quinta generación. En un principio (véase figura 1.1), se contaba con una configuración sencilla que ofrecía una distancia focal constante y una zona de muestreo con condiciones lumínicas limitadas (sistema sin regulación de intensidad). Sin embargo, dicha configuración resultaba ser sensible a las perturbaciones en la zona de trabajo, además de que la zona de muestreo resultaba ser más amplia de lo necesario. Con la última versión del SAI (SAI-v5), se resolvieron de forma parcial las problemáticas que se mencionaron anteriormente, se agregó un control de encendido y apagado del sistema de iluminación, así como una cubierta de aislamiento y teniendo en consideración esta última característica, se empleó un método de acceso remoto por medio de una dirección IP¹ para establecer los tiempos de encendido de la iluminación y los parámetros deseados para la cámara en uso (véase figura 1.2).

¹Conjunto de números que identifica, de manera lógica y jerárquica, a una Interfaz en red (elemento de comunicación/conexión) de un dispositivo (computadora, tableta, portátil, teléfono inteligente) que utilice el protocolo o (*Internet Protocol*), que corresponde al nivel de red del modelo TCP/IP.

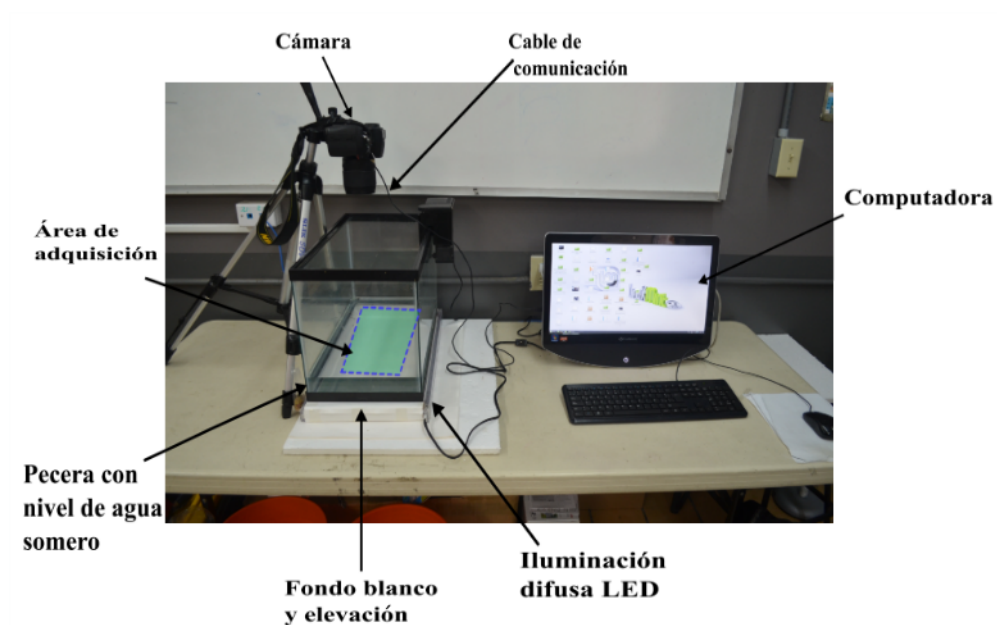


Figura 1.1.- Sistema de Adquisición de Imágenes (SAI)-v1.

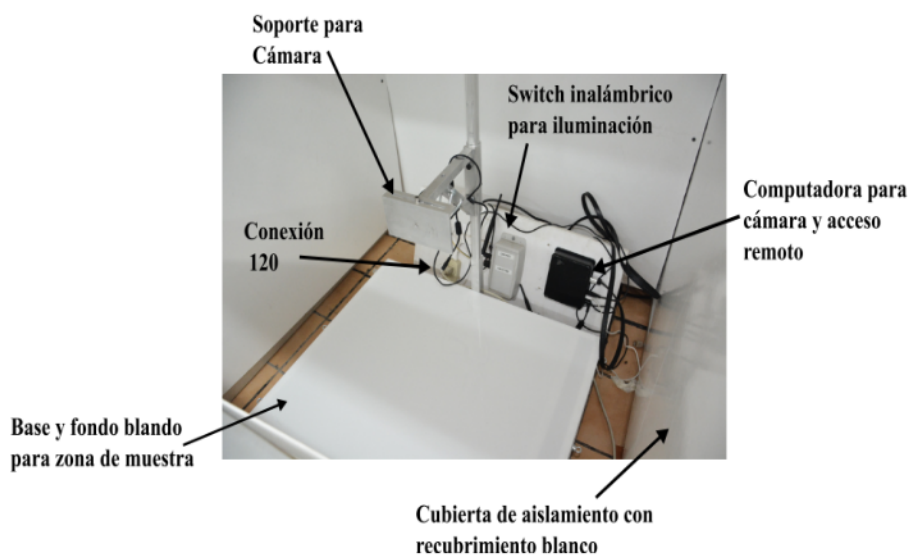


Figura 1.2.- Sistema de Adquisición de Imágenes (SAI)-v5.

En el trabajo de investigación propuesto en este documento se rediseña la etapa de iluminación del SAI-v5, considerando que dicho sistema no proporciona condiciones completamente favorables para las tomas fotográficas efectuadas con la técnica de iluminación de fondo, debido principalmente a que la fuente de iluminación en la que se basa dicho montaje son lámparas de tubo fluorescentes T8, los cuales se colocaron en una posición paralela y en contra al plano objetivo, generando una iluminación por medio de reflexión que limita la zona de muestreo a un área menor a la iluminada (debido a un nivel de uniformidad deficiente sobre el área total). Adicionalmente el sistema genera únicamente una potencia lumínica ya que esta no es regulable.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Desarrollar un sistema de iluminación con intensidad ajustable basado en tecnología LED para la etapa de preprocesado de una imagen digital.

1.2.2. Objetivos específicos

- Diseñar e implementar una celda básica de iluminación uniforme basada en tecnología LED.
- Implementar una etapa de potencia ajustable.
- Diseñar e implementar una etapa de ajuste de intensidad lumínica.
- Evaluar el funcionamiento del sistema de iluminación realizando experimentos con un objeto de estudio.

1.3. Justificación

En el mercado actual encontramos productos dedicados a tareas de iluminación relacionadas a VA, compañías como *STEMMER Imaging*, *Advanced Illumination*, *Smart Vision Lights*, entre otras, ofrecen productos con beneficios como certificaciones con respecto a un determinado *grado de protección IP*², distintos modos de operación (intermitente o continua), un listado de equipos con características fijas (p. ej. dimensiones

²Nivel de protección que ofrecen los materiales con los que se construye un dispositivo eléctrico o electrónico ante la entrada de materiales extraños (polvo o agua) en base a la norma establecida por la Comisión Electrotécnica Internacional (**IEC**, por sus siglas en inglés) 60529.

físicas, longitud de onda (λ) de emisión, CCT³), así como la opción de acoplar un control manual externo para regular la intensidad lumínica del equipo (usualmente, por medio de un potenciómetro). Por lo que esta clase de equipos satisfacen las necesidades para la mayoría de las aplicaciones en la industria en cuestión de robustez.

Estos equipos no resultan convenientes para los trabajos del CACEI relacionados al PDI puesto que son sistemas cerrados, lo que significa que tanto el material difusor como del tipo de LED (λ a la que emite) se vuelven inaccesibles y por ende no es posible el reemplazo de los mismos. Otro de los factores limitantes de los dispositivos comerciales es que la opción de regulación de corriente (o intensidad lumínica) se presenta como un aditamento *manual*, lo cual no permite su uso en procesos automáticos.

Por lo mencionado anteriormente, este trabajo propone un rediseño del SAI en el cual se mantienen algunas de las ventajas que ofrecen los sistemas comerciales (construcción con materiales resistentes e iluminación regulable), así como la adición de otras características, tales como: un diseño mecánico con dimensiones apropiadas a las muestras que se manejan en otras investigaciones del CACIE, asegurando la mayor uniformidad posible sobre la superficie iluminada y la alternativa de regular la intensidad lumínica, no solo de manera manual, sino a través de mandos enviados al microcontrolador por medio de comunicación serie. Esto permitirá al usuario final configurar, en distintas combinaciones, los parámetros del dispositivo de captura referentes al nivel de exposición, tales como la sensibilidad a la luz del sensor (ISO 12232:2019⁴), la velocidad de obturación o la apertura del lente, ajustándose a las necesidades de la aplicación.

³Temperatura de Color Correlacionada, **CCT** por sus siglas en inglés.

⁴Estándar que describe la relación entre la exposición y la luminosidad de la imagen de salida en un sistema de captura digital.

Capítulo 2

Antecedentes

En la actualidad, gran parte de los procesos industriales siguen dependiendo fuertemente de la habilidad del ser humano para analizar escenas visuales complejas. Con base en la versatilidad de la visión humana y al uso de diferentes técnicas como la implementación de distintas fuentes de iluminación, filtros de color o fluorescencia, por mencionar algunas, es posible obtener información detallada relacionada a un determinado objeto de interés, entre dicha información se encuentran características como: forma, color, acabado de la superficie, contaminación de la misma, etc. [3].

En una industria donde la demanda de múltiples procesos se centra en temas de inspección y evaluación de calidad en producciones en masa, las desventajas (o limitantes) inherentes a un sistema de inspección basado en visión humana, tales como la fatiga generada a lo largo de una extensa jornada de trabajo, malestares relacionados a la salud, distracciones, entre otros, no permite que se lleven a cabo las mediciones requeridas por los estándares de calidad contemporáneos. Debido a esto último, la industria actual realiza un esfuerzo constante para lograr una transición completa de forma que los procesos se realicen con base a sistemas de visión artificial dedicados a realizar tareas de análisis o inspección de manera eficiente, con bajas probabilidades de fallo y consumiendo el menor tiempo posible [3, 4].

2.1. Visión artificial

La visión artificial (VA), es el área encargada del análisis y diseño de sistemas opto-electromecánicos que pueden percibir sus alrededores al detectar patrones espacio-temporales de radiación electromagnética y procesar dicha información en una etapa posterior [3]. Distintos autores [3, 5] afirman que existe una suposición natural, entre las personas que no se especializan en el tema, a considerar los términos de Visión

Máquina (VM) y Visión por Computadora (VC) como equivalentes, dado que ambos hacen referencia al conjunto universo que representa la VA.

La VM requiere de la integración de diferentes áreas, tales como óptica, iluminación, manejo de dispositivos de captura, interfaces humano-computadora, por citar algunos, contando con un mayor enfoque a los procesos previos a la captura (acondicionamiento de la escena) de una imagen digital, por lo que no se trata simplemente del diseño de algoritmos especializados para el procesamiento de imágenes digitales [6]. Mientras que VC se enfoca en la extracción automática, análisis y comprensión de la información que se considere importante dentro de una sola imagen digital o grupo (secuencia) de la misma con base al desarrollo de algoritmia especializada.

La confusión entre estos términos se debe a que ambas subáreas de VA realizan tareas en las que se lleva a cabo el procesamiento y análisis de imágenes capturadas por medio de un equipo electrónico; se hace una generalización sin mencionar de forma concreta el uso de computadoras puesto que el procesamiento de las imágenes, en el caso de VM, no se restringe solamente al uso de una sola plataforma digital, considerando herramientas como la computación opto-electrónica, o redes digitales especializadas (FPGAs, por ejemplo) [3]. Lo que nos dice que VC comparte una amplia variedad de términos, conceptos, y algoritmia con VM, pero toman una serie aptitudes y prioridades diferentes.

En cada una de las áreas que se describen anteriormente existen componentes en los que ambas convergen, sin embargo, podemos argumentar que el SAI resulta esencial en ambos casos, pues se considera el punto de partida para iniciar con el análisis de la imagen. Con base a esto, se decidió que el trabajo de investigación se inclina por un esquema de VM, dado que lo que se propone es el rediseño de la etapa de iluminación del SAI-v5, que cumpla con las necesidades específicas de las actividades de investigación desarrolladas por CACIE. Dichas necesidades se ven reflejadas en aspectos relacionados al tipo de fuente de iluminación que se requiere, y a la configuración (o técnica) con la que se implemente esta misma.

2.2. Sistemas de adquisición de imágenes

Un sistema de adquisición de imágenes (SAI) representa la unidad dentro de un sistema de visión por computadora encargada de recolectar toda la información posible de forma óptica acerca de la escena que se pretende examinar. El objetivo principal de este sistema es el entregar una configuración sencilla que proporcione resultados reproducibles, permita reducir la complejidad de la etapa dedicada a la compensación de componentes no deseados (ruido) dentro de una imagen, como lo son la reflexión especular y las sombras generadas por la manera en que se configuró la iluminación.

Esto a través del uso de algoritmos invariantes a las condiciones lumínicas, lo que se traduce directamente como un sistema más económico, rápido y confiable [3].

Antes de realizar el proceso de captura de una imagen monocromática o a color por medio de un arreglo de cámaras, el usuario realiza un proceso de *acondicionamiento de iluminación*, en el cual se posiciona la fuente de iluminación de acuerdo a la técnica que realzará las características particulares del objeto de estudio con base a un nivel de intensidad lumínica. Esta etapa en específico resulta ser el punto de interés de la investigación, puesto que es donde se realizan los ajustes relacionados a la intensidad y tonos generados por la fuente luminosa del sistema.

La imagen digital que se adquiere por medio de la etapa que se describió anteriormente, es manipulada por una unidad de procesamiento después de pasar por un proceso de digitalización que proporciona una representación de la misma en forma *espacial* en configuración de matriz con una resolución de $m \times n$ elementos [7].

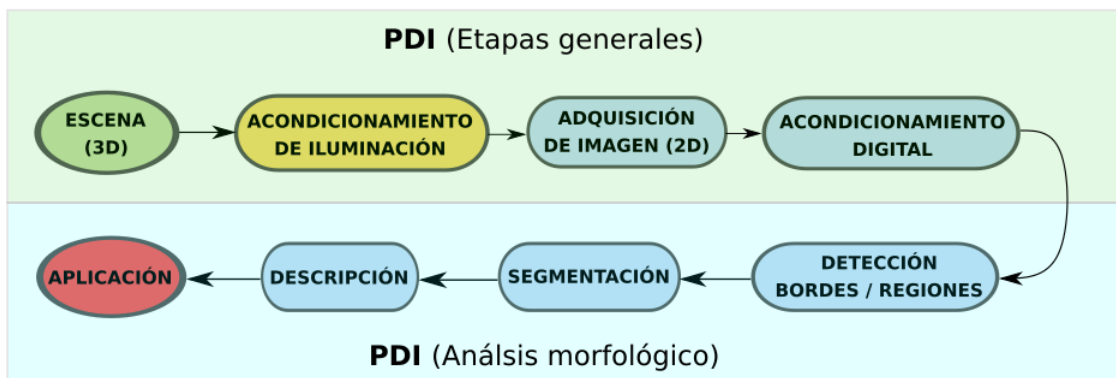


Figura 2.1.- Esquema básico del esquema básico del proceso de PDI en los trabajos de CACIE.

Dichas matrices representan la unidad base con la que se realizan distintos tipos de análisis dentro de las actividades de investigación de CACIE relacionadas a PDI, por ejemplo, una de las áreas que se trabaja en específico es la detección de bordes de un determinado objeto usando una técnica de iluminación tipo *backlight*, donde después de realizar la captura deseada de la escena y emplear una etapa de acondicionamiento, se llevan a cabo técnicas complementarias para realizar una *segmentación* de la imagen de estudio que entregue un grupo de características especiales de interés, como pueden ser el caso de los *bordes* o *regiones* dentro de una determinada área.

De forma posterior, se puede emplear diferentes algoritmos (procesos de descripción) para encontrar *propiedades* con las cuales se pueda recrear una escena tridimensional

que cumpla con los requerimientos de la aplicación [1], este proceso se describe de manera gráfica en la figura 2.1.

A nivel industrial se aplica la mayor parte de las etapas que se describen en el esquema anterior, con un mayor enfoque con la etapa de iluminación y del equipo fotográfico con el que se realice la captura, debido a la importancia que tienen las líneas de inspección del producto que se trabaje. El simple caso donde se maneja la verificación de calidad de un producto en movimiento, relaciona los tiempos de obturación del dispositivo de captura y el manejo de la tecnología de la fuente de iluminación seleccionada, puesto que a medida que se requiera incrementar la velocidad de obturación del dispositivo de captura, el sistema de iluminación tendrá que ser capaz de regular el nivel de intensidad lumínica para evitar casos de subexposición no deseados [4, 8].

En este contexto, resulta obvia la noción de que la iluminación presente en cualquier tarea rudimentaria, tiene un rol crítico en el análisis de un objeto (o grupo de los mismos) en las vertientes de VA, pues a diferencia del sistema de visión humano, los sistemas de procesamiento de imágenes basado en computadoras tienden a perder información si este parámetro no se trabaja de manera consistente en la escena de interés, por lo que son requeridos diferentes métodos de iluminación y visión especializados (uso de luz ultra-violeta, infrarroja, rayos x, etc.) para observar o *detectar* características del objeto de estudio que de otra no forma no sería posible obtener.

2.2.1. Técnicas de iluminación

Como se comentó dentro de la sección anterior, dependiendo de la característica que se pretenda estudiar, la técnica con la que se ilumine el objeto de estudio variará [5]. Un diagrama con las técnicas que se usan con mayor frecuencia en la industria se muestra a continuación:

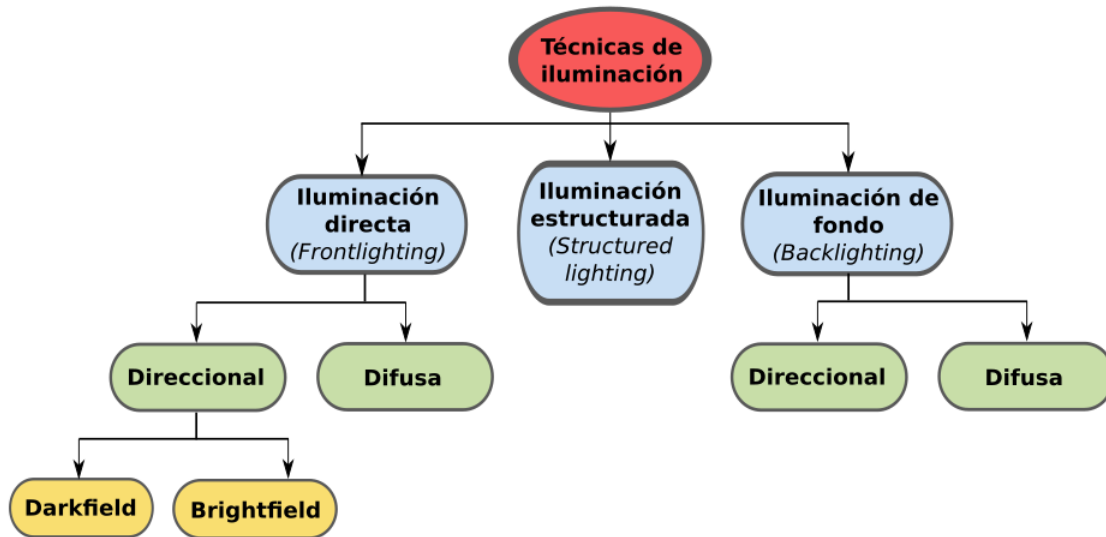


Figura 2.2.- Técnicas de iluminación industriales que se emplean con mayor frecuencia en la actualidad.

Iluminación directa (Frontlighting): este tipo de iluminación utiliza la fuente luminosa por encima del objeto de interés, se emplea cuando el acabado (o características) de la superficie del objeto es el punto de estudio. Algunos ejemplos de esta vertiente son las configuraciones direccionales *brightfield* y *darkfield*, las cuales se basan en usar una fuente de iluminación en ángulo con respecto a la cámara (véase figura 2.3).

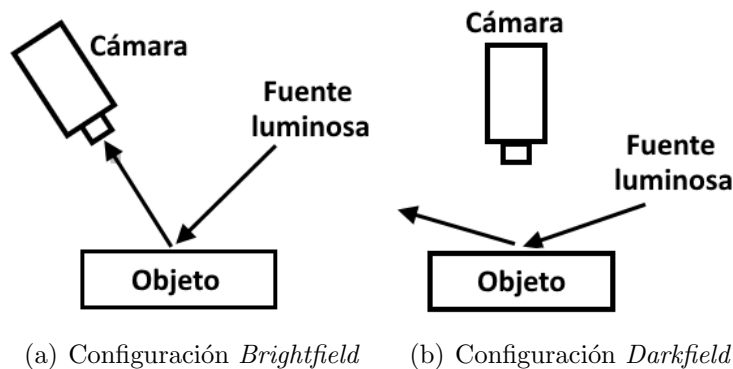


Figura 2.3.- Técnicas de iluminación directa

Iluminación de fondo (Backlighting): en esta configuración, la fuente luminosa se

encuentra detrás del objeto de interés. Produciendo una imagen de alto contraste, donde el fondo y los orificios que pudiese tener el objeto lucen bastante brillantes y el objeto de estudio luce totalmente oscuro y definido, como una sola silueta sobre un fondo brillante (tal como se muestra en la figura 2.4). El backlighting *direccional* resulta mejor para producir bordes definidos, mientras que el *difuso* se emplea para lograr un mejor contraste en la imagen.

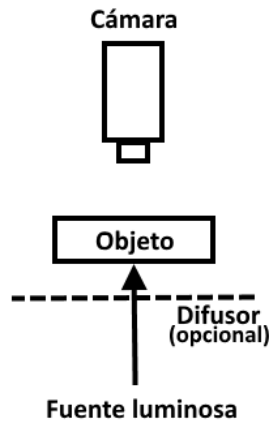


Figura 2.4.- Configuración Iluminación de fondo.

Iluminación estructurada (Structured lighting): la iluminación estructurada produce información 3D sobre el objeto. La idea es proyectar un patrón de luz estructurado, como rayas, sobre el objeto. La desviación de las rayas en cualquier punto indica la altura del objeto en ese punto. Cuando no hay ningún objeto presente, las rayas son completamente rectas (véase figura 2.5). A medida que aumenta la altura del objeto sobre el que se proyectan las franjas, también lo hace la desviación de las franjas [6].

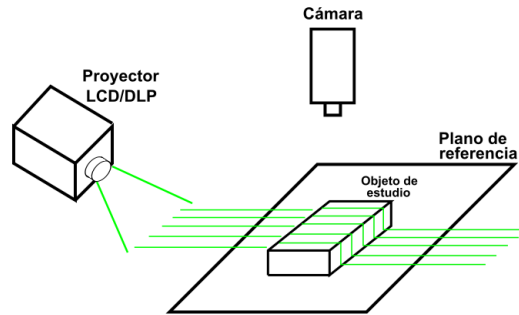


Figura 2.5.- Configuración Iluminación estructurada (*Structured*).

El conjunto de técnicas no sólo realzan las características de interés en el objeto, sino que también ayuda, en cierto, grado a reducir la cantidad de *ruido* en la captura de la escena. En aspectos de Procesamiento Digital de Imágenes (PDI), el ruido presente en la imagen a analizar puede verse reflejado como una variación aleatoria de iluminación que, para la mayor parte de las aplicaciones generan sombras no deseadas y por ende, pérdida de información. La compensación que realiza el sistema complejo ojo-cerebro a las pequeñas variaciones tanto de color como del nivel de iluminación, no nos permite comprender a simple vista el grado en el que estos ligeros cambios afectan a un sistema de visión [3,9].

Es por esto último que se emplean técnicas de acondicionamiento digitales, a las imágenes adquiridas por medio de un SAI para lograr adecuarlas al proceso al que se pretenda someter en futuras etapas del procesamiento. Sin embargo, al remover ruido de la imagen por medio de algún filtro digital de uso general, contribuirá a que los bordes pierdan definición y al tratar de reducir este último efecto, solamente se introduce ruido a la imagen de estudio. Por tanto, se entiende que debe existir un balance entre estos dos tipos de mejora sin comprometer la calidad de la imagen en su totalidad.

2.3. Fuentes de iluminación

La mayor parte de las actividades diarias de una persona promedio se desenvuelven alrededor de alguna clase de iluminación artificial, pues los libera de las restricciones espacio-temporales de la principal fuente de iluminación que representa el sol, lo que significa que pueden laborar de forma funcional tanto de día como de noche, así como en el exterior o interior de una alguna infraestructura.

El desarrollo de tecnología relacionada a la iluminación ha proporcionado desde las últimas décadas un sustituto a la luz del sol en una región espectral comprendida dentro de los 380nm hasta los 780nm, siendo esta región a la cuál la visión humana ha desarrollado mayor sensibilidad [10, 11].

