

Diseño y construcción de una cámara de iluminancia ajustable para calibración de luxómetros

Design and construction of an adjustable illuminance chamber for lux meter calibration

José-Federico Chong-Flores¹, Rubén Salas-Cabrera¹, Samuel Mar-Barón¹, Mario Gómez-García¹, Christian-Emanuel Vicencio-Cruz¹

¹ Tecnológico Nacional de México – IT de Ciudad Madero, Tamaulipas, México.

Recibido: 26-10-2023

Aceptado: 10-12-2023

Autor corresponsal: mario.gg@cdmadero.tecnm.mx

Resumen

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, utilizada para obtener el grado de maestro en ciencias de la ingeniería, del ingeniero José Federico Chong Flores, en el Tecnológico Nacional de México, Campus Ciudad Madero, en la división de estudios de posgrado e investigación, diciembre 2023.

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.

Palabras clave. Banco fotométrico, cámara de iluminancia, calibrador de luxómetros, cámara oscura, controlador digital método RSC.

Abstract.

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, used to obtain the degree of Master of Engineering Sciences, from Engineer José Federico Chong Flores, in The Tecnológico Nacional de México, Campus Ciudad Madero, in the division of graduate studies and research, December 2023.

The 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.

Keywords.

Photometric bench, illuminance chamber, lux meter calibrator, dark chamber, digital controller RSC method.

Introducción.

La Ley Federal del Trabajo, regula las relaciones obrero patronales en todo lo largo y ancho del País, procurando estrictamente el cabal cumplimiento del Artículo 123 de la Constitución Política Mexicana, siempre en busca de situaciones justas para obrero y patrón en los centros de trabajo, asumiendo que las normas del trabajo tienden a conseguir el equilibrio entre los factores de la producción y la justicia social, así como propiciar el trabajo digno o decente en todas las relaciones laborales.

Entendiendo por trabajo digno o decente aquel en el que se respeta plenamente la dignidad humana del trabajador, donde no existe discriminación por origen étnico o nacional, género, edad, discapacidad, condición social, condiciones de salud, religión, condición migratoria, opiniones, preferencias sexuales o estado civil, además se tiene acceso a la seguridad social y se percibe un salario remunerador; con capacitación continua para el incremento de la productividad con beneficios compartidos, y se cuenta con condiciones óptimas de seguridad e higiene para prevenir riesgos de trabajo.

Dentro del establecimiento de normas obrero patronales, con referencia a las condiciones óptimas de seguridad e higiene para prevenir riesgos de trabajo o eventuales daños a la salud del obrero o incluso cualquier ser humano, se define lo dispuesto por la ley en la NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-025-STPS-2008, que se refiere a las CONDICIONES DE ILUMINACION EN LOS CENTROS DE TRABAJO y que define los niveles de iluminación para tareas visuales y áreas de trabajo, los niveles mínimos de iluminación que deben incidir en el plano de trabajo, para cada tipo de tarea visual o área de trabajo.

Para efectos del cumplimiento de la NOM-025-STPS-2008, es necesario realizar mediciones de la iluminación, con equipo que cumpla los criterios estándares de incertidumbre, proporcionados por algún proceso de calibración, inspección o verificación, según lo define la Ley de la infraestructura de la calidad, que tiene por objeto en materia de Metrología, establecer los requisitos para la fabricación, importación, reparación, venta, verificación y uso de los instrumentos para medir y los patrones de medida, para estas acciones, la ley se apoya en la NMX-EC-17025-IMNC-2018, que indica los requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración, y que deben utilizar como referencia 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, prefieren 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]

Materiales y métodos.

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, más 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 solid Works, 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.

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 35cm, con un diámetro de 11cm aproximadamente, de un material termoplástico de policloruro de vinilo, 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 1.



Figura 1. Cámara de aislamiento luminoso. Fuente: Autores

La fuente luminosa de potencia.

La fuente luminosa en el interior de la cámara oscura, se encuentra conformada por tecnología LED de potencia media (5W), en diferentes arreglos serie y paralelo, formando una matriz, destacándose dos tipos de fuente luminosa, una de color ámbar a 3200 °K aproximadamente y una segunda de color rojo a 1400 °K aproximadamente, que por medio de un circuito analógico de potencia se les excita con corriente constante, organizadas físicamente en una matriz de 3x3, 5 color ámbar y 4 color rojo, 45W 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 2856 °K deseados y definidos por el iluminante A como una referencia luminosa.

