



**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD MADERO**  
**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**  
**MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**



"POR MI PATRIA Y POR MI BIEN"

**TESIS**

**Diseño y construcción de una cámara de iluminancia ajustable para calibración de luxómetros utilizando un controlador digital con la técnica de reubicación de polos, cumpliendo con los requisitos de la norma oficial mexicana NOM-025-STPS-2008**

Que para obtener el Grado de  
**Maestro en Ciencias de la Ingeniería**

Presenta  
**Ing. José Federico Chong Flores**  
**G94070105**  
**No. de CVU del CONAHCyT: 434003**

Director de Tesis  
**Dr. Rubén Salas Cabrera**  
**No. de CVU del CONAHCyT: 60075**

Co-director de Tesis  
**Dr. Crescencio García Guendulain**  
**No. de CVU del CONAHCyT: 472861**

Ciudad Madero, Tamaulipas, 04/junio/2024

OFICIO No.: U.080/2024

ASUNTO: Autorización de impresión de tesis

**C. JOSÉ FEDERICO CHONG FLORES**  
**No. DE CONTROL G94070105**  
**PRESENTE**

Me es grato comunicarle que después de la revisión realizada por el Jurado designado para su Examen de Grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería, se acordó autorizar la impresión de su tesis titulada:

**"DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CÁMARA DE ILUMINANCIA AJUSTABLE PARA CALIBRACIÓN DE LUXÓMETROS UTILIZANDO UN CONTROLADOR DIGITAL CON LA TÉCNICA DE REUBICACIÓN DE POLOS, CUMPLIENDO CON LOS REQUISITOS DE LA NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-025-STPS-2008"**

El Jurado está integrado por los siguientes catedráticos:

PRESIDENTE:	DR.	RUBÉN SALAS CABRERA
SECRETARIO:	DR.	CRESCENCIO GARCÍA GUENDULAIN
VOCAL:	DR.	REYNALDO DAVID MARTÍNEZ OROZCO
SUPLENTE:	DR.	PEDRO MARTÍN GARCÍA VITE
DIRECTOR DE TESIS:	DR.	RUBÉN SALAS CABRERA
CO-DIRECTOR:	DR.	CRESCENCIO GARCÍA GUENDULAIN

Es muy satisfactorio para la División de Estudios de Posgrado e Investigación compartir con usted el logro de esta meta. Espero que continúe con éxito su desarrollo profesional y dedique su experiencia e inteligencia en beneficio de México.

**ATENTAMENTE**

*Excelencia en Educación Tecnológica*

*"Por mi patria y por mi bien"*

**MARCO ANTONIO CORONEL GARCÍA**  
**JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE**  
**POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



c.c.p.- Archivo

MACG/NRV



Av. 1º de Mayo y Sor Juana I. de la Cruz S/N Col. Los Mangos C.P. 89440 Cd. Madero, Tam.  
Tel. 01 (833) 357 48 20, ext. 3110, e-mail: [depi\\_cdmadero@tecnm.mx](mailto:depi_cdmadero@tecnm.mx)  
[tecnm.mx](http://tecnm.mx) | [cdmadero.tecnm.mx](http://cdmadero.tecnm.mx)



**DECLARACIONES DE ORIGINALIDAD, PROPIEDAD INTELECTUAL, CESIÓN DE DERECHOS Y/O CONFIDENCIALIDAD.**

A quien corresponda.

Por medio de la presente, se declara que el abajo firmante, es autor y propietario intelectual de la tesis titulada: **“Diseño y construcción de una cámara de iluminancia ajustable para calibración de luxómetros utilizando un controlador digital con la técnica de reubicación de polos, cumpliendo con los requisitos de la norma oficial mexicana NOM-025-STPS-2008”**, siendo un documento original e inédito, que sus contenidos son producto del proceso de experimentación, desarrollo, implementación y pruebas, siendo estos una contribución al desarrollo tecnológico institucional, en el entendido que todas las referencias ya publicadas, se encuentran debidamente incluidas en la bibliografía y que se presenta como requisito para la obtención del grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería, en la División de Estudios de Posgrado, en el Tecnológico Nacional de México, campus Ciudad Madero, en Ciudad Madero, Tamaulipas. A quien se le ceden todos los derechos correspondientes, así como también la confidencialidad de los métodos, resultados o conocimiento que se hayan generado en el trabajo de investigación realizado.

Asimismo, se manifiesta, que este trabajo no está siendo postulado de manera paralela para su posible publicación o uso indebido.

Atentamente.

José Federico Chong Flores

## **DEDICATORIA**

A mi hermosa y gran familia.

## **AGRADECIMIENTOS**

Especialmente a las bondades y prestaciones que otorga el TecNM, en su convocatoria de la Licencia por Beca-Comisión, que nos permite a los trabajadores del sistema, continuar con la preparación académica de calidad, que nuestro alumnado y nuestro país demanda, y especialmente a las autoridades del Campus Ciudad Madero, quienes han contribuido administrativamente de forma amable y dedicada, con las gestiones pertinentes ante la dirección general.

El total y sincero agradecimiento en la parte técnica, que debido a su compromiso e involucramiento total, se ha logrado este objetivo, al Dr. Rubén y el co-director, el Dr. Crescencio y a todo el equipo multidisciplinario de amigos y compañeros, quienes de una u otra forma aportaron su experiencia y conocimiento, y que con sus observaciones expertas y su disposición, guiaron el resultado de este trabajo de investigación, así como los amigos y compañeros que apoyaron de alguna manera la realización de este proceso, que con su paciencia, dirección, recomendación y ayuda, han aportado invaluablemente. A todos ustedes, mil gracias.

# **Diseño y construcción de una cámara de iluminancia ajustable para calibración de luxómetros utilizando un controlador digital con la técnica de reubicación de polos, cumpliendo con los requisitos de la norma oficial mexicana NOM-025-STPS-2008**

José Federico Chong Flores

## **Resumen**

Los luxómetros que se utilicen para la medición de las condiciones de iluminación, deben por ley cumplir con una calibración de un laboratorio que cumple la NMX-EC-17025-IMNC-2018; para garantizar la correcta EVALUACIÓN DE LA CONFORMIDAD el equipo de medición debe cumplir perfectamente con las características metrológicas de: error, reproducibilidad, repetibilidad, trazabilidad, es necesario contar con una REFERENCIA para comparar y lograr una VERIFICACIÓN y/o una CALIBRACIÓN, la CALIBRACIÓN de los luxómetros se realiza con la ayuda de un BANCO FOTOMÉTRICO, que implica una instalación física de alto costo, con un sinnúmero de posibilidades de error mecánico y expuesta al error humano, sin ningún grado de portabilidad.

La propuesta es la construcción de un banco fotométrico portátil, para uso sobre mesas de trabajo para calibración, haciendo uso de tecnología LED y un sistema microprocesador, donde se utiliza un controlador digital que compensa y mantiene dentro de valores seleccionados y permitidos por la norma, la intensidad luminosa y la longitud de onda, para servir de referencia y permitir la posibilidad de verificación o calibración de luxómetros, desde luego después de un proceso de calibración en algún laboratorio acreditado.

El equipo portátil, puede ser utilizado en cualquier mesa de trabajo, sin demandar las condiciones que actualmente demanda un banco fotométrico, el aislamiento total de la luz exterior y compensar satisfactoriamente las variables de temperatura, humedad y condiciones de iluminación, así como el mantener la longitud de onda definida por el iluminante A como referencia durante todas las pruebas de calibración o verificación.

# **Design and construction of an adjustable illuminance chamber for lux meter calibration using a digital controller with the pole relocation technique, complying with the requirements of the official Mexican standard NOM-025-STPS-2008**

José Federico Chong Flores

## **Abstract**

Luxmeters, used to measure lighting conditions, are required by law to be calibrated by a standard-compliant (NMX-EC-17025-IMNC-2018) laboratory; in order to ensure the correct CONFORMITY ASSESSMENT, the measuring equipment must perfectly comply with the metrological characteristics of: error, reproducibility, repeatability, traceability. It is necessary to have a REFERENCE to compare and achieve a VERIFICATION and/or a CALIBRATION, the calibration of lux meters is carried out with the help of a PHOTOMETRIC BENCH, which involves a high-cost physical installation, with countless possibilities of mechanical error and exposed to human error, without any degree of portability.

The proposal is the construction of a portable photometric bench, for use on work bench for calibration, making use of LED technology and a microprocessor system, where a digital controller is used to compensate and maintain the selected values allowed by the standard, the luminous intensity and the wavelength, to serve as a reference and allow the possibility of verification or calibration of lux meters, of course after a calibration process in an accredited laboratory.

The portable equipment, can be used in any work bench, without demanding the conditions that a photometric bench currently demands, the total lighting isolation and satisfactory compensates the values of temperature, humidity, and illuminant conditions, just as to keep the wavelength defined by the illuminant A as a reference during all the tests of calibration or verification.

# Índice general

Resumen .....	VII
Abstract .....	VIII
Índice de tablas.....	XII
Índice de figuras.....	XII
<b>1 Introducción .....</b>	<b>14</b>
1.1 Planteamiento del problema.....	15
1.2 Objetivos .....	16
1.2.1 General .....	16
1.2.2 Específicos .....	16
1.3 Justificación del estudio .....	17
1.4 Organización de la tesis.....	17
<b>2 Marco Teórico .....</b>	<b>19</b>
2.1 Antecedentes del estudio de la luz y el CIE .....	19
2.1.1 Divisiones y comités técnico.....	20
2.2 Estado del arte .....	21
2.2.1 Bancos Fotométricos .....	22
2.3 Marco teórico .....	24
2.3.1 Fotometría y Luxómetros. ....	24
2.3.2 Radiación óptica. ....	25
2.3.3 La fotometría .....	27
2.3.4 Iluminante A .....	28
2.3.5 Función $v(\lambda)$ . ....	29
2.3.6 Magnitudes y unidades fotométricas .....	30
2.3.7 Flujo luminoso .....	31
2.3.8 Intensidad luminosa .....	31
2.3.9 Luminancia.....	32



2.3.10	Iluminancia.....	33
2.3.11	Responsividad fotométrica .....	34
2.3.12	Instrumentos de medición de iluminancia (luxómetros).....	34
2.3.13	Parámetros de desempeño.....	35
2.3.14	Responsividad Espectral .....	35
2.3.15	Error Máximo Permitido .....	36
2.3.16	Resolución.....	37
2.3.17	Escala .....	37
2.3.18	Intervalo Nominal de Indicaciones .....	37
2.3.19	Estabilidad.....	37
2.3.20	Deriva Instrumental .....	38
2.3.21	Linealidad de Respuesta .....	38
2.3.22	Sensibilidad .....	38
2.3.23	de Medida .....	38
2.3.24	Corrección Cosenoidal .....	39
2.3.25	Introducción a los sistemas de control .....	39
2.3.26	Definiciones en los sistemas de control.....	40
2.4	Teoría de control en espacio de estado. ....	46
2.4.1	Espacio vectorial.....	46
2.4.2	Sistemas no lineales.....	47
2.4.3	Puntos de equilibrio.....	48
2.5	Sistemas dinámicos en tiempo discreto.....	49
2.6	Análisis de estabilidad de los sistemas dinámicos en tiempo discreto. ....	49
2.7	Ubicación de polos. ....	50
2.7.1	Estado.....	52
2.8	Ecuación dinámica.....	54
<b>3</b>	<b>Metodología .....</b>	<b>57</b>

3.1	Introducción .....	57
3.2	La cámara de aislamiento luminoso o cámara oscura. ....	59
3.3	La fuente luminosa de potencia. ....	60
3.4	Sensor de luz RGB TCS34725 .....	61
3.5	Etapa analógica de potencia.....	62
3.6	Convertidor de señal digital a señal analógica. ....	64
3.7	Pantalla touch NEXTION. ....	64
3.8	Microcontrolador ESP32. ....	65
3.9	Fuente de poder múltiples salidas. ....	66
3.10	Fuente conmutada elevadora (boost). ....	67
3.11	Sensor de Intensidad luminosa BH1750. ....	68
<b>4</b>	<b>Análisis y Resultados .....</b>	<b>69</b>
4.1	Diagrama a bloques del proyecto.....	69
4.2	Diagrama electrónico .....	70
4.3	Aspecto físico del prototipo .....	72
4.4	Diagrama a bloques del sistema de control en lazo cerrado. ....	77
4.5	Análisis y caracterización del prototipo. ....	78
<b>5</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones.....</b>	<b>84</b>
5.1	Conclusiones.....	84
5.2	Recomendaciones .....	87
	Bibliografía.....	89

# Índice de tablas

Tabla 1. <i>Magnitudes fotométricas y sus unidades según el SI.</i> .....	31
---	----

# Índice de figuras

Figura 1: <i>Descripción gráfica de la composición y funcionamiento de los dos principios de bancos fotométricos.</i> .....	24
Figura 2: <i>Espectro electromagnético.</i> .....	26
Figura 3: <i>Iluminantes estandarizados por la CIE.</i> .....	28
Figura 4: <i>La función <math>v(\lambda)</math> y <math>v'(\lambda)</math>.</i> .....	29
Figura 5: <i>Relación gráfica entre las diferentes magnitudes fotométricas.</i> .....	30
Figura 6: <i>Diferencia típica entre la función <math>v(\lambda)</math> y la responsividad espectral de un luxómetro comercial.</i> .....	36
Figura 7: <i>Ubicación de los valores propios en el plano complejo <math>z</math> y sus comportamientos cualitativos en el dominio del tiempo discreto.</i> .....	51
Figura 8: <i>Comparación de los planos complejos <math>s</math> y <math>z</math>.</i> .....	52
Figura 9: <i>Corriente-Tiempo.</i> .....	53
Figura 10: <i>Voltaje contra tiempo.</i> .....	53
Figura 11: <i>Corriente contra voltaje.</i> .....	54
Figura 12: <i>Cámara de aislamiento luminoso.</i> .....	60
Figura 13: <i>Fuente luminosa en el interior de la cámara de iluminancia.</i> .....	60
Figura 14: <i>Aspecto y dimensiones del sensor RGB y la colocación en la tapa de medición.</i> .....	62
Figura 15: <i>Diagrama eléctrico de la etapa de potencia para excitación individual del led RGB de forma manual.</i> .....	63
Figura 16: <i>Convertidor digital a analógico de un solo canal, en presentación de montaje de fácil integración.</i> .....	64
Figura 17: <i>Pantalla táctil TFT marca NEXTION y sus accesorios para programación vía puerto serie.</i> .....	65

Figura 18: <i>Tarjeta de desarrollo ESP32 NodeMCU32S.</i> .....	66
Figura 19: <i>Fuente de poder conmutada múltiples salidas de tensión TB-05003 500W/ATX.</i> .....	67
Figura 20: <i>Fuente de poder conmutada boost de 600W.</i> .....	68
Figura 21: <i>Sensor de intensidad luminosa.</i> .....	68
Figura 22: <i>Esquema en bloques del proyecto.</i> .....	70
Figura 23: <i>Esquema electrónico completo.</i> .....	71
Figura 24: <i>Aspecto de la placa de circuito impreso.</i> .....	72
Figura 25: <i>Aspecto del chasis a partir de un dibujo a mano alzada.</i> .....	73
Figura 26: <i>Instalación de la cámara oscura o cámara aislante de luz del medio ambiente.</i> .....	73
Figura 27: <i>Instalación la matriz de leds de potencia y sus complementos en una de las tapas de la cámara aislante de la luz exterior.</i> .....	74
Figura 28: <i>Instalación la matriz de leds de potencia visto desde el frente de la tapa, lo que será la fuente emisora de luz dentro de la cámara oscura.</i> .....	74
Figura 29: <i>Instalación del tubo que funge como cámara aislante de la luz del medio ambiente, la fuente de alimentación principal y la bisagra de la pantalla touch.</i> .....	75
Figura 30: <i>Instalación de la pantalla touch en la bisagra, para formar parte de una de las tapas laterales del chasis.</i> .....	75
Figura 31: <i>Instalación de la base soporte de los sensores RGB y de intensidad luminosa, dentro de la cámara de aislamiento de luz del medio ambiente.</i> .....	76
Figura 32: <i>Instalación de la tarjeta electrónica, fijación del módulo boost y de los disipadores de calor en el chasis.</i> .....	76
Figura 33: <i>Esquema de los dos controladores del proyecto.</i> .....	78
Figura 34: <i>Gráficas de respuesta ante excitación tipo escalón de iluminancia al sistema en lazo abierto.</i> .....	80
Figura 35: <i>Excitación escalón de la longitud de onda, para observar el periodo transitorio de respuesta en lazo abierto.</i> .....	82

---

---

## 1 Introducción

La ley federal del trabajo, vigila las relaciones entre obreros y patrones en todo lo largo y ancho del País, buscando de forma estricta el cumplimiento del artículo 123 de la Constitución Política Mexicana, siempre procurando situaciones justas entre obrero y patrón en los centros de trabajo, considerando que las normativas aplicables al trabajo promueven una justicia social y los factores de producción dentro de un entorno de equilibrio, generando relaciones laborales justas, dignas y decentes en lo largo y ancho del país.

Un lugar de trabajo decente es aquel que defiende la dignidad humana de cada trabajador y prohíbe cualquier tipo de discriminación contra las personas por motivos de etnia, sexo, edad, discapacidad, posición social, salud, religión, orientación sexual o estado civil. También permite la seguridad social y ofrece compensaciones acordes con la ley. Esto debe implicar una formación continua, una búsqueda constante de ganancias de productividad tanto para los individuos como para la empresa, y un estricto cumplimiento de las normas de salud y seguridad para reducir en todo momento los riesgos en el lugar de trabajo.

En el marco de la legislación laboral, con relación a las condiciones ideales de seguridad e higiene para prevenir riesgos laborales o posibles perjuicios a la salud del trabajador o de cualquier individuo, se establece lo prescrito por la ley en la Norma Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008 [1]. Esta norma se refiere a las condiciones de iluminación en los lugares de trabajo y establece los niveles de iluminación para tareas visuales y zonas de trabajo, así

como los niveles mínimos de iluminación que deben estar presentes en el plano de trabajo, para cada tipo de tarea visual o zona de trabajo.

Para cumplir con la NOM-025-STPS-2008 [1], se deben llevar a cabo mediciones de iluminación usando equipos que satisfagan los estándares de incertidumbre, proporcionados por un proceso de calibración, inspección o verificación, tal como lo estipula la Ley de Infraestructura de la Calidad. Esta ley tiene como objetivo establecer los requisitos para la fabricación, importación, reparación, venta, verificación y uso de instrumentos de medición y patrones de medida en el campo de la Metrología. Para ello, la ley se basa en la NMX-EC-17025-IMNC-2018 [2], que establece los requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración. Como referencia, se deben utilizar la NOM-025-STPS-2008 y su metodología.

Partiendo como principio, que en su mayoría, los centros de trabajo, para ser independientes de las condiciones naturales del medio ambiente, se diseñan espacios donde predomina la iluminación artificial, esta iluminación debe cumplir lo descrito en las tablas de la NOM-025-STPS-2008, en caso de incumplir con estos parámetros, el patrón se hace responsable de la aplicación de la ley, que en la mayoría de los casos implica multas económicas o administrativas que impactan de forma negativa directamente a la producción, situación que prefieren no experimentar los patrones, por lo tanto, se recomienda contratar los servicios de laboratorios acreditados ante la norma NOM-025-STPS-2008, quien emite informes de inspección y/o verificación periódicamente, ayudando a asegurar que sus espacios iluminados con luz artificial se encuentran de acuerdo a las leyes aplicables [1], [3], [4], [5].

## **1.1 Planteamiento del problema**

Los luxómetros que se utilicen para la medición de las condiciones de iluminación, deben por ley cumplir con una calibración de un laboratorio que cumple la NMX-EC-17025-IMNC-2018 [2].

Para garantizar la correcta evaluación de la conformidad, el equipo de medición debe cumplir perfectamente con las características metrológicas de: error, reproducibilidad, repetibilidad, trazabilidad, es necesario contar con una referencia para comparar y lograr una verificación y/o una calibración [6].

La calibración de los luxómetros se realiza con la ayuda de un banco fotométrico, que implica una instalación física de alto costo, con un sinnúmero de posibilidades de error mecánico y expuesta al error humano, sin ningún grado de portabilidad [6].

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 General**

Diseñar y construir una cámara de iluminancia ajustable para calibración de luxómetros utilizando un controlador digital con la técnica de reubicación de polos, cumpliendo con los requisitos de la norma oficial mexicana NOM-025-STPS-2008, logrando la independencia de los parámetros ambientales que afectan los procesos de verificación y calibración de luxómetros y disminuyendo los errores instrumentales existentes en los métodos actuales, permitiendo la portabilidad en todo momento sin afectar sus características metrológicas.

### **1.2.2 Específicos**

- Diseñar un circuito electrónico de potencia utilizando una fuente lineal como excitación de luminarias LED de potencia.
- Implementar en un sistema digital de lazo cerrado para controlar la intensidad luminosa.
- Diseñar el controlador adecuado que permita la independencia de agentes externos para la emisión controlada de luz.
- Construcción de un medio aislado de luz del medio ambiente para controlar la intensidad luminosa a su interior.
- Construir el modelo matemático con el uso de variables y ecuaciones de estado.
- Implementar la técnica de reubicación de polos para determinar los coeficientes del controlador.

- Utilizar un sistema a base de microprocesador que albergue el modelo matemático del controlador y permita una interacción visual y táctil con el operador del equipo.
- Realizar pruebas funcionales basadas en el cumplimiento de los parámetros mínimos de la norma NOM-025-STPS-2008.

### **1.3 Justificación del estudio**

En México, cada empresa formal que requiera de iluminación artificial en sus instalaciones, donde se desarrollen trabajos diurnos o nocturnos, y para prevenir un daño a la vista de sus trabajadores, deberá proporcionar una iluminación adecuada desde sus talleres, oficinas, pasillos o salas de juntas, cumpliendo con los criterios de la NOM-025-STPS-2008.

Para mantener una relación obrero-patronal, de forma satisfactoria, ambas partes deberán estar conformes con la evaluación de la conformidad, desde la calibración del luxómetro con el que se toma las lecturas de iluminación, así como el procedimiento de la toma de lecturas dentro de un sistema de calidad vigente.

Actualmente la calibración de los luxómetros se realiza con el apoyo de bancos fotométricos, implementados en algunos laboratorios concentrados en el centro del país y que, para llevar a cabo el procedimiento de calibración, los luxómetros deben ser trasladados por algún medio desde su origen hacia un laboratorio acreditado y de regreso, cumpliendo con la logística y el empaquetado de forma muy estricta, para mantener su certificado de calibración vigente [5], [7].