Actualmente, las fuentes de iluminación se clasifican de la siguiente manera:

- *Lámparas de filamento incandescente*: este tipo de lámparas encapsula un filamento de tungsteno que al aplicar una corriente eléctrica a través de este brilla y emite luz visible.
- *Lámparas fluorescentes*: en este tipo de iluminación se hace uso de átomos de mercurio, los cuales se excitan por medio de un arco eléctrico y emiten radiación UV, dicha radiación interactúa con el recubrimiento de fósforo dentro de un tubo de vidrio para generar luz visible.
- *Iluminación de estado sólido (IES)*: basado en diodos emisores de luz (LED, por sus siglas en inglés). Estos son dispositivos semiconductores, esto quiere decir que los materiales con los que se elaboran están dopados con impurezas para crear una unión p-n. Cuando el dispositivo es polarizado directamente, los electrones fluyen del lado n (cátodo) al lado p (ánodo), formando electrones con base a la recombinación en la juntura de la unión p-n. Cuando un electrón se recombina con un hueco, cambia a un nivel de energía inferior y libera una determinada cantidad de energía en forma de fotones. La longitud de onda a la que emite el dispositivo depende de los materiales con los que se elabore dicha unión.

La aplicación de algunas de las fuentes de iluminación presentes en el listado anterior dependerá de las propiedades que nos proporcionen las mismas, y usualmente se consideran lo siguiente:

- Patrón de radiación tridimensional.
- Brillo y la facilidad para regularse (incluyendo variaciones a largo plazo ocasionados por el desgaste de los componentes).
- Sistema de manejo (Driver, AC/DC, frecuencia, control de lazo cerrado).
- La potencia disipada en forma de calor.
- Cantidad de ruido eléctrico generado.
- Forma del dispositivo.

- Espectro emitido.

Las diversas necesidades socio-económicas y ambientales que presenta la sociedad actual han provocado un avance radical en el desarrollo de sistemas de iluminación basado en dispositivos versátiles como los LED [10, 12], pues estos presentan un ahorro substancial de energía eléctrica, y una menor contribución a la contaminación ambiental.

Tabla 2.1.- *Eficiencia de diferentes fuentes de iluminación.*

Tipo de fuente	Eficacia (lm/W)
Incandescente (carbón)	1.2 - 2
Incandescente (tungsteno)	10 - 18
Incandescente (halógeno-tungsteno)	16 - 24
Fluorescente (lineal)	65 - 95
Fluorescente (compacta)	50 - 70
LED blanco (0.1W)	100 - 300

La industria actualmente se esfuerza por implementar la tecnología LED como una alternativa a los sistemas de iluminación convencionales en las etapas de evaluación y control de productos con base a los beneficios que proporciona [4], entre ellos su fidelidad, mayor eficiencia energética [13] (véase tabla 2.1), gran resistencia a las vibraciones del sistema, habilidad de operación en modo estroboscópico y continuo, por mencionar algunos [13, 14]. Otro punto a considerar durante la selección de la fuente de iluminación, es que aplicaciones donde la reproducción del color es un factor crítico, las lámparas tipo LED y basadas en Halógeno, presentan un rendimiento menor en cuestiones de emisión espectral, con respecto a las lámparas de generaciones pasadas (véase figura 2.6).

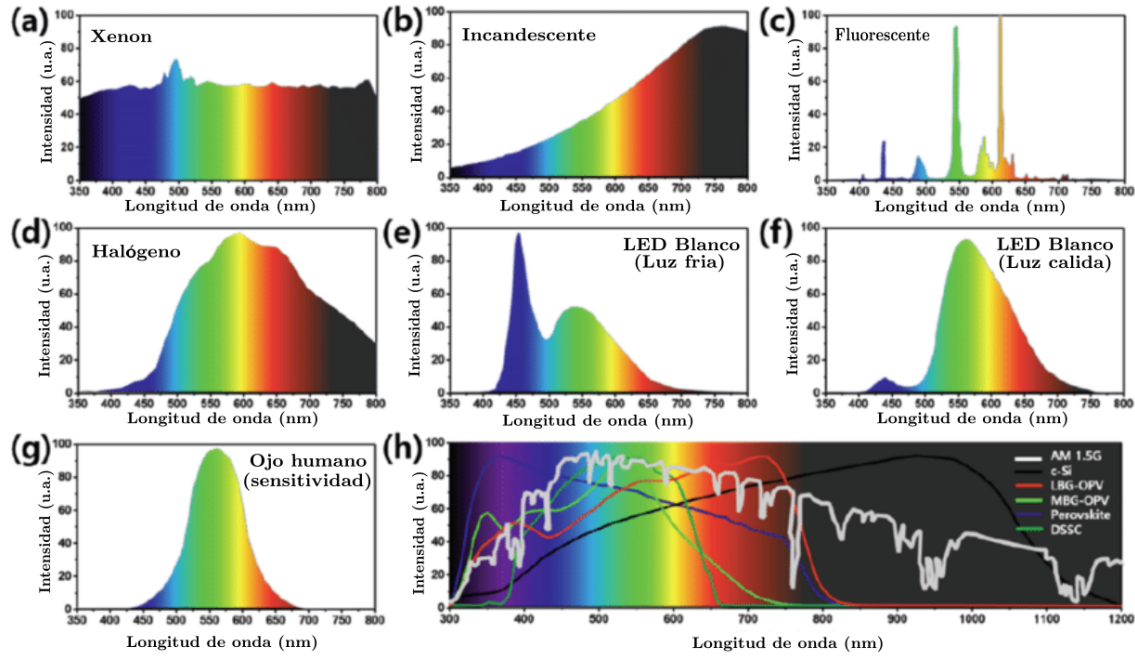


Figura 2.6.- Espectro de diferentes fuentes de iluminación. (a) Lámpara de xenón, (b) Lámpara incandescente, (c) Lámpara fluorescente, (d) Lámpara de halógeno, (e) Lámpara LED (Luz fría), (f) Lámpara LED (Luz cálida), (g) Espectro correspondiente a la sensibilidad del ojo humano, (h) Superposición del espectro AM 1.5G con la respuesta espectral de distintos dispositivos fotovoltaicos.

Esta última figura nos permite explorar la posibilidad de construir fuentes de iluminación en diversas formas y con diferentes características espectrales. Considerando esta última comparativa (figura 2.6), la flexibilidad de la tecnología LED ha dado lugar a la implementación de esta en diferentes tipos de empaquetados [11], incrementando su aplicación en áreas como la medicina, iluminación de potencia, o comunicaciones, de manera más frecuente que las otras fuentes de iluminación mencionadas en este capítulo.

2.4. Uniformidad de la iluminación

La uniformidad en la iluminación de una escena es uno de los factores primordiales del PDI, siendo un determinante para cumplir el objetivo de muchas aplicaciones de análisis de imágenes. Una iluminación apropiada a dicha escena es capaz de eliminar

información irrelevante, mejorar el contraste de características particulares dentro de la imagen y la relación señal a ruido de la imagen analizada. Por ejemplo, un objeto iluminado con un bajo grado de uniformidad generará sombras sobre el área iluminada, y por tanto, si lo que se emplea como sistema de detección es una cámara digital, se obtendría como resultado la pérdida de información en la imagen capturada.

Una solución típica a las problemáticas relacionadas a la uniformidad de la iluminación, es el diseño de una fuente de iluminación basada en tecnología LED dado que por características como su patrón de radiación (del tipo lambertiano) y sus dimensiones físicas, es posible colocar sobre una superficie plana un arreglo de dichos dispositivos por debajo de un plano objetivo para adquirir el nivel de uniformidad deseado [15]. Para obtener una iluminación uniforme es necesario establecer dos características del sistema, 1) todos los LEDs son fuentes puntuales con la misma distribución intensidad luminosa y el mismo flujo luminoso y 2) la relación entre la distancia máxima entre LEDs (d_{max}) en el arreglo seleccionado y la altura (z) que existe entre el plano base y el plano objetivo (**DHR**¹)(véase figura 2.7), dada por:

$$DHR = \frac{d_{max}(\text{u.a.}^2)}{z(\text{u.a.})}. \quad (2.1)$$

Basados en la literatura [15,16], se puede observar que, a menor espaciado entre LED y LED y a mayor distancia entre los emisores de luz al plano objetivo, se obtiene un mayor nivel de uniformidad sobre dicho plano. El parámetro a considerar en el diseño de un módulo de iluminación de fondo es d_{max} , representado en la figura 2.7 por el espacio existente entre la cresta de cada una de las curvas naranjas (distribución de irradiancia por cada fuente de iluminación) en las subfiguras (2.7) b) y c). Término que se obtendrá de distinta manera con base a la configuración geométrica que se pretenda implementar en el módulo de iluminación y variará con respecto a z pues se considera una restricción de diseño constante. Durante el desarrollo de este trabajo de investigación solamente se trabajará la teoría correspondiente a un arreglo de LEDs cuadrado, ya que con esto se cubren los requerimientos en el rediseño del prototipo.

Para determinar el parámetro d_{max} , se parte de un estudio radiométrico del LED, donde la distribución de intensidad lumínica del LED se expresa en forma general de la siguiente manera:

$$I(\theta) = I_0 \cos^m \theta, \quad (2.2)$$

donde θ es el ángulo de visión del LED, I_0 es la irradiancia ($\frac{W}{m^2}$) dada en el eje óptico, y m , que consiste en un número obtenido por la siguiente expresión:

¹Abreviatura del término en inglés **Distance-Height Ratio**.

²(u.a.) - Abreviatura: Unidades arbitrarias.

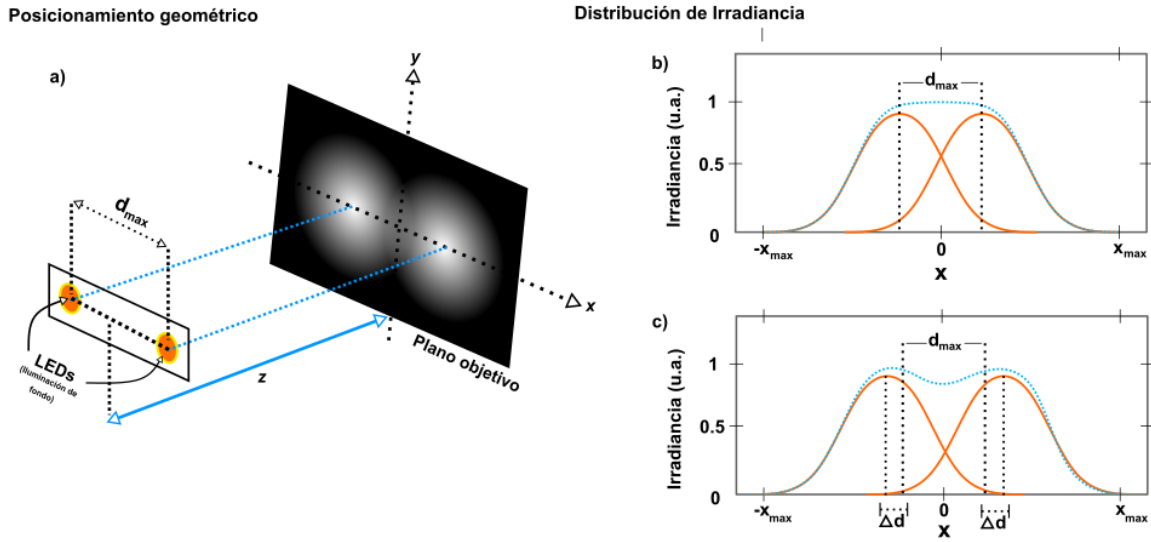


Figura 2.7.- Esquema de posicionamiento para asegurar máxima uniformidad posible empleando LEDs como fuente de iluminación. a) Representación del esquema de iluminación de fondo con un arreglo lineal (1×2) de LEDs. b) Gráfico donde se describe la distribución de irradiancia de cada una de las fuentes del esquema presentado en a) (curvas naranjas), y la contribución del nivel de irradiancia total que se obtiene al respetar la restricción de diseño d_{max} (curva azul). c) Gráfico describiendo el caso donde se establece una separación LED a LED mayor a d_{max} .

$$m = \frac{-\ln(2)}{\ln(\cos \theta_{\frac{1}{2}})} \quad (2.3)$$

En este caso, el término **m** representa un valor de *idealidad* del emisor [16], en donde $\theta_{\frac{1}{2}}$ se define como el ángulo de visión donde el nivel de irradiancia equivale a la mitad de lo que se mide en el eje óptico, y que el fabricante del LED en cuestión proporciona en la mayoría de los casos. En la práctica, se puede encontrar valores correspondientes a $m > 1$, o $m < 1$, donde $m = 1$ correspondería a la respuesta dada por un emisor con distribución lambertiana ideal, pero debido a factores como el encapsulado y la manufactura de la óptica relacionada al LED no son perfectas, se presenta estas variaciones.

Como uno de los objetivos principales es cuantificar la cantidad de luz percibida por la emisión del módulo de iluminación, es de interés para el trabajo de investigación considerar el nivel de iluminancia **E** (lm/m^2), la cual se define para un punto dado

$(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ en el plano objetivo a una distancia $\mathbf{r}$ con base a la siguiente expresión:

$$E(r, \theta) = I(\theta) \frac{\cos \theta}{r^2}. \quad (2.4)$$

Considerando una celda básica de iluminación conformada por 4 LEDs (arreglo 2×2) con un espaciado entre LEDs d y una distancia vertical entre el plano objetivo y el arreglo z , la iluminancia E en un punto (x, y) en dicho plano se obtiene por la siguiente expresión [15]:

$$E(r, \theta) = \sum_{i=1}^4 E_i(r_i, \theta_i). \quad (2.5)$$

Al substituir (2.2) y (2.4) dentro de (2.5), además de realizar la conversión a coordenadas cartesianas $E(x, y)$ los obtenemos por la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} E(x, y) = & I_0 z^{m+1} \left(\left[\left(x_1 - \frac{d}{2} \right)^2 + \left(y_1 - \frac{d}{2} \right)^2 + z^2 \right]^{-\frac{m+3}{2}} + \right. \\ & \left[\left(x_2 - \frac{d}{2} \right)^2 + \left(y_2 + \frac{d}{2} \right)^2 + z^2 \right]^{-\frac{m+3}{2}} + \\ & \left[\left(x_3 + \frac{d}{2} \right)^2 + \left(y_3 - \frac{d}{2} \right)^2 + z^2 \right]^{-\frac{m+3}{2}} + \\ & \left. \left[\left(x_4 + \frac{d}{2} \right)^2 + \left(y_4 + \frac{d}{2} \right)^2 + z^2 \right]^{-\frac{m+3}{2}} \right). \end{aligned} \quad (2.6)$$

Usando el criterio del límite de resolución de Sparrow [15, 17], se puede estimar la máxima separación entre LEDs. De acuerdo a este criterio, se calcula la segunda derivada de $E(x, y)$ y se establece $\partial^2 E / \partial x^2 = 0$ en el punto ubicado en $x = 0$ y $y = 0$ nos entrega la siguiente expresión.

$$d_{max} = \sqrt{\frac{4}{m+3}} z. \quad (2.7)$$

Ésta garantiza que la iluminación sobre la región central de la superficie iluminada mantenga altos valores de uniformidad. Para un sistema basado en módulos LED con una distribución de intensidad lumínica del tipo lambertiana, el máximo valor de DHR se aproxima a la unidad cuando se obtienen características aceptables de uniformidad.

Esto puede verse representado por medio de la línea naranja en las figuras 2.7 (b) y 2.7 (c).

Un concepto que se usa en la literatura como métrica para determinar nivel de uniformidad, es el coeficiente de variación del error cuadrático medio [$CV(RMSE)$]³ [15, 17], el cual se define como la relación que existe entre el valor RMSE y el valor promedio de las muestras de interés ($\bar{x}$). Esta definición es de uso común en PDI y se expresa de la siguiente manera:

$$CV(RMSE) = \frac{RMSE}{\bar{x}}. \quad (2.8)$$

Por otro lado, si bien el $CV(RMSE)$ logra proporcionar una métrica del rendimiento del sistema de iluminación, otros autores como Wang *et al* [17], complementan sus evaluaciones con la relación entre el nivel de iluminancia mínimo (E_{min}) y máximo (E_{max}) del área de estudio.

$$U = \frac{E_{min}}{E_{max}}. \quad (2.9)$$

Los resultados que se muestran en la figura 2.8 demuestran que haciendo uso de unidades LED convencionales es posible obtener altos valores de uniformidad en la zona sobre la cual se proyecta la luz de dichos emisores. Esto se demuestra en la secuencia de las figuras 2.7 (a), 2.7 (b) y 2.7 (c), ya que a medida que se sobrepasa el valor de d_{max} calculada para una distancia z establecida, y por ende el término DHR , los índices de uniformidad adoptados para este trabajo, U y $CV(RMSE)$, tienden a decrementar e incrementar (respectivamente), lo que resulta en una distribución más amplia del nivel de iluminancia a lo largo del rango dinámico, que se percibe en la generación de puntos calientes⁴ y sombras⁵ en la simulación de trazado de rayos.

Si se empleara un panel de iluminación de fondo con características similares a las de las figuras 2.7 (b) y 2.7 (c), no sería posible obtener el contorno completo de un objeto bien definido puesto que no existiría un realce homogéneo de la figura a lo largo de la extensión del área iluminada debido a la variación que existe entre E_{min} y E_{max} (tal caso se muestra en las figuras 2.8 (b) y 2.8 (c)). No obstante, debe considerarse que aun teniendo la iluminación *ideal* en la escena de interés (véase figura 2.8 (a)), las deficiencias existentes en el sistema óptico y hardware de captura que interactúen con dicha escena, provocarán un determinado nivel de variaciones en la iluminación en

³Abreviatura del término en inglés **Coefficient of Variation (Root Mean Square Error)**

⁴Zonas iluminadas por un nivel de iluminación que satura la respuesta del sensor optoelectrónico perteneciente al dispositivo de captura.

⁵Figuras creadas dentro de una imagen por un nivel bajo o nulo de iluminación sobre una superficie.

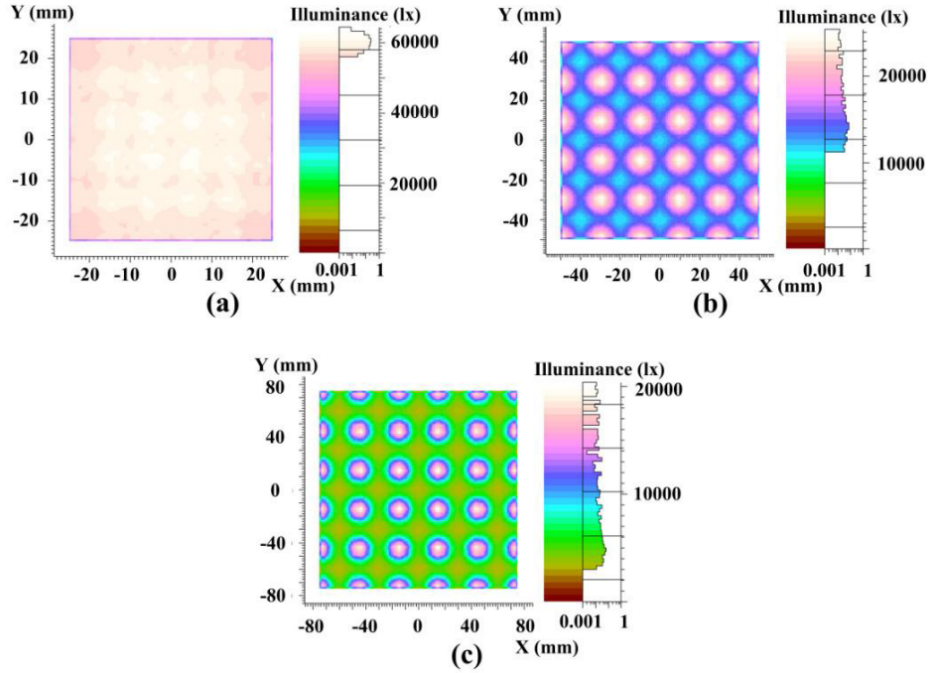


Figura 2.8.- Rendimiento de iluminación con LEDs tradicionales sobre plano objetivo con base a simulación de trazado de rayos [17]. (a) $DHR = 1$, $U = 0.902$, $CV(RMSE) = 0.0167$; (b) $DHR = 2$, $U = 0.446$, $CV(RMSE) = 0.2201$; (a) $DHR = 3$, $U = 0.155$, $CV(RMSE) = 0.5688$

cuestión y por lo tanto, reducirá la robustez y fiabilidad del sistema de visión [3, 5], así como el manejo de esta tecnología con base a sus características intrínsecas resulta indispensables para el desarrollo del módulo de iluminación basado en la misma.

2.5. Manejo de tecnología LED

El uso de fuentes de iluminación de estado sólido en la iluminación general (exterior e interior) ha aumentado su presencia en las últimas décadas en diferentes mercados, comenzando por el alumbrado público hasta trasladarse a sectores más complicados como los comerciales (o de negocios) y nivel de consumidor (por ejemplo, bombillas *retrofit* y lámparas de escritorio). Esto se debe a que esta tecnología presenta un perfil con pequeñas dimensiones y una alta eficiencia de energía, que resulta en un consumo

de potencia con bajos valores nominales de voltaje y corriente en la mayoría de los casos [11] (menores a los 4V y 700mA, respectivamente). Sin embargo, el componente principal de un LED es un material semiconductor, por lo que existen requerimientos específicos para la construcción del empaquetado relacionado al mismo, y esto resulta en un número determinado de áreas donde se producen fallos de funcionamiento en la mecánica interna del dispositivo [11, 18]. Las áreas de mayor relevancia en los procesos de manufactura se pueden clasificar de la siguiente manera:

- *Fallas en relación con el material semiconductor*: degradación del nivel de intensidad lumínica de salida, metalización⁶ quemada/rota en el material semiconductor.
- *Fallas en relación con interconexión*: ruptura/degradación de contactos metálicos debido al estrés al que se someten las terminales del dispositivo (ej., descargas electrostáticas).
- *Fallas relacionadas al empaquetado*: carbonización del encapsulado, fuerte decoloración del encapsulado (se torna de una tonalidad amarilla), fisuras en la óptica y fatiga de la unión p-n.

Como se muestran en el listado anterior, existen diversos factores durante el proceso de manufactura de un LED que pueden perjudicar el funcionamiento de este. Aunque se realizan procesos de control de calidad para evitar la venta de dispositivos con bajo rendimiento (o con la menor cantidad de defectos posibles), tanto los fabricantes como los estándares actuales concluyen que la forma ideal de trabajar con estos dispositivos es con un monitoreo constante de las variables medibles relacionadas directamente a la cantidad de luz que proporcionan como salida [19, 20]; aspectos que se estudiarán a continuación.

2.5.1. Características I-V del LED

La expresión matemática con la cual se modela la relación entre voltaje y corriente de conducción (V_f e I_f , respectivamente) de una unión (o juntura) ideal $p-n$ fue propuesta por William Shockley en 1950 [21] en su obra titulada *Electrons and Holes in Semiconductors*, la cual describe dicha expresión de la siguiente forma:

$$I_f(V_f) = I_0 \left[e^{\left(\frac{V_f}{V_T}\right)} - 1 \right]. \quad (2.10)$$

⁶Proceso de revestimiento de metal sobre la superficie de un objeto.

$$V_T = \frac{kT}{q} \approx 26mV.$$

Donde:

- V_T - Voltaje térmico (Volts),
- $T \approx 300K$ - Temperatura en grados Kelvin,
- $k = 1.3806485210 \times 10^{-23} (m^2 kg/s^2 K)$ - Constante de Boltzmann,
- $q = -1.602 \times 10^{-19} C$ - Carga eléctrica de un electrón (Coulomb).

Una característica importante acerca de los LED es que a medida que aumenta I_f , la resistencia en serie interna toma un papel significativo en las características I-V correspondientes, desviándose del modelo establecido por Shockley dada en la expresión (2.10), por lo que se considera que este componente del modelo en dispositivos de potencia no debe ser despreciado, pues contribuyen a la eficiencia de conversión de energía general del LED (dicho fenómeno se muestra en la figura 2.9). El voltaje que se mide entre los contactos (ánodo y cátodo) es la suma de la caída de voltaje de la resistencia eléctrica interna en serie (R_S) y del voltaje que se produce en la juntura interna (V_{Fpn}), tal y como se presenta en la siguiente expresión:

$$V_{fpn} = V_f - V_R = V_f - (I_f \cdot R_S). \quad (2.11)$$

Con esta consideración, se puede aproximar nuevamente I_f de la siguiente manera:

$$I_f = I_0 \left[e^{\left(\frac{V_f - (I_f \cdot R_S)}{V_T} \right)} \right]. \quad (2.12)$$

En la expresión anterior se puede observar que pequeñas variaciones de V_f producen cambios en gran proporción en la corriente que pasa a través del diodo, provocando una variación notoria en la temperatura interna del semiconductor y a la vez en la intensidad en la que el diodo en cuestión está emitiendo luz [12, 22]. Con base a esto, resulta evidente que no es adecuado emplear una metodología para el control de intensidad lumínica de un arreglo (en serie, paralelo, o una combinación de ambas) de LEDs basada en la variación de V_f , sino por la regulación directa de la amplitud de I_f y de la temperatura del LED.