### **1.4 Organización de la tesis.**

La tesis se encuentra dividida en cinco capítulos, el número uno, que describe la introducción a la problemática existente, así como la justificación, para darle el soporte suficiente al tema sobre calibración de luxómetros en un equipo de menor costo y que presenta gran portabilidad, para el capítulo dos, se presenta el marco teórico y los antecedentes, donde se incluye todo el soporte teórico de los componentes, etapas, teóricas y consideraciones en general que ocupa el desarrollo del tema y la construcción del proyecto, resaltando aspectos de construcción física y aspectos sobre procedimientos y teorías matemáticas necesarias, en



el tercer capítulo, se aborda la metodología que se utilizó en la consecución de los resultados que resuelven el problema planteado, así como los caminos que se exploraron, bajo cierto orden, siempre en el análisis de llevar un camino correcto hacia el objetivo planteado, describiendo de igual forma los caminos explorados y que no llevaron a buen término y mediante análisis se tuvieron que descartar, en el cuarto capítulo donde se analizan los resultados obtenidos, que de cierta forma se plantea los experimentos llevados a cabo, así como sus resultados, donde se concluyen algunos resultados a partir de la experimentación y nos permite plantear o replantear los experimentos realizados y sus resultados, para el quinto capítulo, se plasman las conclusiones y recomendaciones, según lo experimentado y habiendo adquirido la experiencia en el proyecto, hacia donde podemos redirigir esfuerzos o mantenerlos, pensando en trabajos futuros de desarrollo e investigación.

---

## 2 Marco Teórico

### 2.1 Antecedentes del estudio de la luz y el CIE

La Comisión Internacional de Iluminación, también conocida como CIE (por sus siglas en francés, *Commission Internationale de l'Eclairage*), fue fundada en 1900 inicialmente como la Comisión Internacional de Fotometría (CIP), se reestructuró como la CIE en 1913; y se ha convertido en una organización técnica profesional reconocida a nivel mundial como una autoridad en temas relacionados con la luz e iluminación [8].

La CIE se dedica a la investigación y al intercambio de información científica en todo lo relacionado con la ciencia y el arte de la luz, la iluminación, el color y la visión, la medición de la luz y la radiación, la fotobiología y la tecnología de la imagen. Con una sólida base técnica, científica y cultural, la CIE es una organización independiente sin fines de lucro que presta servicios a los países miembros de manera voluntaria. La CIE está reconocida por la Comisión Internacional de Pesas y Medidas (CIPM), la Organización Internacional de Normalización (ISO) y la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) como organismo internacional de normalización [8].

Los términos “luz” e “iluminación” se consideran en un sentido amplio, incluyendo temas fundamentales como la visión, la fotometría y la colorimetría, teniendo en cuenta las fuentes de radiación electromagnética naturales y artificiales en el espectro ultravioleta, visible e

infrarrojo, las aplicaciones relacionadas con el uso de la luz en exteriores e interiores de edificios, los efectos medioambientales y estéticos, así como los medios de producción y control de la radiación [8].

Las normas y las recomendaciones técnicas emitidas por la CIE son aceptadas en todo el mundo. La CIE es reconocida como la máxima autoridad en todos los aspectos de la luz y la iluminación; ocupando una posición importante entre las organizaciones internacionales. La CIE es la única organización mundial para el intercambio de información en la ingeniería de la iluminación, la radiometría, la fotometría y la colorimetría, y en el desarrollo de patrones internacionales, recomendaciones y procedimientos de trabajo [8]. La CIE ha sido reconocida por la Organización Internacional para la Normalización (ISO) como una corporación de normalización internacional. La Resolución 10/89 del Consejo de la ISO establece que la CIE es la corporación de normalización internacional sobre “aspectos fundamentales de evaluación metrológica y aplicaciones de la luz y el color, incluyendo otros aspectos de la energía radiante en el rango óptico del espectro” [8].

### 2.1.1 Divisiones y comités técnico

La CIE realiza su labor técnica a través de siete divisiones, cada una con sus respectivos comités técnicos. Actualmente, dichos comités están compuestos por más de setecientos especialistas de más de cien países. El alcance de su trabajo abarca desde temas fundamentales hasta diversas aplicaciones de la luz y la iluminación:

**División 1: Visión y color.** Se dedica al estudio de las respuestas visuales a la luz y establece patrones de las funciones de respuesta, modelos y procedimientos de especificación los cuales son esenciales para la fotometría, la colorimetría, el rendimiento en función del color o la longitud de onda de la luz, el comportamiento visual y la apreciación visual de la luz y de la iluminación.

**División 2: Medida de la luz y la radiación.** Estudia procedimientos para la evaluación de la radiación con luz en el espectro ultravioleta, visible e infrarrojo, la radiación global, así como las propiedades ópticas de materiales y luminarias. Estudia tanto las propiedades ópticas como el comportamiento de los detectores físicos y otros dispositivos.

División 3: **Ambiente interior y diseño de iluminación.** Investiga los factores visuales que influyen en el confort de los ocupantes de un edificio en su entorno, además de la interacción de dichos factores visuales con aspectos térmicos y acústicos. Proporciona criterios de diseño para luminarias. Estudia técnicas de diseño, incluyendo procedimientos de cálculo relevantes, para la iluminación de interiores.

División 4: **Iluminación y señalización para el transporte.** Estudia la iluminación y las necesidades de señalización e información para el transporte y el tráfico vehicular, así como apoyos visuales para otros tipos de transporte.

División 5: **Iluminación exterior y otras aplicaciones.** Estudia los procedimientos y elabora guías para el diseño de luminarias para espacios de trabajo en exteriores, iluminación de seguridad, iluminación en vías de comunicación, peatonales y otros espacios sin tráfico de automóviles, áreas destinadas a actividades deportivas y recreativas así como iluminación de minas.

División 6: **Fotobiología y fotoquímica.** Investiga los efectos de la radiación óptica en sistemas de visión de tipo biológicos y fotoquímicos; trabaja sobre temas relacionados con la fototoxicidad en ambientes domésticos e industriales. Tiene un número importante de Comités Técnicos y puede ser de especial interés para la optometría debido a su relación con las ciencias de la salud.

División 8: **Tecnología de la Imagen.** Estudia procedimientos, y elabora guías y normas para los aspectos ópticos visuales y metrológicos de la comunicación, procesado y reproducción de imágenes.

## 2.2 Estado del arte

En la actualidad en el país a partir de la Ley de Infraestructura de la Calidad, prevalece el Centro Nacional de Metrología (CENAM), que funge como laboratorio primario y es la autoridad en el área de metrología que en general es referencia para el cumplimiento en la evaluación de la conformidad en todas las áreas de medición, posee un área de metrología física, con una división de óptica y radiometría donde se realiza la investigación pertinente

sobre temas de medición de iluminancia, que para realizar el proceso de calibración y verificación de luxómetros, utiliza un banco fotométrico como la gran mayoría de los laboratorios primarios en el mundo, basado en el desplazamiento mecánico [6], para lograr una intensidad luminosa variable sobre el instrumento bajo prueba, ya sea con el método de distancia variable, que consiste en modificar la distancia desde la fuente emisora de luz, hasta el sensor o instrumento bajo prueba; o transmitancia variable, que consiste en mantener una distancia constante entre la fuente principal de luz y el sensor bajo prueba, controlando la intensidad luminosa con el uso de lentes de admitancia variable previamente caracterizados, con respecto a la NOM (Norma Oficial Mexicana), la NOM-025-STPS-2008, aunque se encuentra un proyecto de NOM-025-STPS-2009, que aún no se ha concluido a la fecha, existen un sinnúmero de artículos emitidos por el CENAM y diferentes laboratorios del país y América Latina sobre las modificaciones que se harán, incluido la consideración de la iluminación con tecnología LED, que es la que prevalece en los diferentes centros de trabajo, pero aún no existe nada oficial que sustituya la NOM-025-STPS-2008 [1].

### **2.2.1 Bancos Fotométricos**

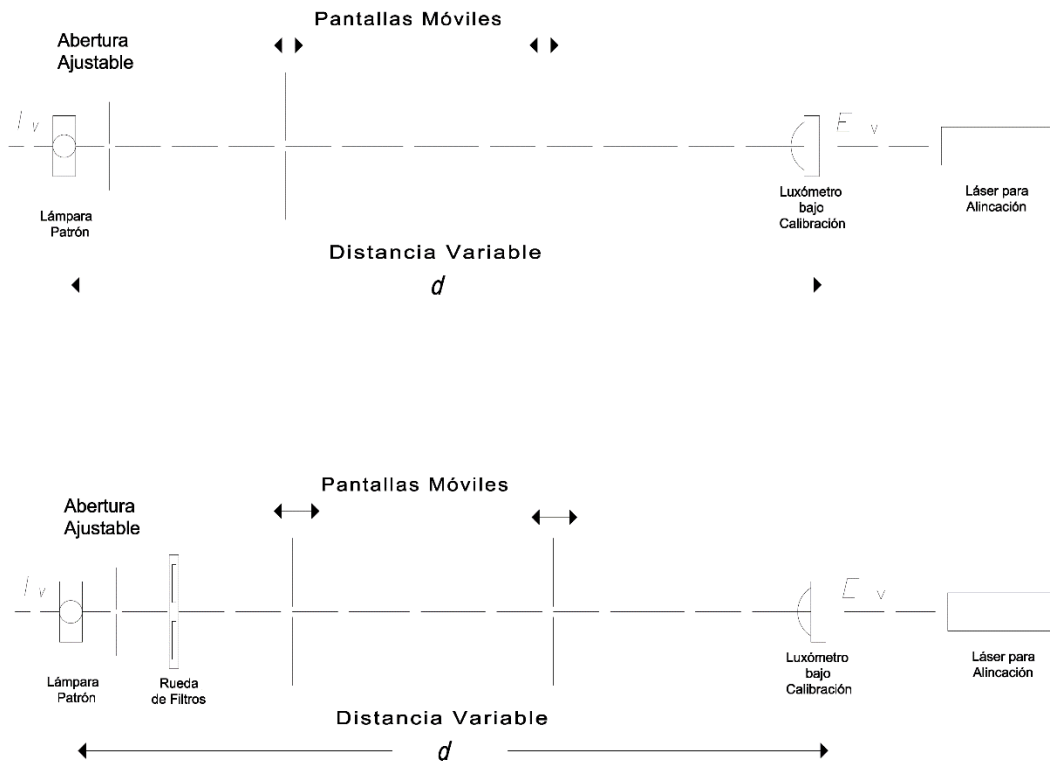
En el Laboratorio de Fotometría del CENAM poseen dos sistemas experimentales, frecuentemente llamados bancos fotométricos, empleados para la emulación de iluminancias de referencia, basados en lo descrito por la Ley de Bouguer [6]. El primero de estos emula la Ley de Bouguer de forma directa, para lograr este cometido, se cuenta con una mesa fija y estable que posee una estructura robusta de dos rieles paralelos montados sobre la longitud de la misma. La fuente luminosa, que consta de una lámpara incandescente de tipo FEL, se ubica en el extremo del riel principal y se deslizan rodamientos a lo largo del riel para permitir la selección ajustable de posición, el luxómetro y su sensor, en proceso de calibración, se ubica a una longitud definida [6]. En la segunda plana con rodamientos, se ubica de forma segura, un sistema que permite la alineación, para determinar con exactitud la distancia de referencia entre la fuente emisora de luz y el sensor del luxómetro [6]. Con este método, es suficiente con utilizar el valor de intensidad luminosa de la lámpara y modificar la distancia entre estos dispositivos para obtener diferentes valores de iluminancia, véase la Figura 1a.

El segundo banco fotométrico del Laboratorio de Fotometría del CENAM implementa la Ley de Bouguer con una ligera variación [6]:

$$E_v = \frac{I_v}{d^2} = \frac{T \cdot I'_v}{d^2}$$

siendo  $T$  el valor de transmitancia de un filtro de densidad óptica neutra que, dependiendo del valor de  $T$ , intensidad luminosa original  $I_v$  de la lámpara se atenúa produciendo de esta manera una nueva intensidad luminosa  $I'_v$  [6]. Este banco de pruebas, que de igual forma se encuentra ensamblado sobre una mesa estable, cuenta con un sistema de alineación y ajuste de posición semejante al del primero. Sin embargo, este segundo dispone de un porta-filtros situado frente a la lámpara y que se controla mediante electrónica, permitiendo así seleccionar un valor de transmitancia factible a través de combinaciones de filtros de densidad óptica neutra con diferentes transmitancias [6]. Así, el cambio en el valor de la transmitancia  $T$  permite generar los valores de iluminancia de referencia  $E_v$ , manteniendo el detector del luxómetro en calibración siempre a la misma distancia.

Ambos bancos fotométricos cuentan con pantallas ancladas a los rieles principales y perpendiculares a sus ejes ópticos que se forman por la línea de visión que une a la lámpara y al detector. Estas pantallas tienen una abertura circular que debe ser centrada con respecto a dichos ejes ópticos y que permite tanto definir el cono de luz (ángulo sólido) que iluminará al detector del luxómetro, así como bloquear las reflexiones que de otra forma alcanzarían a incidir sobre el detector del luxómetro, a las cuales se es conoce como “luz extraviada”, véase la Figura 1b [6]. En ambos bancos el valor de la iluminancia de referencia que se logra obtener tal como se describió, es comparado con la lectura en el luxómetro bajo calibración. Sin embargo, también es posible comparar las lecturas que a partir de una misma iluminancia proporcionen dos luxómetros; empleando alguno de estos como instrumento patrón, cuya lectura sirve como valor de referencia [6].



**Figura 1:** Descripción gráfica de la composición y funcionamiento de los dos principios de bancos fotométricos.[6]

Los sistemas modernos para la emisión de iluminancia emplean sistemas en lazo cerrado para el monitoreo de distancias, el desplazamiento de lentes, el sistema de alineación emisor-sensor. En estos un sistema de control central recibe de forma digital los datos de referencia y control, empleando para ello partes móviles. Sin embargo, ninguno retroalimenta directamente la cantidad de iluminancia, lo cual incrementa considerablemente los errores de medición.

## 2.3 Marco teórico

### 2.3.1 Fotometría y Luxómetros.

Para comprender adecuadamente el proceso de calibración de los luxómetros es necesario conocer algunas definiciones esenciales de la fotometría, entre las que se encuentran los iluminantes y observadores estándar, así como las cinco magnitudes fotométricas: el flujo luminoso, la intensidad luminosa, la luminancia, la iluminancia y la responsividad fotométrica. Se da una descripción concisa de los medidores de iluminancia, puntualizando

las diferencias principales entre los luxómetros analógicos y digitales. Se describen asimismo los principales parámetros de desempeño de los luxómetros [9], [10].

### 2.3.2 Radiación óptica.

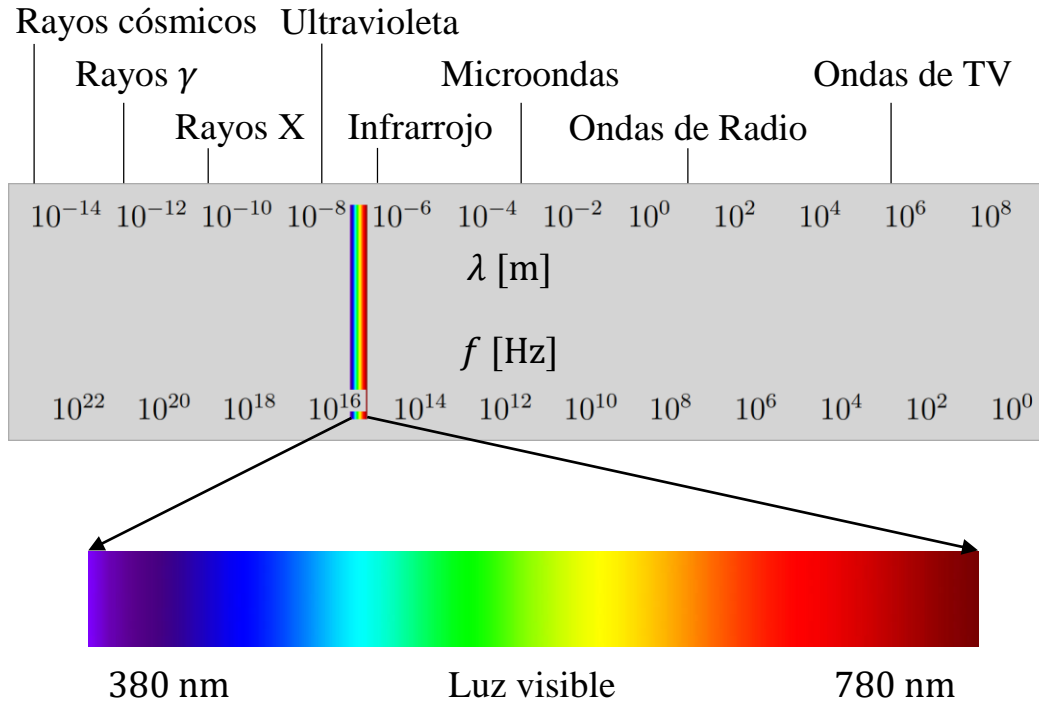
La radiación infrarroja, la luz visible, las ondas de radio y televisión, los rayos X, gamma, entre otros se encuentran en el dominio de la energía electromagnética, que se transporta por campos eléctricos y magnéticos ondulatorios a través de diferentes medios. La propagación de la energía electromagnética se conoce como radiación y en el vacío lo hace a una velocidad cercana a los  $300,000 \text{ km/s}$  [6], [11].

La energía electromagnética se caracteriza mediante dos parámetros, la longitud de onda  $\lambda$  y la frecuencia de oscilación  $f$ .  $\lambda$  es la distancia longitudinal que hay entre dos crestas de una onda y su unidad de medida es el metro; comúnmente se expresa en nanómetros.  $f$  es el número de crestas que atraviesan un punto dado por unidad de tiempo; se expresa en Hertz. Ambos parámetros se relacionan mediante [3]:

$$v = \lambda f \quad (1)$$

Donde  $v$  es la velocidad de propagación de la onda; que para el vacío corresponde a  $c = 299,792,458 \text{ m/s}$  [3], [4], [6], [11], [12].





**Figura 2:** *Espectro electromagnético.*[6]

Las formas de radiación electromagnética se clasifican por su longitud de onda o frecuencia, como se muestra en la Figura 2. A dicha clasificación se le conoce como espectro electromagnético. En el espectro de la luz visible, los colores que percibe el ojo humano, se identifican con relación a su longitud de onda. La radiación electromagnética con una  $\lambda$  de 632.8 nm típicamente se percibe como rojo, la de 594 nm como amarillo, la de 543.5 nm como verde y la de 450 nm como azul [3], [6], [11].

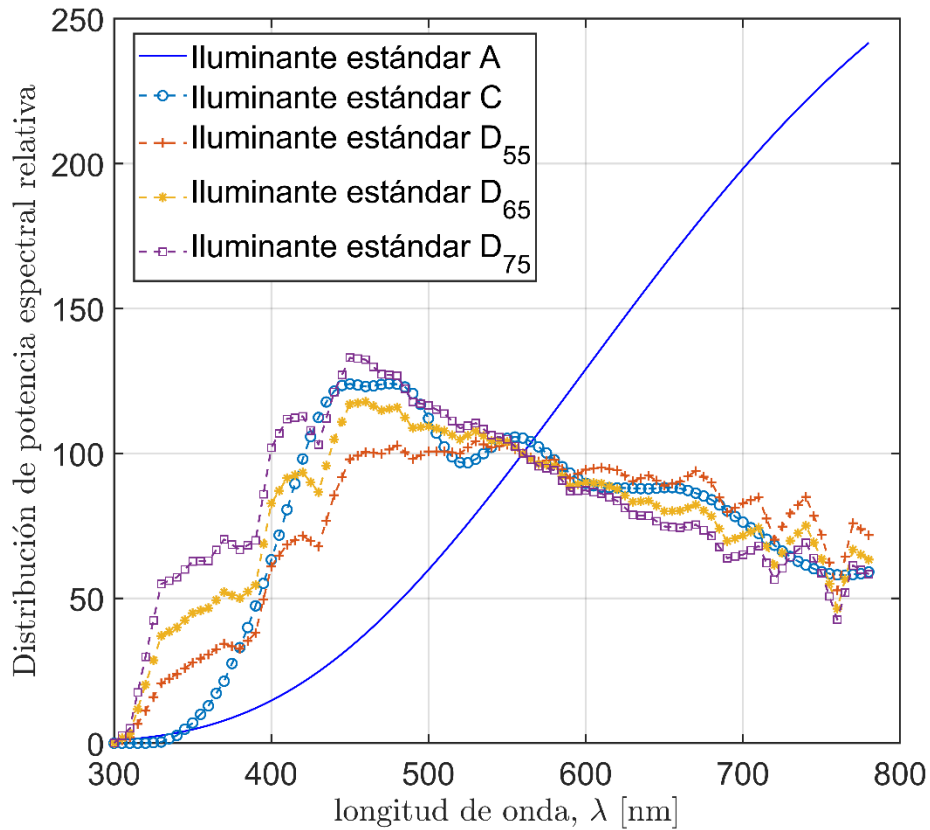
El intervalo óptico, una parte del espectro electromagnético muy importante a considerar, está compuesto por la radiación ultravioleta (UV), la visible y la infrarroja (IR). La radiación UV, cuyo espectro electromagnético se encuentra a la izquierda del visible, comprende longitudes de onda que no pueden ser percibidas por el ojo humano (por debajo de la que corresponde con el violeta, alrededor de los 400 nm) y hasta los rayos X (que tienen longitudes de onda en el orden de las decenas de nanómetros). La radiación IR, cuyo espectro se encuentra a la derecha del visible, comprende de igual forma longitudes de onda que no pueden ser percibidas por el ojo humano (va de los 780 nm hasta aproximadamente 1 mm) [3], [6], [11].

### 2.3.3 La fotometría

Esta disciplina se ocupa del estudio de la medición de la luz visible ponderada espectralmente en su capacidad para estimular el ojo humano [3], [6], [11], [13]. Típicamente la luz visible está presente con suficiente intensidad luminosa entre los 360 nm y 830 nm. No existen valores exactos para el campo del espectro visible, puesto a que el flujo radiante que llega a la retina y la sensibilidad del observador son factores físicos y biológicos que lo determinan. Por ello es aceptado que el campo de espectro visible va de los 360 nm a los 830 nm [6], [13].

La percepción visual del color es un atributo que se puede describir por sus elementos cromáticos (amarillo, naranja, azul, rojo, verde, etc.) y acromáticos (blanco, negro o gris) así como por el tamaño, la forma, la estructura y los alrededores de la superficie de la que se origina el estímulo [6], [11], [13], [14].

La CIE ha generado convenciones para realizar la caracterización de la radiación óptica en términos físicos. Con ello se han establecido bases adecuadas de medición para la fotometría; esto mediante referencias exactas y reproducibles para sus diversas aplicaciones. Mediante dichas convenciones se logra la estandarización de modelos teóricos que atiendan tanto las características de emisión de las fuentes de luz, como las de respuesta espectral de los dispositivos utilizados para su detección [15].