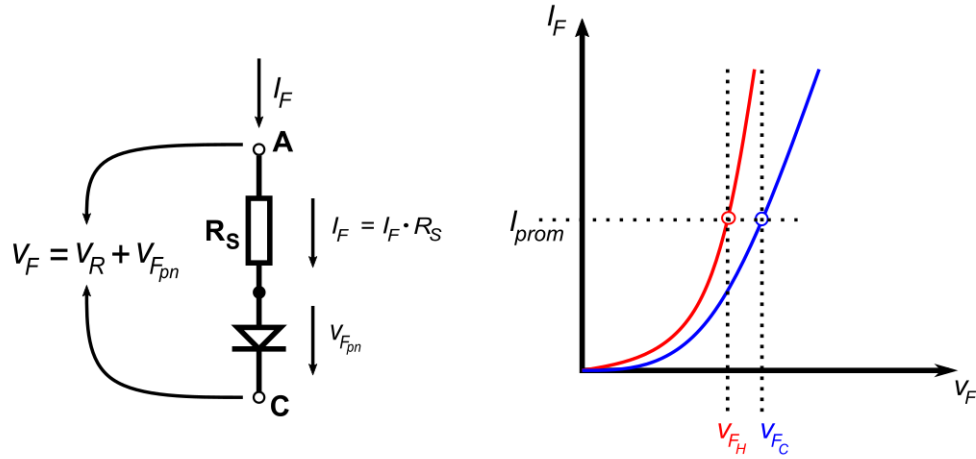


Figura 2.9.- Circuito eléctrico representativo del modelo no ideal considerando juntura p-n con el efecto de la resistencia interna, y representación gráfica del efecto térmico en las características I-V del diodo, donde V_{F_H} representa el nivel de V_f cuando la temperatura interna del LED es mucho mayor a la recomendada por el fabricante, y V_{F_C} presenta el caso contrario.

2.5.2. Aspectos de manejo térmico en LEDs

En sistemas IES, T_j representa el punto donde se obtiene la cantidad más elevada de calor del dispositivo semiconductor (unión p-n de un diodo, en este caso) y uno de los parámetros con mayor influencia en aspectos de confiabilidad y tiempo de vida de este. Esta temperatura absoluta forma parte de un conjunto de propiedades que se encuentran directamente relacionadas con la cantidad de intensidad lumínica que se produce (tal como se muestra en la figura 2.10), por lo que la medición y monitoreo de esta permitirá tener un mayor control de la salida del sistema. Esto quiere decir que el diseño térmico debe considerarse como parte integral dentro de un sistema IES.

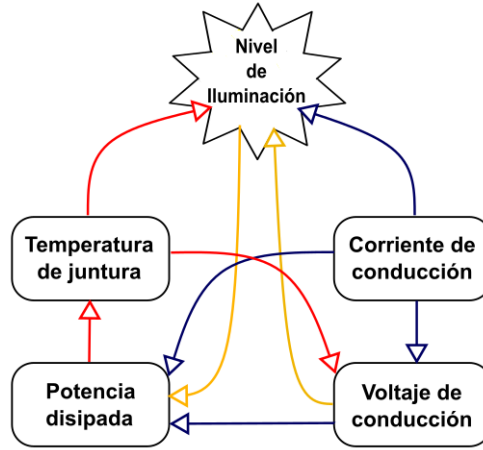


Figura 2.10.- Esquema básico de los múltiples factores que producen variaciones en la intensidad lumínica de un LED.

La literatura relacionada al modelado térmico de dispositivos semiconductores y su simulación [12,18], establece que una aproximación cercana al valor real de T_j tiene la siguiente expresión:

$$T_j \approx P_H \cdot R_{JC} + T_C. \quad (2.13)$$

Donde P_H representa la potencia eléctrica que se aplica a la juntura, R_{JC} la resistencia térmica y T_C es la temperatura de la superficie donde reposa el encapsulado del dispositivo. Con los avances que se presentan actualmente en el desarrollo de tecnología LED con empaquetados con mayor eficiencia y compactibilidad [20], el desafío que se presenta al calcular con precisión esta temperatura incrementa debido a que los estándares actuales [19] no consideran algunas de las características estructurales como los dispositivos con montaje directo, el incremento de *chips* por unidad de iluminación y el cambio de los empaquetados a formas complejas (alejándose a la idea de una distribución homogénea de la temperatura sobre el empaquetado).

2.6. Técnicas de regulación de corriente

La técnica más común para regular la corriente de un arreglo en serie de LEDs, con una fuente de alimentación de corriente directa (CD), es el uso de una resistencia eléctrica en serie con dicho arreglo (véase figura 2.11). Esta técnica, aunque resulta fácil

de implementar, proporciona una baja eficiencia dado a las características de disipación de potencia en dicha resistencia. Además, dado a las propiedades termodinámicas del mismo LED (incremento de V_f con base al incremento de temperatura de juntura) resulta complicado mantener un nivel constante de corrientes en el arreglo de LEDs de interés usando dicha técnica [23].

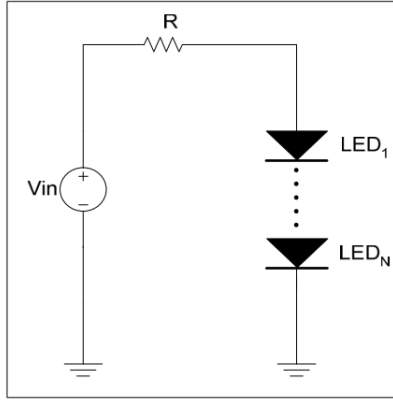


Figura 2.11.- Regulación de corriente por medio de resistencia eléctrica.

En la actualidad se consideran otras alternativas en cuanto a técnicas de regulación de corriente (por lo general, una combinación de ambas [24–28]) que se aplican al manejo de LEDs. En la siguiente sección se consideran solamente los reguladores lineales y los convertidores de potencia conmutados (CPCM) debido a los buenos resultados que se reportan en la literatura revisada [24, 29].

2.6.1. Reguladores lineales

En este tipo de circuitos (véase figura 2.12) se hace uso de un transistor de tecnología BJT o FET, para mantener un nivel de corriente constante independientemente de la temperatura y uso de la carga (de forma ideal). Al tomar el voltaje generado a través de una resistencia de sensado (R_{SENSE}) y compararlo con el voltaje de referencia (V_{REF}), un amplificador de error (EA, por sus siglas en inglés) nos proporciona una salida tal que el transistor (Q_1) llega al nivel de corriente necesario, dado por la ecuación:

$$i_L = \frac{V_{REF}}{R_{SENSE}}. \quad (2.14)$$

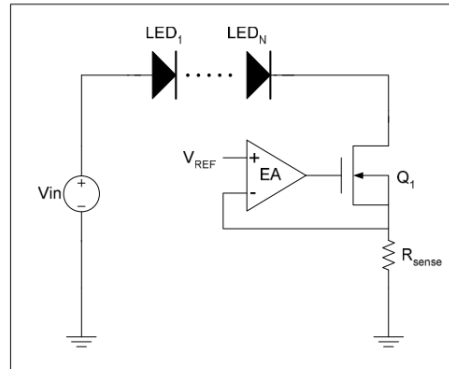


Figura 2.12.- Esquema de regulación lineal de corriente.

Los reguladores lineales se consideran soluciones *económicas* pues no requieren (en su estructura más básica) componentes de almacenamiento adicionales (capacitores, inductores), pero entregan una menor eficiencia considerando las pérdidas en disipación de potencia generadas por el transistor en uso. Además, se tiene que considerar que, para el caso de regular arreglos de LEDs en paralelo, cada una de estas redes requeriría una etapa de regulación lineal individual, aumentando el costo total en arreglos más complejos.

2.6.2. Convertidores de Potencia Conmutados (CPCM)

Un CPCM, es un sistema conformado por electrónica de potencia que proporciona una salida regulada con base a una entrada no-regulada (véase figura 2.13). Esto se logra con base al control del tiempo de encendido de los componentes que cumplen con la función de un interruptor, para producir la conversión deseada en la salida del sistema. A diferencia de la técnica que describe en la sección anterior, los CPCM hacen uso de componentes de almacenamiento (capacitores, inductores) como una etapa de filtrado pasa-bajas para reducir el *rizo* de la señal de salida. Las topologías tipo BUCK y BOOST son las más comunes. Sin embargo, debido a la similitud estructural entre ambas topologías, a continuación solamente se describirá el funcionamiento de la topología tipo BUCK, ya que cuenta con la mayor presencia en la literatura.

Un convertidor tipo BUCK mantiene un nivel de corriente constante al regular el voltaje generado a través de una R_{SENSE} ⁷. Dicho voltaje es comparado con un determinado V_{REF} para generar una señal de error que se utiliza en un esquema de control,

⁷Resistencia eléctrica que generalmente es de un valor pequeño y disipa poca potencia

para esto normalmente se emplea un controlador basado en histéresis o en algunos casos, por un controlador proporcional-integral-derivativo (PID) con el fin de producir una señal de modulación por ancho de pulso (PWM, por sus siglas en inglés) dirigida a los interruptores (transistores) del CPCM. Al hacer uso de una realimentación negativa, el ciclo de trabajo (*duty cycle*) de la señal PWM es modulada y, por ende, el voltaje en R_{SENSE} . De forma adicional, el transistor en este caso opera dentro de la región lineal, por lo que las pérdidas por disipación de potencia se reducen, incrementando los valores de eficiencia en comparación a los métodos de regulación anteriores.

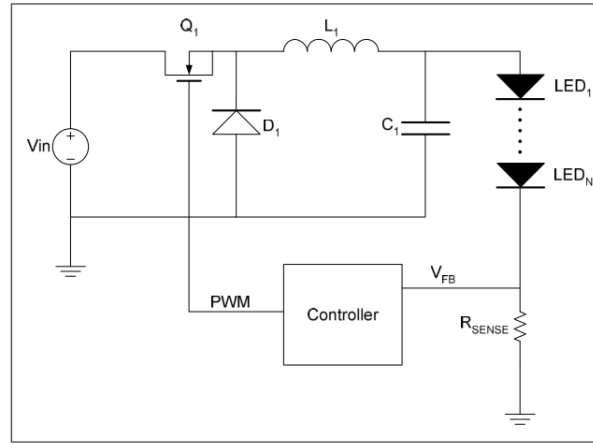


Figura 2.13.- Construcción básica de CPCM tipo BUCK para regulación de corriente.

La forma en la que un CPCM opera puede dividirse en dos etapas dependiendo de la forma en la que los transistores realizan la conmutación de estados. Para facilitar el siguiente desarrollo, se considera al LED como una carga totalmente resistiva, esto con base al modelo establecido durante la sección anterior, por lo que V_{OUT} se expresará de la siguiente manera:

$$I_{LED} = \frac{V_{OUT}}{R_{SENSE}}. \quad (2.15)$$

Durante la primera etapa del funcionamiento de un convertidor tipo BUCK, el transistor (Q_1) se mantiene en el estado de conducción (t_{ON}) y el diodo (D_1) en el estado opuesto (t_{OFF}). Esta etapa se caracteriza principalmente por cargar el inductor L_1 , debido a que $V_{in} > V_{out}$. El voltaje dicho inductor está dado por:

$$V_L = L \frac{di_L}{dt}. \quad (2.16)$$

Con base a (2.15), se puede observar que:

$$V_{in} - V_{out} = L \frac{I_2 - I_1}{t_{ON}} = L \frac{\Delta I}{t_{ON}}, \quad (2.17)$$

$$\Delta I = \frac{(V_{in} - V_{out})t_{ON}}{L}, \quad (2.18)$$

donde I_1 representa la corriente mínima que pasará a través de L_1 (inductancia), e I_2 el nivel máximo de la misma. V_{out} es el voltaje de salida promedio, y ΔI es el valor pico a pico de la corriente de rizado de L_1 .

La segunda etapa del funcionamiento de este tipo de convertidor presenta un estado opuesto a la etapa previa ($Q_1 = OFF$, $D_1 = ON$). La energía proporcionada a la carga, en este caso, es suministrada por la carga almacenada por L_1 durante la etapa anterior, por lo que la corriente en el mismo tenderá a disminuir.

$$-V_{out} = L \frac{I_1 - I_2}{t_{OFF}}. \quad (2.19)$$

$$\Delta I = \frac{V_{out}t_{OFF}}{L}. \quad (2.20)$$

Para manejar un estado operación de estado estable (*steady state*), ΔI debe permanecer al mismo nivel durante ambos estados del ciclo de trabajo, esto quiere decir:

$$\frac{(V_{in} - V_{out})t_{ON}}{L} = \frac{V_{out}t_{OFF}}{L}. \quad (2.21)$$

t_{ON} y t_{OFF} se definen de la siguiente manera:

$$t_{ON} = DT_s. \quad (2.22)$$

$$t_{OFF} = (1 - D)T_s, \quad (2.23)$$

donde $\mathbf{D}$ es el *ciclo de trabajo* y $\mathbf{T}_s$ es el periodo de conmutación. Por lo tanto:

$$(V_{in} - V_{out})DT_s = V_{out}(1 - D)T_s. \quad (2.24)$$

$$V_{out} = V_{in}D. \quad (2.25)$$

En este caso, V_{out} es el producto entre el V_{in} y D , y a causa de esto, el voltaje proporcionado a la carga resistiva (para el caso de interés, un arreglo de LEDs) por el convertidor tipo BUCK solamente puede ser menor a V_{in} . Dado que V_{in} es constante y se establece con respecto al número máximo de LEDs, el nivel promedio de corriente que pasará a través de la carga de interés se basa únicamente en término común V_{out} dentro de 2.18, 2.20 y 2.25 en función de D , una señal de control PWM que si bien representa corriente no continua, bajo este esquema de regulación proporcionará a la carga una señal de corriente *continua* con un ligero nivel de variación o rizo.

En general, las técnicas de regulación descritas en esta sección presentan tanto ventajas como desventajas en diferentes áreas, estas se resumen en la tabla 2.2. Sin embargo, las CPCM han tomado mayor presencia en la industria actual debido a las ventajas que proporcionan, comparados a los sistemas de regulación lineal convencional, entre estas ventajas se puede mencionar: reducción significativa de ruido acústico generado, mayor nivel de integración, salida con bajo nivel de rizo, entre otros.

Tabla 2.2.- Comparación entre las diferentes técnicas de regulación estudiadas.

Técnica de regulación	Ventajas	Desventajas
Regulación lineal	Alta eficiencia si $V_{in} \approx V_{out}$.	Poca eficiencia si la diferencia entre V_{in} y V_{out} es grande.
	Bajos niveles de ruido, prácticamente no se obtiene rizo en la señal de salida (I_L).	Solamente cumple la función de un convertidor reductor.
	Diseño compacto con bajo nivel de complejidad y económicamente la opción más viable.	
CPCM	Corriente de salida (I_L) es una señal continua.	Corriente de entrada (I_{in}) es una señal discontinua.
	Manejo de una arquitectura de control sencilla.	Número de LEDs en el arreglo limitados por V_{in}

Al considerar las múltiples ventajas que se mencionaron en este capítulo sobre el uso de tecnología LED en aplicaciones relacionadas a VA, y a los SAI empleados en las mismas, se puede concluir que resulta viable la construcción de un sistema de iluminación de fondo basado en tecnología LED. El cual a través de las restricciones de diseño que se establecieron en secciones anteriores, tiene la posibilidad de obtener un alto nivel de uniformidad con respecto a la iluminación. El desarrollo de un sistema de iluminación de fondo regulable basado en tecnología LED se presenta en el siguiente capítulo.

Capítulo 3

Desarrollo

En este capítulo se describe la construcción del módulo de iluminación propuesto en el presente trabajo. Comenzando por la selección de la tecnología LED apropiada y el método de regulación relacionado a la misma, seguido del diseño mecánico propuesto y su ensamble, se muestra el esquema general de los componentes que conforman el módulo de control del sistema y, por último, en la manera que se integra cada una de estas etapas en el esquema final de su funcionamiento.

3.1. Selección de tecnología LED

La primera etapa en la construcción del módulo de iluminación consiste en la selección apropiada del tipo de LED en el que se basará el rediseño del SAI-v5 que actualmente se usa por el cuerpo académico CACIE. Con base a las diversas ventajas y desventajas, que se establecieron sobre la tecnología LED, durante la comparación de fuentes de iluminación que se presentaron en el capítulo anterior y a la disponibilidad de dicha tecnología con los distribuidores nacionales, se optó por hacer uso de productos que ofrece la compañía *CREE, Inc.* Esta compañía es líder en la manufactura y distribución de iluminación de potencia basada en tecnología LED, brinda gran variedad de encapsulados y opciones de montaje para los mismos. La tabla 3.1 muestra algunas de las familias que predomina la industria actual [30].

Tabla 3.1.- Comparativa entre los tipos de encapsulados para LED que se usan con mayor frecuencia en la industria.

	Tipo de encapsulado	Corriente de conducción	Flujo luminoso (Salida de luz)	Aplicaciones
	Tipo-T1 (3 - 7 mm)	5 – 20 mA	<1 – 4 lm	- Indicadores. - Señalamientos de tráfico. - Señalamientos electrónicos.
	Montaje superficial	5 – 20 mA	1 – 10 lm	- Industria automotriz. - Iluminación de fondo LCD.
	Alta potencia	200 – 1500 mA	50 – 400 lm	- Iluminación general. - Dispositivos portables. - Arquitectura.
	Chips Multi-pequeño	200 – 700 mA	150 – 500 lm	Iluminación general.
	Chips Multi-potencia	200 – 1000 mA	300 – 3000 lm	Iluminación general.

El uso de los encapsulados indicados en la tabla 3.1, dependerá estrictamente de las necesidades de la aplicación y puesto que el trabajo de investigación trata de el rediseño de la etapa de iluminación de un SAI que hace uso de lámparas fluorescentes T8, las opciones viables para trabajar se reducen a los LED de alto brillo (*HB LED*, por sus siglas en inglés), ilustrados por el encapsulado de *Alta potencia* en la tabla 3.1, los cuales manejan una I_f nominal mayor a los 350mA. Estos LEDs en particular pueden llegar a equiparar el nivel de flujo luminoso emitido por la fuente de iluminación presente en el SAI-v5, el cuál llega a un valor cercano a 1000lm por lámpara. Sin embargo, como se hizo mención durante el capítulo anterior, la eficacia de estos dispositivos se reduce gravemente debido al aumento de temperatura inducido por la corriente de conducción, por lo que la disipación térmica se convierte en un factor crítico para su manejo, a diferencia de los LEDs con empaquetados convencionales (Montaje superficial y Tipo-

T1, por ejemplo).

Por esta razón, se adquirieron HB LEDs de la familia XP-L (véase figura 3.1), los cuales se adquirieron ensamblados sobre una montura (material de sustrato térmico) también conocida como *tarjeta de circuito impreso con núcleo metálico* (o *MCPCB*, por sus siglas en inglés) tipo estrella, dicha MCPCB sirve como una primera etapa para la dispersión de calor para el dispositivo, y además proporcionar un medio de transferencia al disipador principal por medio de un ensamble mecánico.



Figura 3.1.- Modelo de LEDs que se implementaron en el rediseño del módulo de iluminación, correspondientes a los LEDs de alta potencia ilustrados en la tabla 3.1.

3.1.1. Manejo de temperatura en el sistema

Por medio de la MCPCB también se realiza la conexión eléctrica al regulador de corriente y proporciona un punto de medición física para realizar una aproximación a T_j , que como se estudió en el capítulo anterior, es un parámetro crítico que se debe monitorizar de forma regular para asegurar que se está haciendo entrega de la máxima potencia del dispositivo. El esquema del montaje típico de este tipo de LEDs se puede observar en la figura 3.2.

La trayectoria térmica, correspondiente a un sistema basado en HB LEDs es ilustrado en la figura 3.2 como una red básica de resistencias conectadas en serie, de forma similar a lo que se encontraría en un sistema eléctrico, la resistencia térmica de cada uno de los componentes del arreglo representada por cada uno de los resistores presentes en dicha figura, el flujo de calor podría aproximarse en este caso a la corriente eléctrica que pasa a través de un circuito eléctrico de la misma configuración, y por último, las temperaturas representadas por cada uno de los nodos de la figura 3.2 (en este caso: $T_{Juntura}$, $T_{Puntodesoldadura}$, T_{Board} y $T_{Ambiente}$), corresponderían a un voltaje eléctrico en específico. Estos nodos representan a su vez cada una de las secciones dentro de las que se compone el sistema y los puntos donde es posible medir una temperatura en concreto.

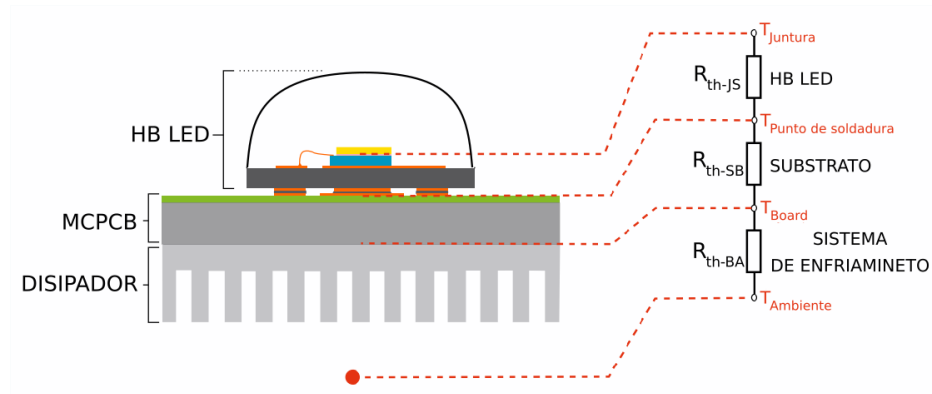


Figura 3.2.- Visualización del montaje típico de un HB LED y su representación a partir de una red de resistencias térmicas [31].

De esta manera, se puede esperar que el calor generado por la junta del HB LED sea disipado al pasar a través de un MCPCB, seguido de una capa delgada compuesta de un material de interfaz térmico¹ (también conocido como *TIM*, por sus siglas en inglés), la cual facilita la transferencia de calor y proporciona un medio de aislamiento eléctrico a la siguiente y última etapa que consiste en el disipador principal, donde el flujo de calor de la fuente de iluminación escapará al medio ambiente, ya sea por convección natural o forzada (uso de ventiladores u otro tipo de enfriamiento activo) [31–33].

Cabe mencionar, que el disipador representa una de la parte más determinante del conjunto de componentes que conforma un sistema de iluminación de fondo basado en HB LEDs, puesto que la selección del mismo y del material con el que se construye determinará el rendimiento del sistema. Para este trabajo, en particular, se hizo una revisión de los distintos dispositivos de enfriamiento disponibles que fuesen compatibles con el empaquetado seleccionado para la aplicación. En primera instancia se descartó el uso de enfriamiento activo (dispositivos basados en placas Peltier, recirculación de líquido, así como el uso de pipas), dado que estos sistemas están diseñados para disipar una potencia más elevada a la que se estima disipar en esta aplicación, por lo que la búsqueda se redujo solamente a la selección de un disipador extruido de un material con baja resistencia térmica, fácil de manipular, y que proporcione el área de montaje necesaria para el posicionamiento de los HB LEDs, de acuerdo a las restricciones de diseño que se discutieron anteriormente. En este caso, se adquirió un disipador de aluminio de la compañía *wakefield-vette*, el cual se dividió en dos piezas iguales para

¹Este componente del arreglo se excluye en la figura 3.2 puesto que su contribución en la red de resistencias térmicas resulta en un valor relativamente pequeño.

aproximar la base a una figura cuadrada.

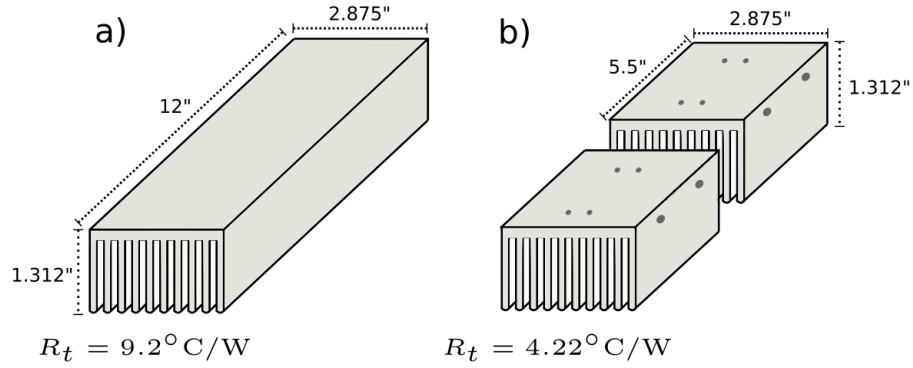


Figura 3.3.- a) Representación de las dimensiones del disipador original que se adquirió, b) Proyección de las modificaciones para hacer uso del disipador como base de los HB LEDs, con las respectivas perforaciones para el ensamble representadas por los círculos oscuros.