**Figura 3:** Iluminantes estandarizados por la CIE.[6], [16]

### 2.3.4 Iluminante A

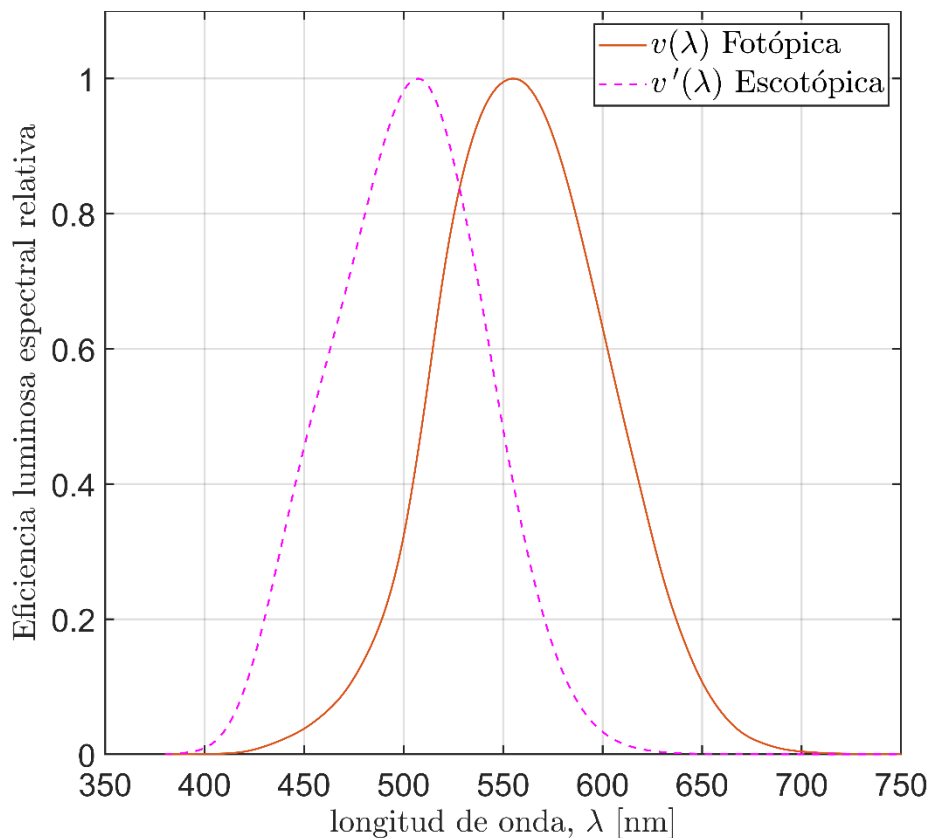
Un iluminante estándar es un espectro de emisión de radiación definido teóricamente y que es susceptible de ser materializado por medio de dispositivos físicos. Algunos de estos iluminantes estándar establecidos por la CIE se muestran en la Figura 3 [6], [16].

Entre los iluminantes estándar se encuentran aquellos que buscan simular condiciones naturales de iluminación, como la luz de día; de igual forma, existen iluminantes estándar a través de los que se tiene el objetivo de reproducir condiciones de iluminación específicas para ciertas aplicaciones [6], [16].

El Iluminante A de la CIE es el que más se utiliza en fotometría y corresponde con un espectro de emisión teórico llamado radiador Planckiano a una temperatura de 2,856 K, el cual es relativamente fácil de construir mediante lámparas incandescentes a las cuales se les controla la corriente eléctrica de operación para producir una temperatura de color cercana a los 2,856 K [6], [16].

### 2.3.5 Función $v(\lambda)$ .

La respuesta típica estandarizada de la percepción visual diurna del ser humano, también llamada fotópica (más de  $10^{\text{cd}}/\text{m}^2$ ) fue definida por la CIE en 1924 y describe la responsividad espectral un ojo humano “estándar” [17]. Dicha respuesta típica está basada en la apreciación promedio de los colores por parte de aproximadamente doscientas personas de distintas edades en buenas condiciones de iluminación. Al promedio de estas observaciones, el cual se conoce como la “función  $v(\lambda)$ ”, se le denominó observador fotométrico patrón CIE para visión fotópica, se observa en la Figura 4 [6], [8].



**Figura 4:** La función  $v(\lambda)$  y  $v'(\lambda)$ . [15]

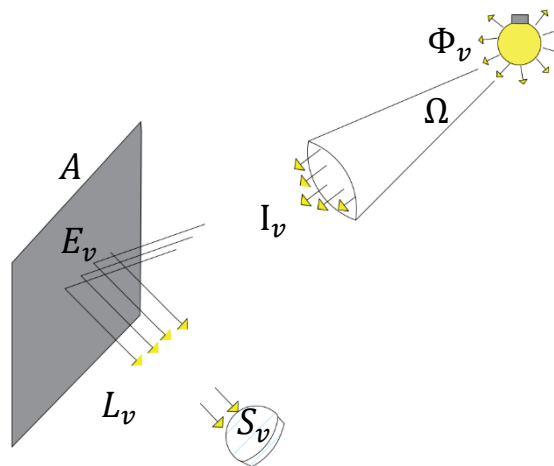
La CIE ha estandarizado otras respuestas del ojo humano las cuales se conocen como escotópica y mesotópica. La respuesta escotópica, adoptada en 1949, se representa mediante la función  $v'(\lambda)$  y corresponde con la visión en condiciones de mediana oscuridad (menos de  $10^{-4} \text{cd}/\text{m}^2$ ); es el promedio de la percepción del color de una población de cincuenta

observadores menores de treinta años. La respuesta mesotópica corresponde a un estado intermedio de adaptación del ojo humano entre las regiones fotópica y escotópica [6], [8].

En la Figura 4 se muestra la eficiencia luminosa espectral relativa para la visión fotópica  $v(\lambda)$  y escotópica  $v'(\lambda)$ . Se observa que para la iluminación fotópica la máxima responsividad de onda corresponde con una longitud de onda de 555 nm (color verde); mientras que, para la iluminación escotópica, el máximo se alcanza en 507 nm [15].

### 2.3.6 Magnitudes y unidades fotométricas

En la medición de la luz visible pueden obtenerse distintas magnitudes fotométricas según aquello que desee conocerse. Por ejemplo, como se muestra en la Figura 5, podría ser de interés la luz emitida por una fuente en todas direcciones o en alguna dirección en particular; o la luz que llega a una superficie o su brillo. En la Tabla 1 se detallan algunas de estas magnitudes fotométricas así como sus unidades en el Sistema Internacional de Unidades (SI) [15].



**Figura 5:** Relación gráfica entre las diferentes magnitudes fotométricas.[15]

**Tabla 1.** Magnitudes fotométricas y sus unidades en el SI.[15]

Magnitud Fotométrica	Símbolo de la CIE	Unidad del SI	Nombre de la Unidad
Flujo Radiante	$\Phi_e$	W	Watt
Flujo Luminoso	$\Phi_v$	lm	Lumen
Ángulo Sólido	$\Omega$	sr	Estereorradián
Intensidad Luminosa	$I_v$	cd	Candela
Luminancia	$L_v$	$\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$	Candela sobre metro cuadrado
Iluminancia	$E_v$	lx	Lux
Responsividad Fotométrica	$s_v$	$\text{A} \cdot \text{lx}^{-1}$ $\text{V} \cdot \text{lx}^{-1}$ $\text{Lectura} \cdot \text{lx}^{-1}$	Ampere sobre lux Volt sobre lux Lectura sobre lux

### 2.3.7 Flujo luminoso

El flujo luminoso, el cual se representa mediante el símbolo  $\Phi_v$ , se define como la cantidad de radiación electromagnética visible emitida por una fuente. La unidad fotométrica básica de medida de  $\Phi_v$  es el lumen y se obtiene a partir de la interacción del flujo radiante o potencia óptica  $\Phi_e$  y las curvas de respuesta de la visión fotópica, escotópica o mesotópica. En el caso de la visión fotópica el flujo luminoso se define como:

$$\Phi_v = K_m \int_{360}^{830} v(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

Donde el factor de escalamiento  $K_m = 683 \text{ lm/W}$  es la eficacia lumínica de radiación [6].

### 2.3.8 Intensidad luminosa

La intensidad luminosa, que se representa mediante el símbolo  $I_v$ , se define como el flujo luminoso  $\Phi_v$  emitido por una fuente por unidad de ángulo sólido  $\Omega$ :

$$I_v = \frac{\Phi_v}{\Omega} \quad (3)$$

En donde el ángulo sólido se define como:

$$\Omega = \frac{A}{d^2} \quad (4)$$

Donde  $d$  es el radio de una esfera y  $A$  es el área efectiva de una superficie esférica de área  $S$  de radio  $D$  que se proyecta de forma cónica en dicha esfera en cuyo centro se encuentra una fuente luminosa puntual, con  $d < D$ ;  $A$  y  $S$  están orientadas de tal forma que la luz incide de forma perpendicular en ellas. Así,  $\Omega$  puede considerarse como el ángulo sólido de un cono cuyo vértice coincide con el centro de la fuente luminosa. El estereorradián es la unidad de medida de  $\Omega$  y su símbolo es sr, como se muestra en la Tabla 1.

En el SI la candela es la unidad básica de medida de  $I_v$ , puede también expresarse como lumen por estereorradián, y su símbolo es cd. Así, en la fotometría la candela es una unidad básica de medida para la intensidad luminosa. La candela se define como la intensidad luminosa, en una dirección determinada, de una fuente que emite una radiación monocromática con frecuencia de  $540 \times 10^{12}$  Hz (aproximadamente 555 nm, color verde) y cuya intensidad energética es de  $1/683$  W/sr. Puede reproducirse un patrón para la candela a través de medir la energía de una fuente luminosa que atraviesa un detector con respuesta espectral de detección que reproduzca la función  $v(\lambda)$ . La candela se determina por métodos de comparación empleando lámparas patrón y fotodiodos [4], [6], [13].

### 2.3.9 Luminancia

La luminancia, que se representa mediante el símbolo  $L_v$ , es la intensidad luminosa emitida por unidad de área aparente de la superficie real de una fuente orientada en una dirección específica. Es decir,

$$L_v = \frac{I_v}{A} \quad (5)$$

El área aparente  $A$  corresponde con la proyección de la superficie real sobre una superficie esférica perpendicular a la línea de visión.

La candela por metro cuadrado, cuyo símbolo es  $\text{cd}/\text{m}^2$ , es la unidad de medida de  $L_v$ . Dicha unidad derivada no lleva un nombre en particular; sin embargo, a los equipos con los que se mide dicha magnitud fotométrica, llamada comúnmente brillo, se les conoce como medidores de luminancia y se utilizan en la fabricación de televisores, monitores, así como de anuncios espectaculares [6], [15].

### 2.3.10 Iluminancia

La iluminancia, que se representa mediante el símbolo  $E_v$ , se define como el flujo luminoso que incide en una superficie por unidad de área iluminada

$$E_v = \frac{\Phi_v}{A} \quad (6)$$

Por definición el área  $A$  está orientada de forma perpendicular a la dirección del cono de iluminación; así, dado un cierto valor de flujo luminoso, la iluminancia alcanza un valor máximo cuando la superficie está orientada en la dirección del haz luminoso puesto a que en dicha configuración el flujo luminoso incide sobre la mayor parte de la superficie. Despejando  $\Phi_v$  de la ec. (3) y sustituyendo en la ec. (6) se tiene que:

$$E_v = \frac{I_v \cdot \Omega}{A} \quad (7)$$

Si se sustituye la ec. (4) en la ec. (7) se obtiene:

$$E_v = \frac{I_v \cdot A}{A \cdot d^2} \quad (8)$$

De esta manera si se conoce si la intensidad luminosa  $I_v$  de una fuente puntual en una determinada dirección, puede calcularse la iluminancia  $E_v$  que produce dicha fuente a una distancia  $d$  en esa misma dirección:

$$E_v = \frac{I_v}{d^2} \quad (9)$$

A la ec. (9) se le conoce como la Ley de Bouguer, Ley fotométrica de la distancia o Ley del inverso de la distancia al cuadrado. El lux es una unidad derivada de medida de la iluminancia y su símbolo es lx; está relacionado con otras unidades fotométricas básicas de la siguiente manera:



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

En términos simples, se logra una iluminancia de 1 lx cuando un flujo luminoso igual a 1 lm ilumina uniformemente 1 m<sup>2</sup> de superficie. Como referencia, en la NOM-025-STPS-2008 se establece que para áreas de trabajo tales como salas de cómputo, áreas de dibujo y laboratorios se debe cumplir con un nivel mínimo de iluminación de 500 lx que incidan en el plano de trabajo.

### 2.3.11 Responsividad fotométrica

El detector físico de una magnitud fotométrica cuenta con la característica llamada responsividad fotométrica, que se representa mediante el símbolo  $S_v$ , y se define como el cociente de la respuesta que produce el detector cuando incide alguna magnitud fotométrica sobre este. Si la magnitud fotométrica que incide sobre un detector es la iluminancia  $E_v$  y su respuesta es una corriente eléctrica  $i$ , entonces la responsividad fotométrica de dicho detector puede expresarse como:

$$S_v = \frac{i}{E_v} \quad (10)$$

En este caso, el ampere por lux, cuyo símbolo es  $A/\text{lx}$ , es la unidad de medida de  $S_v$ . La respuesta del detector también podría ser una diferencia de potencial u otra magnitud física; así la responsividad fotométrica tendrá las unidades que correspondan según la Tabla 1 [15].

### 2.3.12 Instrumentos de medición de iluminancia (luxómetros)

Un luxómetro, también conocido como medidor de iluminancia, es un instrumento fotométrico diseñado para medir el flujo luminoso visible que incide sobre una superficie específica, como podría ser un plano de trabajo.

Este instrumento se compone de un fotodetector, el cual podría ser un arreglo formado por un fotodiodo y un filtro verde, diseñado específicamente reproducir la responsividad espectral de la función  $v(\lambda)$ , como se muestra en la Figura 6 [13]. Además, un luxómetro cuenta con una cubierta traslúcida, denominada “corrector cosenoidal”, así como con la instrumentación electrónica requerida para la amplificación, procesamiento y lectura de la

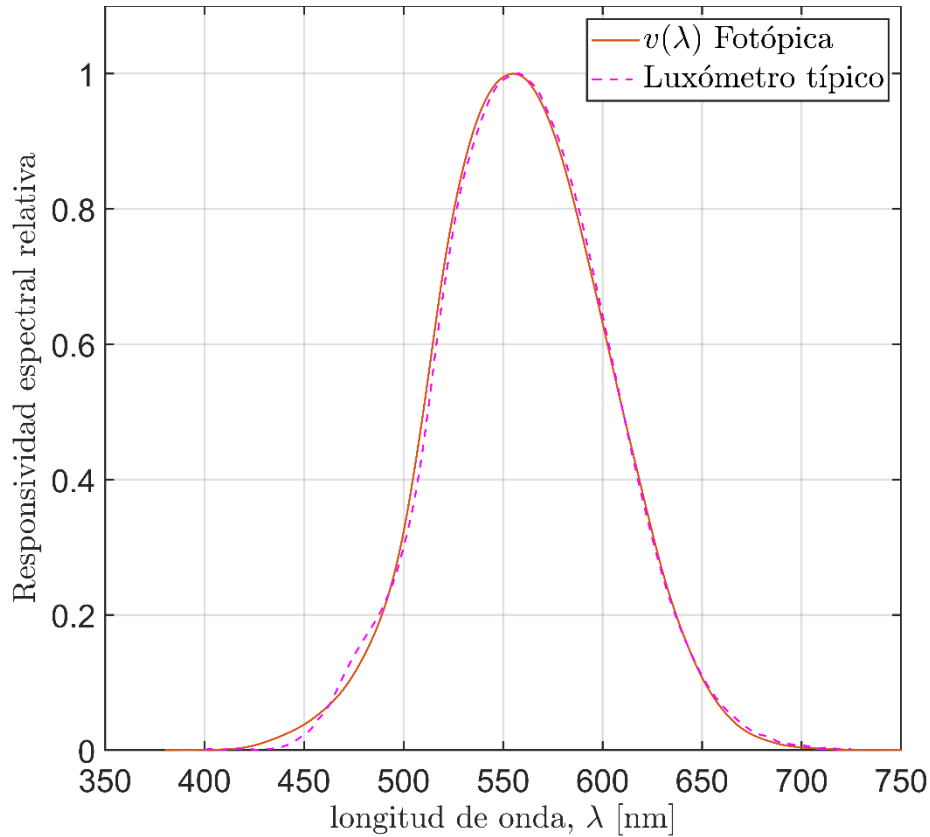
medición. Los luxómetros pueden ser digitales o analógicos, observando que los instrumentos analógicos tienen desventajas tales como una baja resolución dado el gran campo de medida requerido, lo cual provoca grandes variabilidades de sus lecturas, y que repercute en la incertidumbre de la medición de iluminancia (luxes) de este tipo de luxómetros, que podría llevarlos a exceder los valores de exactitud requeridos por normas tales como la NOM-025-STPS-2008 [15]. Por ello, los luxómetros digitales son los más populares en el mercado.

### **2.3.13 Parámetros de desempeño**

Existen diversos instrumentos comerciales para medir la iluminancia. Dichos luxómetros se pueden diferenciar por algunos de sus parámetros de desempeño más importantes tales como el campo de medida, la resolución, el rango, la linealidad, la estabilidad, la exactitud, la sensibilidad, la deriva, por nombrar algunos los cuales se describen a continuación [15].

### **2.3.14 Responsividad Espectral**

Los fotodetectores de los luxómetros detectan de manera selectiva las distintas componentes espectrales de la luz de forma análoga al ojo humano [6], [13]. Dicha selectividad, en términos de la capacidad de detección del elemento fotosensible, determina la responsividad espectral del luxómetro; mediante la cual se realiza una interpretación integral fotométrica, es decir, en términos de la visión humana, del nivel de iluminancia que establece el flujo luminoso que incide en el luxómetro.



**Figura 6:** Se muestran las curvas de función  $v(\lambda)$  y de la responsividad espectral de un luxómetro comercial.

Así, cuando se consideran dos distintos fotodetectores con responsividad espectral idéntica interpretarán niveles de iluminancia idénticos. Si se desea que el fotodetector tenga una respuesta que sea representativa de la del ojo humano, el cual es simulado empleando el observador fotométrico patrón de la CIE para visión fotópica; el fotodetector ha de tener una responsividad espectral igual a la función  $v(\lambda)$ . Así, idealmente se busca que el fotodetector, formado por el par filtro-fotodiodo, reproduzca la función  $v(\lambda)$ , de lo contrario la medición de iluminancia que se realice será incorrecta. Como se muestra en la Figura 6, un luxómetro comercial puede presentar una curva de responsabilidad espectral con desviaciones promedio de entre un 3% y un 5% [6], [15].

### 2.3.15 Error Máximo Permitido

Esta característica se refiere a los valores extremos del error que son aceptados por las especificaciones, normas, etc. Por ello, es importante seleccionar un luxómetro cuya responsividad espectral fotópica se aproxime lo máximo posible a la función  $v(\lambda)$  [6], [15].

### **2.3.16 Resolución**

Es la mínima diferencia de indicación que puede ser percibida de forma significativa en la escala o pantalla de un instrumento [6]. Algunos luxómetros que miden iluminancia con mucha precisión pueden contar con una resolución en el orden de las décimas o centésimas de lux; pero también existen otros instrumentos que permiten hacer lecturas con resolución mínima de la unidad, decena o centena de lux [15].

### **2.3.17 Escala**

La escala de un instrumento de medición es el conjunto de marcas, asociadas a una numeración, que forma parte del dispositivo indicador del instrumento. Existen luxómetros que poseen diferentes opciones de escalas, como x1, x5, x10, x20, x60, x100, x1 k, x10 k, etc., que representa el factor por el que debe ser multiplicada la lectura que entrega el luxómetro para obtener la iluminancia leída [15].

### **2.3.18 Intervalo Nominal de Indicaciones**

El intervalo nominal de indicaciones de un instrumento se refiere al intervalo de la escala obtenido por la posición dada de los controles en sus límites inferior y superior de medición; por ejemplo, hay equipos con intervalos nominales de indicación de (0 a 2) lx, (0 a 199) lx, (200 a 1,999) lx, (0 a 2,000) lx, (0 a 5,000) lx, (0 a 20,000) lx, (0 a 50,000) lx, de (0 a 100,000) lx, (0 a 200,000) lx, etc. [15].

### **2.3.19 Estabilidad**

Se dice que un instrumento de medición es estable o tiene buena estabilidad cuando éste mantiene sus características metrológicas constantes durante el tiempo que dura una medición. Existen algunos instrumentos cuyas características metrológicas varían significativamente mientras se está realizando una medición, lo que los vuelve inadecuados. En algunos casos la estabilidad de un instrumento se califica en función de otra magnitud distinta al tiempo; si es así, debe ser mencionado claramente [15].

### **2.3.20 Deriva Instrumental**

Por otro lado, si el error que comete el luxómetro al medir cambia conforme transcurren periodos largos de tiempo; entonces se dice que éste presenta deriva instrumental, pues ésta representa la variación lenta de una característica metrológica del instrumento de medición. En un luxómetro la deriva puede deberse por ejemplo al envejecimiento del detector, al oscurecimiento del difusor, a la descarga de las pilas que se usan para su operación, etc.; y por ello se recomienda realizar verificaciones frecuentes de su funcionamiento a fin de determinar con oportunidad cuando un equipo presente deriva. Al igual que la estabilidad, en ciertos casos la deriva instrumental puede calificarse en función de otra magnitud, como la temperatura; lo que debe ser mencionado con claridad cuando así suceda [15].

### **2.3.21 Linealidad de Respuesta**

Se dice que un instrumento presenta una respuesta lineal cuando la razón de proporcionalidad entre sus señales de entrada y de salida puede ser expresada como la ecuación de una línea recta. La mayoría de los luxómetros presentan una respuesta lineal, lo que permite extrapolar la determinación del error que presentará el luxómetro cuando mida niveles de iluminancia distintos a los valores calibrados [15].

### **2.3.22 Sensibilidad**

La sensibilidad del instrumento es la razón entre el cambio que sufre su respuesta a un estímulo y el cambio del estímulo mismo. Un luxómetro con una alta sensibilidad permitirá detectar variaciones pequeñas en los niveles de iluminancia que esté midiendo, lo que se reflejará en la repetibilidad de sus lecturas. En este caso será necesario asegurar que el nivel de iluminancia que se esté midiendo se mantenga estable [15].

### **2.3.23 de Medida**

La exactitud de medida de un instrumento de medición se refiere a su capacidad para dar respuestas próximas al valor verdadero del mensurando. Este término es meramente cualitativo y debe cuantificarse mediante la determinación del error que presentan las mediciones realizadas con él [15].

### **2.3.24 Corrección Cosenoidal**

La corrección cosenoidal en un luxómetro se refiere a su capacidad para coleccionar la luz independientemente del ángulo de incidencia y dirigirla hacia el detector, cuya área sensible es habitualmente pequeña. En general, el detector de un luxómetro está cubierto por un difusor que dispersa la luz al tiempo que la transmite, provocando así una iluminancia uniforme sobre toda el área efectiva de detección, que es normalmente menor al área del difusor [15].

### **2.3.25 Introducción a los sistemas de control**

Las teorías de control que se utilizan habitualmente son la teoría de control clásico (que emplea normalmente una descripción matemática entrada-salida) y la teoría en espacio de estado (que emplea normalmente una descripción matemática en forma de ecuaciones diferenciales ordinarias o ecuaciones en diferencias). El control automático ha desempeñado un papel vital en el avance de la ingeniería y la ciencia. El control automático se ha convertido en una parte importante e integral en los sistemas de vehículos espaciales, en los sistemas robóticos, en los procesos modernos de fabricación y en cualquier operación industrial que requiera el control de temperatura, presión, humedad, flujo, etc. Es deseable que la mayoría de los ingenieros y científicos estén familiarizados con la teoría y la práctica del control automático [13].

Durante la década de los cuarenta, los métodos de la respuesta en frecuencia (especialmente los diagramas de Bode) hicieron posible que los ingenieros diseñaran sistemas de control lineales en lazo cerrado que cumplieran los requisitos de comportamiento. En los años cuarenta y cincuenta muchos sistemas de control industrial utilizaban controladores PID para el control de la presión, de la temperatura, etc. A comienzos de la década de los cuarenta Ziegler y Nichols establecieron reglas para sintonizar controladores PID, las denominadas reglas de sintonía de Ziegler-Nichols. A finales de los años cuarenta y principios de los cincuenta, se desarrolló por completo el método del lugar de las raíces propuesto por Evans. Los métodos de respuesta en frecuencia y del lugar de las raíces, que forman el núcleo de la teoría de control clásica, conducen a sistemas estables que satisfacen un conjunto más o menos arbitrario de requisitos de comportamiento. En general, estos sistemas son aceptables,

pero no óptimos desde ningún punto de vista. Desde el final de la década de los cincuenta, el énfasis en los problemas de diseño de control se ha desplazado del diseño de uno de los posibles sistemas que funciona adecuadamente al diseño de un sistema óptimo respecto de algún criterio. Conforme las plantas modernas con muchas entradas y salidas se vuelven más y más complejas, la descripción de un sistema de control requiere una gran cantidad de ecuaciones. La teoría de control clásica, que trata de los sistemas con una entrada y una salida, pierde su potencialidad cuando se trabaja con sistemas con entradas y salidas múltiples. Hacia 1960, debido a la disponibilidad de las computadoras digitales fue posible el análisis en el dominio del tiempo de sistemas complejos. La teoría de control en espacio de estado, basada en el análisis en el dominio del tiempo y la síntesis a partir de variables de estado, se ha desarrollado para manejar la creciente complejidad de las plantas modernas y los requisitos cada vez más exigentes sobre precisión, peso y costo en aplicaciones militares, espaciales e industriales [13].

Durante los años comprendidos entre 1960 y 1980, se investigó a fondo el control óptimo tanto de sistemas determinísticos como estocásticos, así como el control adaptativo y con aprendizaje de sistemas complejos. Desde la década de los ochenta hasta la de los noventa, los avances en la teoría de control en espacio de estado se centraron en la robustez del control automático y temas relacionados.

La teoría de control en espacio de estado se basa en el análisis en el dominio temporal de los sistemas de ecuaciones diferenciales o ecuaciones en diferencias. La teoría de control en espacio de estado simplificó el diseño de los sistemas de control porque se basa en un modelo del sistema real que se quiere controlar. Sin embargo, la estabilidad del sistema depende del error entre el sistema real y su modelo. Esto significa que cuando el controlador diseñado basado en un modelo se aplica al sistema real, éste puede resultar ser inestable.

### **2.3.26 Definiciones en los sistemas de control**

Para adentrarse en los sistemas de control, deben definirse ciertos términos básicos, que ayudarán a conocer y entender los conceptos físicos y matemáticos coexistentes en los sistemas de control y las diferentes teorías [13].

### **2.3.26.1 Variable controlada y señal de control**

La variable controlada es la cantidad o condición que se mide y controla. La señal de control o variable manipulada es la cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable controlada. Normalmente, la variable controlada es la salida del sistema. Controlar significa medir el valor de la variable controlada del sistema y aplicar la variable manipulada al sistema para corregir o limitar la desviación del valor medido respecto del valor deseado. En el estudio de la ingeniería de control, es necesario definir términos adicionales que se precisan para describir los sistemas de control [13].

### **2.3.26.2 Plantas**

Una planta puede ser una parte de un equipo, tal vez un conjunto de los elementos de una máquina que funcionan juntos, y cuyo objetivo es efectuar una operación particular [18], [19]. Se considera planta a cualquier objeto físico que se va a controlar (como un dispositivo mecánico, un horno de calefacción, un reactor químico o una nave espacial) [13].

### **2.3.26.3 Procesos**

El Diccionario Merriam-Webster define un proceso como una operación o un desarrollo natural progresivamente continuo, marcado por una serie de cambios graduales que se suceden unos a otros de una forma relativamente fija y que conducen a un resultado o propósito determinados; o una operación artificial o voluntaria que se hace de forma progresiva y que consta de una serie de acciones o movimientos controlados, sistemáticamente dirigidos hacia un resultado o propósito determinado. Se llama proceso a cualquier operación que se va a controlar. Algunos ejemplos son los procesos químicos, económicos y biológicos [13].

### **2.3.26.4 Sistemas**

Un sistema es una combinación de componentes que actúan juntos y realizan un objetivo determinado [18], [20]. Un sistema no está necesariamente limitado a los sistemas físicos. El concepto de sistema se puede aplicar a fenómenos abstractos y dinámicos, como los que se encuentran en la economía. Por tanto, la palabra sistema debe interpretarse en un sentido amplio que comprenda sistemas físicos, biológicos, económicos y similares [13].



### **2.3.26.5 Perturbaciones**

Una perturbación es una señal que tiende a afectar negativamente el valor de la salida de un sistema. Si la perturbación se genera dentro del sistema se denomina interna, mientras que una perturbación externa se genera fuera del sistema [13], [21].

### **2.3.26.6 Control retroalimentado.**

El propósito del control retroalimentado es que en presencia de perturbaciones se reduzca la diferencia entre la salida de un sistema y la entrada de referencia, y lo realiza tomando en cuenta esta diferencia [22], [21]. Aquí sólo se especifican con este término las perturbaciones impredecibles, ya que las perturbaciones predecibles o conocidas siempre pueden compensarse dentro del sistema [13], [23].

### **2.3.26.7 Sistemas de control retroalimentados.**

Un sistema que mantiene una relación determinada entre la salida y la entrada de referencia, comparándolas y usando la diferencia como medio de control, se denomina sistema de control retroalimentado [18], [21]. Un ejemplo sería el sistema de control de temperatura de una habitación. Midiendo la temperatura real y comparándola con la temperatura de referencia (temperatura deseada), el termostato activa o desactiva el equipo de calefacción o de enfriamiento para asegurar que la temperatura de la habitación se mantiene en un nivel confortable independientemente de las condiciones externas. Los sistemas de control retroalimentados no se limitan a la ingeniería, sino que también se encuentran en diversos campos ajenos a ella. Por ejemplo, el cuerpo humano es un sistema de control retroalimentado muy avanzado. Tanto la temperatura corporal como la presión sanguínea se conservan constantes mediante una realimentación fisiológica. De hecho, la retroalimentación realiza una función vital: hace que el cuerpo humano sea relativamente insensible a las perturbaciones externas, permitiendo que funcione de forma adecuada en un entorno cambiante [13].

### **2.3.26.8 Sistemas de control en lazo cerrado**

Los sistemas de control retroalimentados se denominan también sistemas de control en lazo cerrado. En la práctica, los términos control retroalimentado y control en lazo cerrado se usan indistintamente. En un sistema de control en lazo cerrado, se alimenta al controlador la señal

de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de referencia y la señal de realimentación (que puede ser la propia señal de salida o una función de la señal de salida y sus derivadas y/o integrales), con el fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor deseado. El término control en lazo cerrado siempre implica el uso de una acción de control retroalimentado para reducir el error del sistema [13].

#### **2.3.26.9 Sistemas de control en lazo abierto**

Los sistemas en los cuales la salida no tiene efecto sobre la acción de control se denominan sistemas de control en lazo abierto. En otras palabras, en un sistema de control en lazo abierto no se mide la salida ni se retroalimenta para compararla con la entrada de referencia. Un ejemplo práctico es una lavadora: el remojo, el lavado y el centrifugado en la lavadora operan con una base de tiempo. La máquina no mide la señal de salida, que es la limpieza de la ropa. En cualquier sistema de control en lazo abierto, la salida no se compara con la entrada de referencia. Así, a cada entrada de referencia le corresponde una condición de operación fija; como resultado de ello, la precisión del sistema depende de la calibración. Ante la presencia de perturbaciones, un sistema de control en lazo abierto puede no realizar la tarea en forma deseada. En la práctica, el control en lazo abierto sólo se usa si se conoce la relación entre la entrada y la salida y si no hay perturbaciones significativas internas ni externas. Es evidente que estos sistemas no son de control retroalimentado. Obsérvese que cualquier sistema de control que opere con una base de tiempo está en lazo abierto. Por ejemplo, el control de tráfico mediante señales operadas con una base de tiempo es otro ejemplo de control en lazo abierto [13].

#### **2.3.26.10 Modelo matemático**

Un modelo matemático de un sistema se define como un conjunto de ecuaciones que representan la dinámica del sistema con precisión o, al menos bastante bien. Téngase presente que un modelo matemático no es único para un sistema determinado. Un sistema puede representarse de muchas formas diferentes, por lo que puede tener muchos modelos matemáticos, dependiendo de cada perspectiva. La dinámica de muchos sistemas, ya sean mecánicos, eléctricos, térmicos, económicos, biológicos, etc., se describe en términos de ecuaciones diferenciales ordinarias. Dichas ecuaciones diferenciales se pueden obtener a partir de leyes físicas que gobiernan un sistema determinado – como las leyes de Newton

para sistemas mecánicos y las leyes de Kirchhoff para sistemas eléctricos. Se debe siempre recordar que obtener un modelo matemático razonable exacto es la parte más importante de todo el análisis. Se supone que el principio de causalidad se aplica a los sistemas físico, esto significa que la salida actual del sistema (la salida en  $t = 0$ ) depende de las entradas pasadas (entradas en  $t < 0$ ) pero no depende de las entradas futuras (entradas para  $t > 0$ ).

#### **2.3.26.11 Modelados matemáticos y sus formas**

Los modelos matemáticos pueden adoptar muchas formas distintas. Dependiendo del sistema del que se trate y de las circunstancias específicas, un modelo matemático puede ser más conveniente que otros [21]. Por ejemplo, en problemas de control óptimo, es provechoso usar representaciones en el espacio de estado [24]. En cambio, para los análisis de la respuesta en la frecuencia de sistemas lineales con una entrada y una salida invariantes en el tiempo, la representación mediante la función de transferencia puede ser más conveniente que cualquier otra [18], [20], [19], [21]. Una vez obtenido un modelo matemático de un sistema, se usan diversos recursos analíticos, así como computadoras para estudiarlo y sintetizarlo.

#### **2.3.26.12 Simplicidad contra precisión**

Al obtener un modelo matemático se debe establecer un compromiso entre la simplicidad de este y la precisión de los resultados del análisis [21]. Al obtener un modelo matemático razonablemente simplificado, a menudo resulta necesario ignorar ciertas propiedades físicas inherentes al sistema. En particular, si se pretende obtener un modelo matemático de parámetros concentrados lineal (es decir, uno en el que se empleen ecuaciones diferenciales ordinarias lineales invariantes en el tiempo), siempre es necesario ignorar ciertas no linealidades y parámetros distribuidos que pueden estar presentes en el sistema dinámico [21]. Si los efectos que estas propiedades ignoradas tienen sobre la respuesta son pequeños, se obtendrá un buen acuerdo entre los resultados del análisis de un modelo matemático y los resultados del estudio experimental del sistema físico [21]. En general, cuando se resuelve un problema nuevo, es conveniente desarrollar primero un modelo simplificado para obtener una idea general de la solución.

Si el modelo simplificado no es suficientemente adecuado para los fines de control entonces se desarrolla un modelo matemático más completo. Se debe ser consciente de que un modelo

de parámetros concentrados lineal, que puede ser válido si opera en baja frecuencia, tal vez no sea válido en frecuencias suficientemente altas, debido a que la propiedad no considerada de los parámetros distribuidos puede convertirse en un factor importante en el comportamiento dinámico del sistema [21]. Por ejemplo, la masa de un resorte puede pasarse por alto en operaciones en baja frecuencia, pero se convierte en una propiedad importante del sistema en altas frecuencias [25]. Para el caso en el que el modelo matemático tiene en cuenta consideraciones de errores, se puede aplicar la teoría de control robusto [20].

#### **2.3.26.13 Sistemas lineales**

Un sistema se denomina lineal si se aplica el principio de superposición [18], [21]. Este principio establece que la respuesta producida por la aplicación simultánea de dos funciones de entradas diferentes es la suma de las dos respuestas individuales [18]. Por tanto, para el sistema lineal, la respuesta a varias entradas se calcula tratando una entrada cada vez y sumando los resultados [18]. Este principio permite desarrollar soluciones complicadas para la ecuación diferencial lineal a partir de soluciones simples. Si en una investigación experimental de un sistema dinámico son proporcionales la causa y el efecto, lo cual implica que se aplica el principio de superposición, el sistema se considera lineal.

#### **2.3.26.14 Sistemas lineales invariantes y variantes en el tiempo.**

Una ecuación diferencial es lineal si sus coeficientes son constantes o son funciones sólo de la variable independiente [20], [21]. Los sistemas dinámicos formados por componentes de parámetros concentrados lineales invariantes con el tiempo se describen mediante ecuaciones diferenciales lineales invariantes en el tiempo – de coeficientes constantes. Tales sistemas se denominan sistemas lineales invariantes en el tiempo (o lineales de coeficientes constantes) [19]. Los sistemas que se representan mediante ecuaciones diferenciales cuyos coeficientes son funciones del tiempo, se denominan sistemas lineales variantes en el tiempo [21]. Un ejemplo de un sistema de control variante en el tiempo es un sistema de control de naves espaciales [19]. La masa de una nave espacial cambia debido al consumo de combustible [19].

## 2.4 Teoría de control en espacio de estado.

La tendencia en los sistemas de ingeniería es hacia una mayor complejidad, debido sobre todo a que se requieren tareas más complejas y buena precisión [18], [20]. Los sistemas complejos pueden tener múltiples entradas y múltiples salidas y pueden ser variantes en el tiempo [20], [21]. Debido a la necesidad de cumplir requisitos cada vez más exigentes en el comportamiento de los sistemas de control, el aumento en la complejidad del sistema y el fácil acceso a las computadoras a gran escala, la teoría de control en espacio de estado, que es una aproximación al análisis y diseño de los sistemas de control complejo, se ha desarrollado desde 1960 [20], [26]. Esta nueva aproximación se basa en el concepto de estado [21], [24]. El concepto de estado por sí mismo no es nuevo, puesto que ha existido durante bastante tiempo en el campo de la dinámica clásica y en otros campos.

### 2.4.1 Espacio vectorial.

Un espacio vectorial sobre un campo  $F$ , denotado por  $(X, F)$ , consiste de un conjunto, denotado por  $X$ , de elementos llamados vectores, un campo  $F$ , y dos operaciones llamadas suma vectorial y multiplicación escalar [5], [21], [24]. Las dos operaciones están definidas en  $X$  y  $F$  tal que satisfacen todas las siguientes condiciones:

- A cada par de vectores  $\mathbf{x}_1$  y  $\mathbf{x}_2$  en  $X$ , le corresponde un vector  $\mathbf{x}_1 + \mathbf{x}_2$  en  $X$ , llamado la suma de  $\mathbf{x}_1$  y  $\mathbf{x}_2$ .
- Adición es conmutativa: Para cualquier  $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2$  en  $X$ ,  $\mathbf{x}_1 + \mathbf{x}_2 = \mathbf{x}_2 + \mathbf{x}_1$ .
- Adición es asociativa: Para cada  $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2$  y  $\mathbf{x}_3$  en  $X$ ,  $(\mathbf{x}_1 + \mathbf{x}_2) + \mathbf{x}_3 = \mathbf{x}_1 + (\mathbf{x}_2 + \mathbf{x}_3)$ .
- $X$  contiene un vector, denotado por  $\mathbf{0}$ , tal que  $\mathbf{0} + \mathbf{x} = \mathbf{x}$ .
- Para cada  $\mathbf{x}$  in  $X$ , existe un vector  $\bar{\mathbf{x}}$  en  $X$  tal que  $\mathbf{x} + \bar{\mathbf{x}} = \mathbf{0}$ .

Para cada  $\alpha$  en  $F$ , y cada  $\mathbf{x}$  en  $X$ , le corresponde un vector  $\alpha\mathbf{x}$  en  $X$  llamado el producto escalar de  $\alpha$  and  $\mathbf{x}$ .

- Multiplicación escalar es asociativa: Para cualquier  $\alpha, \beta$  en  $F$  y cualquier  $\mathbf{x}$  en  $X$ ,  $\alpha(\beta\mathbf{x}) = (\alpha \cdot \beta)\mathbf{x}$ .

- Multiplicación escalar es distributiva con respecto a la adición vectorial: Para cualquier  $\alpha$  en  $F$  y cualquier  $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2$  en  $X$ ,  $\alpha(\mathbf{x}_1 + \mathbf{x}_2) = \alpha\mathbf{x}_1 + \alpha\mathbf{x}_2$ .
- Multiplicación escalar es distributiva con respecto a la adición escalar: Para cualquier  $\alpha, \beta$  en  $F$  y cualquier  $\mathbf{x}$  en  $X$ ,  $(\alpha + \beta)\mathbf{x} = \alpha\mathbf{x} + \beta\mathbf{x}$ .
- Para cualquier  $\mathbf{x}$  en  $X$ ,  $1\mathbf{x} = \mathbf{x}$ , donde 1 es el elemento 1 en  $F$ .

Si el sistema es lineal, las funciones  $h$  y  $g$  en (1) son funciones lineales de  $x$  y  $u$

$$\begin{cases} \mathbf{h}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{g}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) = \mathbf{C}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{E}(t)\mathbf{u}(t) \end{cases} \quad (11)$$

donde  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$  y  $\mathbf{E}$  son matrices de dimensiones respectivas,  $n \times n$ ,  $n \times p$ ,  $q \times n$  y  $q \times p$  [21], [24]. Los valores de  $\mathbf{A}(\cdot)$ ,  $\mathbf{B}(\cdot)$ ,  $\mathbf{C}(\cdot)$  y  $\mathbf{E}(\cdot)$  cambian con el tiempo. Entonces, una ecuación lineal variante en el tiempo continua n-dimensional tiene la siguiente forma:

$$E: \begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{E}(t)\mathbf{u}(t) \end{cases} \quad (12)$$

En algunos casos,  $\mathbf{A}(\cdot)$ ,  $\mathbf{B}(\cdot)$ ,  $\mathbf{C}(\cdot)$  y  $\mathbf{E}(\cdot)$  no dependen del tiempo [18], [20], [21], [19]. Entonces, una ecuación lineal invariante en el tiempo continua n-dimensional tiene la siguiente forma:

$$FE: \begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) & \text{ecuación de estado} \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{E}\mathbf{u}(t) & \text{ecuación de salida} \end{cases} \quad (13)$$

### 2.4.2 Sistemas no lineales.

Aunque existe un gran número de leyes de control para sistemas lineales, la gran mayoría de los sistemas en el mundo real no son lineales [27], [25]. Cualquier modelo diferencial continuo que no tiene la estructura de (10) se le llama sistema dinámico no lineal continuo.

Una familia de los sistemas no lineales parece ser lineal en algún sentido: sea  $\mathbf{X}$  una variedad matemática n-dimensional de característica suave, y sea  $U \subseteq \mathbb{R}^n$  para algún  $m \leq n$ . Un sistema no lineal de la siguiente forma:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t)) + \sum_{i=1}^m g_i(\mathbf{x}(t))u_i(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{h}(\mathbf{x}(t)) \end{cases} \quad (14)$$

con funciones suaves  $\mathbf{f}$ ,  $\mathbf{h}$  y  $g_i$  se le llama *sistema no lineal afín al control*.

Otra familia de sistemas no lineales puede ser definida de la siguiente forma [13]

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(\mathbf{y}(t), \mathbf{u}(t), t)\mathbf{x}(t) + \varphi(\mathbf{y}(t), \mathbf{u}(t), t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}(t)\mathbf{x}(t) \end{cases} \quad (15)$$

Se le llama *sistema no lineal afín al estado*. Es necesaria una breve nota acerca de la propiedad denominada *afín* [3] [4]. Afín simplemente significa “lineal”, y no afín significa “no lineal”, los cuales se emplean en el contexto de los sistemas no lineales (con respecto al estado del sistema). Por tanto, un sistema no lineal en el cual el control aparece linealmente se le llama *sistema no lineal afín al control/entrada* o simplemente *sistema afín al control/entrada*, donde implícitamente se entiende la existencia de una no linealidad con respecto al estado. Por otro lado, un sistema que tiene no linealidades tanto en el estado como en el control se le llama *sistema no lineal no afín al control/entrada* o simplemente *sistema no afín al control/entrada*. La forma general de un sistema afín al control/entrada se representa con una ecuación diferencial vectorial:  $\frac{dx}{dt} = f(x) + g(x)u$ ; mientras que la forma general para un sistema no afín al control/entrada se define como  $\frac{dx}{dt} = f(x) + g(x, u)$ .

### 2.4.3 Puntos de equilibrio.

En la mayoría de los casos se lleva a cabo el análisis de la dinámica del sistema sin la presencia explícita de la entrada  $u$ ; esto da origen a la llamada ecuación de estado forzada

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(t, \mathbf{x}) \quad (16)$$

la ecuación de estado forzada no necesariamente significa que la entrada del sistema es cero [28]. Podría ser que la entrada ha sido especificada como una función del tiempo,  $u = \psi(t)$ , como una función del estado,  $u = \psi(\mathbf{x})$ , o ambas  $u = \psi(t, \mathbf{x})$ . La sustitución de  $u = \psi$  elimina  $u$  y da origen a la ecuación de estado forzada. Un caso especial de (16), surge cuando la función  $f$  no depende explícitamente de  $t$ ; es decir:

$$\dot{x} = f(x) \quad (17)$$

en cuyo caso se dice que el sistema es *autónomo* o *variante en el tiempo* [28], [29]. En contraste, si el sistema no es autónomo, entonces se le denomina *no-autónomo* o *variante en el tiempo*.

Un concepto importante en la ecuación de estado es el concepto de punto de equilibrio (punto fijo) [7], [28], [29]. Un punto  $x = x^*$  en el espacio de estado se dice que es un punto de equilibrio (o punto fijo) de (16) si el estado se mantiene en  $x^*$  para todo tiempo futuro cuando el estado se inicializa en  $x^*$  [29]. Para el caso de los sistemas autónomos (17), los puntos de equilibrio son las raíces reales de la ecuación [28], [29]:

$$f(x) = 0 \quad (18)$$

Un punto de equilibrio puede ser un equilibrio aislado, es decir no existen otros equilibrios en su vecindad en el espacio de estado o podría ser que existiera una secuencia infinita continua de puntos de equilibrios [29].

## 2.5 Sistemas dinámicos en tiempo discreto.

En general, una ecuación dinámica lineal en tiempo discreto invariante en el tiempo  $n$  - dimensional tiene la siguiente forma [21], [22]:

$$D: \begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{\Phi}\mathbf{x}(k) + \mathbf{\Gamma}\mathbf{u}(k) & \text{ecuación de estado} \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{H}\mathbf{x}(k) & \text{ecuación de salida} \end{cases} \quad (19)$$

donde  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$  es el estado,  $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_q]^T$  es la salida y  $\mathbf{u} = [u_1, u_2, \dots, u_p]^T$  es la entrada [21], [30]. Matemáticamente, la ecuación de estado en (19) es en realidad un sistema de ecuaciones en diferencias lineales invariantes en el tiempo cuyo vector de estado pertenece a un espacio vectorial real  $n$ -dimensional [21].