Como se estableció durante el desarrollo del capítulo anterior, la expresión (2.13) representa una aproximación válida a la temperatura generada en la unión p-n del HB LED, pero en la práctica el término T_c se conoce como T_{SP} , por lo que la expresión anterior se reescribirá de la siguiente manera:

$$T_j \approx P_H \cdot R_{JC} + T_{SP}. \quad (3.1)$$

T_{SP} se mide con respecto a un punto que se indican en el mismo diseño de una MCPCB bajo el mismo nombre, usualmente se encuentran los más cercano posible al emisor y cuentan con el área suficiente para soldar un termopar que permita establecer la temperatura a la que se encuentra dicho punto por medio de algún circuito electrónico. En este trabajo se realiza la conversión del voltaje generado entre ambas terminales del termopar, debido a la variación de la temperatura en la MCPCB por medio de un submódulo basado en el circuito integrado (IC) de Maxim Integrated MAX31855, el cual entrega, a un microcontrolador por medio de comunicación SPI una conversión analógica-digital con una precisión de $\pm 2^\circ\text{C}$ al usar particularmente un termopar tipo K (véase figura 3.4).

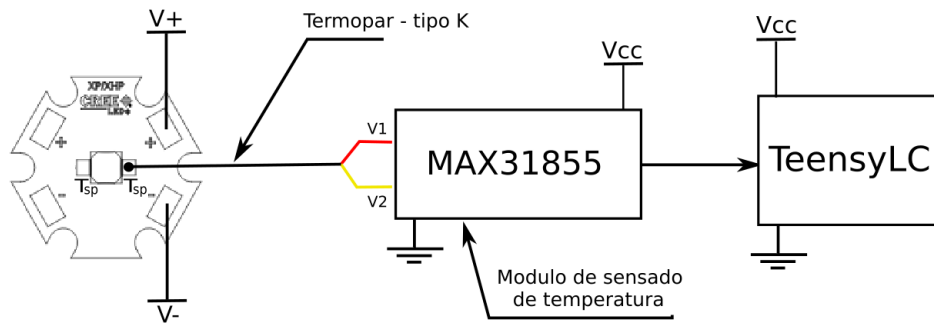


Figura 3.4.- Esquema del proceso de medición empleado para realizar la tarea de monitoreo de T_{sp} en el sistema de iluminación.

3.2. Comparación y selección de Reguladores de corriente

Una vez definido el tipo de HB LED que se utilizará en el prototipo, el siguiente paso en el proceso de construcción del módulo de iluminación consiste en decidir cual esquema de regulación de corriente tiene un mejor rendimiento para la aplicación. Para establecer esto, se llevó a cabo una comparación entre dos de las técnicas de regulación de corriente que se implementan con mayor frecuencia en la literatura, *Regulación lineal* y regulación basada en PWM (*CPCM*)(véase figura 3.5), a través de una serie de mediciones, con base a carga común que consiste en un arreglo de cuatro HB LEDs (Cree®XP-L HD, 480lm - 1A @2.98V) conectados en serie, el cual representa la cantidad mínima necesaria de HB LEDs para construir un módulo de iluminación cuadrado tal como se propuso en este trabajo.

Esquemas de regulación

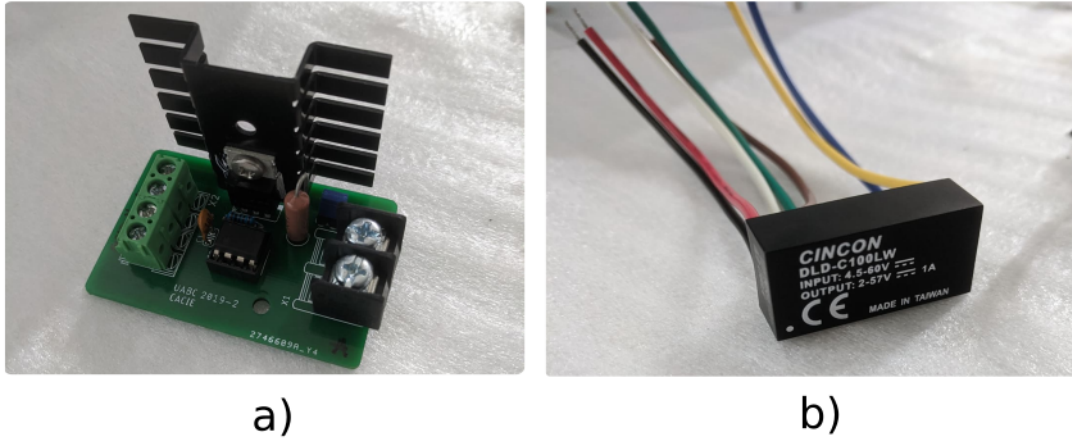


Figura 3.5.- Dispositivos de regulación de corriente comparados. a) Regulador lineal basado en TLV2372 y TIP31, b) CPCM 1A comercial (DLD-C100LW).

En la figura 3.6 se hace referencia al equipo que se usó durante el proceso de caracterización de ambos esquemas. Una fuente de alimentación programable tanto para alimentar el circuito como para controlar con precisión los incrementos del voltaje de control (V_{ctrl}) con los que se regula la cantidad de corriente suministrada a la carga (I_L), y al acoplar una punta de corriente con su respectivo módulo amplificador al circuito en prueba, se realizó el monitoreo de I_L por medio de un osciloscopio.

Ambos esquemas siguieron una serie de pasos similares durante el proceso de medición (véase figura 3.7). La circuitería en general fue alimentada por medio del canal de salida número 1 (CH1) de la fuente PST-3202 y se hacía uso de otro de los canales de la misma (CH3) para realizar variaciones *finas* de voltaje necesario para obtener variaciones en I_L de 50mA hasta llegar a una $I_{L_{max}} = 1A$ en ambos casos. Cada una de las variaciones de 50mA eran visualizadas a través de un voltaje proporcional que se obtuvo por medio del módulo amplificador conectado a la punta de corriente que formaba parte del circuito principal. Dichas lecturas eran almacenadas en formato CSV² de forma individual en un dispositivo de almacenamiento externo (memoria USB) conectado directamente al osciloscopio en uso.

²Abreviatura para el término en inglés *Comma-Separated Value*, que hace referencia a un tipo de documento en formato abierto sencillo para representar datos en forma de tabla, en las que las columnas se separan por comas.

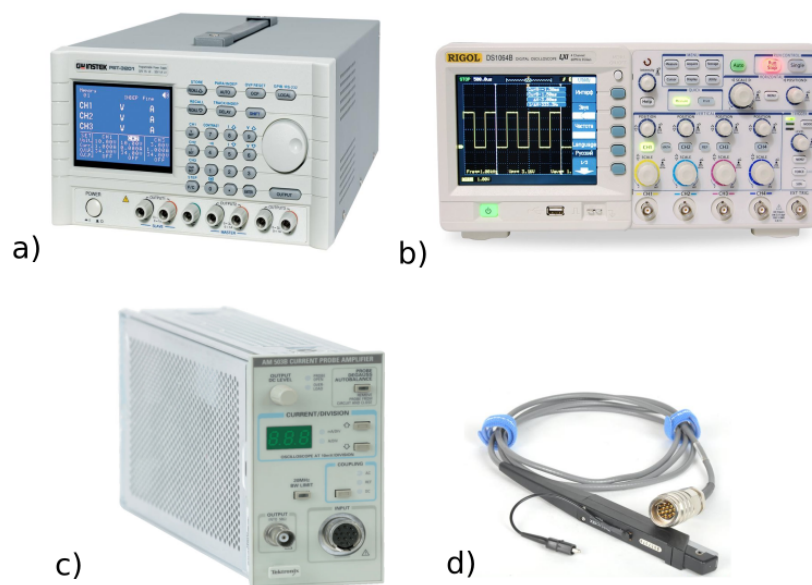


Figura 3.6.- *Equipo empleado en la medición de cada uno de las técnicas de regulación de corriente. a) Fuente de alimentación programable PST-3202 (GW INSTEK), b) Osciloscopio DS1064B (RIGOL), c) Módulo Amplificador AM503B (TEKTRONIX), d) Punta de corriente A6302 (TEKTRONIX).*

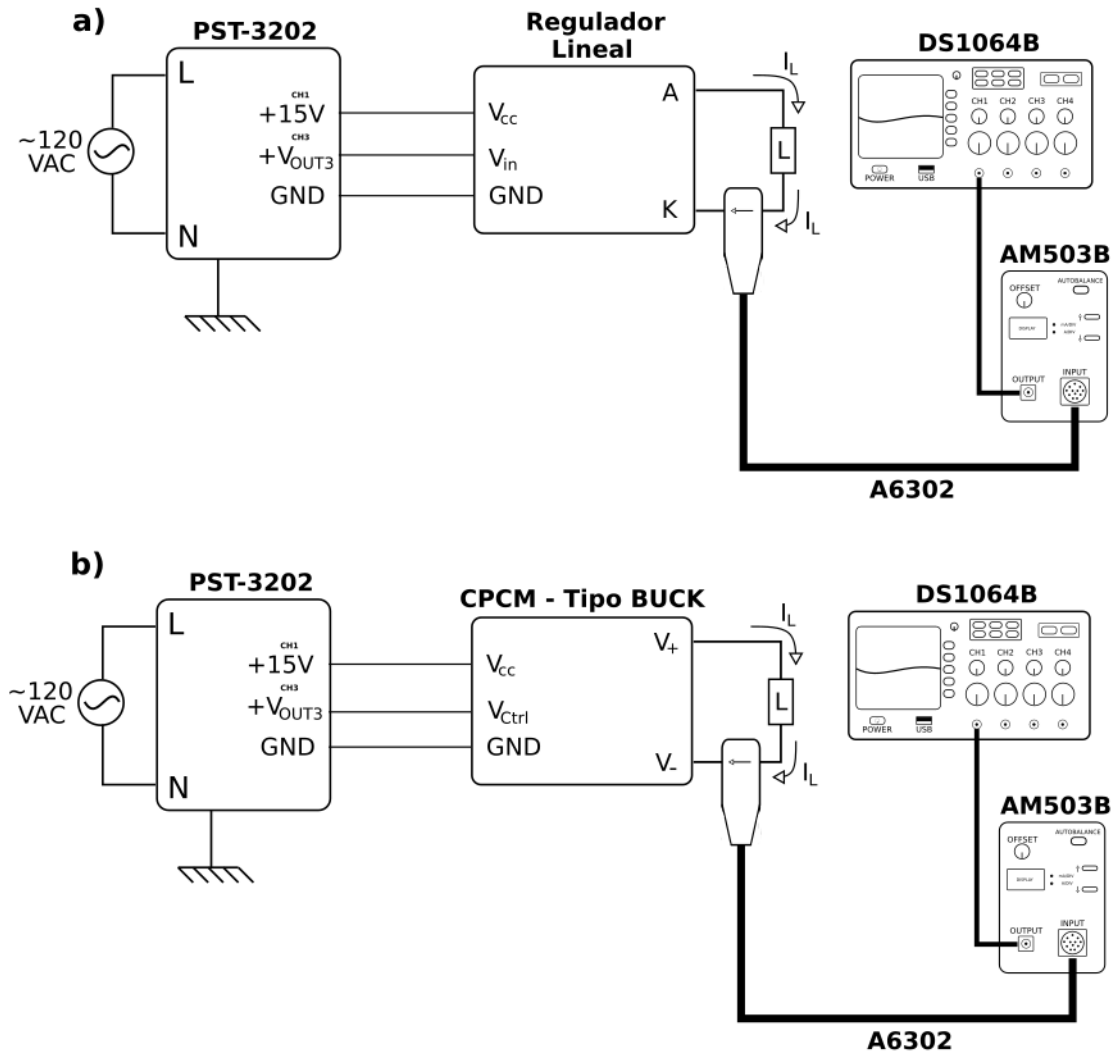
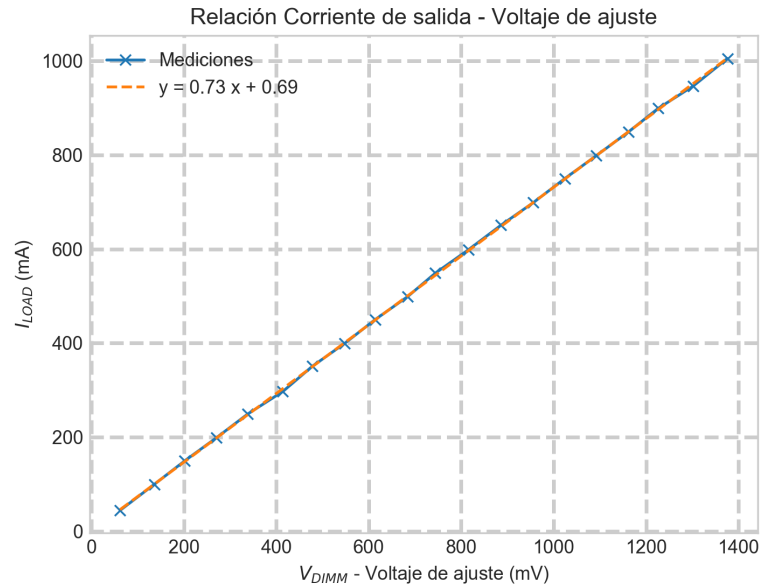


Figura 3.7.- Diagrama de las configuraciones empleadas para las mediciones de comparación entre ambos métodos de regulación de corriente. a) Método de regulación lineal, b) Método de regulación basado en PWM.

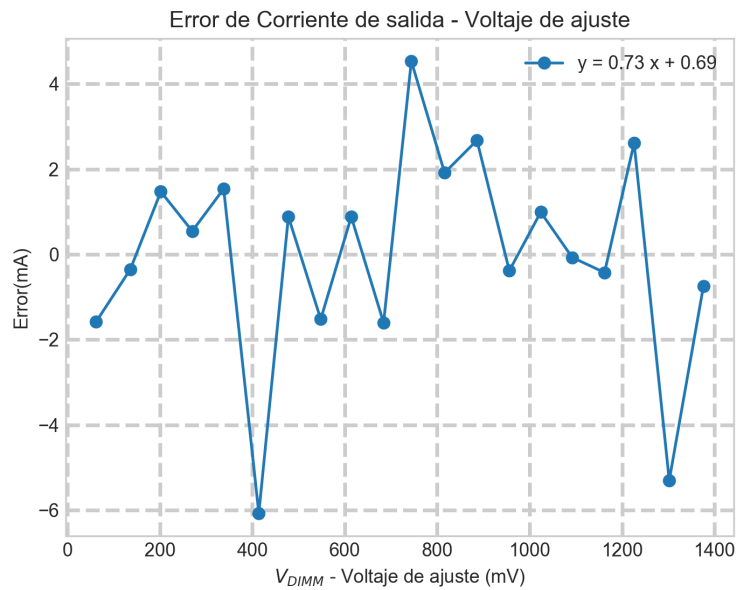
Los datos que se obtuvieron de estas mediciones se manejaron con base a un *script*³ en python 3, en el cual se utilizaron las bibliotecas *pandas* y *numpy* para manipular la información de los archivos CSV almacenados y generar un polinomio de primer grado con base a los mismos. Dicho polinomio, se generó con el objetivo de que el módulo de control de iluminación, que está basado en un microcontrolador de bajo costo (en este caso, un Teensy LC) tenga la capacidad de aproximarse a un nivel de I_f deseado con un bajo nivel de error al suministrar un determinado V_{ctrl} (también conocido como V_{DIMM}) al esquema de regulación que se haya seleccionado.

Como se puede apreciar en ambos casos (véanse figuras 3.8(a) y 3.9(a)), la relación entre I_L y V_{DIMM} mantienen un comportamiento prácticamente lineal, por lo que cualquiera de estos esquemas representarían una buena elección para el método de regulación y aunque exista una diferencia en el error entre las mediciones y el polinomio que se calculó para ambos casos (véase figura 3.8(b) y 3.9(b)), se considera que el error presente en el polinomio correspondiente a la fuente DLD-C100LW mantiene un nivel más constante en el intervalo de I_L de interés para el funcionamiento del módulo de iluminación ($300\text{mA} < I_L < 1000\text{mA}$), por lo que se optó por hacer uso de este esquema sobre el de regulación lineal; además otra característica por la que se hizo uso de la fuente DLD-C100LW es su diseño compacto y la poca necesidad de acoplar un medio para disipar la potencia generada por la misma, caso contrario a la fuente de corriente basada en el TLV2372 y TIP31.

³Archivo de texto que contiene una serie de tareas o rutinas basadas en algún lenguaje de programación en específico.

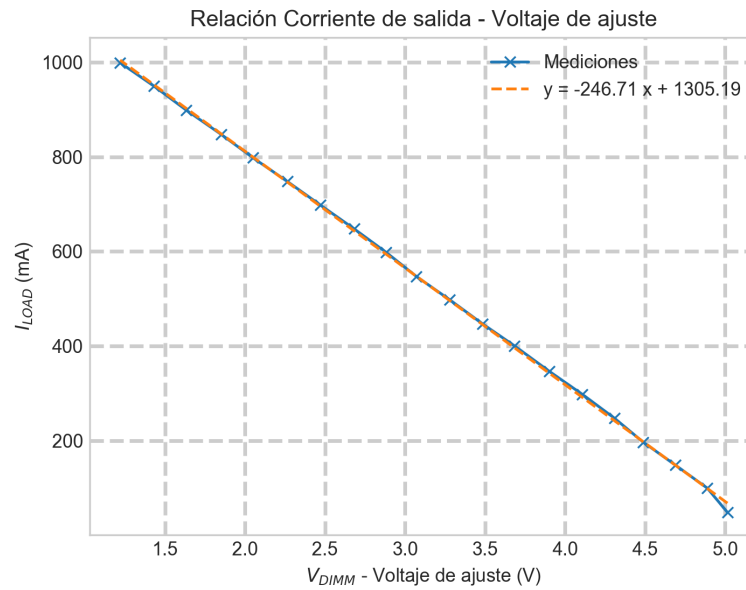


(a)

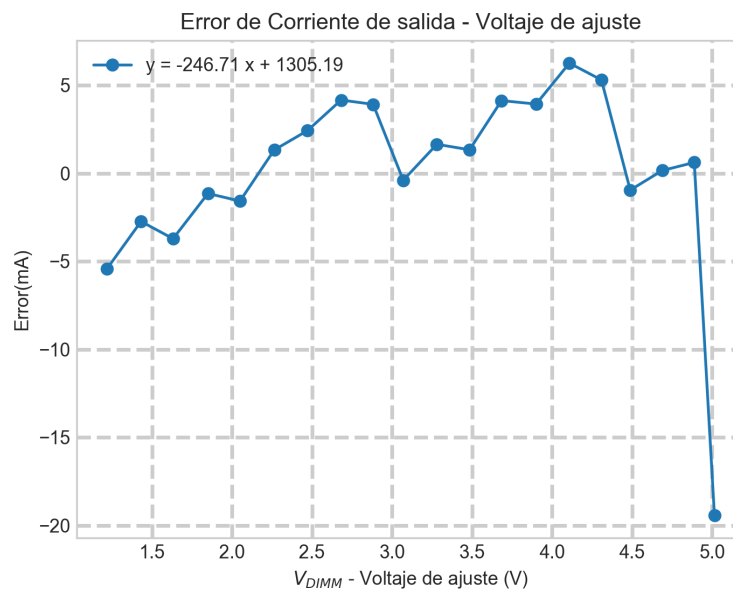


(b)

Figura 3.8.- (a) Relación entre voltaje de ajuste (V_{DIMM}) y corriente de salida (I_L) por medio de regulación lineal. (b) Error entre mediciones del método de regulación al polinomio calculado en base a un ajuste de curvas.



(a)



(b)

Figura 3.9.- (a) Relación entre voltaje de ajuste (V_{DIMM}) y corriente de salida (I_L) por medio de PWM. (b) Error entre mediciones del método de regulación al polinomio calculado en base a un ajuste de curvas.

3.3. Propuesta de diseño mecánico

Antes de presentar el rediseño del sistema de iluminación que se propone en este trabajo es necesario revisar nuevamente la configuración actual del SAI para justificar las características de dicho rediseño. De acuerdo a lo que se reporta en el trabajo de Martinez [1], la etapa de iluminación del SAI hace uso de dos lámparas fluorescentes de 18W, capaces de proporcionar (en teoría) un total de 2200lm, esta fuente de iluminación se coloca de manera que la luz que proviene de las lámparas ilumine de forma directa una lámina, de tal forma que la reflexión de la pintura blanca con la que se cubrió ilumine de forma indirecta una superficie objetivo, en este caso una pieza de acrílico blanco (tal como se muestra en las figuras 3.10 y 3.11) que funciona como difusor.

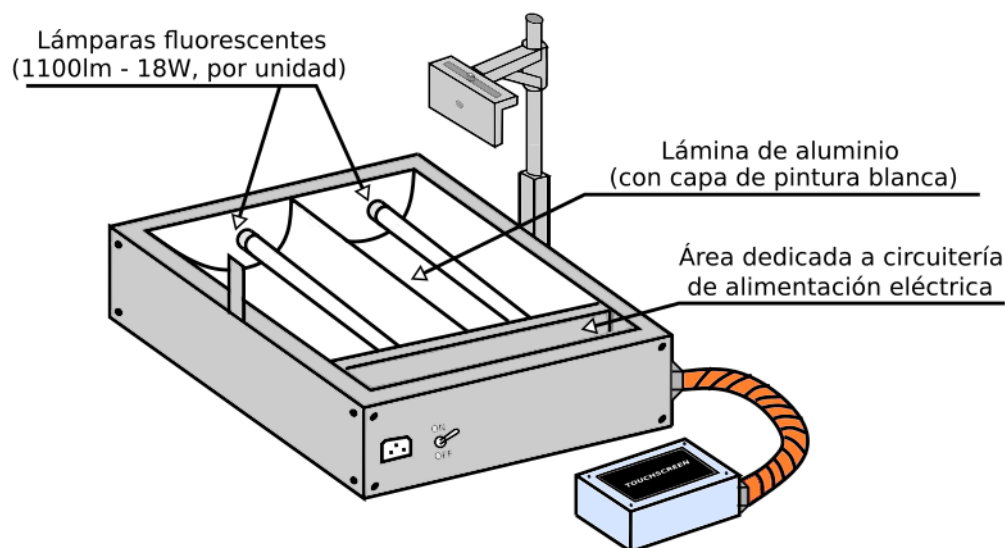


Figura 3.10.- Esquema general de la configuración interna de la etapa de iluminación del SAI-v5.

Durante el trabajo experimental de Martinez [1] se observa que el área de interés para las capturas de las muestras biológicas se reduce a un área de aproximadamente 35 in^2 ⁴(206.45 cm²) limitada por las dimensiones de los recipientes de vidrio que se decidió utilizar, por lo que el resto del área iluminada se desperdicia. Considerando este último punto y haciendo uso de la teoría descrita en el capítulo anterior sobre la

⁴En este trabajo se hace uso del sistema de unidades imperial por convención.

obtención de iluminación uniforme con fuentes puntuales con un patrón de radiación Lambertiano [15,16], se elaboraron una serie de maquetas basadas en un material ligero y fácil de manipular llamado *foamboard*. Como se puede observar en la figura 3.12, estas maquetas consisten en un marco de foamboard blanco, cuyas bases se elaboraron del mismo material siguiendo las dimensiones que proporcionan los disipadores que se establecieron en la sección anterior. El número de HB LEDs implementados en el diseño de estas maquetas (cuatro HB LEDs de 3W @1A en total) concuerda con el número mínimo de emisores necesarios para construir un sistema de iluminación de fondo con una geometría similar a los recipientes que se utilizaron en el trabajo experimental de Martínez [1] y que en conjunto se equipara al nivel de iluminancia que proporciona el SAI-v5 con un total de 1920lm en su máxima potencia. En la figura 3.12 a) se muestra el marco correspondiente al recipiente de menor tamaño empleado durante los experimentos de Martínez [1], y la figura 3.12 b) representa el marco con las dimensiones más grandes que se consideraron en el trabajo de Martínez. Ambos diseños respetan el principio de uniformidad establecido por el termino *DHR* y como una ventaja clara, hasta este punto, mantienen un conjunto de dimensiones físicas menores a las del SAI-v5.

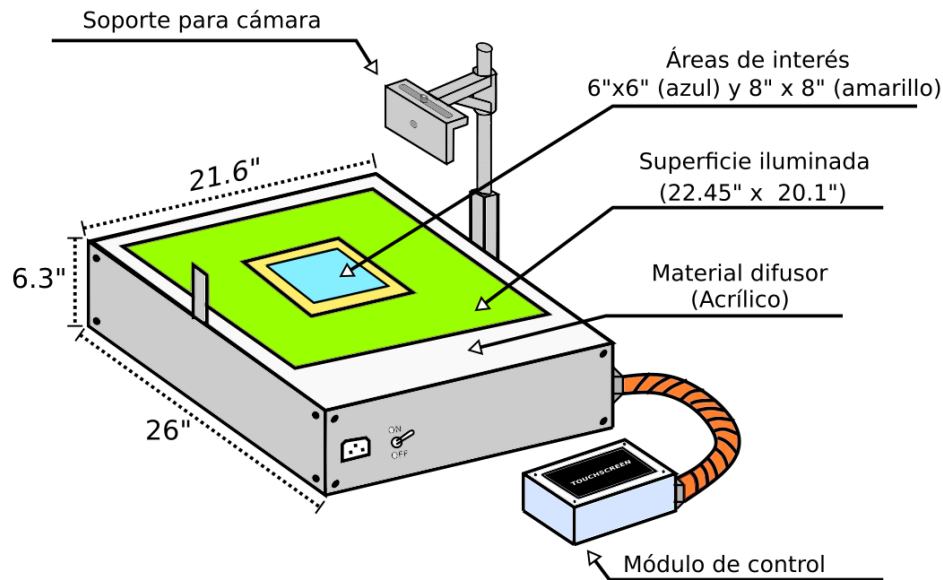


Figura 3.11.- Representación gráfica del área que se logra iluminar con el SAI-v5 y su comparación con respecto al área de interés en las capturas digitales.

Al término de las pruebas realizadas con ambas maquetas, se optó por basar el

diseño del módulo de iluminación en las dimensiones de la segunda maqueta puesto que son las que aseguran un alto nivel de uniformidad en la regional central, considerando el uso de un recipiente con características similares a las de la primera maqueta.

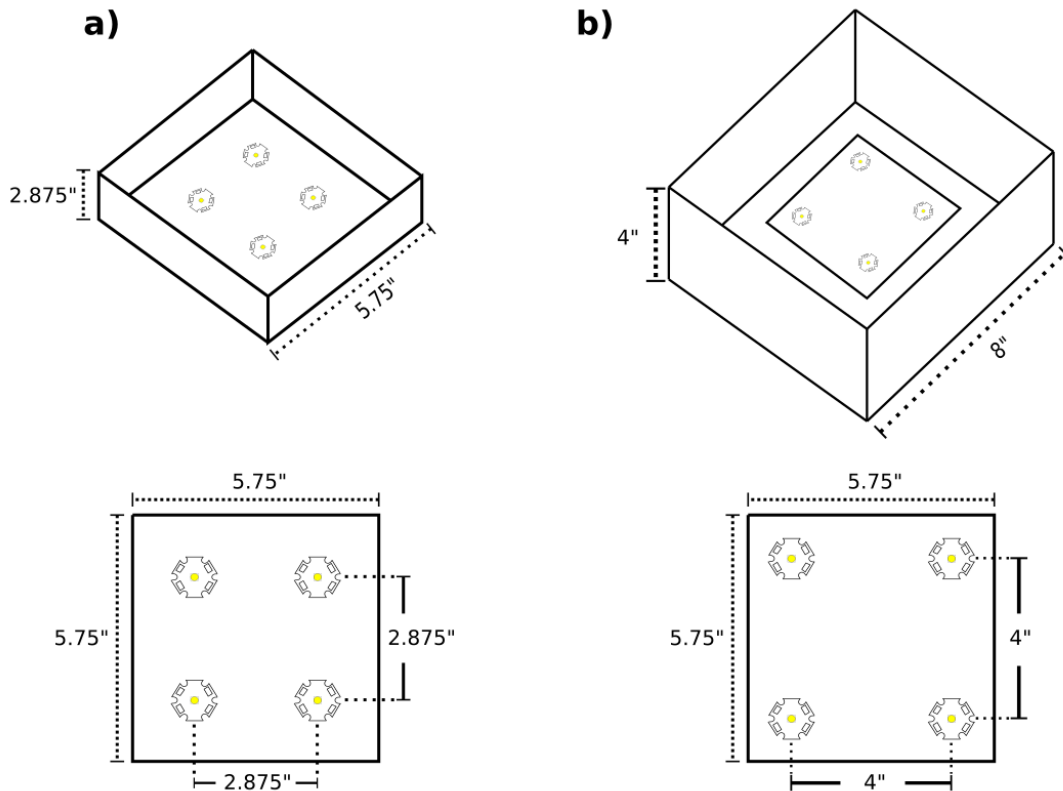


Figura 3.12.- *Diseño de marcos elaborados con foamboard como primera aproximación experimental al rediseño del módulo de iluminación.*

La estructura general del rediseño propuesto en este trabajo basa sus dimensiones en el segundo marco de foamboard, como se muestra en la figura 3.13, y consiste en el ensamble mecánico de cuatro etapas (las cuales se muestran en la figura 3.14), en la figura 3.14 a) se muestra cada una de estas etapas por separado, comenzando por la base de los HB LEDs, la cual consta del uso de los dos disipadores que se mencionaron en subsecciones anteriores, dichos disipadores son alineados al fijarse a un marco de aluminio que además de esto, permite el montaje de un gabinete de plástico que delimita el área de proyección de la fuente de iluminación y por último se coloca una

pieza de acrílico que recae sobre las paredes plásticas, la cual cumple con la tarea de homogeneizar la luz que se recibe sobre esta superficie.

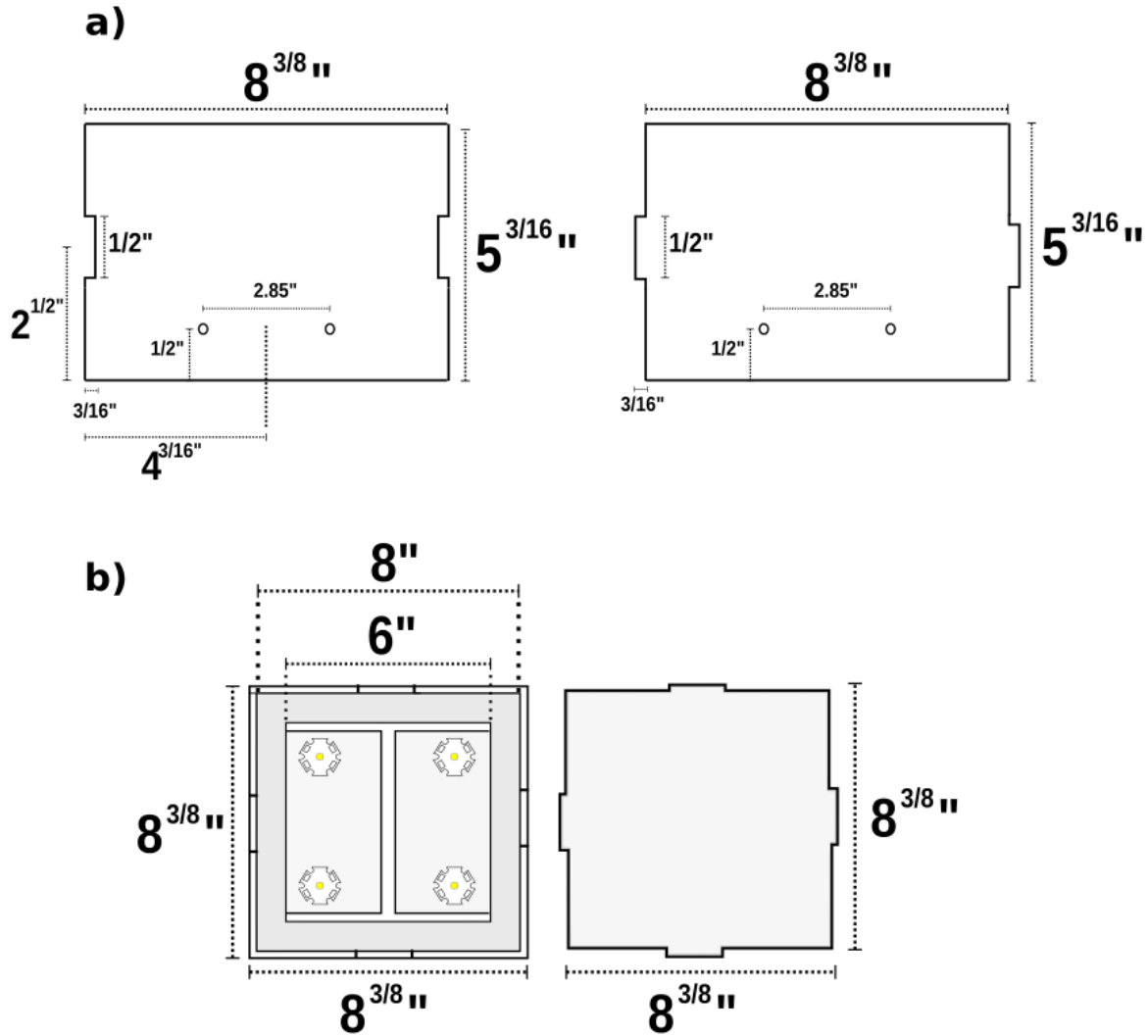


Figura 3.13.- Esquema 2D del diseño propuesto para el montaje de HB LEDs. a) Dimensiones de las paredes del sistema, y b) Dimensiones del sistema ensamblado y panel difusor (vista superior).

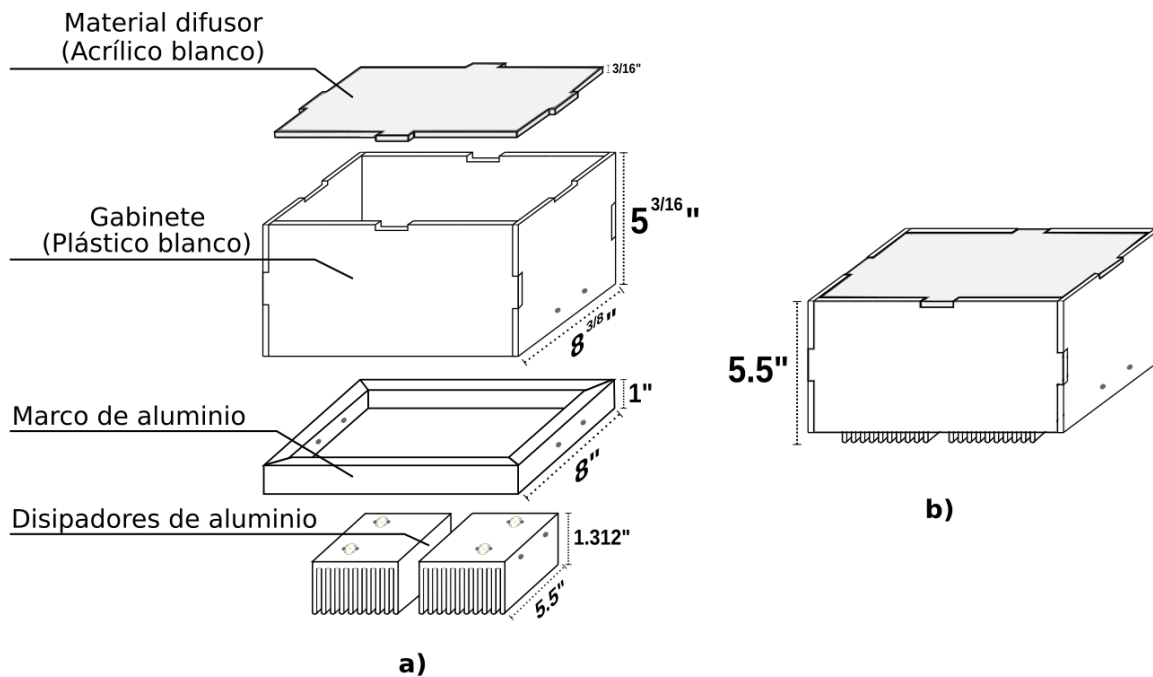


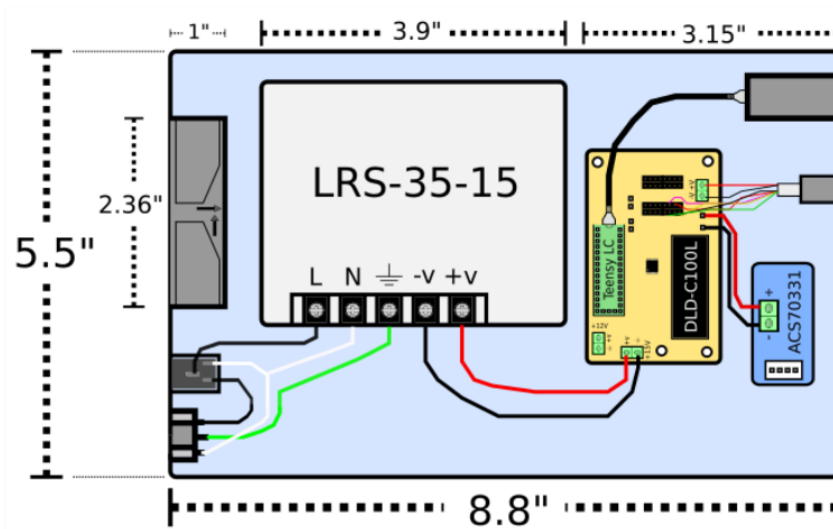
Figura 3.14.- Ensamble mecánico del módulo de iluminación propuesto. a) Etapas de ensamblaje del diseño propuesto. b) Figura representativa del aspecto del módulo de iluminación ensamblado.

Este diseño presenta ciertas ventajas en comparación al sistema de iluminación del SAI-v5, comenzando por la optimización del área iluminada, lo que permite reducir de forma considerable las dimensiones del módulo, también es importante mencionar que aunque este tipo de ensamblaje permite tener un acceso a las fuentes de iluminación similar a las del SAI-v5, su reemplazo no resulta un proceso trivial debido a la manera en la que se realiza su montaje.

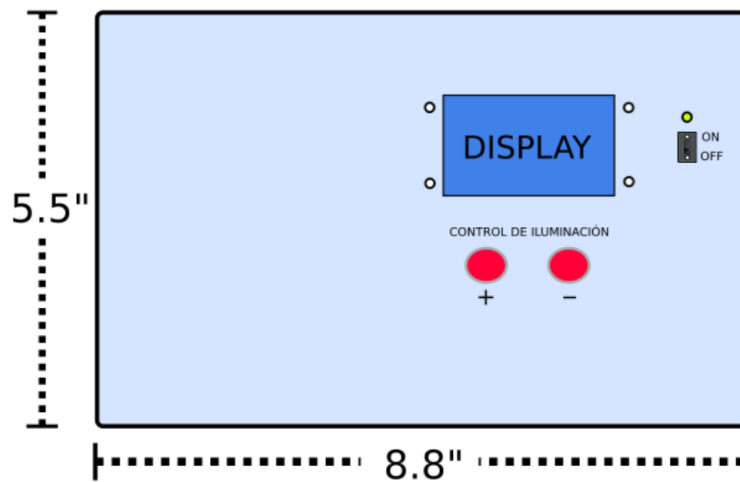
3.4. Propuesta de diseño del módulo de control

En el trabajo de Martínez [1] se menciona que el control de la iluminación del SAI-v5 se logra por medio de un módulo externo, el cual se compone por un sistema embebido (*Raspberry Pi*), electrónica de potencia y una pantalla táctil capacitiva para interactuar con la interfaz gráfica relacionada a la configuración básica de la cámara en uso y los tiempos de encendido y apagado de la iluminación en cuestión.

En comparación a lo que se describe anteriormente, el módulo de control (véanse figuras 3.15 y 3.16) que se propone en esta sección contiene la fuente de alimentación principal, un ventilador de 60mm que regula la temperatura interna y se hace uso de un microcontrolador que monitoriza los sensores de corriente y temperatura con los que se corrobora el funcionamiento del sistema de iluminación (tal y como se muestra en la figura 3.15(a)), además de que se cuenta con una interfaz manual (véase figura 3.15(b)) que permite introducir comandos para regular el nivel de iluminancia del módulo de iluminación por medio de los controles situados en la parte superior de dicho módulo de control.

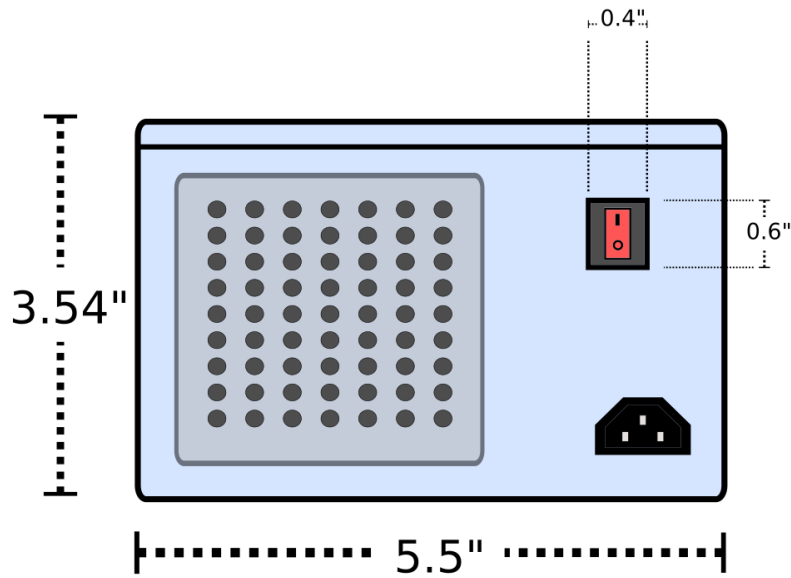


(a)

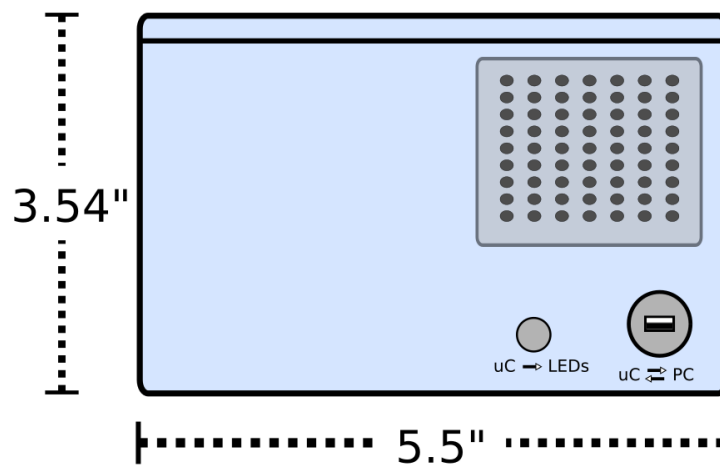


(b)

Figura 3.15.- Descripción esquemática de (a) contenido interno del módulo de control propuesto y (b) interfaz manual presente en el panel frontal. Basado en el microcontrolador Teensy LC y el sensor de corriente ACS70331.



(a)



(b)

Figura 3.16.- Descripción esquemática de puertos I/O del módulo de control. (a) Entrada de ventilación, conector de alimentación principal e interruptor de alimentación eléctrica general. (b) Salida de ventilación y puertos de comunicación y regulación.

3.4.1. Interfaz para uso con computadora

El uso de la interfaz manual de la figura (3.15) permite controlar de forma sencilla, intuitiva y autónoma (en cuestión de alimentación eléctrica) el sistema de iluminación. Sin embargo, se deben considerar las situaciones donde no es posible que se opere de forma directa el sistema de iluminación, por lo que se desarrolló una interfaz gráfica de usuario (también denominada *GUI*, por sus siglas en inglés) compatible con múltiples plataformas (Linux/Windows) que permite el manejo del sistema por medio del uso de un equipo de cómputo, al comunicarse con el microcontrolador del módulo de control por medio de comunicación serie con base a algunas bibliotecas de Python 3.6 como *pyserial* y *Tkinter*.

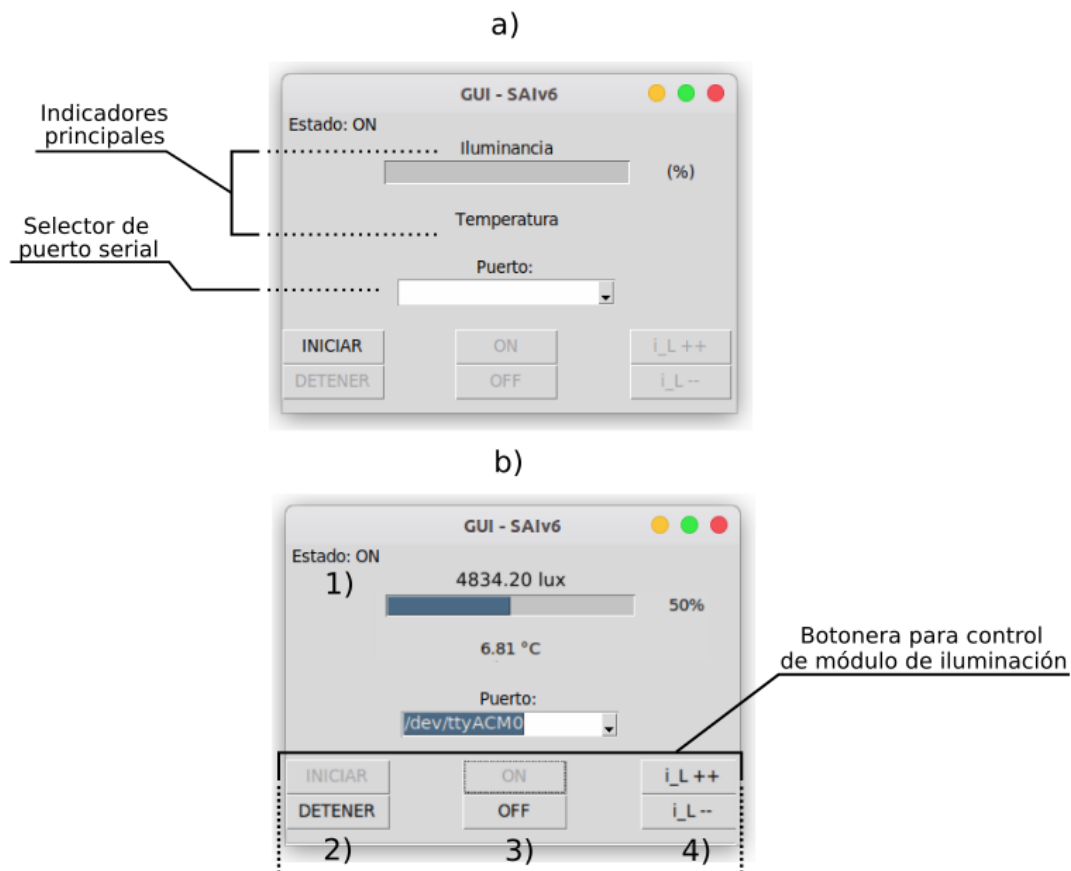


Figura 3.17.- GUI para el control de forma remota del sistema de iluminación.

La figura 3.17 a) muestra la composición general de la interfaz antes de establecer comunicación con el microcontrolador. Antes intentar establecer la comunicación serie entre ambos sistemas es importante hacer selección de algunos de los puertos detectados por el script, de lo contrario un mensaje de advertencia aparecerá indicando que la conexión no se pudo realizar a falta de dicha acción. En el caso de la figura 3.17 b), se puede observar la botonera dedicada a los comandos que controlarán la interacción entre la GUI y el microcontrolador. En este caso, 1) en la figura 3.17 b) es un simple indicador del estado general del sistema controlado, y varía en función al estado de los botones correspondientes a 3) los cuales permiten activar o desactivar por completo la salida de la fuente DLD-C100L (esta opción se encuentra únicamente disponible en modo de control remoto). En el caso de las secciones 2) y 4), tenemos los botones que permitirán realizar con comunicación serie con el microcontrolador y la regulación de i_L en pasos discretos del 10 %, respectivamente.

3.5. Algoritmo de regulación de corriente (i_L)

En esta sección se muestra en forma de diagrama de flujo el algoritmo con el que se programó en el Teensy LC para gestionar la información de los sensores que se han presentado en las secciones anteriores y las entradas de las diferentes interfaces para regular la corriente suministrada a los HB LEDs (i_L).

El algoritmo sigue una rutina en la que se establecen algunos valores iniciales como: nivel de intensidad lumínica mínima recomendada ($i_L = 300\text{mA}$), voltaje de compensación (V_{offset}) para la lectura del sensor ACS70331 ($V_{offset} = 0.26$) y un espacio para la variable *input* del tipo *char* con la que se hace selección de la operación que modifica el estado actual de la salida del panel de iluminación (véase figura 3.18).

Dentro del ciclo principal (ciclo *while*) se realiza una revisión constante al estado de los pines digitales asignados a los botones de la interfaz física que se muestra en la figura 3.15 b), si se detecta un flanco de subida⁵ en alguno de estos pines se manda a llamar una ISR⁶ en la que el microcontrolador aumenta o disminuye una determinada cantidad al valor actual de la variable i_L (véanse figuras 3.18 y 3.19).

Dentro de este mismo ciclo se verifica si existe conexión serie entre el microcontrolador y otro dispositivo, en el caso de que esto se cumpla, la variable *input* toma el valor correspondiente al caracteres que se envía desde los botones de la GUI (véase figura 3.17) al microcontrolador a través del puerto de comunicación serie y, dependiendo

⁵Transición de un valor lógico bajo a un valor lógico alto.