## 2.6 Análisis de estabilidad de los sistemas dinámicos en tiempo discreto.

En un sistema de tiempo discreto autónomo definido por la siguiente ecuación de estado:



$$\mathbf{x}(k + 1) = \Phi \mathbf{x}(k) \quad (20)$$

se puede decir que una condición necesaria y suficiente para garantizar la estabilidad global asintótica del equilibrio (origen del espacio de estado) es que todos los valores propios de  $\mathbf{G}$  (o equivalentemente las raíces del polinomio característico) tengan magnitud menor que la unidad [21], [30]. Es decir, las raíces del siguiente polinomio característico:

$$\det(z\mathbf{I} - \mathbf{G}) = z^n + a_1z^{n-1} + \dots + a_{n-1}z + a_n \quad (21)$$

deben estar en el interior del círculo unitario centrado en el origen del plano complejo  $z$  [21], [30]. Más aun, la localización de los valores propios determina el comportamiento cualitativo de la respuesta del sistema en tiempo discreto como se puede apreciar en la Figura 7 [21], [30].

Adicionalmente, la respuesta en el dominio de tiempo continuo se puede fácilmente asociar a la respuesta en el dominio de tiempo discreto empleando la Figura 7 que relaciona el plano complejo  $s$  con el plano complejo  $z$  [21], [30].

## 2.7 Ubicación de polos.

La Ubicación de Polos (Pole Placement) es una técnica de control empleada en los sistemas lineales invariantes en el tiempo tanto para el caso continuo como para el caso discreto [18], [21], [22], [30]. La aplicación de esta técnica requiere el cumplimiento de la propiedad denominada estado controlable [21]. Si el sistema es estado controlable entonces es posible calcular las ganancias de una retroalimentación de estado lineal que tenga la propiedad de guiar la trayectoria dinámica del sistema hacia al equilibrio deseable asociado a un valor de referencia (set-point) [21]. Este hecho implica que el equilibrio deseable sea globalmente asintóticamente estable y por tanto implica que los polos del sistema en lazo cerrado debieran estar ubicados dentro del círculo unitario del plano complejo  $z$  como se muestra en la Figura 7 [11], [21], [30]. Los polos del sistema en lazo abierto (polos originales) pudiesen estar localizados en cualquier punto del plano complejo  $z$  [19], [21]. Si el sistema es estado controlable, es posible calcular las ganancias de la retroalimentación de estado aun en condiciones extremas, por ejemplo, cuando los polos en lazo abierto estuviesen ubicados fuera del círculo unitario y por lo

tanto, el equilibrio del sistema en lazo abierto sea inestable [21]. Considere la siguiente retroalimentación de estado lineal:

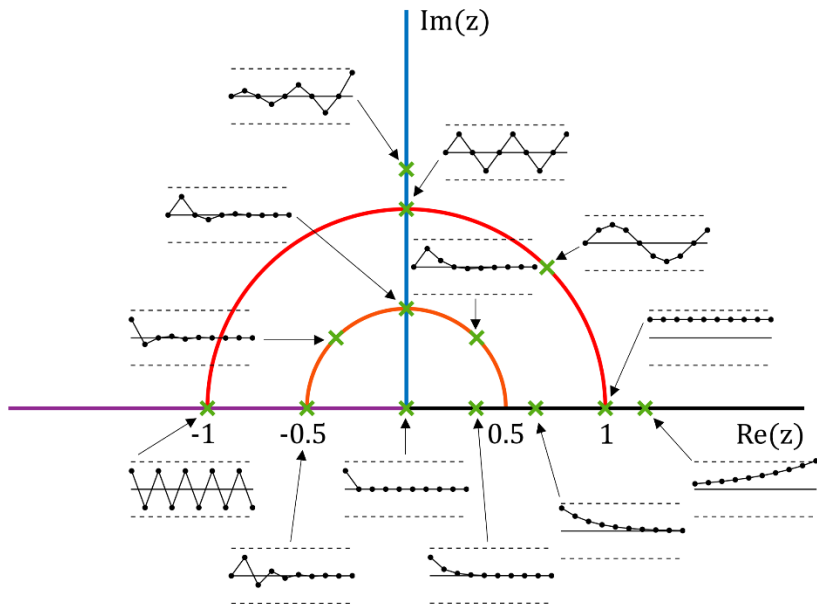
$$\begin{aligned} \mathbf{u}(k) &= -\mathbf{G}\mathbf{x}(k) \\ &= -[g_1, g_2, \dots, g_n][x_1(k), x_2(k), \dots, x_n(k)]^T \end{aligned} \quad (22)$$

substituyendo la ley de control (22) en (19), la ecuación de estado del sistema en lazo cerrado en coordenadas originales resulta de la siguiente forma:

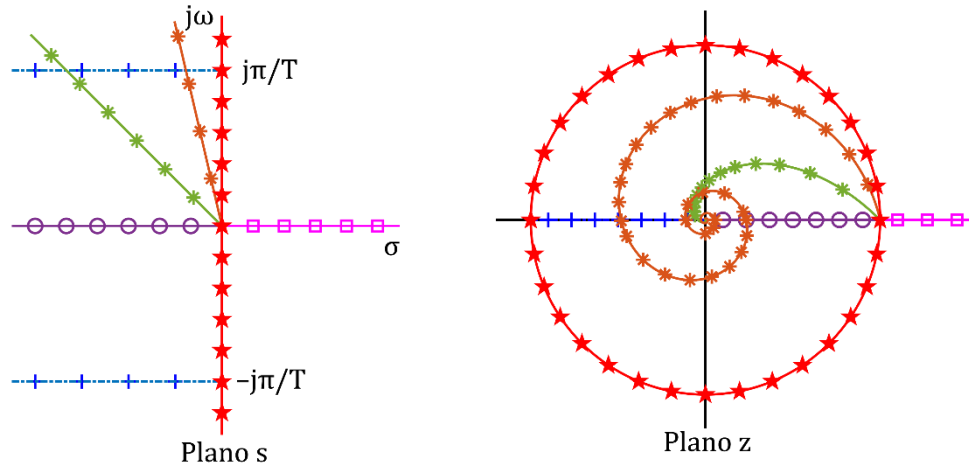
$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{\Phi}\mathbf{x}(k) + \mathbf{\Gamma}(-\mathbf{G}\mathbf{x}(k)) = (\mathbf{\Phi} - \mathbf{\Gamma}\mathbf{G})\mathbf{x}(k)$$

Recordemos que si el sistema es estado controlable entonces es transformable a su forma canónica controlable [11], [19], [20], [21], en particular la ecuación de estado en (19) en su forma canónica controlable resulta:

$$\tilde{\mathbf{x}}(k+1) = \tilde{\mathbf{\Phi}}\tilde{\mathbf{x}}(k) + \tilde{\mathbf{\Gamma}}\mathbf{u}(k) \quad (23)$$



**Figura 7:** Ubicación de los valores propios en el plano complejo  $\mathbf{z}$  y sus comportamientos cualitativos en el dominio del tiempo discreto. [11]



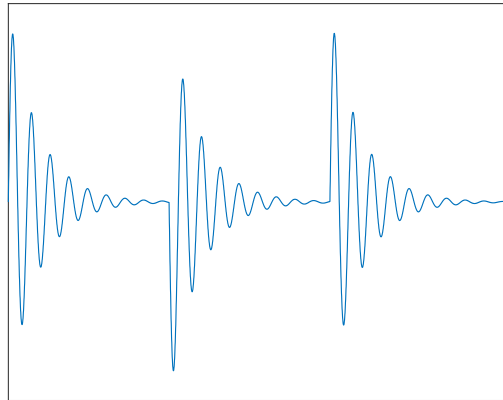
**Figura 8:** Comparación de los planos complejos  $s$  y  $z$ . [11]

### 2.7.1 Estado.

El estado de un sistema en el tiempo  $t_0$  es la cantidad de información en  $t_0$  que con el conocimiento de la entrada  $u[t_0, \infty)$  determina de manera única el comportamiento del sistema para todo  $t \geq t_0$  [5], [21].

Determinar el comportamiento del sistema se refiere a conocer todas las respuestas del sistema, inclusive el estado; si el sistema es una red eléctrica, se refiere a conocer el voltaje y la corriente de cada rama de la red. Entonces, a partir del estado en  $t_0$ , se puede calcular el estado para todo  $t \geq t_0$  [21]. Es decir, el estado en un tiempo particular  $t_1$  sintetiza la información esencial acerca de la entrada aplicada al sistema en el pasado; ese estado particular que llamaremos estado en tiempo inicial se necesita para poder determinar de manera única el comportamiento futuro del sistema [21].

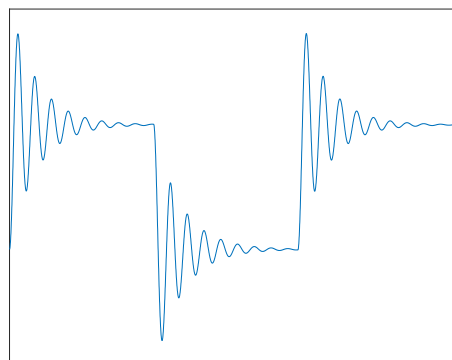
El estado de un sistema normalmente consiste de un número finito de variables [21]. Estas variables se les conoce como *variables de estado* [21], [24]. Cada una de ellas toma su valor del conjunto de los números reales. En la práctica, el estado es un elemento vector de un espacio vectorial real  $n$ -dimensional, i.e.  $(\mathbb{R}^n, \mathbb{R})$  [21]. Considere un circuito RLC conectado en serie como un caso particular de un sistema de segundo orden. Es posible obtener numérica o experimentalmente el comportamiento transitorio del sistema. Las Figura 9-Figura 11 muestran la respuesta de un sistema sub-amortiguado cuando se aplica una entrada periódica cuadrada.



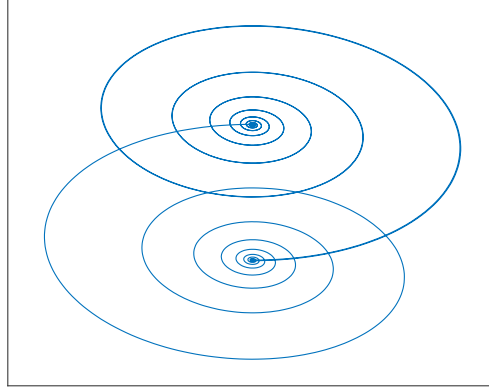
**Figura 9:** *Corriente-Tiempo.*

La Figura 11 ilustra el comportamiento transitorio del sistema cuando cada variable de estado se asocia a un eje. Es decir, la Figura 11 representa el comportamiento transitorio del vector de estado (variables dependientes en un sistema diferencial de orden dos) hacia los dos estados estacionarios (puntos de equilibrios) en el espacio vectorial real 2-dimensional, i.e.  $(\mathbb{R}^2, \mathbb{R})$ . La existencia de dos puntos de equilibrios en la Figura 11 es debido a los dos valores de voltaje contenidos en la entrada cuadrada.

En general, una ecuación de estado  $n$ -dimensional (ecuación diferencial ordinaria de orden  $n$ ) tiene una solución numérica para cada tiempo particular  $t_1$ . Esa solución numérica contiene  $n$  números reales que pueden ser ordenados en un vector que es un elemento de un espacio vectorial real  $n$ -dimensional. Dado que la variable más importante en este enfoque de modelado es la variable de estado entonces el espacio vectorial real  $n$ -dimensional se le llama *espacio de estado*.



**Figura 10:** *Voltaje contra tiempo.*



**Figura 11:** Corriente contra voltaje.

## 2.8 Ecuación dinámica.

El conjunto de ecuaciones que establecen de manera única la relación entre la entrada, la salida y el estado se le llama ecuación dinámica. En este trabajo, se utilizarán las ecuaciones dinámicas que tienen la siguiente estructura [5], [19], [20], [21],

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{h}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t) \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{g}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), t)\end{aligned}\tag{24}$$

o más explícitamente,

$$\begin{aligned}\dot{x}_1(t) &= h_1(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_p(t), t) \\ \dot{x}_2(t) &= h_2(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_p(t), t) \\ &\vdots \\ \dot{x}_n(t) &= h_n(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_p(t), t) \\ y_1(t) &= g_1(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_p(t), t) \\ y_2(t) &= g_2(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_p(t), t) \\ &\vdots \\ y_q(t) &= g_q(x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), u_1(t), u_2(t), \dots, u_p(t), t)\end{aligned}$$

donde  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$  es el estado,  $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_q]^T$  es la salida y  $\mathbf{u} = [u_1, u_2, \dots, u_p]^T$  es la entrada. La salida  $\mathbf{y}$ , la entrada  $\mathbf{u}$  y el estado  $\mathbf{x}$  son funciones vectoriales que asumen valores en el conjunto de los números reales y que dependen de  $t$  definidas en el intervalo  $(-\infty, \infty)$ . El espacio vectorial del vector de

estado en (24) es un espacio vectorial real  $n$ -dimensional; entonces el conjunto de ecuaciones (24) se le llama *ecuación dinámica  $n$ -dimensional* [21].

### 2.8.1.1 Teoría de control en espacio de estado frente a teoría de control clásico

La tendencia de control en espacio de estado contrasta con la teoría de control clásico en que su formulación es fácilmente aplicable a sistemas de múltiples-entradas, múltiples-salidas, que pueden ser lineales o no lineales, invariantes en el tiempo o variantes en el tiempo, mientras que la teoría de control clásico se aplica principalmente a sistemas de una entrada-una salida, invariantes en el tiempo [21]. Además, la teoría de control en espacio de estado es esencialmente una aproximación en el dominio temporal, mientras que la teoría de control clásico es una aproximación en el dominio de la frecuencia compleja [18], [19], [20]. Antes de continuar, se debe definir estado, variables de estado y espacio de estado.

### 2.8.1.2 Estado

El estado de un sistema dinámico es el conjunto de variables más pequeño (llamadas variables de estado), de forma que el conocimiento de estas variables en  $t = t_0$ , junto con el conocimiento de la entrada para  $t \geq t_0$ , determinan completamente el comportamiento del sistema en cualquier  $t \geq t_0$  [21]. Obsérvese que el concepto de estado no está limitado a sistemas físicos. Es aplicable a sistemas biológicos, sistemas económicos, sistemas sociales y otros.

### 2.8.1.3 Variables de estado.

Las variables de un sistema dinámico son las variables que constituyen el menor conjunto de variables que determinan el estado del sistema dinámico [21]. Si al menos se necesitan  $n$  variables  $x_1, x_2, \dots, x_n$  para describir completamente el comportamiento de un sistema dinámico (de forma que una vez que la entrada para  $t \geq t_0$  está dada y el estado inicial en  $t = t_0$  está especificado, el estado futuro del sistema está determinado completamente), entonces tales  $n$  variables son un conjunto de variables de estado [21].

Obsérvese que las variables de estado no necesitan ser físicamente medibles o cantidades observables. Se pueden seleccionar como variables de estado variables que no representan cantidades físicas y aquellas que no son medibles ni observables [21]. Tal libertad en la elección de las variables de estado es una ventaja de los métodos en el espacio de estado. Sin

embargo, prácticamente es conveniente seleccionar para las variables de estado cantidades físicamente medibles, si esto es posible, porque las leyes de control óptimo requerirán realimentar todas las variables de estado con una ponderación adecuada.

#### **2.8.1.4 Vector de estado**

Si se necesitan  $n$  variables de estado para describir completamente el comportamiento de un sistema dado, entonces esas  $n$  variables de estado se pueden considerar como las  $n$  componentes de un vector  $x$  [19], [21], [26]. Este vector se denomina vector de estado. Un vector de estado es, por lo tanto, un vector que determina unívocamente el estado del sistema  $x(t)$  en cualquier instante del tiempo  $t \geq t_0$ , una vez que se conoce el estado en  $t = t_0$  y se especifica la entrada  $u(t)$  para  $t \geq t_0$  [21].

#### **2.8.1.5 Espacio de estado.**

El espacio  $n$ -dimensional cuyos ejes de coordenadas están formados por el eje  $x_1$ , eje  $x_2$ , ..., eje  $x_n$ , donde  $x_1, x_2, \dots, x_n$  son las variables de estado, se denomina espacio de estado [21]. Cualquier estado se puede representar como un punto en el espacio de estado.

#### **2.8.1.6 Ecuaciones en el espacio de estado.**

En el análisis en el espacio de estado se centra la atención en los tres tipos de variables que aparecen en el modelado de los sistemas dinámicos; las variables de entrada, las variables de salida y las variables de estado, la representación en el espacio de estado de un sistema dado no es única, salvo que el número de variables de estado es el mismo para cualquiera que sea la representación en variables de estado de un mismo sistema [21]. El sistema dinámico debe contener elementos que recuerden los valores de la entrada para  $t \geq t_1$ . Puesto que los integradores en un sistema de control en tiempo continuo sirven como dispositivo de memoria, las salidas de tales integradores se pueden considerar como las variables que describen el estado interno del sistema dinámico. Así las salidas de los integradores sirven como variables de estado. El número de variables de estado para definir completamente la dinámica del sistema es igual al número de integradores que aparezcan en el mismo. Sea un sistema de múltiples entradas-múltiples salidas con  $n$  integradores. Supóngase también que hay  $r$  entradas  $u_1(t)$ ,  $u_2(t)$ , ...,  $u_r(t)$  y  $m$  salidas  $y_1(t)$ ,  $y_2(t)$ , ...,  $y_m(t)$ . Se definen las  $n$  salidas de los integradores como variables de estado:  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$ , ...,  $x_n(t)$ .

---

## 3 Metodología

### 3.1 Introducción

Para la implementación de este prototipo, ha sido necesario llevar a cabo varios diseños teóricos de circuitería electrónica, eléctrica y dimensionamiento físico, pasando por diferentes pruebas con elementos y componentes, revisando y comprobando su eficiencia y eficacia en cada una de las funcionalidades especificadas en sus hojas técnica, para implementar el prototipo por etapas y bloques, hasta llegar a su total funcionalidad, una de las tareas más importantes ha sido la lectura de las hojas técnicas de cada componente o bloque electrónico, posteriormente su adquisición, y eventualmente la experimentación que nos ilustra el fabricante en las hojas técnicas, la cual ha llevado tiempo no contabilizado ni registrado, por ser en su mayoría productos de importación y que han estado sufriendo retrasos de todo tipo, como un efecto remanente de la pandemia del COVID-19, específicamente en el país de manufactura de origen de la gran mayoría de los componentes, China, dicho tiempo se ha ido compensando a la llegada de los componentes, realizando la implementación de los diferentes circuitos de prueba para verificar su correcto funcionamiento.



Algunas herramientas digitales complementarias, software, se han instalado, aprendiendo y utilizando, dichas herramientas que nos son tema del trabajo de investigación aquí descrito; sin embargo, es conveniente resaltarlo, como refuerzo del trabajo realizado ya que demandan tiempo y dedicación, estas herramientas han sido la actualización de la licencia de SolidWorks, instalación de software para programación del ESP32, instalación del editor NEXTION, la selección de materiales, la elaboración de los dibujos del chasis y las partes del mismo, para posteriormente pasarlas a corte por una maquina CNC que requirió de igual forma, mantenimiento de software y de hardware, así como el suministro de herramientas de corte y materiales para construir el chasis, previo a este proceso, fue necesario contar con todos los elementos y su formas y dimensiones físicas, así como las piezas de sujeción y tornillería, la adecuación de las mismas para cumplimiento de la función requerida.

Cabe hacer mención que este trabajo ha contado con la valiosa participación de diferentes profesionistas y estudiantes, que han contribuido con sus diferentes habilidades y capacidades, así como un sinfín de herramientas manuales, eléctricas y algunas de estas, muy especializadas.

Con los elementos adquiridos ya a la mano, se ha procedido al armado en placas de experimentación electrónica, denominadas protoboard, para corroborar pruebas de funcionamiento de cada componente, así como el acoplamiento, etapa por etapa, para verificar el correcto funcionamiento, la caracterización de funcionalidad de cada componente y por etapas parciales, hasta caracterizar la etapa analógica completa, de igual forma la etapa digital, su acoplamiento y caracterización, para su posterior acoplamiento, digital y analógica, donde se prueba nuevamente funcionalidad, para eventualmente proceder a la caracterización y entonces proceder al dibujo del diagrama electrónico que se plasma en una tarjeta electrónica de baquelita, con el trazado de las correspondientes pistas, siendo este el último elemento para definir dimensiones y formas del chasis.

Teniendo instalados todos los componentes en la tarjeta electrónica, así como todas las etapas en el chasis, se procede a probar por etapas y posteriormente el prototipo completo, para nuevamente caracterizar el circuito electrónico, obtener las gráficas discretas de respuesta en lazo abierto de todo el sistema, para proceder a definir, según el tipo de respuestas, el modelo

dinámico del sistema con sus diferentes entradas y salidas, para proceder al cálculo del controlador mediante la ayuda de simulaciones de MATLAB.

Para tal efecto, se describe brevemente cada componente o bloque que se encuentran incluidos en este proyecto.

### **3.2 La cámara de aislamiento luminoso o cámara oscura.**

La cámara de aislamiento luminoso o también definida como cámara oscura, consta de una pieza tubular de una longitud aproximada de 35 cm , con un diámetro de 11 cm aproximadamente, de un material termoplástico de policloruro de vinilo (PVC), es el cuerpo tubular dispuesto para aislar por completo la iluminación externa del medio ambiente, hacia el ambiente interior, que funciona como una cámara que en su interior se emite un haz luminoso constante, controlado en su intensidad (iluminancia) y longitud de onda (TCC), y que a su vez es captada por dos sensores respectivamente, ubicados en la tapa contraria a la fuente luminosa, sirviendo como elementos primarios para la retroalimentación de la iluminancia y la longitud de onda en el interior de la cámara oscura, hacia el sistema controlador digital.

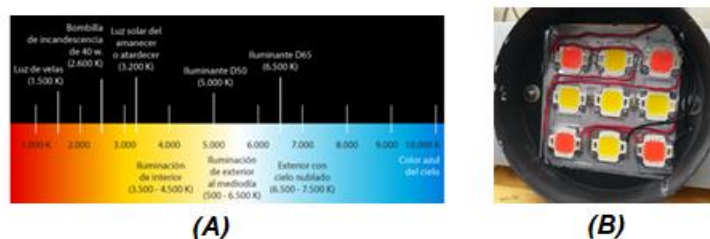
La cámara es pintada en su interior de un color negro mate, con la intención de evitar cualquier rebote del haz de luz emitido por la fuente luminosa en el interior y que podría ocasionar errores en la medición, por parte de los sensores RGB y de iluminancia, en su parte exterior, la cámara se encuentra de la misma forma pintada y forrada para evitar y disminuir las características traslucidas del PVC utilizado como base, asegurando el total aislamiento de la luz exterior hacia el interior de la cámara, por el lado contrario el conjunto de sensores RGB y de iluminancia, así como la ventana circular correspondiente al diámetro del sensor de cada luxómetro que será sometido a las diferentes pruebas metrológicas, tal cual se observa en la Figura 12.