⁶Acrónimo para el término en inglés: *Interruption Service Rutine*, y hace referencia al mecanismo que permite asociar una función a la ocurrencia de un determinado evento.

de dicho carácter, se elige una acción en específico relacionada a la salida del sistema (incremento/decremento del nivel de intensidad o encendido/apagado del módulo de iluminación). Seguido de esto, se realiza un promedio de las lecturas realizadas a los sensores del sistema, con los cuales se calculan los valores actuales de T_j , iluminancia de salida y V_{ctrl} necesario para regular la salida del CPCM a un nivel de corriente específico y por último (véase figura 3.20), se verifica que el valor de T_j no sobrepase el límite establecido por el fabricante antes de hacer el despliegue de la información de interés al usuario.

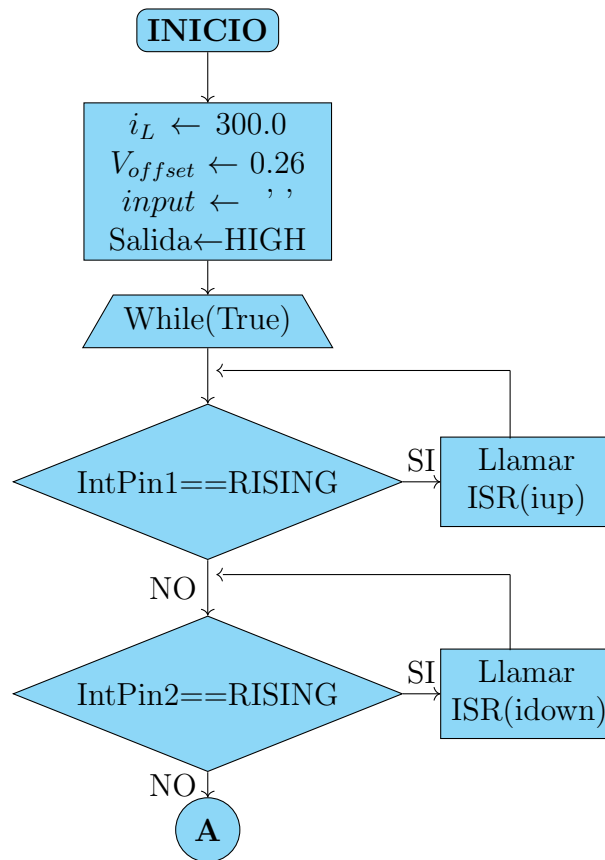


Figura 3.18.- Diagrama de flujo correspondiente al algoritmo para regular i_L en base a V_{ctrl} .

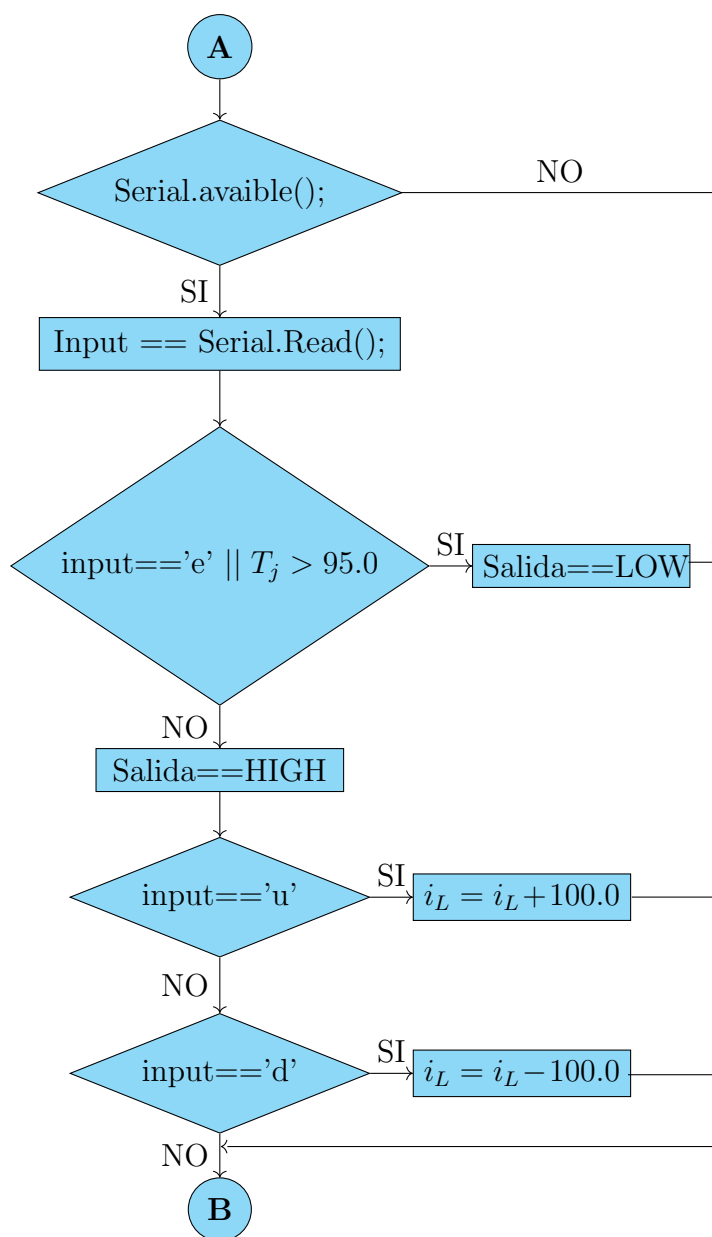


Figura 3.19.- Continuación del diagrama de flujo correspondiente a la figura 3.18.

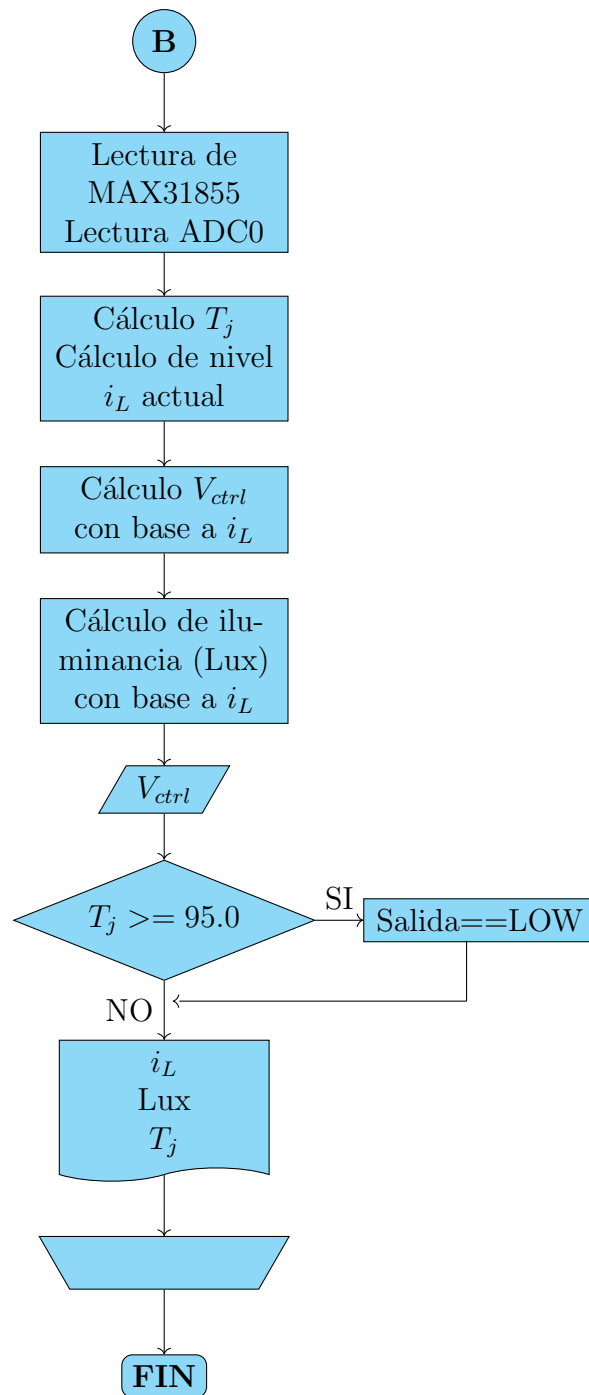


Figura 3.20.- Continuación del diagrama de flujo correspondiente a la figura 3.19.

Como se puede observar al término de este capítulo, la combinación de la tecnología LED seleccionada junto con otros factores como un determinado tipo de alimentación eléctrica, un diseño mecánico (de acuerdo a los parámetros establecidos en el capítulo anterior) y un algoritmo que regule de manera apropiada el nivel de intensidad de dicha fuente de iluminación, entrega como producto final un sistema de iluminación de fondo que, en teoría, tiene la funcionalidad del SAI-v5, y de forma adicional, una serie de ventajas proporcionadas por el mismo diseño. Los resultados de la comparación entre el prototipo desarrollado y el SAI-v5 se presentan con mayor detalle en el siguiente capítulo.

Capítulo 4

Resultados

En este capítulo se presenta la implementación del módulo de iluminación con su respectivo módulo de control, la estructura interna de este y el funcionamiento general del sistema. Por último, se realiza una comparativa del prototipo desarrollado en este trabajo contra el sistema de referencia SAI-v5 con base a las métricas establecidas en capítulos anteriores.

4.1. Integración del equipo

Como se estableció en el desarrollo del capítulo anterior, el diseño del sistema de iluminación consiste principalmente de dos partes, un juego de paredes (cuatro piezas de acrílico blanco) sujetas a un marco de aluminio, en el cual se colocan los disipadores donde reposan las fuentes de iluminación, en este caso, cuatro HB-LEDs de 3W con una temperatura de color de 6500K. Acoplado a una de las paredes del panel de iluminación, se tiene un gabinete compacto donde se colocó el módulo del sensor de temperatura MAX31855, cumpliendo la función de una etapa interconexión entre el panel de iluminación y el módulo con la electrónica de control (véase figura 4.1).

La conexión entre ambas etapas se realiza por medio de un conector DIN 45329, con el cual se suministra la alimentación eléctrica requerida tanto por el panel de iluminación como por el sensor de temperatura, además de proveer un canal de transmisión de datos.(véase figura 4.2(a)).

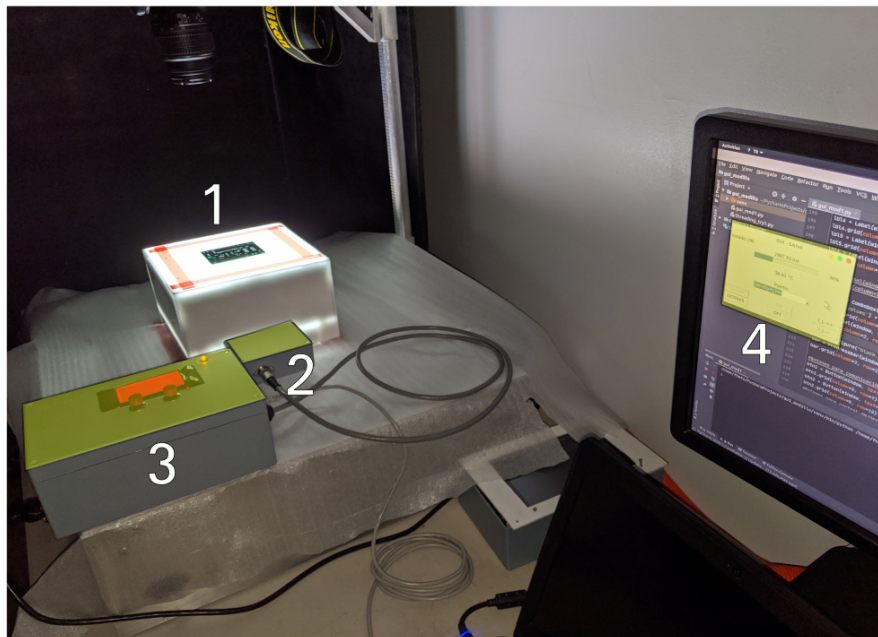


Figura 4.1.- Captura del sistema de iluminación en funcionamiento. 1) Panel de iluminación de fondo basado en HB LEDs. 2) Módulo de interconexión entre panel de iluminación y módulo de control. 3) Módulo para regular intensidad en panel de iluminación. 4) Interfaz de computadora para monitorizar y regular la intensidad lumínica del sistema de forma remota.

La figura 4.2(b) muestra por secciones el contenido interno tanto del módulo de interconexión como del módulo de control. Con respecto a este último, en las figuras 4.1 y 4.2(a) se puede observar la interfaz y los controles que le permiten al usuario regular la corriente que se suministra a la carga en incrementos de 100mA, a un costado del mismo gabinete se encuentra el puerto de conexión USB, con el que de forma opcional se puede hacer uso de la GUI diseñada para cumplir la función de regulación y control de ENCENDIDO/APAGADO del sistema de manera remota por medio de un equipo de cómputo capaz de ejecutar código basado en python, tal como se muestra en la figura 4.1.

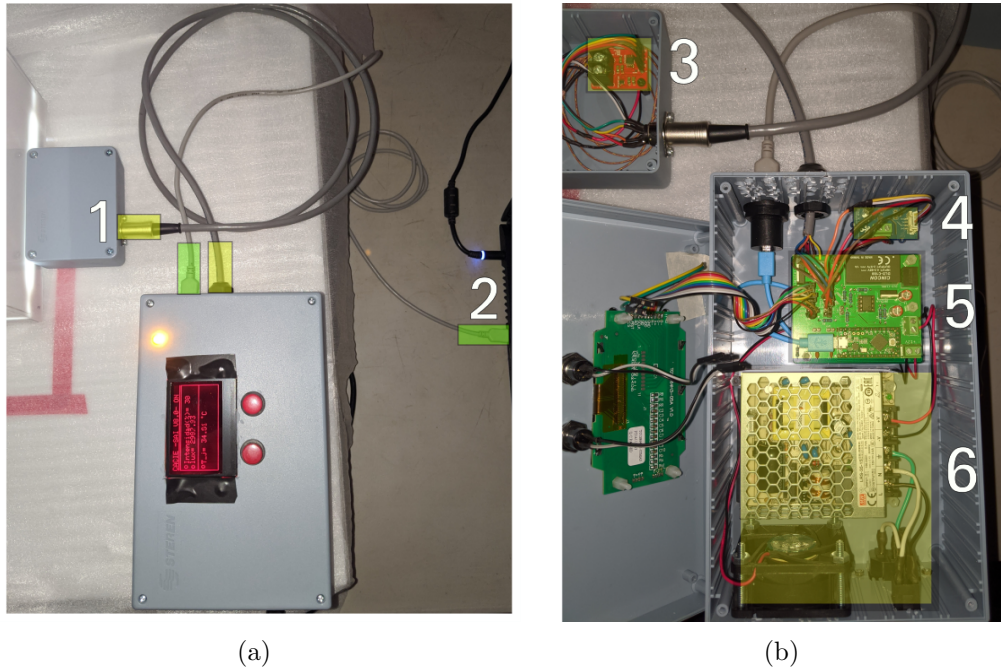


Figura 4.2.- (a) Esquema conexión entre módulos y computadora personal: 1) Conexión establecida entre módulo de electrónica relacionada al sensor MAX31855 y cableado de alimentación para HB LEDs por medio de un conector DIN 45329, 2) Conexión entre módulo de regulación y computadora personal a través de puertos USB tipo A. (b) Contenido interno en módulos empleados en el sistema de iluminación: 3) Sensor de temperatura MAX31855, 4) Sensor de corriente ACS70331, 5) Electrónica de regulación de corriente y 6) Etapa de conversión CA/CD y ventilación.

4.2. Caracterización del prototipo

Uno de los principales objetivos del diseño que se propone en este trabajo es el obtener al menos características similares al SAI-v5 en relación con el nivel de iluminancia¹ y la uniformidad de la luz proyectada sobre el panel difusor en la etapa de iluminación. Es por esta razón que, una vez probada la funcionalidad del prototipo, es necesario realizar una comparación entre los dos dispositivos en cuestión, para demostrar de manera cuantitativa la mejora que se obtiene en rendimiento. Dicha comparación se describe a continuación.

¹Cantidad de flujo luminoso que incide en una superficie. En unidades derivadas del Sistema Internacional, se mide en *lux*, o en lm/m^2 de forma equivalente.

4.2.1. Iluminancia de salida del sistema

En ambos sistemas se empleó el sensor TSL2561 para medir la cantidad de iluminancia que se obtiene en la superficie iluminada. En el caso del diseño propuesto, las mediciones se basaron en cinco diferentes puntos del panel difusor (véase figura 4.3(a)), correspondientes a la región central del mismo y a las ubicaciones correspondientes al punto donde se obtiene el nivel de intensidad más alto en cada uno de los HB-LEDs (eje normal al plano objetivo). En cuanto a las mediciones realizadas en el SAI-v5, sólo se consideró el segmento central de interés en el que se basa las dimensiones del prototipo propuesto correspondiente a un área de 64in^2 . Dentro de esta región se tomaron mediciones considerando nueve puntos que se distribuyeron de forma equidistante (véase figura 4.3(b)).

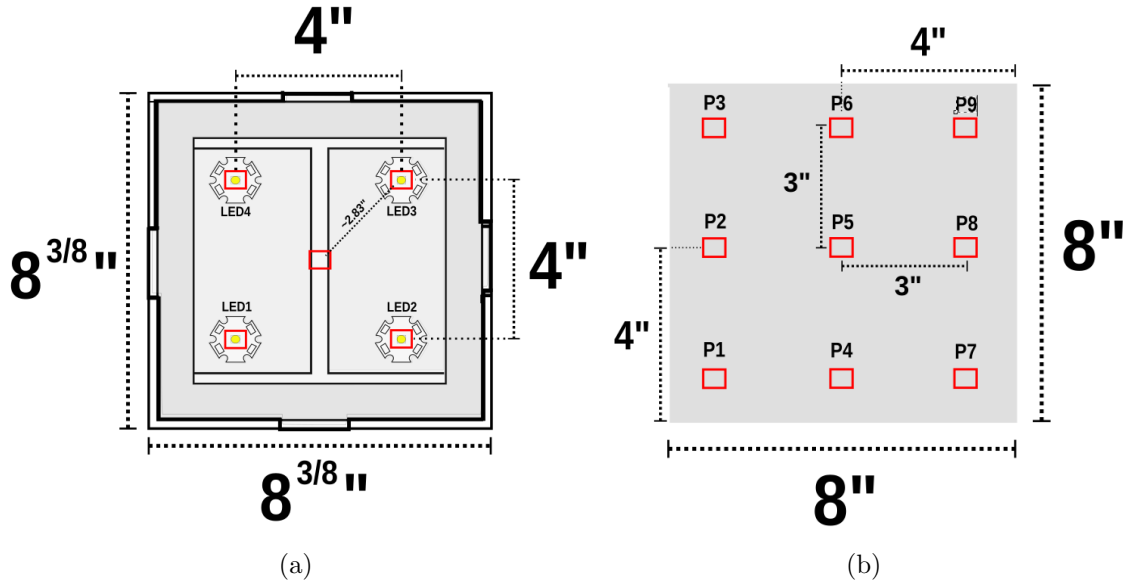


Figura 4.3.- Esquema representativo de los puntos donde se realizaron mediciones de iluminancia, donde (a) diseño propuesto, (b) segmento de interés en SAI-v5. Las figuras rectangulares rojas representan la ubicación del sensor TSL2561 sobre cada una de las superficies a 1cm de distancia.

Los resultados que se obtuvieron de las mediciones en el prototipo desarrollado se muestran en la tabla 4.1 y con apoyo de la figura 4.4 se puede observar una variación por parte de los HB-LEDs número 3 y 4. Este procedimiento de medición se repitió para corroborar dicho comportamiento y se concluyó que si bien las variaciones quizás provengan de las características intrínsecas a estos dispositivos, estas no representan un

problema significativo para aplicación debido al bajo valor de las mismas a lo largo de la escala (100lux, aproximadamente).

Tabla 4.1.- Resultado de las mediciones de iluminancia que se realizaron en cada uno de los puntos de interés del prototipo desarrollado, tal y como se establece en la figura 4.3(a).

Punto de medición	Iluminancia (lux)									
	Nivel de intensidad con respecto a i_L									
	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %
LED1	1118	2116	3117	4095	5047	5974	6880	7765	8625	9455
LED2	1122	2098	3089	4054	4995	5910	6808	7682	8532	9358
LED3	1122	2100	3090	4055	4993	5905	6800	7669	8512	9332
LED4	1085	2032	2994	3928	4838	5723	6590	7435	8250	9045
Punto central	1090	2040	2996	3929	4834	5717	6580	7415	8230	9020
Promedio	1107	2077	3057	4012	4941	5846	6732	7593	8430	9242

Con el uso del promedio de las mediciones que se realizaron en el prototipo elaborado, se calculó un polinomio de aproximación que proporciona al usuario final la capacidad de monitorizar, con un bajo nivel de error, el nivel de iluminancia de salida de este. Una representación gráfica del ajuste de curvas que se realizó y del error con respecto a la media de las mediciones se muestra en la figura 4.5.

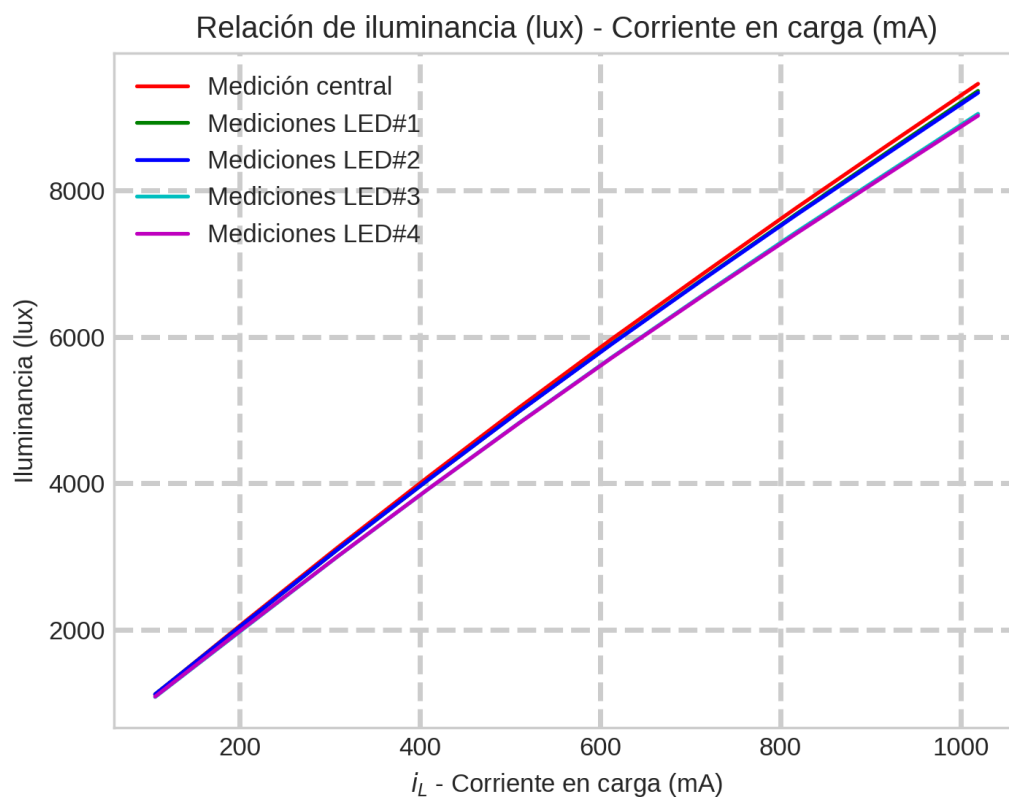
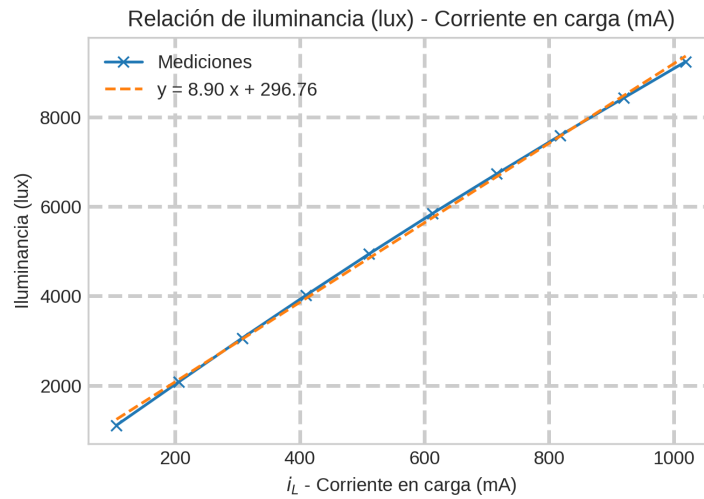
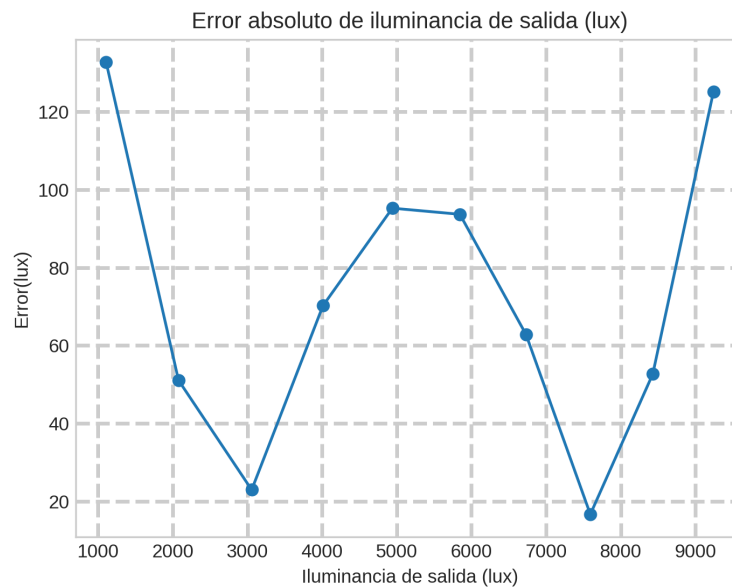


Figura 4.4.- Gráfica del promedio de las mediciones realizadas en cinco diferentes puntos de la superficie iluminada por el diseño propuesto.



(a)



(b)

Figura 4.5.- Gráficas correspondientes al cálculo de polinomio de aproximación de lux con base a una determinada corriente en la carga. (a) Relación lux de salida - corriente en carga, (b) Error absoluto entre la media de las mediciones de lux de salida y el ajuste de curvas.

La tabla 4.2 muestra el resultado de las mediciones que se llevaron a cabo en el segmento de interés del SAI-v5, en esta se observa que el promedio del nivel de iluminancia que proporciona el sistema en el estado de encendido se aproxima a 1863lux. Esto quiere decir que El único nivel de iluminancia presente en el SAI-v5 resulta en una deficiencia cercana al 10 % en comparación a los 2077lux que entrega el prototipo en su segundo nivel de iluminación (correspondiente al 20 % de la intensidad máxima), lo cual demuestra que el rendimiento del prototipo que se presenta en este capítulo, en cuestión de iluminancia, se compara al del SAI-v5 en su estado actual y puede considerarse un equipo más flexible considerando los múltiples niveles a los que se puede ajustar dicho parámetro sin generar parpadeos (o *flickers*²) debido a el tipo de alimentación eléctrica que se suministra la carga se aproxima a una señal de CD.

Tabla 4.2.- Resultado de las mediciones de iluminancia que se realizaron en cada uno de los puntos de interés del SAI-v5, tal y como se establece en la figura 4.3(b).

	Iluminancia (lux)
Punto de medición	Nivel de intensidad
	100 %
P1	1868
P2	1946
P3	1869
P4	1780
P5	1842
P6	1775
P7	1875
P8	1940
P9	1876
Promedio	1863

4.2.2. Análisis de uniformidad

Tal como se estableció en capítulos anteriores, existen dos parámetros que en la literatura se usan de manera frecuente para determinar el nivel de uniformidad en la iluminación proyectada sobre una superficie objetivo al utilizar una técnica de iluminación de fondo, estos corresponden a CV(RMSE) y U, dados por las expresiones (2.8) y

²Característica de una fuente de iluminación que brilla de forma inestable; o el brillo de la misma varía a una frecuencia tal que el observador puede percibir las transiciones entre encendido y apagado del sistema.

(2.9), respectivamente. En un caso ideal, se espera que $CV(RMSE)$ tienda a un valor cercano a cero, caso contrario a U , puesto que, al representar la relación entre el nivel mínimo y máximo de intensidad presente en la superficie iluminada, este debería acercarse a la unidad mientras más homogénea sea la distribución de los niveles de intensidad detectados.

En este trabajo en particular, se estableció como uno de los objetivos específicos diseñar un sistema de iluminación que se aproximará a las características de uniformidad de la etapa de iluminación del SAI-v5 (las cuales se muestran en la figura 4.7). En la figura 4.7 se observa el nivel de uniformidad en el área iluminada por las lámparas fluorescentes T8 del SAI-v5 (región resaltada en color verde en la figura 4.6), dicha fuente de iluminación proporciona un nivel bajo tanto de $CV(RMSE)$, así como del índice U en comparación a los sistemas disponibles de forma comercial [34–38]. Además de esto, el área de interés dentro de esta zona se reduce a una región centrada con respecto a la posición del soporte para el dispositivo de captura (región resaltada en color amarillo en la figura 4.6), cuya distribución de iluminación podemos apreciar en la figura 4.8.

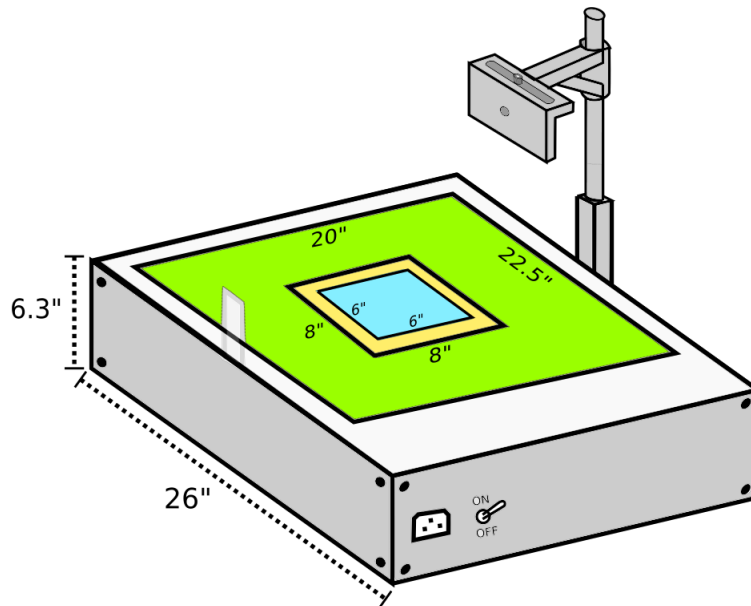


Figura 4.6.- Representación gráfica del área iluminada por el SAI-v5 (área verde) y las regiones de interés en las que se basó el diseño del panel de iluminación (área amarilla y azul).

El prototipo que se construyó sigue una serie de restricciones de diseño (nivel de iluminancia y área de cobertura mínima) con las cuales se entrega como resultado el máximo nivel de uniformidad posible sobre una superficie iluminada que corresponden a las mismas dimensiones físicas que las del área de interés que se estableció previamente. Las tomas fotográficas que se realizaron durante las pruebas para determinar el nivel de uniformidad de prototipo desarrollado se llevaron a cabo con bajos niveles de sensibilidad (ISO 800), una apertura pequeña (f8.0) y una alta velocidad de obturación (1/400), respetando los parámetros empleados durante la etapa de experimentación del trabajo de Martínez [1], con la finalidad de hacer énfasis en la aplicación del prototipo desarrollado en el mismo tipo de actividades de investigación relacionadas al área de PDI en el que se usa el SAI-v5.

Los resultados relacionados a dichas pruebas para determinar el nivel de uniformidad en cada sistema se muestran en las figuras 4.9–4.11 y 4.12–4.14.

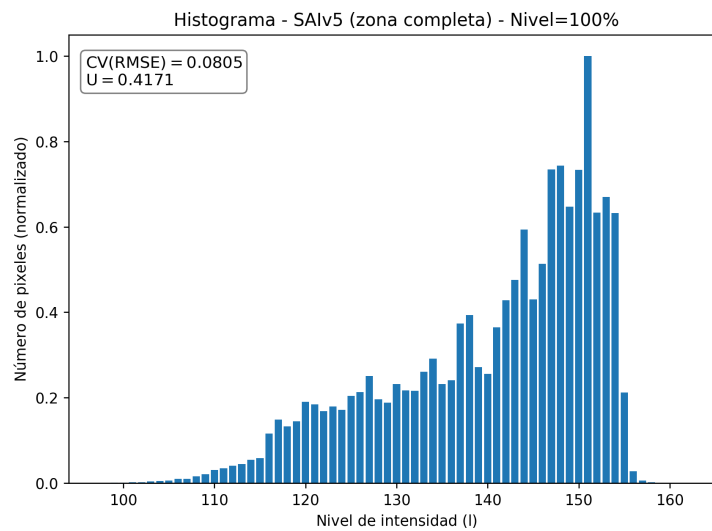
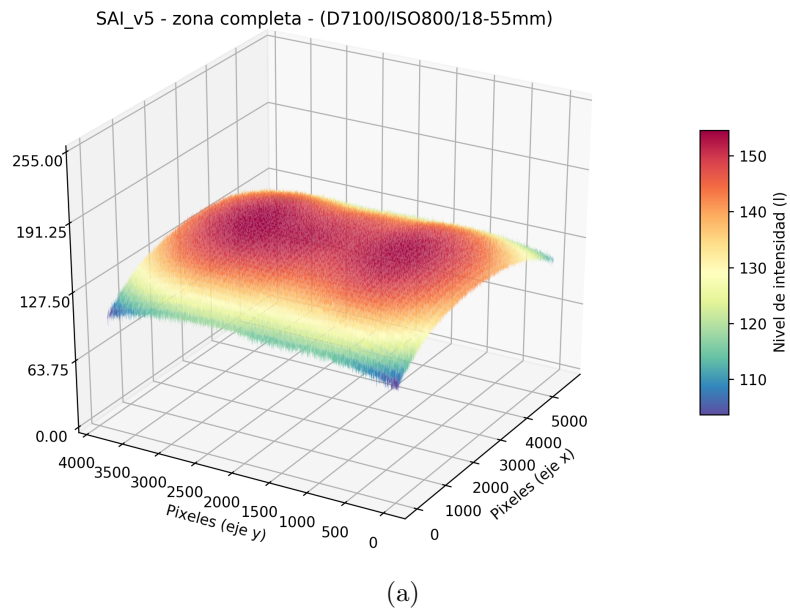


Figura 4.7.- Representación gráfica de la distribución de iluminación en el panel difusor del SAI-v5. (a) Gráfico 3D de la distribución en el área iluminada, (b) Histograma del gráfico en (a) en el que se muestra la distribución de los niveles de intensidad presentes en la imagen analizada.

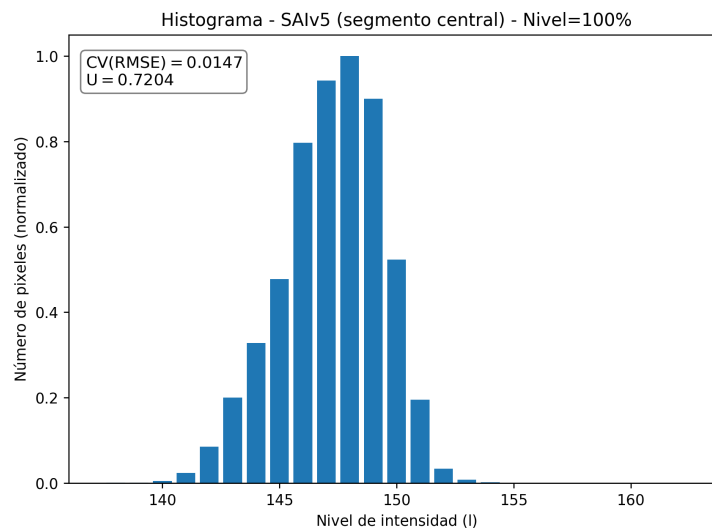
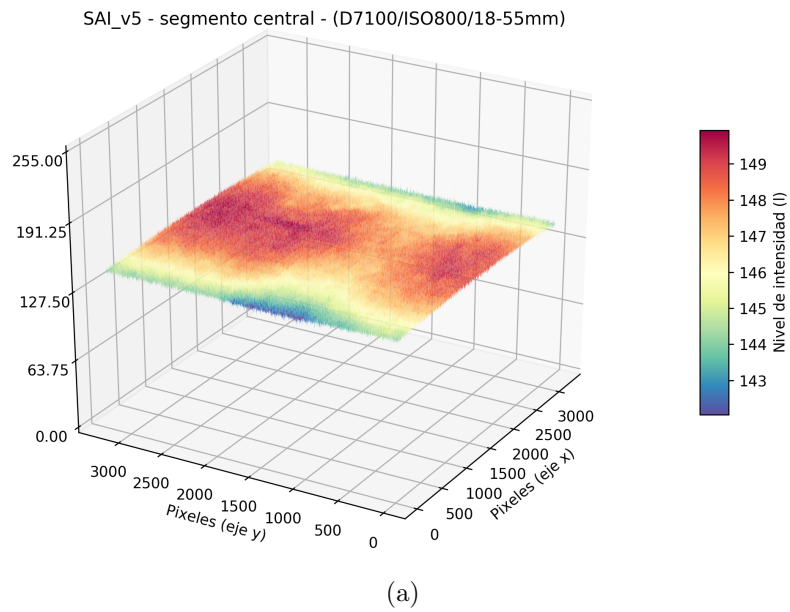


Figura 4.8.- Representación gráfica de la distribución de iluminación en el área de captura de interés del SAI-v5. a) Gráfico 3D de la distribución en el área iluminada, (b) Histograma del gráfico en (a) en el que se muestra la distribución de los niveles de intensidad presentes en la imagen analizada.

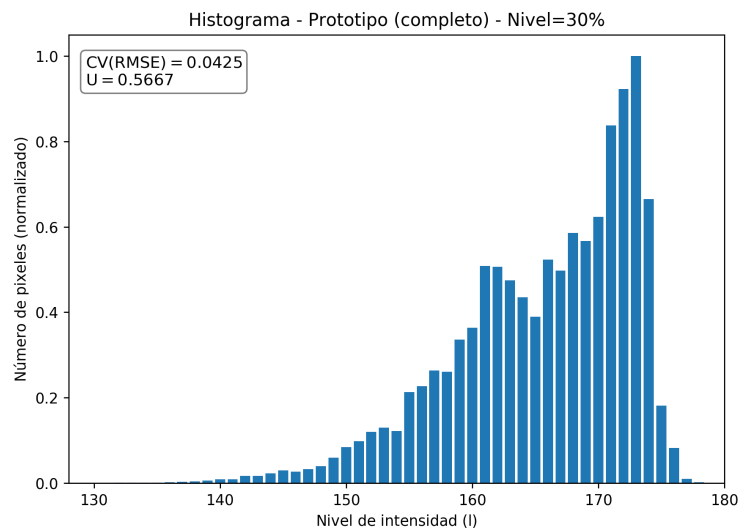
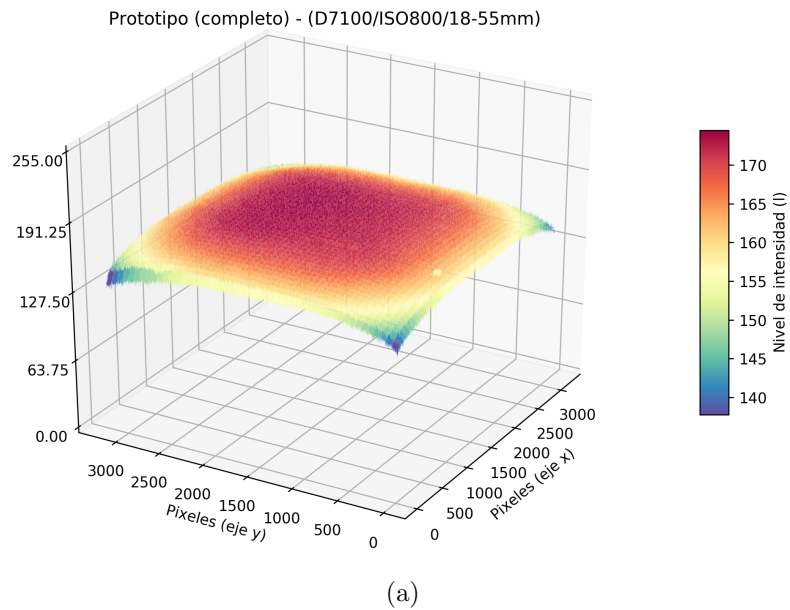


Figura 4.9.- Representación gráfica de la distribución en el área iluminada por el prototipo desarrollado al 30 % del nivel de iluminación. (a) Representación 3D de la distribución de intensidades detectadas sobre superficie iluminada, (b) Histograma del gráfico en (a) en el que se muestra la distribución de los niveles de intensidad presentes en la imagen analizada.

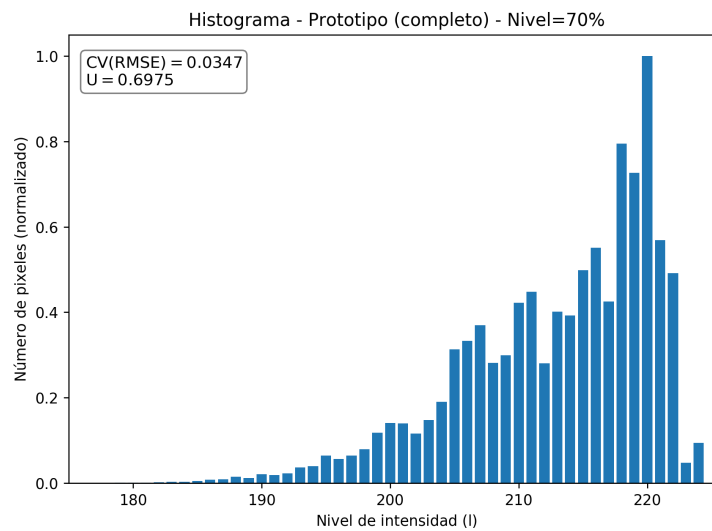
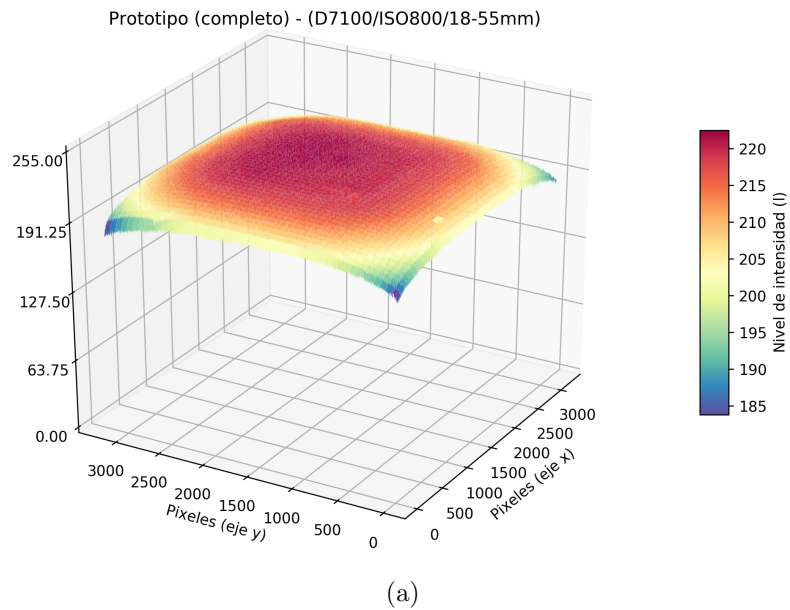


Figura 4.10.- Representación gráfica de la distribución en el área iluminada por el prototipo desarrollado al 70 % del nivel de iluminación. (a) Representación 3D de la distribución de intensidades detectadas sobre superficie iluminada, (b) Histograma del gráfico en (a) en el que se muestra la distribución de los niveles de intensidad presentes en la imagen analizada.

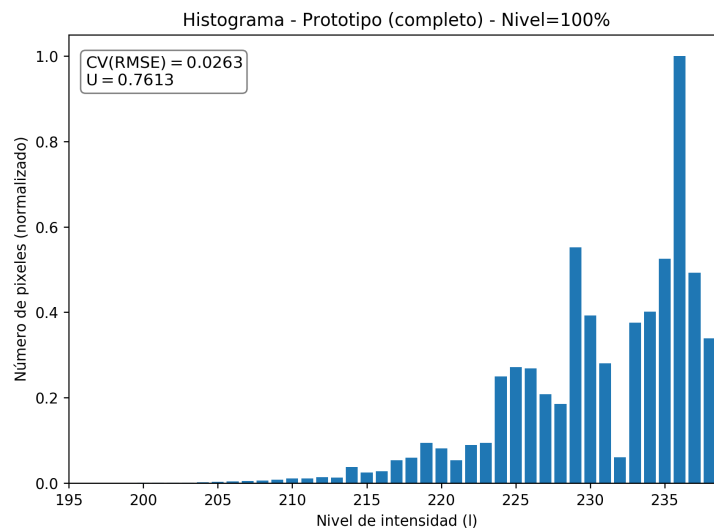
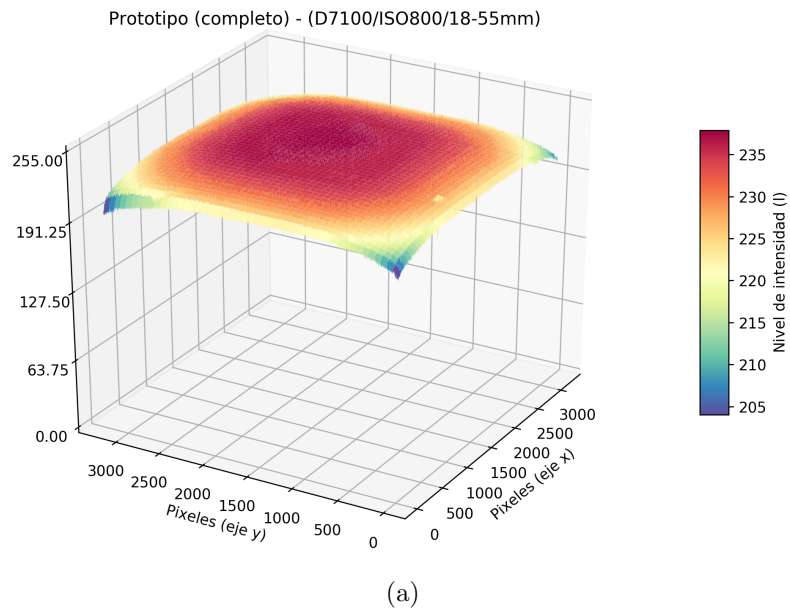


Figura 4.11.- Representación gráfica de la distribución en el área iluminada por el prototipo desarrollado al 100 % del nivel de iluminación. (a) Representación 3D de la distribución de intensidades detectadas sobre superficie iluminada, (b) Histograma del gráfico en (a) en el que se muestra la distribución de los niveles de intensidad presentes en la imagen analizada.

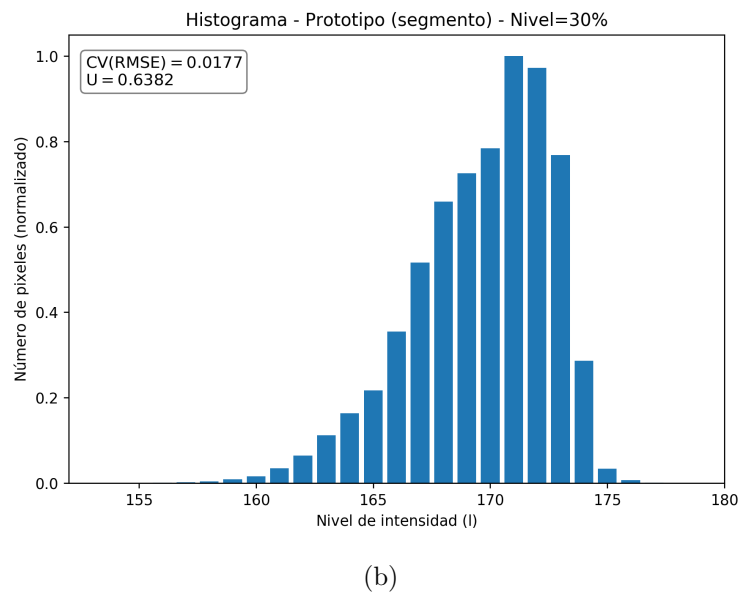
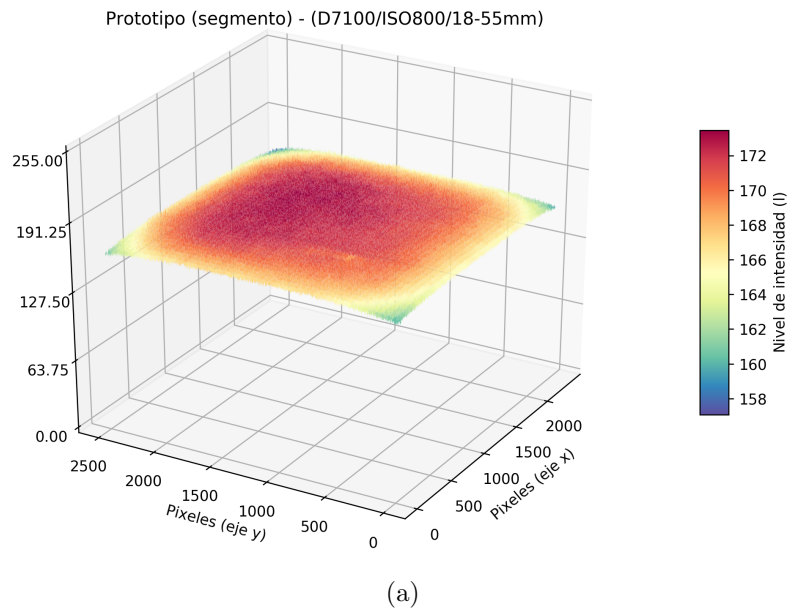


Figura 4.12.- Representación gráfica de la distribución en región central del área iluminada por el prototipo desarrollado al 30 % del nivel de iluminación. (a) Representación 3D de la distribución de intensidades detectadas sobre superficie iluminada, (b) Histograma del gráfico en (a) en el que se muestra la distribución de los niveles de intensidad presentes en la imagen analizada.