**Figura 12:** Cámara de aislamiento luminoso.

### 3.3 La fuente luminosa de potencia.

La fuente luminosa en el interior de la cámara oscura, se encuentra conformada por tecnología LED de potencia media (5 W), en diferentes arreglos serie y paralelo, formando una matriz, destacándose dos tipos de fuente luminosa, una de color ámbar a 3,200 K aproximadamente y una segunda de color rojo a 1,400 K aproximadamente, que por medio de un circuito analógico de potencia se les excita con corriente constante, organizadas físicamente en una matriz de  $3 \times 3$ , 5 color ámbar y 4 color rojo, 45 W en total, excitándose mediante una fuente de corriente, controlada por voltaje para cada color independiente, para conformar una sumatoria de las dos longitudes de onda emitidas dentro de la cámara oscura, propiciando una longitud de onda promedio, buscando que mediante la manipulación de sus respectivas excitaciones, nos proporcione los 2,856 K deseados y definidos por el iluminante A como una referencia luminosa.



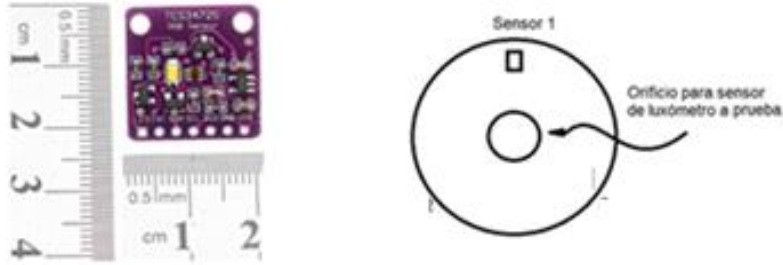
**Figura 13:** Fuente luminosa en el interior de la cámara de iluminancia. (A) gráfico de la longitud de onda deseada y (B) Matriz de leds en el interior de la cámara oscura.

Éste parámetro es importante para una medición de la iluminancia en los luxómetros a calibrar, según la NOM-025-STPS-2008, la primera consiste en la excitación de las dos

fuentes luminosas, para entregar la cantidad suficiente de lux, sobre los sensores, que de igual forma, la iluminancia mezclada de las dos fuentes luminosas, será descompuesta en sus componentes RGB, para de igual forma tomar lectura de la temperatura correlacionada del color (TCC), que mediante el control de la corriente en la excitación de cada arreglo de leds, se controla la potencia de emisión, denominada como iluminancia, mientras que el porcentaje que conforman como un promedio de longitudes de onda de ambas fuentes, se determina la temperatura correlacionada del color.

### **3.4 Sensor de luz RGB TCS34725**

Con la intención de poder leer la presencia del haz luminoso, dentro de la cámara de aislamiento luminoso, es instalado un sensor de luz RGB, por la parte interior de la tapa ubicada en la boca contraria a donde se ubica la fuente luminosa, apoyados en el uso de las nuevas tecnologías en cuanto a sensores del tipo inteligente, en este caso el TCS34725, que comercialmente es presentado como una tarjeta electrónica donde se integran el sensor a partir de fotodiodos por color, rojo (Red), verde (Green), azul (Blue) y blanco (Clear), un sistema de adquisición de datos que convierte las señales analógicas, en digitales con muy alta resolución, 16 bits, además con la particularidad de ser administrado por un sistema microcontrolado que a su vez acopla y compensa las mediciones, para eventualmente transferir datos por un puerto I2C, ya digitalizados, compensados y procesados, contando con cuatro registros dedicados a almacenar los valores adquiridos y listos para la transmisión, con la intención de proporcionar certeza en la adquisición de las mediciones de color, así como asegurar una correcta medición, que debido a los tiempos de procesamiento y establecimiento de los circuitos sensores, se realiza una secuencia de mediciones, se logra una lectura muy estable y con el mínimo error en la medición, lo que le dará certidumbre al equipo, el sensor físicamente, así como su distribución en la tapa de la cámara de aislamiento de luz, se muestra en la Figura 14.



**Figura 14:** Aspecto y dimensiones del sensor RGB y la colocación en la tapa de medición.

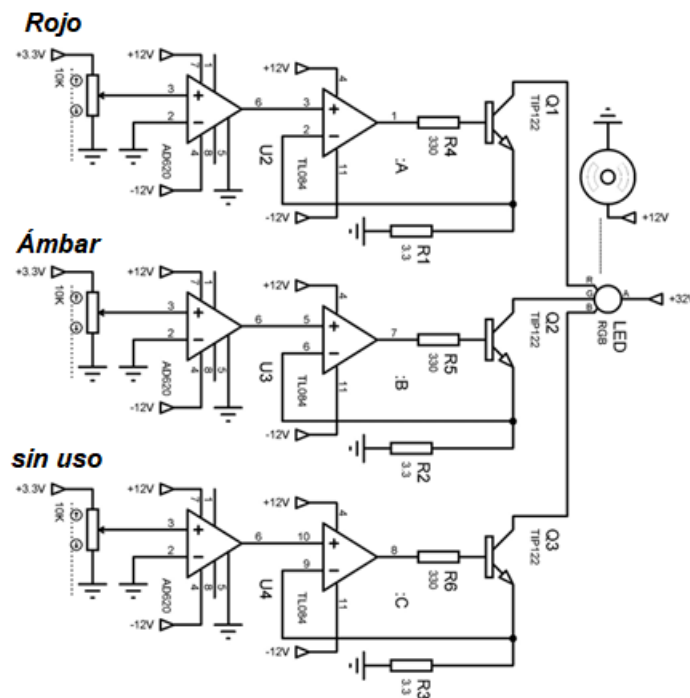
### 3.5 Etapa analógica de potencia.

Consta de dos fuentes de corriente constante, a base de transistores de potencia y amplificador operacional, configurado como un seguidor de tensión, que al excitar la base de un BJT Darlington y con la ayuda de una resistencia de alambre de potencia, mantiene una corriente constante a partir de una señal de tensión controlada desde cero hasta 5 V, una para cada color de la fuente luminosa (ámbar y rojo), con la intención de proporcionar una intensidad luminosa constante y ajustable, pues las fuentes de corriente constante son manipuladas por tensión de corriente directa, lo que permite de alguna forma cierta inmunidad ante variaciones de la fuente de poder, así como de ruidos eléctricos que pudieran suceder durante la operación en conjunto de todos los componentes, en la Figura 15 se ilustra el diagrama de excitación por fuente de corriente constante de las fuentes luminosas.

Para este primer circuito, se observa que el potencial constante, es proporcionado por un convertidor digital a analógico, que con la ayuda de un amplificador de instrumentación AD620, se acopla a la entrada del amplificador operacional TL084, que funciona como un buffer, que excita la base del transistor TIP122, que por la caída de tensión en su emisor, con la ayuda del resistor de alambre de potencia, se define el flujo de corriente constante a través de cada uno de las fuentes luminosas, ámbar y roja respectivamente.

En la práctica, se ha determinado que la mínima tensión de la fuente de alimentación de potencia, son necesarios 48 V, para poder hacer fluir por cada fuente de color, una corriente máxima de 850 mA, teniendo la capacidad en el diseño para que fluyan 2 A máximo, cabe hacer mención que debido a esos valores de corriente y tensión, los componentes de potencia

como el BJT, la resistencia de alambre y la matriz de leds, experimentan un incremento de temperatura según la corriente demandada en cada prueba, y que para disminuir el efecto de tal temperatura en los dispositivos semiconductores, se ha optado por acoplar disipadores de calor, consistente en bloques de aluminio suave, con formación de aletas que hacen eficiente la disipación de calor, mientras que la resistencia de alambre, se ha calculado para soportar la potencia máxima de trabajo, sin que sufra daño parcial o total en sus características eléctricas.



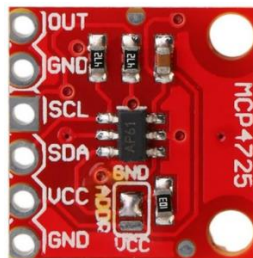
**Figura 15:** Diagrama eléctrico de la etapa de potencia para excitación individual del led RGB de forma manual.

Se observa en el esquema los tres transistores TIP122, transistores darlington de potencia, ubicados dentro del lazo de retroalimentación negativa de buffer, en este esquema aun no aparece la etapa digital, ya que este diagrama corresponde solo a la etapa analógica con la que se logró estabilizar dicha corriente constante, sin problemas de efecto de carga, ni problemas de manejo de potencia, la señal de entrada es proporcionada digitalmente por

medio de dos convertidores de señal digital a analógica, correspondientes uno por cada color y que funcionan independientes.

### 3.6 Convertidor de señal digital a señal analógica.

La conversión de señal digital a señal analógica, es la interacción del sistema microprocesado digital hacia la etapa analógica de potencia, la señal que gobierna la etapa analógica, es determinada por el microprocesador a muy baja potencia, dependiendo de las exigencias del algoritmo de control, consta de dos convertidores de señales digital a analógico, que funcionan de forma independiente, correspondientes uno por cada color o fuente luminosa, lo que nos permite manipular desde una señal digital, el flujo de corriente constante y que requiere ser ajustado con precisión, por tal situación se seleccionó el circuito integrado MCP4725, que es un convertidor digital a análogo, que funciona con 5 V y podemos tener una resolución de 12 bits, con una comunicación I2C a una velocidad de conversión de seis micro segundos, por su interface I2C, permite la manipulación de forma multiplexada, pues posee un búfer de guardado de último dato para no perder el valor deseado en lo que se instruye a un segundo dispositivo mediante esta misma interface, el circuito integrado, montado en una tarjeta comercial que permite su integración de forma sencilla, se muestra en la Figura 16.



**Figura 16:** *Convertidor digital a analógico de un solo canal, en presentación de montaje de fácil integración.*

### 3.7 Pantalla touch NEXTION.

Es una pantalla táctil de 5 in, capaz de fungir como una interface hombre máquina (HMI), que le permite interactuar mediante visualización y control de las variables y parámetros del

proceso o proyecto, a partir de una interacción con pantalla táctil del tipo resistivo (TFT), consta complementariamente de un editor NEXTION exclusivo para su configuración y programación visual, la que permite visualizar imágenes en un desarrollo de software orientado a objetos, permitiendo su programación de forma eficiente y cuasi automática, pudiendo proporcionar a todo tipo de proyectos, las características de visualización del internet de todas las cosas (IOT), posee una memoria flash de almacenamiento de programa de 16 Mb, una memoria RAM de 3,584 bytes, con la posibilidad de reproducir 65,536 colores, con una resolución de  $480 \times 272$  pixeles, diseñada para un uso continuo de 30,000 horas efectivas, soporta una tarjeta microSD de 32 Gb en formato FAT32, donde se alberga el firmware de NEXTION/diseño HMI, su alimentación de tensión es de 5 V, compatible con familia TTL, la vía de comunicación es serial, típicamente a 9,600 bps, esta pantalla se muestra en la Figura 17.



**Figura 17:** *Pantalla táctil TFT marca NEXTION y sus accesorios para programación vía puerto serie.*

### **3.8 Microcontrolador ESP32.**

El microcontrolador ESP32 NodeMCU-32 se encuentra integrado en una placa de desarrollo, donde podemos encontrar conexiones inalámbricas como WiFi y Bluetooth, su unidad de procesamiento es de 32 bits de doble núcleo de hasta 240 MHz, con posibilidad de trabajar de forma independiente, otorgando grandes capacidades para su utilización en desarrollo de proyectos con internet de todas las cosas (IOT), el entorno de programación es compatible



con el compilador de arduino, mediante la instalación de algunas librerías, siendo posible programarle vía USB, incluyendo internamente gran cantidad de periféricos para conexión con sensores táctiles capacitivos, sensores de efecto hall, interfaz de tarjeta SD, ethernet, SPI de alta velocidad, UART, I2S e I2C, puede ser alimentado directamente con 3 V o con 5 V vía el regulador dentro de la misma tarjeta de desarrollo, así como la disposición de los pines entrada/salida de 3 V (GPIO), esta tarjeta de desarrollo pone a disposición todas sus 38 terminales en espaciado estándar para poder acoplar en tablillas de experimentos (proto-board), se puede observar la Figura 18, el aspecto físico de esta tarjeta de desarrollo.



**Figura 18:** Tarjeta de desarrollo ESP32 NodeMCU32S.

### **3.9 Fuente de poder múltiples salidas.**

La fuente de poder TrueBasix, modelo TB-05003 500W/ATX, consta de una fuente conmutada de 500 W, con salidas de tensión de +12 V, -12 V, 5 V y 3.3 V, empaquetada en un chasis estándar ATX, refrigerada por ventilación, recibe alimentación configurable de 125 Vca o 220 Vca a 60 Hz, con disposición de múltiples cables de salida para cada tensión, se aprovecha la inclusión de un switch de encendido/apagado, así como la conexión para extensión polarizada, se muestra su aspecto físico en la Figura 19.



**Figura 19:** Fuente de poder conmutada múltiples salidas de tensión TB-05003 500W/ATX.

### **3.10 Fuente conmutada elevadora (boost).**

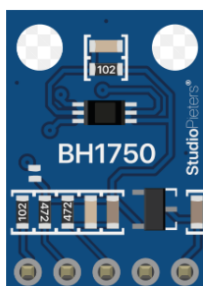
Consiste en un convertidor estático de potencia del tipo elevador (boost), capaz de suministrar una potencia de salida de 600 W, con una eficiencia del 85%, puede recibir una tensión de entrada desde 10 Vcd a 60 Vcd y podrá entregar a la salida una tensión regulada desde 12 Vcd hasta 80 Vcd, permitiendo una corriente máxima de 10 A, posee un disipador de calor perfectamente acoplado y según especificaciones de fabricante, no requiere ventilación, más sin embargo para asegurar el correcto funcionamiento en este proyecto, se coloca en el flujo de aire en el interior del chasis, posee una protección de sobre corriente por fusible rápido de 15 A, pudiendo ajustar la tensión y corriente máxima de salida, con la ayuda de un par de potenciómetros multivoltajes verticales, instalados en la misma placa electrónica del convertidor, es utilizado básicamente para elevar la tensión de 12 Vcd de la fuente principal y entregar una tensión de 48 Vcd para suministrar la tensión suficiente en la fuente de corriente constante que excita el conjunto de leds de potencia de la fuente luminosa interna, los cuales demandan como máximo una corriente de 1.2 A, la Figura 20, ilustra el aspecto físico del elevador de tensión conmutado.



**Figura 20:** Fuente de poder conmutada boost de 600 W.

### 3.11 Sensor de Intensidad luminosa BH1750.

Este circuito integrado, es un dispositivo semiconductor capaz de leer una intensidad luminosa de forma analógica y convertirla en un dato digital de 16 bits, con un bus de comunicación serial I2C, con amplio rango desde 1 lx, hasta 65,535 lx, con una respuesta espectral muy aproximada a la respuesta espectral del ojo humano, consume muy baja potencia durante su funcionamiento, alto rechazo al ruido debido a las frecuencias de línea, integrado en una tarjeta electrónica de tamaño compacto, sin necesidad de incluir componentes extras para su funcionamiento, por lo que está catalogado entre los sensores del tipo Smart, por lo que puede ser directamente manipulado desde un microprocesador, mediante una dirección electrónica definida por el fabricante.



**Figura 21:** Sensor de intensidad luminosa.

---

## 4 Análisis y Resultados

### 4.1 Diagrama a bloques del proyecto.

Consta de siete bloques principalmente, los cuales hacen posible el funcionamiento, conectados entre estos, proporcionando una funcionalidad, según las funciones definidas, como primer punto, se encuentra la cámara oscura, que su función principal es evitar el acceso de la luz del medio ambiente, evitando afectación sobre la iluminancia controlada en su interior, dos tapas, una posterior, que soporta los actuadores, en este caso una matriz de leds, que requieren una placa disipadora de calor y ventilación, para su correcto funcionamiento, mientras que en la tapa frontal, donde se albergan los sensores, el de iluminancia y el de longitud de onda, soportados en una tapa traslúcida de policarbonato, para no interferir en la salida del orificio de calibración de luxómetros, en el caso del booster, como un elevador de tensión de corriente directa, para mantener una tensión suficiente y constante a la circuitería de potencia que excita la matriz de leds, la fuente de alimentación, que recibe el suministro desde un tomacorriente de 120 Vca a 60 Hz, para entregar los diferentes niveles y polaridades de tensión de corriente directa, que permiten el funcionamiento de todos los componentes y etapas del proyecto, la pantalla táctil, que nos permite manipular el control del proyecto, seleccionando los valores deseados para calibración, así como el monitoreo de las variables de forma visual para facilidad del usuario,

de igual forma, la tarjeta electrónica que es el cerebro del equipo, ya que es desde donde se manipula los actuadores y se hace lectura de los sensores, para así, tomar una decisión, basado en los valores capturados previamente, con ayuda de un controlador digital, el detalle se puede observar en la Figura 22.

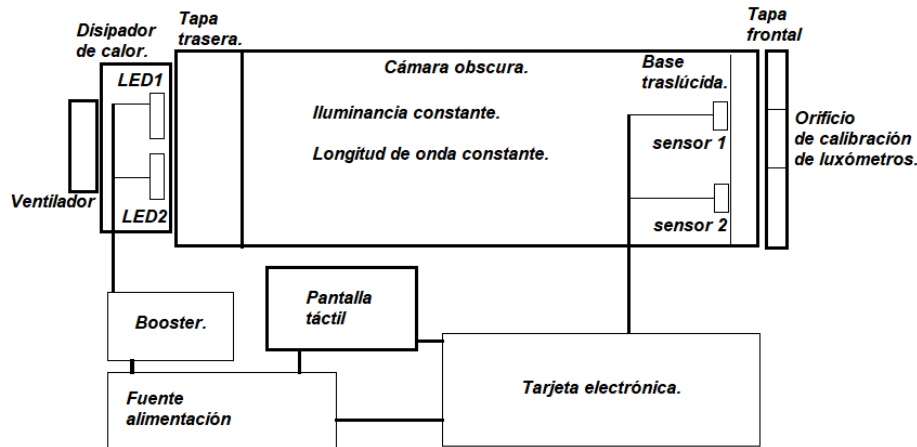


Figura 22: Esquema en bloques del proyecto.

## 4.2 Diagrama electrónico

Con respecto al diagrama electrónico, ilustrado en la Figura 23, después de haber comprobado la funcionalidad, ahora se realizó el montaje en la tarjeta impresa, siendo un segundo diseño por ajustes en las dimensiones, distribución de componentes y la inserción de nuevos componentes, siendo este el ultimo diseño, donde se ha probado un mejor desempeño de la funcionalidad, y ahora se ha caracterizado el circuito completo y acoplado, totalmente instalado y probado, para lograr las respuestas del sistema completo en lazo abierto, asumiendo mayor confiabilidad por disminuir los posibles falsos contactos y malos acoplamientos de conductores.

De igual forma, la instalación de bases para circuito impreso, la placa disipadora para los transistores de potencia y la sujeción en el interior del chasis definitivo, quedando instalados algunos puntos de prueba y medición, para seguir en el proceso de mejora continua en el proyecto en general, en una segunda etapa para su crecimiento, incrementando mediante software sus funciones y capacidades metrológicas.

Este circuito se ha diseñado en Eagle, para enviar los archivos a una empresa de origen chino, donde se ha manufacturado con altos estándares de calidad, la cual fue probada durante el montaje, pues las donas de soldadura mostraron su adhesión al estaño y resistencia a la temperatura. Cabe hacer mención de los tiempos de manufactura, de al menos 10 días hábiles, expresando que esa espera ha valido la pena.

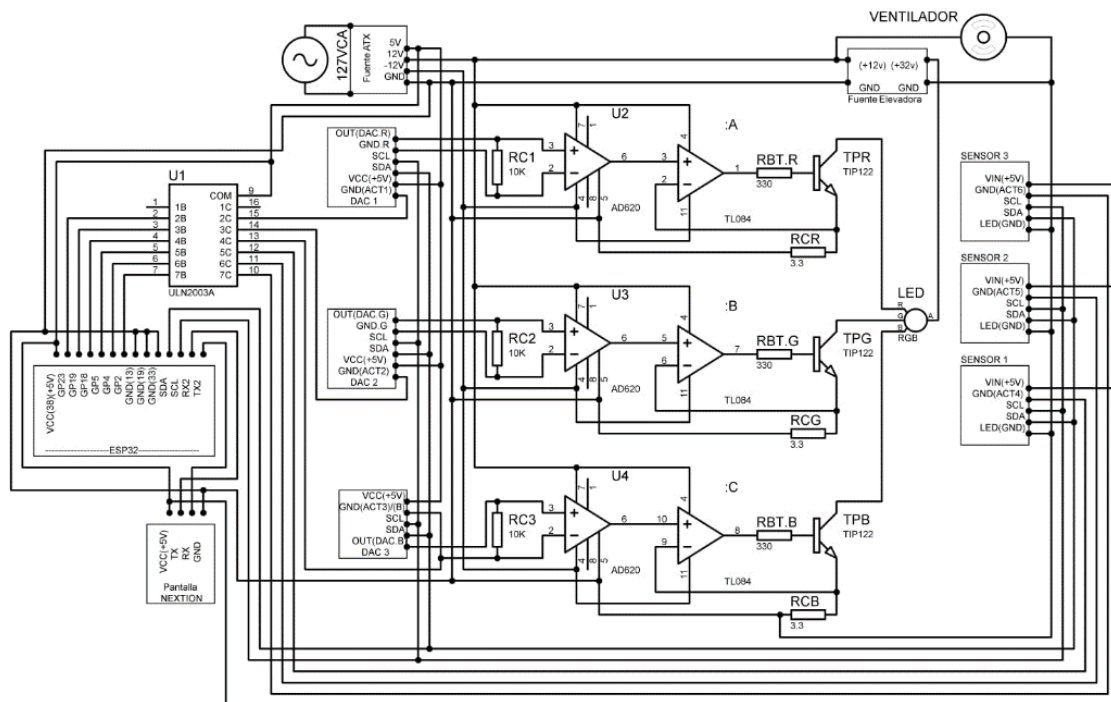
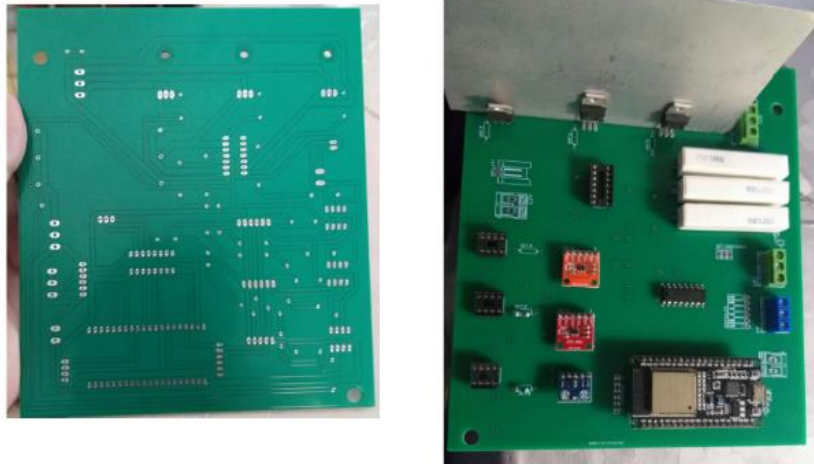


Figura 23: Esquema electrónico completo.