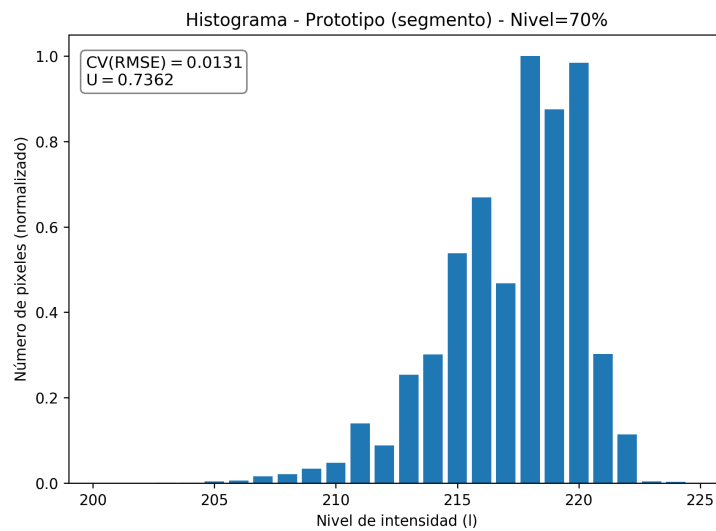
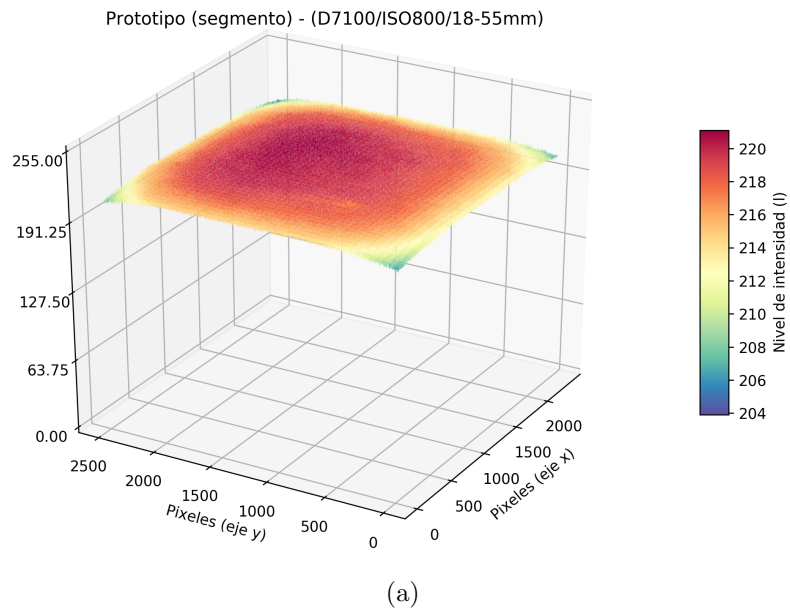


Figura 4.13.- Representación gráfica de la distribución en región central del área iluminada por el prototipo desarrollado al 70 % del nivel de iluminación. (a) Representación 3D de la distribución de intensidades detectadas sobre superficie iluminada, (b) Histograma del gráfico en (a) en el que se muestra la distribución de los niveles de intensidad presentes en la imagen analizada.

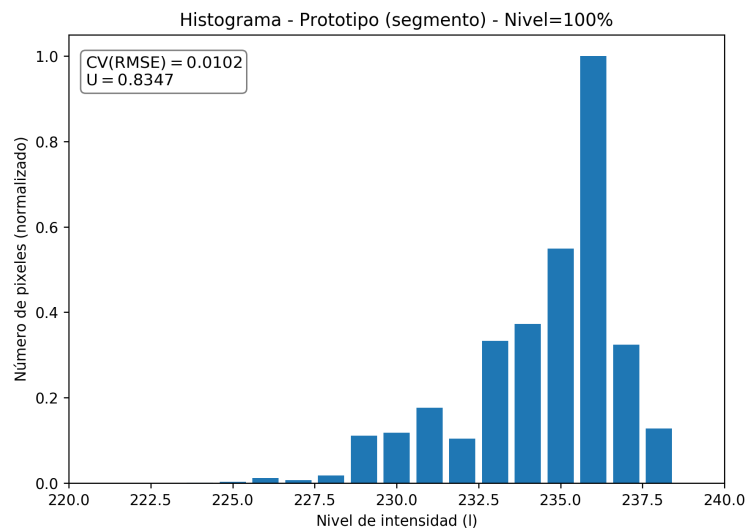
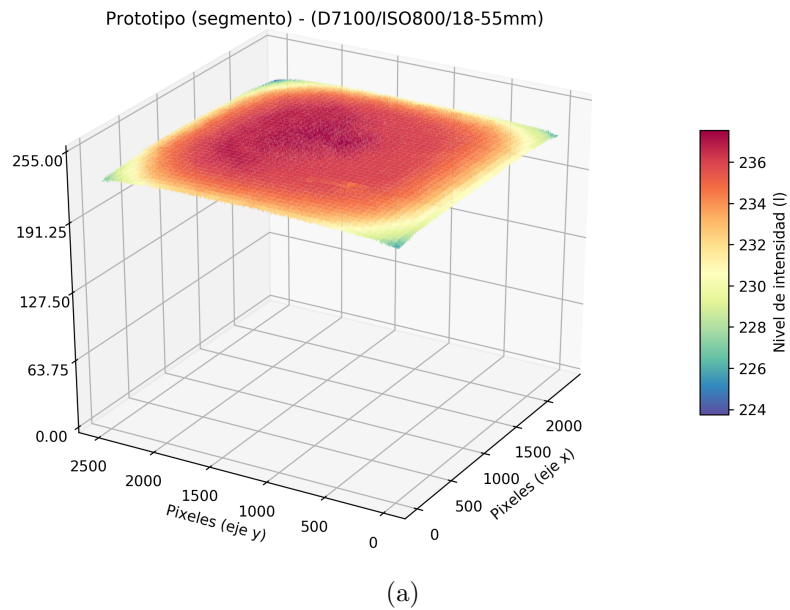


Figura 4.14.- Representación gráfica de la distribución en región central del área iluminada por el prototipo desarrollado al 100 % del nivel de iluminación. (a) Representación 3D de la distribución de intensidades detectadas sobre superficie iluminada, (b) Histograma del gráfico en (a) en el que se muestra la distribución de los niveles de intensidad presentes en la imagen analizada.

EL índice U fué una de las métricas presentes en los resultados que se presentan en este capítulo con respecto a la evaluación de uniformidad de cada uno de los sistemas de iluminación estudiados, debido a su alta presencia en la documentación técnica correspondiente a productos de iluminación de fondo comerciales que actualmente se implementan en la industria [34–38].

En este trabajo se considera que, para el usuario final, U representa una medida con la que se puede discernir con facilidad el rendimiento del equipo de iluminación en cuestión de uniformidad, puesto que se deriva de una relación entre el nivel máximo y mínimo de iluminancia detectada en la superficie iluminada, por ende, la generación de sombras sobre la superficie de interés produce variaciones significativas en los resultados basados en esta métrica, tal se como mencionó anteriormente. Por otro lado, métricas como $CV(RMSE)$ complementan los resultados de U por medio de información resultante de mayor precisión, puesto que bajo esta métrica se obtiene una comparación puntual entre el nivel iluminancia detectado en cada uno de los pixeles de la imagen analizada y el valor promedio de los mismos. Bajo este principio, se considera que entre menor sea la diferencia entre el nivel de iluminancia promedio y los pixeles de la imagen, mayor será la uniformidad sobre la superficie iluminada.

En las figuras 4.9, 4.10 y 4.11 se muestran los resultados del análisis que se llevó a cabo en el área iluminada por el prototipo desarrollado, esta información se resume en la tabla 4.3. En esta tabla se muestra que el índice uniformidad (U) se aproxima a las características de la etapa de iluminación del SAI-v5 y en cuestiones de $CV(RMSE)$ se mantienen valores inferiores a los que presenta dicho sistema, lo cual se debe esperar considerando que el prototipo desarrollado no cuenta con un material reflectivo en las paredes del mismo, lo que incrementa la cobertura de las sombras generadas en las esquinas y, por ende, la diferencia entre el nivel máximo y mínimo de la intensidad detectada en cada un de las imágenes analizadas (véase de la figura 4.9(b) a la figura 4.11(b)).

Sin embargo, si se considera nuevamente los resultados presentados en la tabla 4.3, se observa que al mantener un área de estudio dentro de la región central que se describió anteriormente (6"x6"), los niveles de uniformidad mejoran de manera significativa conforme incrementa el nivel de intensidad lumínica (tal como se observa de manera gráfica en las figuras 4.12, 4.13 y 4.14).

Tabla 4.3.- Comparativa de nivel de uniformidad por sistema y región analizada.

Sistema	Métrica	
	U(%)	CV(RMSE)
SAI V5 (completo)	41.71	0.0805
Prototipo @30 % (completo)	56.67	0.0425
Prototipo @70 % (completo)	69.75	0.0347
Prototipo @100 % (completo)	76.13	0.0263
SAI V5 (segmento)	72.04	0.0147
Prototipo @30 % (segmento)	63.82	0.0177
Prototipo @70 % (segmento)	73.62	0.0131
Prototipo @100 % (segmento)	83.47	0.0102

Al considerar la información presente en la tabla 4.3, se puede determinar que los resultados que se obtuvieron en los diferentes niveles de intensidad del prototipo desarrollado (en un intervalo comprendido del 30 % al 100 %) son satisfactorios al mantener un bajo nivel de error con respecto a un valor medio y un nivel de U igual o mayor a la etapa de iluminación actual del SAI-v5, lo cual demuestra que el prototipo en cuestión iguala la función base del SAI-v5 para la adquisición de imágenes digitales con base a una técnica de iluminación de fondo y además presenta una mejora significativa en cuestiones de uniformidad e iluminancia.

En el siguiente capítulo se discute acerca de los resultados presentados anteriormente, y de esta manera concluye tanto de forma general como específica los objetivos que se establecieron para este trabajo de investigación.

Capítulo 5

Conclusiones generales

En este trabajo de tesis se expuso el desarrollo e implementación de la propuesta de rediseño a la etapa de iluminación del Sistema de Adquisición de Imágenes (SAI-v5) con el cual el Cuerpo Académico de Comunicaciones e Instrumentación Electrónica lleva a cabo actividades de investigación relacionadas al Procesamiento Digital de Imágenes. El sistema de iluminación de fondo regulable construido presenta las características necesarias para la captura de imágenes en las que se quiere resaltar de manera definida los bordes del objeto de estudio, en este caso, altos niveles de iluminancia y variaciones de intensidad bajas, o imperceptibles, para el dispositivo de captura. El prototipo que se elaboró en este trabajo logra aproximarse (al 30 % de intensidad máxima), e incluso superar, el rendimiento del SAI-v5 en cuestiones tanto del nivel de iluminancia al emplear un nivel de intensidad $\geq 70\%$; así como en uniformidad de la luz proyectada sobre el panel difusor con base a las métricas previamente establecidas, con las cuales se asegura la obtención de imágenes donde se resalta los bordes del objeto de estudio con altos niveles de definición y sin pérdida de información significativa en la escena capturada.

Cabe mencionar que, durante la etapa de pruebas de la investigación, no hubo posibilidad de comparar el desempeño del prototipo desarrollado contra equipos comerciales. Sin embargo, de acuerdo a la información que proporcionan diferentes fabricantes [34–38] y a los resultados que se mostraron en el capítulo anterior, se puede asegurar que el trabajo expuesto en esta tesis entrega un prototipo que, dentro de esta etapa del diseño, tiene el potencial de competir contra las características de iluminación y uniformidad que dichos sistemas comerciales ofrecen.

5.1. Discusiones

Como se observa en las tablas 4.1, 4.2 y 4.3, el valor de iluminancia promedio que el prototipo entrega a un 20 % de su máxima capacidad, supera levemente al único nivel de iluminancia que el SAI-v5 es capaz de producir y, además de esto, logra iluminar el área de interés con características de uniformidad superiores a este, lo cual no solo indica que el prototipo que se construyó puede emplearse bajo condiciones similares a las del sistema de iluminación elaborado por Martínez [1] en proyectos de investigación acuícola, si no que a su vez es posible aplicar dicho sistema con distintos tipos de dispositivos de captura fuera del área de equipo fotográfico profesional, debido a su reducción en dimensiones físicas y a su capacidad de regular el nivel de iluminancia por medio del módulo de control e interfaz de usuario diseñadas en este trabajo.

5.2. Conclusiones

Al termino de este trabajo de investigación se logró cumplir con los objetivos establecidos en un inicio, los cuales eran:

Objetivo general

- *Desarrollar un sistema de iluminación con intensidad ajustable basado en tecnología LED para la etapa de preprocesado de una imagen digital.*

Se desarrolló un sistema iluminación de fondo ajustable basado en tecnología LED de potencia considerando las características de iluminancia y uniformidad presentes en el SAI-v5, logrando una reducción considerable de las dimensiones físicas con respecto al sistema base, aumentando sus características de portabilidad y uso en diferentes entornos. También se consiguió eliminar el parpadeo por parte de la fuente de iluminación, así como también, una mejora significativa en aspectos de uniformidad de la luz proyectada al panel difusor con un solo arreglo en serie de HB LEDs reduciendo, de manera adicional, el consumo eléctrico de la etapa de iluminación empleada durante el proceso de captura de una imagen digital en las actividades de investigación de CACIE.

Objetivos específicos

- *Diseñar e implementar una celda básica de iluminación uniforme basada en tecnología LED.*

Se realizó una extensa revisión de la literatura y se determinaron los parámetros de diseño que nos proporcionarían el máximo nivel de uniformidad al usar HB

LEDs con un patrón de radiación lambertiano en un sistema de iluminación de fondo.

- *Implementar una etapa de potencia ajustable.*

Con base a la literatura se seleccionaron dos de las técnicas de regulación de corriente que se implementan con mayor frecuencia para el manejo de sistemas de iluminación basados en tecnología LED. Se realizó una comparativa entre un método de regulación lineal y uno basado en PWM, optando por este último debido al bajo nivel de rizo que presenta en su salida y a que su empaquetado ofrece una solución más práctica al desarrollo de un módulo de regulación, considerando sus dimensiones físicas reducidas y a la poca necesidad de incorporar un sistema de enfriamiento dedicado para el uso prolongado del mismo.

- *Diseñar e implementar una etapa de ajuste de intensidad lumínica.*

Se diseñó una tarjeta de circuito impreso con la electrónica necesaria para proporcionar un sistema basado en un microcontrolador de bajo consumo, capaz de interactuar con el usuario final por medio de una interfaz física, así como de forma remota con una computadora personal a través de comunicación serie, lo que le permite al usuario controlar el nivel de iluminancia del módulo de iluminación en la manera que resulte más conveniente para la aplicación. En dicho diseño no solo se consideró la etapa de alimentación del módulo de iluminación, si no que también se interpreta la información que proporcionan los sensores integrados en el sistema, con la finalidad de evitar daños irreversibles a las fuentes de iluminación.

- *Evaluar el funcionamiento del sistema de iluminación realizando experimentos con un objeto de estudio.*

Se llevó a cabo una evaluación del sistema con base a las métricas que se establecen en la literatura [15, 16]. Con las tablas 4.1 y 4.3 se observó que los resultados obtenidos al término de la comparativa directa en el prototipo desarrollado y el SAI-v5 son satisfactorios, debido a que el prototipo logra aproximarse, e incluso superar a lo largo de su escala de regulación, al rendimiento del sistema base en cuestiones de uniformidad, con una diferencia máxima en su índice de uniformidad del 8.22 % y una baja diferencia con respecto al nivel medio de iluminancia ($\Delta E_{V_{mean}} = 0.0030$) en el CV(RMSE) calculado alrededor de la región de interés. De forma adicional se logró reducir el consumo eléctrico general en comparación a el SAI-v5, así como también eliminar el parpadeo que se obtenía con la fuente de iluminación de este último.

5.3. Trabajo a futuro

Se plantearon los siguientes puntos como trabajo a futuro para mejorar la funcionalidad del prototipo desarrollado:

- Acoplar al diseño del módulo de iluminación actual una estructura rígida que permita la montura de diversos tipos de dispositivos de captura digital, junto a un sistema de reubicación automatizado con base a los parámetros fotográficos que proporcione el usuario.
- Realizar pruebas de uniformidad con distintos materiales difusores comerciales y evaluar su efecto en los parámetros de diseño que se establecieron en este trabajo.
- Ampliar la funcionalidad del GUI para el control remoto del sistema de iluminación, al emplear bibliotecas de código libre como *libgphoto2* y permitirle al usuario final tener un control directo de los parámetros y funcionalidad tanto del sistema de iluminación como del dispositivo de captura en uso.

Glosario

Acrónimos

CV(RMSE).- *Coeficiente de Variación del Error Cuadrático Medio.*

PDI.- *Procesamiento Digital de Imágenes.*

SAI.- *Sistema de Adquisición de Imágenes.*

VA.- *Visión Artificial.*

ISO.- *International Organization for Standardization.*

VM.- *Visión Máquina.*

VC.- *Visión por Computadora.*

FPGA.- *Field-Programmable Gate Array.*

IES.- *Iluminación de Estado Sólido.*

DHR.- *Distance-Height Ratio.*

CD.- *Corriente Directa.*

CA.- *Corriente Alterna.*

CPCM.- *Convertidor de Potencia Conmutado.*

PID.- *Proporcional-Integral-Derivativo.*

PWM.- *Pulse Width Modulation.*

HB LED.- *High Brightness light-emitting diode.*

TIM.- *Thermal Interface Material.*

IC.- *Integrated Circuit*

SPI.- *Serial Peripheral Interface*

GUI.- *Graphical User Interface*

Bibliografía

- [1] Ernesto Martinez Sandoval. Sistema de visión por computadora para contabilizar larvas de peces. Master's thesis, Universidad Autonoma de Baja California, 2015.
- [2] Jesús Raúl Martínez Sandoval. *Análisis del Color en Post-cosecha de Chile Habanero basado en Sistemas de Visión por Computadora*. PhD thesis, Universidad Autónoma de Baja California, 2014.
- [3] Bruce G. Batchelor. *Machine vision handbook*. 2012.
- [4] J. Blasco, N. Aleixos, S. Cubero, and D. Lorente. *Fruit, vegetable and nut quality evaluation and control using computer vision*. Woodhead Publishing Limited, 2012.
- [5] D.T. Pham and R.J. Alcock. Image Acquisition and Enhancement. In *Smart Inspection Systems Techniques and Applications of Intelligent Vision*, chapter 2, pages 35–68. Elsevier, 2003.
- [6] D.T. Pham and R.J. Alcock. Segmentation. In *Smart Inspection Systems Techniques and Applications of Intelligent Vision*, number February, chapter 3, pages 69–93. Elsevier, 2003.
- [7] Rafael C Gonzalez, Richard E Woods, and Steven L Eddins. *Digital Image Processing Using Matlab*. 2009.
- [8] John Reidar Mathiassen, Ekrem Misimi, Morten Bondø, Emil Veliyulin, and Stein Ove Østvik. Trends in application of imaging technologies to inspection of fish and fish products. *Trends in Food Science and Technology*, 22(6):257–275, 2011.
- [9] Haim Levkowitz. Color Theory and Modeling for Computer Graphics, Visualization, and Multimedia Applications. *Springer*, 402:236, 1997.

- [10] T De Groot, T Vos, RJMJ Vogels, and WD van Driel. Quality and reliability in solid-state lighting. In *Solid State Lighting Reliability*, pages 1–11. Springer, 2013.
- [11] Michael Pecht, Diganta Das, and Moon-Hwan Chang. Introduction to led thermal management and reliability. In *Thermal Management for LED Applications*, pages 3–14. Springer, 2014.
- [12] CA Yuan, CN Han, HM Liu, and WD van Driel. Solid-state lighting technology in a nutshell. In *Solid State Lighting Reliability*, pages 13–41. Springer, 2013.
- [13] Jaehee Cho, Jun Hyuk Park, Jong Kyu Kim, and E. Fred Schubert. White light-emitting diodes: History, progress, and future. *Laser and Photonics Reviews*, 11(2), 2017.
- [14] Yijie Wang, J. Marcos Alonso, and Xinbo Ruan. A Review of LED Drivers and Related Technologies. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(7):5754–5765, 2017.
- [15] Zong Qin, Kai Wang, Fei Chen, Xiaobing Luo, and Sheng Liu. Analysis of condition for uniform lighting generated by array of light emitting diodes with large view angle. *Optics Express*, 18(16):17460, aug 2010.
- [16] Ivan Moreno and Roumen I. Tzonchev. Effects on illumination uniformity due to dilution on arrays of LEDs. In Roland Winston and R. John Koshel, editors, *Nonimaging Optics and Efficient Illumination Systems*, volume 5529, page 268, sep 2004.
- [17] Kai Wang, Dan Wu, Zong Qin, Fei Chen, Xiaobing Luo, and Sheng Liu. New reversing design method for LED uniform illumination. *Optics Express*, 19(S4):A830, jul 2011.
- [18] Gábor Farkas and András Poppe. Thermal testing of leds. In *Thermal Management for LED Applications*, pages 73–165. Springer, 2014.
- [19] András Poppe and Clemens JM Lasance. Standardization of led thermal characterization. In *Thermal Management for LED Applications*, pages 197–264. Springer, 2014.
- [20] MG Pecht and Moon-Hwan Chang. Failure mechanisms and reliability issues in leds. In *Solid state lighting reliability*, pages 43–110. Springer, 2013.

- [21] Joel N Shurkin. *Broken genius: The rise and fall of William Shockley, creator of the electronic age*. Palgrave Macmillan, 2006.
- [22] Jinmin Li, Junxi Wang, Zhe Liu, and András Poppe. Solid state physics fundamentals of led thermal behavior. In *Thermal Management for LED Applications*, pages 15–52. Springer, 2014.
- [23] Jaber Hasan and Simon S. Ang. A high-efficiency digitally controlled RGB driver for LED pixels. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 47(6):2422–2429, 2011.
- [24] Heinz Van Der Broeck, Georg Sauerlinder, and Matthias Wendt. Power driver topologies and control schemes for LEDs. *Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*, pages 1319–1325, 2007.
- [25] Daniel De Waal, Steven Le Moan, and Huub Bakker. Toward the Adaptive Control of the Colour Rendering of LED Lighting with an RGBW Sensor. *2017 International Conference on Image and Vision Computing New Zealand (IVCNZ)*, pages 1–5, 2017.
- [26] Xiaohui Qu, Wong Siu Chung, and C K Tse. Color Control System for RGB LED Light Sources Using Junction Temperature Measurement. *IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2007 - 33th Annual Conference on*, pages 1363–1368, 2007.
- [27] Chia-te Chou, Chia-liang Lee, and Tien-lu Lin. COLOR TEMPERATURE COMPENSATION FOR LED LIGHTING. pages 15–17, 2012.
- [28] Juan Sebastian Botero Valencia, Francisco Eugenio Lopez Giraldo, and Jesus Francisco Vargas Bonilla. Calibration method for Correlated Color Temperature (CCT) measurement using RGB color sensors. *Symposium of Signals, Images and Artificial Vision - 2013, STSIVA 2013*, pages 3–8, 2013.
- [29] K.H. Loo, Wai-Keung Lun, Siew-Chong Tan, Y.M. Lai, and C.K. Tse. On Driving Techniques for LEDs: Toward a Generalized Methodology. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(12):2967–2976, dec 2009.
- [30] David Cox. Solid state lighting led theory of operation. URL: <https://www.slideshare.net/davidiancox/solid-state-lighting-science-and-led-theory-of-operation-december-2010>, 9 2019.
- [31] J. Hartmann and Stephan Völker. Thermal management of light sources, 2011.

- [32] Cree®. Thermal Management of Cree® XLamp® LEDs, 2019.
- [33] Cree®. Optimizing PCB Thermal Performance for Cree® XLamp® LEDs, 2010.
- [34] *BL245 Series BL245*, 2020.
- [35] *SLLUB - White led Backlight*.
- [36] *LLUB - White led Backlight*.
- [37] *ODMOBL Backlight Series*, 2020.
- [38] *BL 2D Expandable Series BL*, 2017.