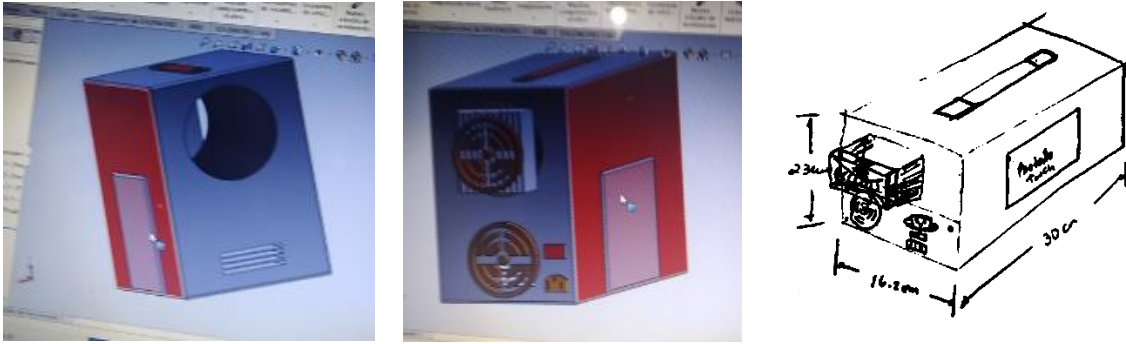


**Figura 24:** *Aspecto de la placa de circuito impreso.*

### **4.3 Aspecto físico del prototipo**

Se ha diseñado un chasis a base de policarbonato de 6 mm de espesor, aprovechando su resistencia mecánica, así como las características que presenta para trabajarlo, haciendo cortes con herramientas convencionales o someterlo a cortes muy precisos con maquina CNC, así como su característica termo moldeable muy resistente y de aspecto presentable. Las dimensiones aproximadas son de 31 cm de longitud, un ancho de 22 cm y una altura de 24 cm, realizada en tres secciones con maquinados y cortes para instalación de demás componentes.

Se puede observar en la Figura 25, que, a partir de un esquema a mano alzada, con dimensiones aproximadas, debido a no tener a la mano las dimensiones de todos los componentes, se propone un chasis, que posteriormente se dibuja en SolidWorks, para eventualmente llevarlo a cortar a la maquina CNC, conociendo al menos los componentes más significativos en dimensiones y que ayudaran a fortalecer toda la estructura.



**Figura 25:** *Aspecto del chasis a partir de un dibujo a mano alzada.*

En un siguiente paso, ya armada la estructura principal, se instaló el tubo que funciona como cámara oscura o cámara de aislamiento de la luz del medio ambiente, pintada tanto en el interior, como en el exterior, por una pintura acrílica de color negro mate, para evitar en lo posibles reflexiones que pudieran ocasionar ruido en las mediciones, observándose un tubo sin las tapas de sus extremos, las cuales llevan algunas adecuaciones especiales para albergar a otros componentes, en la Figura 26, se observa una vista posterior del chasis, permitiendo el paso de luz desde un extremo hasta el otro, por no tener colocadas las tapas.

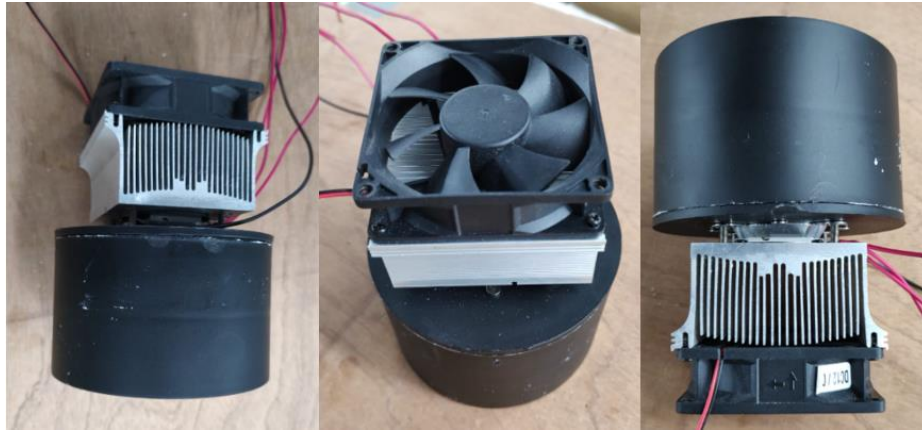


**Figura 26:** *Instalación de la cámara oscura o cámara aislante de luz del medio ambiente.*

Una primera etapa, sobre su tapa posterior, que alberga la instalación de la matriz de leds de potencia, encargados de emitir un haz de color ámbar y un segundo haz de color rojo, para generar una sumatoria de sus longitudes de onda dentro de la cámara oscura, sobre un disipador de calor, a base de aluminio suave, acondicionado para acoplarse perfectamente



por un lado, con el led de potencia y sus complementos, mientras que a la espalda de este mismo disipador, se instala un ventilador, de la misma forma acondicionado para que mediante tornillería sea sujetado a la tapa, una ilustración gráfica de esta instalación, se puede observar en la Figura 27.



**Figura 27:** *Instalación la matriz de leds de potencia y sus complementos en una de las tapas de la cámara aislante de la luz exterior.*

En el interior de esta misma tapa, se puede observar la matriz de leds de potencia, acondicionado para una distribución geométrica y la sujeción por un arreglo de tornillería perfectamente ajustado, este detalle se observa en la Figura 28.



**Figura 28:** *Instalación la matriz de leds de potencia visto desde el frente de la tapa, lo que será la fuente emisora de luz dentro de la cámara oscura.*

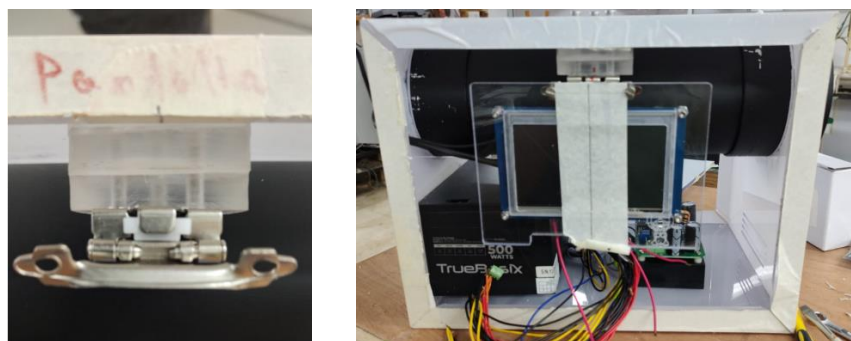
Una vista lateral del chasis, nos permite observar el tubo negro que atraviesa el chasis de lado a lado, así como la fuente de múltiples salidas de tensión, ya sujetas a la estructura principal, ambas piezas con tornillería para evitar su desacomodo durante el montaje del resto de componentes, en esta misma vista lateral, es posible observar la bisagra que sirve de soporte

con movimiento, para la pantalla touch NEXTION de 5 in, los detalles se observan en la Figura 29.



**Figura 29:** *Instalación del tubo que funge como cámara aislante de la luz del medio ambiente, la fuente de alimentación principal y la bisagra de la pantalla touch.*

Para la instalación de la pantalla en su bisagra, se sujeta una base, atornillada desde la estructura principal en la parte superior, proporcionando una sujeción y soporte robusta para soportar el movimiento abatible de la pantalla durante la operación del proyecto, ya que esta pantalla puede ser extraída a un ángulo aproximado de 45 grados, para permitir una operación ergonómica del teclado e imágenes de la interface gráfica HMI, que al finalizar la operación, puede ser resguardada en un receptáculo de esta misma tapa lateral, para evitar daños durante el traslado del prototipo, ya que esta característica de portabilidad es la mas importante, para una ilustración a detalle, se puede observar la Figura 30.



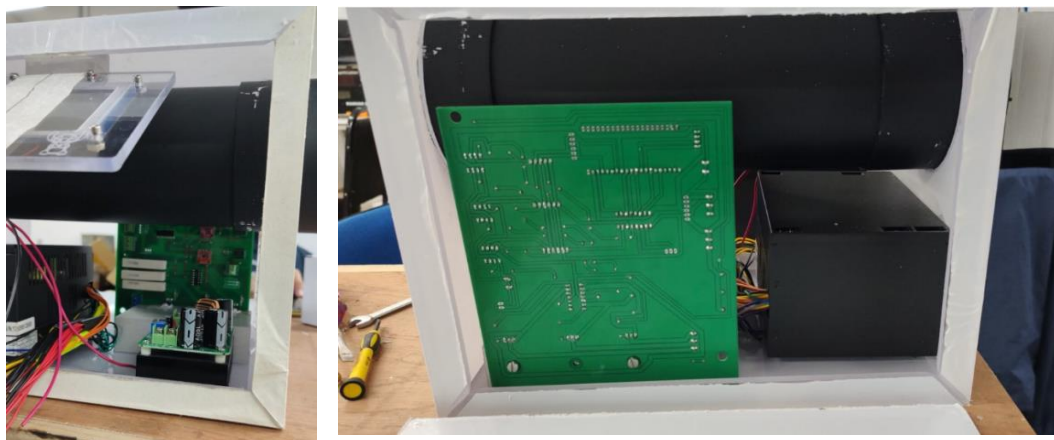
**Figura 30:** *Instalación de la pantalla touch en la bisagra, para formar parte de una de las tapas laterales del chasis.*



**Figura 31:** *Instalación de la base soporte de los sensores RGB y de intensidad luminosa, dentro de la cámara de aislamiento de luz del medio ambiente.*

La otra tapa del tubo que funge como cámara aislante de la luz del medio ambiente, posee una base traslúcida que soporta los sensores de luz RGB y de intensidad luminosa, que serán los responsables del monitoreo de la luz emitida por la matriz de leds y que proporcionan la señal de retroalimentación al circuito microprocesado, esta misma tapa, lleva una base que recibe mediante un encastre suave, el sensor del luxómetro que se pretende poner a prueba

La instalación de componentes electrónicos se hace de forma adecuada para que el flujo de aire desde el exterior del chasis, el flujo en el interior y la extracción adecuada de aire caliente, permite mantener los dispositivos a temperaturas adecuadas y que no afecten en su operación para evitar desviaciones en el funcionamiento de prototipo en su totalidad, pudiendo observar esta distribución en la Figura 32.



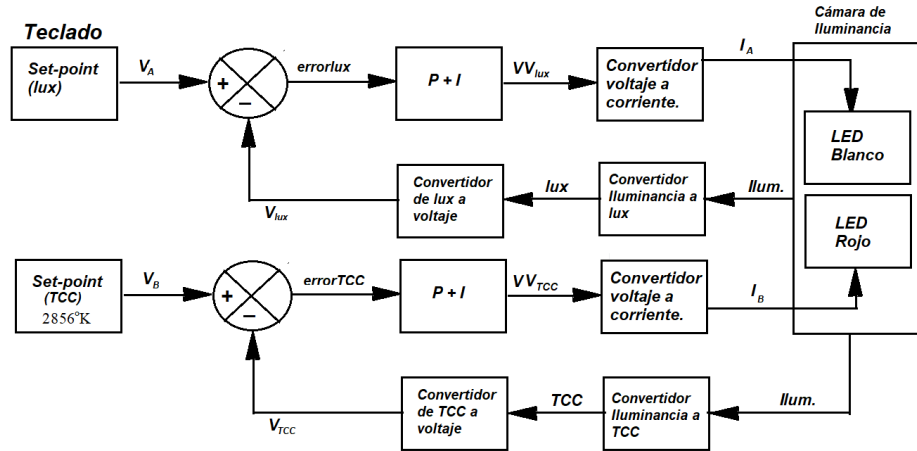
**Figura 32:** *Instalación de la tarjeta electrónica, fijación del módulo boost y de los disipadores de calor en el chasis.*

Independientemente de todo lo tangible y que se encuentra a la vista en este proyecto, no se refleja una gran cantidad de trabajo y tiempo invertido en el software, donde se encuentran diseñadas y probadas la gran mayoría de subrutinas que han servido de prueba y de operación parcial, se han ido perfeccionando con el pasar del tiempo y con los diferentes resultados que arrojan las pruebas, siendo estas más de 600 líneas de programación sin contar sus modificaciones.

#### **4.4 Diagrama a bloques del sistema de control en lazo cerrado.**

El esquema utilizado como base del diseño del controlador digital, consta de dos lazos de control, que sus efectos finales interactúan físicamente dentro de la cámara oscura, proponiéndose ambos controladores independientes uno del otro, pero si funcionando como perturbación, la salida controlada de uno hacia el otro, el esquema se muestra en la Figura 33.

Puede destacarse que del lazo de control que gobierna al led que emite haz de color blanco, se retroalimenta del sensor de iluminancia dentro de la cámara, para esta información, ser comparada contra el setpoint colocado en el controlador, vía la pantalla touch, este controlador posee como estrategia de control una acción proporcional integral, por otro lado, el segundo lazo de control, en el que se gobierna el funcionamiento del led que emite el haz de color rojo, este se recoge la señal de retroalimentación, mediante un sensor de color RGB, que descompone la longitud de onda total emitida dentro de la cámara oscura, para posteriormente interpretarla como un valor de temperatura correlacionada del color (TCC), lo que nos permite interpretar de forma cuantitativa una longitud de onda, relacionada directamente con el iluminante A de la CIE, que de igual forma, mediante un setpoint fijo, definido por los 2,856 K , su estrategia de control es mediante un proporcional integral.



**Figura 33:** Esquema de los dos controladores del proyecto.

$$TCC(2,856 K) = 0.5 (A1 \cdot (3,200 K) \text{ lux} - A2(1400 K))$$

$$I(\text{intensidad}) = A1 \cdot \text{lux} + A2 \cdot \text{lux}$$

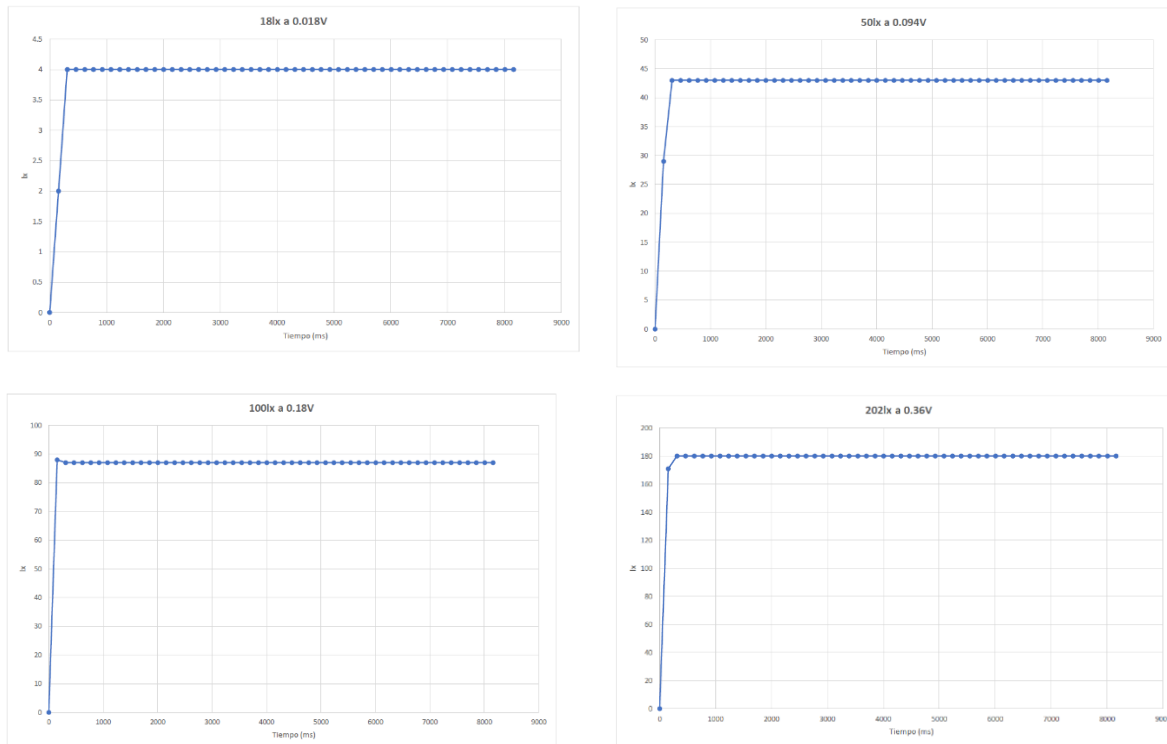
Para el correcto diseño del controlador, se lleva a cabo una identificación dinámica del sistema, aplicando una secuencia experimental de excitación de entrada en cada uno de los sistemas, considerando el otro constante, para la obtención de respuesta en lazo abierto, considerando necesario realizar un número considerable de experimentos, lo que nos proporciona las características del sistema como tal, ante una entrada escalón conocida, observando sobre todo su proceso transitorio desde cero hasta el punto de referencia en el cada experimento.

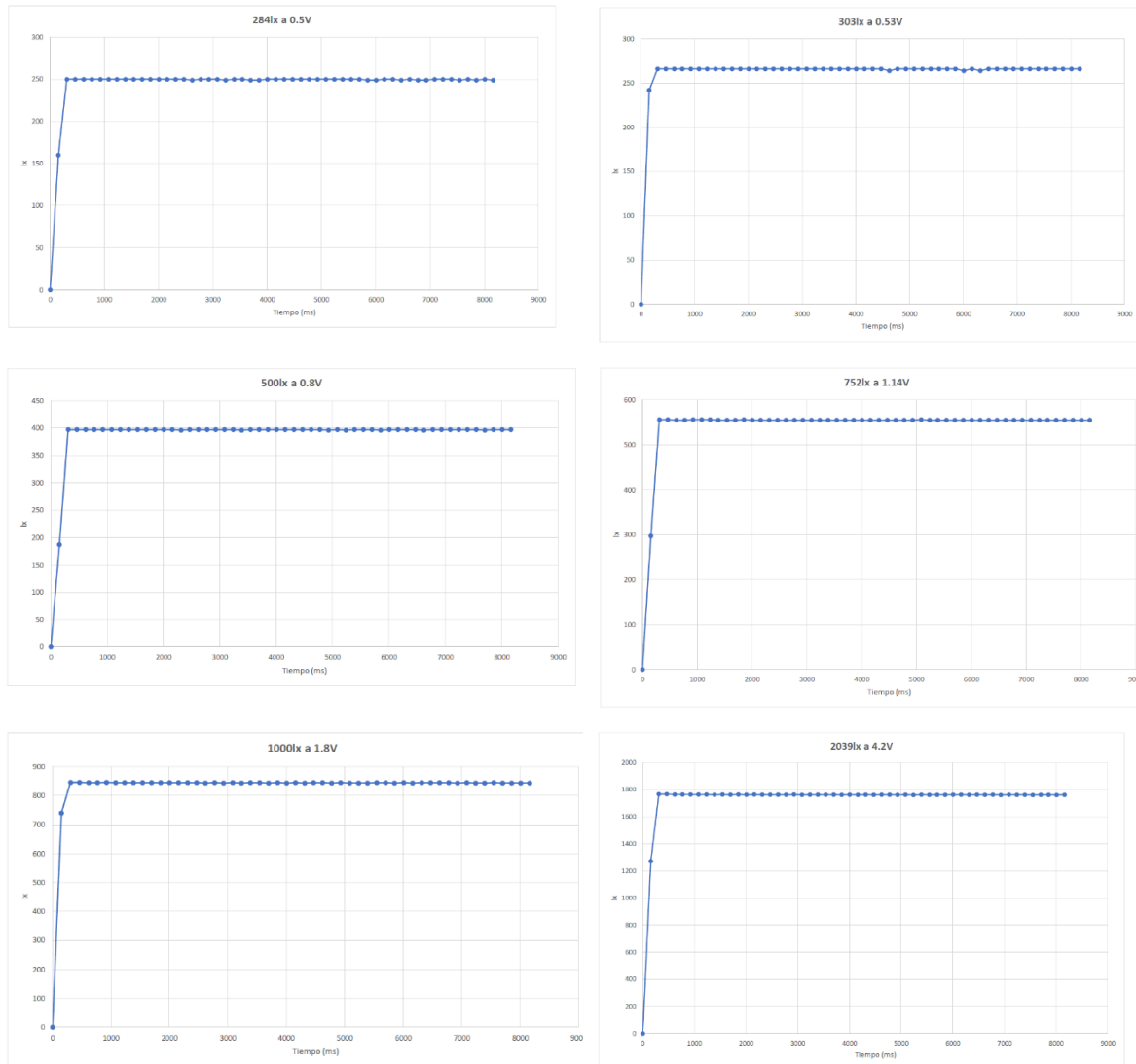
#### 4.5 Análisis y caracterización del prototipo.

En esta sección, se realiza la caracterización del prototipo funcional completo, con la intención de conocer las respuestas transitorias del sistema completo, a partir de una excitación conocida en lazo abierto, para este ejercicio fue necesario el desarrollo de un programa auxiliar en el microprocesador, que consiste en la recolección de datos, donde se evalúa la salida del sistema, con respecto a una base de tiempo, que nos definirá los tiempos de muestreo a partir de la velocidad de conversión de los sensores, los que se definieron a 154 ms, lo que nos proporciona una referencia para designar un periodo de muestreo, que al mismo tiempo es usado para el diseño del controlador.

A partir de diseñar los experimentos, sobre los valores de escalón que se utilizaron como excitación, se consideraron preferentemente valores, según los niveles de iluminación, de la Tabla 1 de referencia en la NOM-025-STPS-2008 vigente, los cuales son: 20 lx, 50 lx, 100 lx, 200 lx, 300 lx, 500 lx, 750 lx, 1,000 lx y 2,000 lx, cada una de estas respuestas fueron graficadas proporcionando valores muy próximos, pues la idea de medir la iluminancia considerando una longitud de onda constante, implicaba mover ambos sistemas manualmente, hasta ajustar lo más cercano posible, proceso similar en diferentes magnitudes constantes de iluminancia, lograr el ajuste manual para que la temperatura correlaciona del color se acercara a la deseada.

En primera instancia, se presentan las gráficas en la Figura 34. En las gráficas de la Figura 34, pueden observarse respuestas de sistemas de primer orden en su periodo transitorio, lo que nos indica que podríamos hacer una consideración práctica para definirlo como un sistema de primer orden invariante en el tiempo.



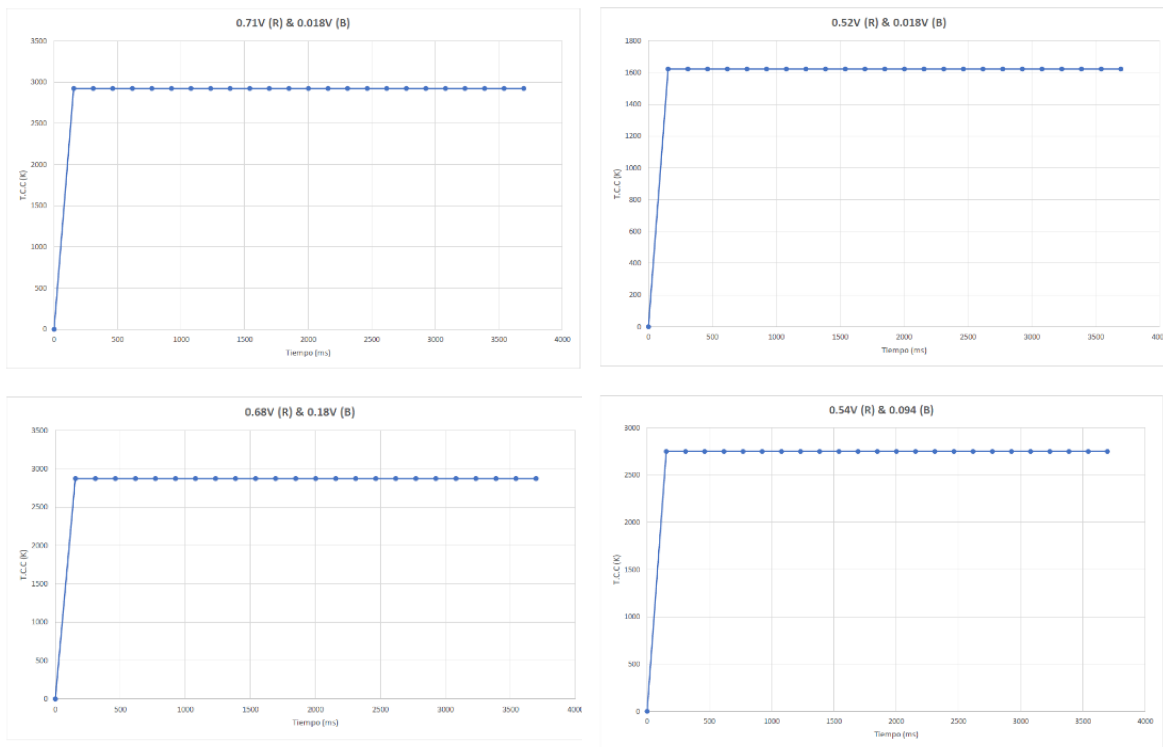


**Figura 34:** Gráficas de respuesta ante excitación tipo escalón de iluminancia al sistema en lazo abierto.

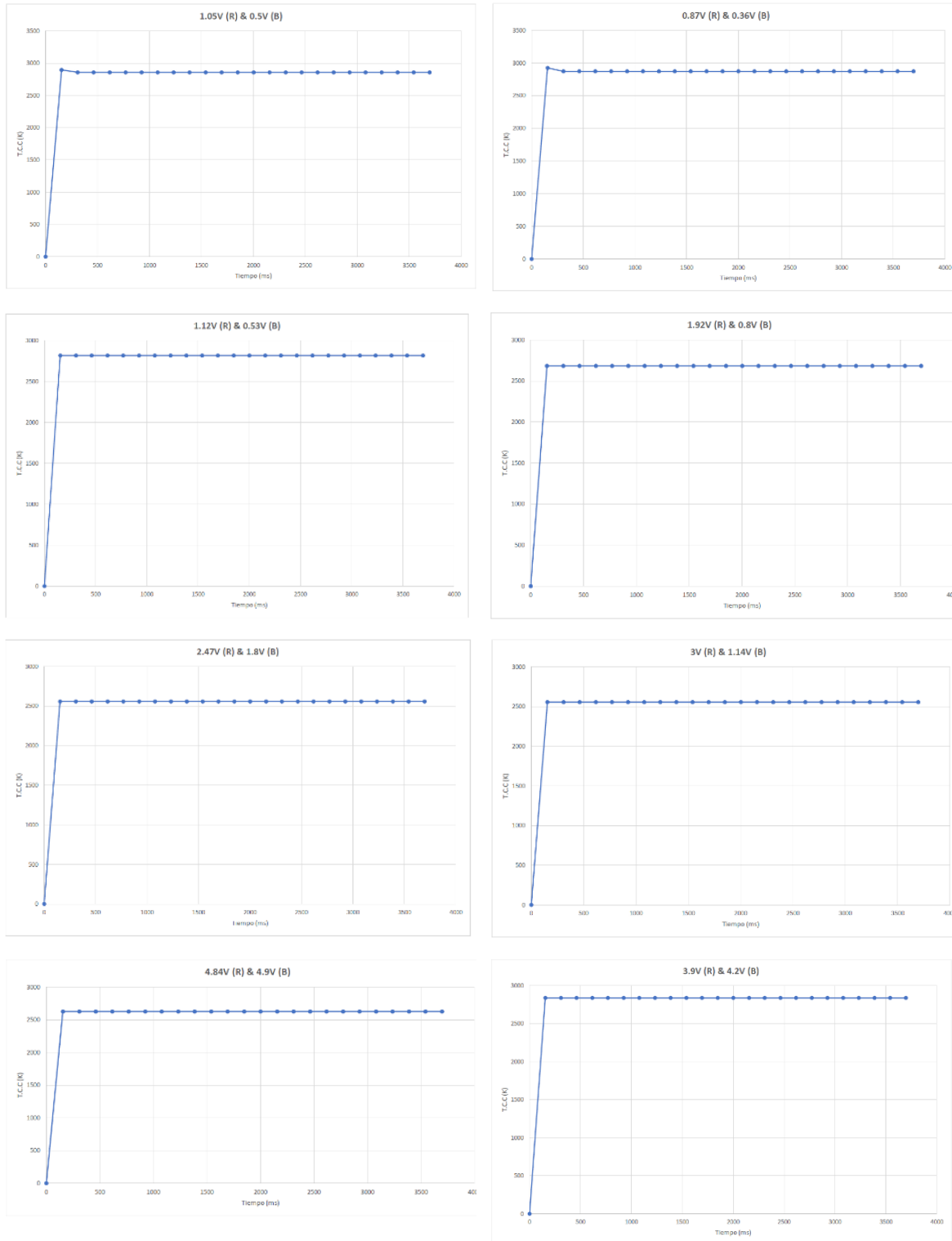
Por otro lado, se realizó la experimentación similar, ahora considerando que la longitud de onda es constante 2,856 K. ajustando manualmente mediante la mezcla de la intensidad en el led de haz ámbar y de haz rojo, según se muestra en la Figura 35, mostrando nuevamente imperfecciones, pero si las respuestas del sistema, que de igual forma se asemejan a respuestas de sistemas de primer orden, por aproximación y de forma práctica, de igual manera, se consideran sistemas invariantes en el tiempo de primer orden, en este caso los experimentos arrojan el ajuste en tensión para la entrada que excita el led blanco y al led rojo.

Con la observación de estas respuestas, que de cierta forma muestran una independencia de cada controlador, determinado por que experimentalmente con ajustes a mano, sin ninguna ayuda electrónica, nos ha permitido llegar a un estado estacionario en lazo abierto, pero también acercar los valores deseados, realizando ajustes muy finos y de baja eficiencia, por ser solamente tanteo, generando las respuestas esperadas con algún grado de error con respecto a la señal ingresada como escalón de excitación.

A continuación, con estas respuestas, que describen perfectamente un comportamiento de un sistema de primer grado, pero con diferentes pendientes durante su estado transitorio, determinamos la matriz  $A$ , de la ecuación de estado en cada caso. considerando de entre todas las gráficas de la Figura 34 y Figura 35 de forma individual y para cada caso, la más representativa en un punto medio de todo el rango, siendo esta la mejor opción de aproximación, para calcular la matriz  $B$ .







**Figura 35:** Excitación escalón de la longitud de onda, para observar el periodo transitorio de respuesta en lazo abierto.

Una segunda opción en la experimentación sería encontrar el valor de la matriz  $\mathbf{A}$ , para cada curva de respuesta, calcular un valor promedio de la matriz  $\mathbf{A}$ , según cada curva y utilizarla para el diseño del controlador, lo que nos arroja valores demasiado dispersos, que exigirían de forma práctica al controlador, pudiendo no lograr un control adecuado incluso con el integrador.

---

---

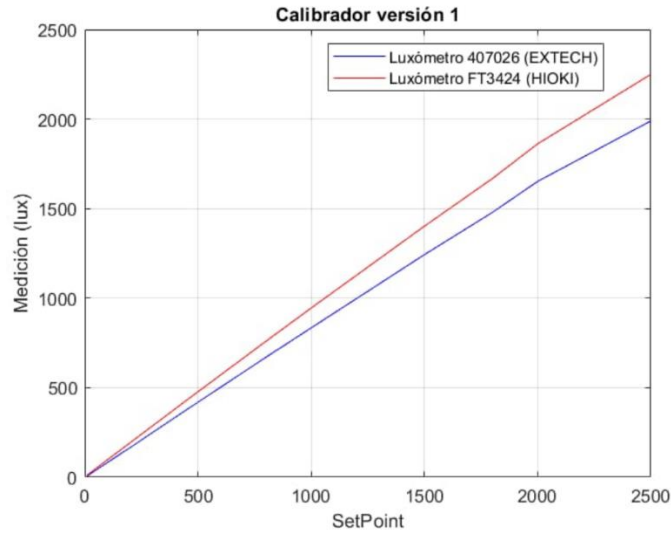
## 5 Conclusiones y Recomendaciones

### 5.1 Conclusiones.

La disciplina de las mediciones, la metrología, obliga a realizar las mediciones de variables bajo sustentos científicos que eventualmente se convierten en legales, pues por su función en la evaluación del grado de conformidad, implica que los resultados pueden ser tomados en cuenta como una evidencia válida legal y que debe ser reproducible bajo procedimientos estrictos establecidos por la normativa, situación que demanda gran cuidado en el diseño y elaboración de equipos para este fin, teniendo siempre como referencia algún patrón nacional o internacional o patrones de laboratorio o de trabajo, siempre con su trazabilidad correspondiente, cabe hacer mención, que el equipo que en este trabajo se implementó, durante el proceso de diseño y construcción, así como la selección de los componentes que lo conforman, los métodos de acoplamiento, incluidos sus principios de medición, han sido minuciosamente cuidados, con la intención de cumplir cada una de las exigencias marcadas en las normas mexicanas aplicables, en este caso hablando del fenómeno de la luz, que por principio, es una variable intangible y sus métodos de medición son apegados a teorías físicas y matemáticas que se tomaron en cuenta para el diseño.

La construcción del equipo, que llevo varios procesos de pruebas y ajustes, en la experimentación hubo necesidad de buscar los mejores elementos y tarjetas electrónicas existentes en el mercado, que cumplieran las exigencias del objetivo planteado, en este caso, la emisión de la energía electromagnética visible, en dos de sus aspectos importantes, la intensidad luminosa y la longitud de onda, expresada cada una en sus unidades, en el caso de la iluminancia en lux, mientras que la longitud de onda en grados kelvin, las cuales siempre fue importante el comparativo durante todo momento en el diseño del equipo.

La gran ventaja del equipo desarrollado como banco fotométrico portátil, nos permites el cumplimiento de los principios físicos de la generación de una iluminancia constante, dentro de una cámara oscura, que aísla totalmente la incidencia de luz exterior y que permite al mismo tiempo hacer mediciones y ajustes o comparativas, lo que se realizó con respecto a un equipo patrón de trabajo, proporcionado bajo, convenio vigente, por la empresa Asesoría Ambiental S.A. de C.V, así como el ejercicio de calibración implementado en sus laboratorios especializados, con el apoyo invaluable de sus técnicos especialistas, quienes al realizar esta comparativa, nos da rumbo y certeza para el ajuste de nuestro equipo, siendo este un proceso ordinario durante una calibración profesional, ya que exige todas las pruebas y requisitos de cualquier equipo comercial existente y de aplicación en la industria de la medición de la iluminancia en los centros de trabajo, los resultados que concluyeron el funcionamiento solo se refieren a la intensidad luminosa, ya que los procesos implementados en la gran mayoría de laboratorios secundarios en el país, no hacen pruebas fotométricas, lo que implica la medición de la longitud de onda, que para nuestro equipo, por no tener una referencia confiable, no se le realizo ajuste alguno, solo en cuanto a iluminancia.

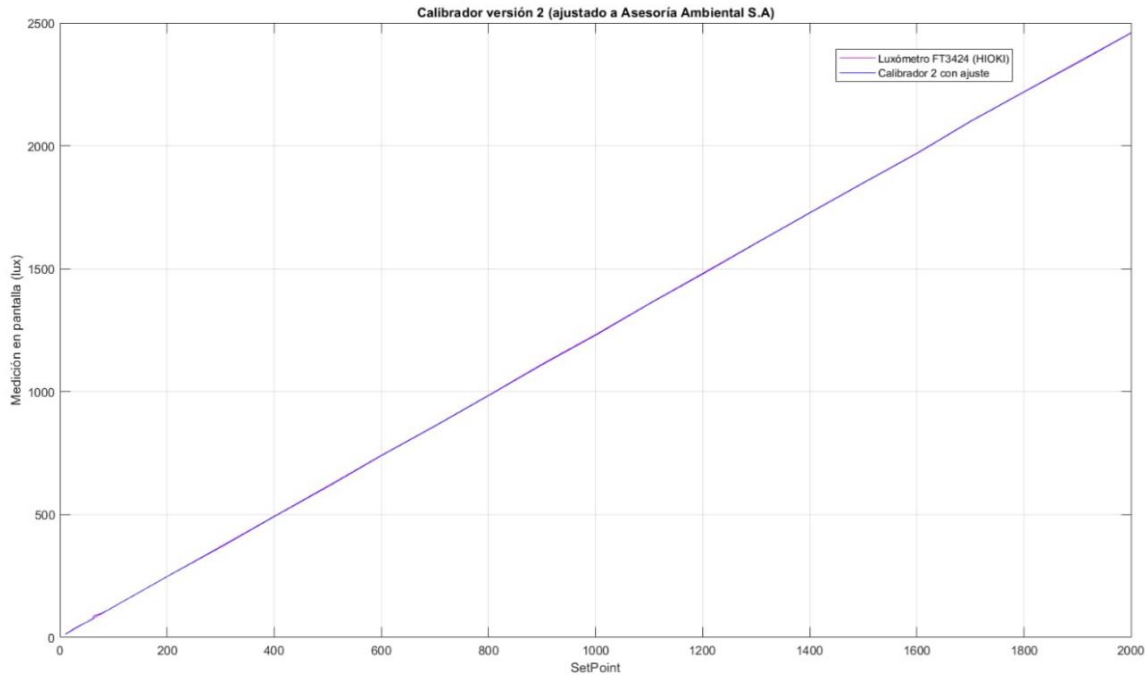


**Figura 36:** Gráficas comparativas durante la primera calibración en laboratorio.

En todo momento durante el diseño, construcción, pruebas y ajustes del banco fotométrico portátil, fue utilizado como referencia un luxómetro de la marca Extech, cabe hacer mención que es un medidor de calidad media - baja, este medidor es el que hubo disponible durante todo el proceso, durante las pruebas realizadas en laboratorio acreditado de la empresa y bajo la estricto cumplimiento de su sistemas de calidad acreditado para la calibración de instrumentos, por el método de comparación, dicha comparación se realizó contra un luxómetro de gama alta en cuanto a calidad, observándose en la figura 36, el resultado, siendo la gráfica de color azul(curva inferior), la respuesta del luxómetro Extech, obviamente asociado este valor al valor que indica el display del banco fotométrico, con un error menor a 2lux, observándose, con respecto a la medición del luxómetro patrón del laboratorio, curva color rojo(curva superior), una desviación completamente lineal, esta desviación demandando un ajuste en nuestro equipo, considerando la respuesta solo en el rango que marca la normativa y que nuestro banco fotométrico emite por diseño, desde 0 lux, hasta 2500 lux.

Posterior al ajuste en software, que consistió en colocar una ecuación lineal de ajuste, correspondiente a la referencia de la gráfica color rojo en la misma figura 36, se muestra en la figura 37, la emisión corregida con respecto al patrón de referencia, realizando una segunda calibración, de forma directa de display del luxómetro, contra el display del banco

fotométrico, presentando en todo momento un error máximo en toda la escala de 3% de la medición, como máximo en la zona de valores bajos en el rango de 0 lux hasta 20lux, posterior a eso valores el error disminuyo hasta en un 1%.



**Figura 37:** *Graficas comparativas posterior al ajuste realizado al banco fotométrico portátil, con respecto al luxómetro patrón del laboratorio de la empresa.*

## 5.2 Recomendaciones

Es importante mencionar que nuestro país no se caracteriza por ser desarrollador de tecnologías de aplicación a problemas industriales, por lo que se recomienda redirigir los esfuerzos a este rubro, pues existe indudablemente la capacidad técnica e inventiva suficiente, pudiendo impactar en la economía nacional de forma positiva, muestra de esto, es este equipo con altas posibilidades de ser utilizado a nivel industrial, pues resuelve una necesidad del tipo industrial, impactando en el ahorro significativo de dinero para los usuarios, pudiendo en un futuro crear más empresas y marcas mexicanas de alto impacto.

Debe promoverse en mayor intensidad, desde el gobierno, la interacción de las ecuaciones matemáticas, con los procesos físicos, para poder emigrar hacia un país científico y tecnológicamente más fuerte, competitivo a nivel internacional.

En el caso del banco fotométrico portátil, nombre técnico industrial de este equipo, aún tiene áreas de mejora muy demandadas por los laboratorios de calibración, sobre todo en el aspecto de la medición de la longitud de onda, que aunque se logra controlar dentro de un error máximo permitido del 5%, no fue posible hacer comparativos con equipos de medición de longitud de onda de alta precisión, ya que son muy costosos, pero es posible hacer un proceso de calibración y posteriormente realizar el ajuste para disminuir considerablemente la desviación, de igual forma, pueden desarrollarse herramientas de software, en la que exista una conexión wifi, para la exportación de los datos medidos en el banco fotométrico portátil, hacia un formato digital con membrete y dentro del sistema de calidad del laboratorio acreditado, evitando posibles errores del tipo humano, incluso la realización de pruebas de repetibilidad y reproducibilidad de manera automática, sin interacción de técnicos que deban dedicar tiempo en colocar valores en teclado, incluso poder bajarle de forma digital toda la secuencia de tiempos y valores desde alguna aplicación digital.

En el caso de desviación por envejecimiento o desgaste de componentes, aunque el controlador digital compensa cualquier variación paramétrica, podría colocarse una función de auto sintonización, a partir de un proceso de auto caracterización, lo que proporcionara un equipo con mucho tiempo de confiabilidad en el proceso, incluso con la posibilidad de que la longitud de onda, sea ajustada para hacer pruebas bajo la referencia de diferentes iluminantes teóricos, mediante la inserción de una ecuación RGB.

## Bibliografía

- [1] Secretaría del Trabajo y Previsión Social, «Norma Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008, Condiciones de iluminación en los centros de trabajo,» *Diario Oficial de la Federación*, pp. 61-73, 30 12 2008.
- [2] Secretaría de Economía, «Declaratoria de Vigencia de la Norma Mexicana NMX-EC-17025-IMNC-2018, Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración (Cancelará a la NMX-EC-17025-IMNC-2006),» *Diario Oficial de la Federación*, 09 08 2018.
- [3] R. Resnick, D. Halliday y K. S. Krane, Física Vol. 1, 4 ed., México: Compañía Editorial Continental, 2001.
- [4] R. Resnick, D. Halliday y K. S. Krane, Física Vol. 2, 4 ed., México: Compañía Editorial Continental, 1999.
- [5] N. Mohan, T. M. Undeland y W. P. Robbins, Electrónica de Potencia: Convertidores, aplicaciones y diseño, 3 ed., México, D.F.: McGraw-Hill Interamericana, 2008.
- [6] E. Rosas y R. Cardoso, «Calibración de Luxómetros y su uso en la medición de niveles de iluminación,» CENAM, México, 2010.
- [7] T. J. Maloney, Electrónica Industrial Moderna, Naucalpan de Juárez, Edo. de México: Pearson Educación, 2006.
- [8] A. Corróns, J. Campos y M. Melgosa, «La Comisión Internacional de Iluminación (CIE),» Departamento de Óptica, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada, España, 2007.
- [9] International Bureau of Weights and Measures, Vocabulario Internacional de Metrología Conceptos fundamentales y generales, y Términos asociados (VIM). Traducción oficial al español del VIM 3ª, México: CENAM, 2008.



- [10] Secretaría de Economía, «DECLARATORIA de vigencia de las normas mexicanas [...] NMX-Z-055-IMNC-2009, Vocabulario Internacional de Metrología - Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM),» *Diario Oficial de la Federación*, 24 12 2009.
- [11] R. Damaye y D. S. León, *Optoelectronica*, Madrid: Paraninfo, 1974.
- [12] Secretaría de Economía, «NORMA Oficial Mexicana NOM-008-SE-2021, Sistema general de unidades de medida,» *Diario Oficial de la Federación*, 2023.
- [13] R. L. Boylestad y L. Nashelsky, *Electrónica: Teoría de Circuitos y Dispositivos Electrónicos*, 10 ed., México: Pearson Educación, 2009.
- [14] J. Stevanov, S. Marković y A. Kitaoka, «Aesthetic Valence of Visual Illusions,» *i-Perception*, vol. 3, nº 2, pp. 112-140, 2012.
- [15] D. W. Hart, *Electrónica de potencia*, 1 ed., Madrid, España: Pearson Educación, 2001.
- [16] CIE Technical Committee 1-48 of Division 1 "Vision and Color", «CIE 15: Technical Report: Colorimetry,» International Commission on Illumination, 2004.
- [17] J. Fraytag, M. F. da Silva, N. B. Chagas, R. N. do Prado y M. A. D. Costa, «Lighting systems energy efficiency based on different human visual conditions,» de *2010 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications - INDUSCON 2010*, Sao Paulo, Brazil, 2010, pp. 1-6.
- [18] K. Ogata, *Ingeniería de control moderna*, 4 ed., Madrid, España: Pearson Educación, 2003.
- [19] B. C. Kuo, *Sistemas de Control Automático*, 7 ed., México D.F.: Prentice Hall Hispanoamericana, 1996.
- [20] R. C. Dorf y R. H. Bishop, *Modern Control Systems*, 10 ed., Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2004.
- [21] C.-T. Chen, *Linear system theory and design*, New York: Oxford University Press, 2013.
- [22] K. Ogata, *Sistemas de control en tiempo discreto*, 2 ed., Naucalpan de Juárez, Estado de México: Prentice Hall Hispanoamericana, 1996.
- [23] T. Kailath, *Linear Systems*, Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1980.

- [24] K. Furuta, A. Sano y D. P. Atherton, State variable methods in automatic control, Chichester, England: John Wiley & Sons, 1988.
- [25] U.-E. Eronini, Dinámica de Sistemas de Control, México: Thomson Learning, 2001.
- [26] W. J. Rugh, Linear system theory, 2 ed., Upper Saddle River, NJ: Pearson, 1995.
- [27] M. H. Rashid, Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones, 3 ed., México: Pearson Educación, 2004.
- [28] A. Garza Alonson, *Diseño de algoritmos de tipo Super-Twisting convergentes por tiempo fijo para sistemas dinámicos sujeto a incertidumbres con cotas desconocidas*, San Nicolás de los Garza, Nuevo León: Universidad Autónoma de Nuevo León, 2019.
- [29] S. H. Strogatz, *Nonlinear dynamics and chaos: with applications to physics, biology, chemistry, and engineering*, CRC press, 2018.
- [30] G. F. Franklin, J. D. Powell y M. L. Workman, Digital control of dynamic systems, 2 ed., Reading, MA: Addison-Wesley Publishing Company, 1990.
- [31] W. L. Luyben, Process modeling, simulation and control for chemical engineers, 2 ed., New York, NY: McGraw-Hill Higher Education, 1989.
- [32] E. Kreyszig, Advanced Engineering Mathematics, 9 ed., Nashville, TN: John Wiley & Sons, 2005.
- [33] J. M. Maciejowski, Multivariable Feedback Design, Reading, MA: Addison-Wesley, 1989.
- [34] J. G. Proakis y D. G. Manolakis, Tratamiento digital de señales, Madrid, España: Prentice Hall, 2007.