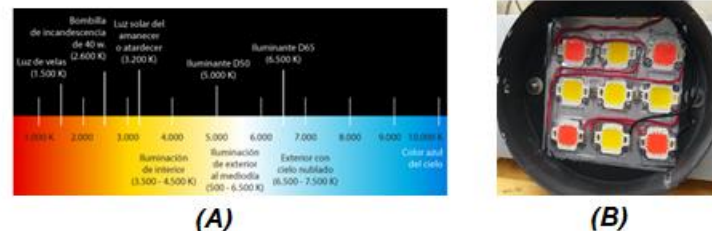


Figura 2.- (A) gráfico de la longitud de onda deseada y (B) Matriz de LED en el interior de la cámara oscura. Fuente: Autores

Éste parámetro es importante para una medición de la iluminancia en los luxómetros a calibrar, según la NOM 025, 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.

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 3.



Figura 3. Aspecto y dimensiones del sensor RGB y la colocación en la tapa de medición. Fuente: Autores

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 4 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 48v, para poder hacer fluir por cada fuente de color, una corriente máxima de 850mA, teniendo la capacidad en el diseño para que fluyan 2A 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.

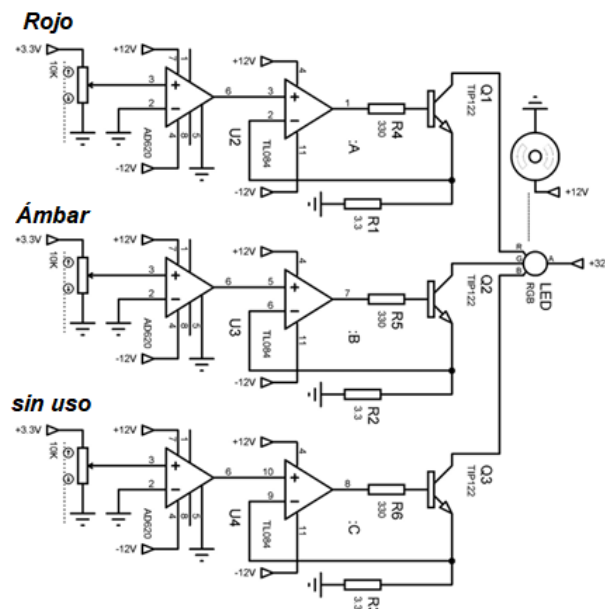


Figura 4. Diagrama eléctrico de la etapa de potencia para excitación individual del led RGB de forma manual.

Fuente: Autores

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.

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 5v 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 5.



Figura 5. Convertidor digital a analógico de un solo canal, en presentación de montaje de fácil integración. **Fuente:** Autores.

Pantalla touch NEXTION.

Es una pantalla táctil de 5in, 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 16Mb, una memoria RAM de 3584 bytes, con la posibilidad de reproducir 65,536 colores, con una resolución de 480*272 pixeles, diseñada para un uso continuo de 30,000 horas efectivas, soporta una tarjeta microSD de 32Gb en formato FAT32, donde se alberga el firmware de NEXTION/diseño HMI, su alimentación de tensión es de 5v, compatible con familia TTL, la vía de comunicación es serial, típicamente a 9600 bps, esta pantalla se muestra en la figura 6.



Figura 6. Pantalla táctil TFT marca NEXTION y sus accesorios para programación vía puerto serie. **Fuente:** Autores **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 32bits de doble núcleo de hasta 240Mhz, 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 3v o con 5v vía el regulador dentro de la misma tarjeta de desarrollo, así como la disposición de los pines entrada/salida de 3v(GPIO), esta tarjeta de desarrollo pone a disposición todas sus 38 terminales en espaciado estándar para poder acoplar en tablillas de experimentos (protoboard), se puede observar la figura 7, el aspecto físico de esta tarjeta de desarrollo.



Figura 7. Tarjeta de desarrollo ESP32 NodeMCU32S. **Fuente:** Autores

Fuente de poder múltiples salidas.

La fuente de poder TrueBasix, modelo TB-05003 500W/ATX, consta de una fuente conmutada de 500W, con salidas de tensión de +12v, -12v, 5v y 3.3v, empaquetada en un chasis estándar ATX, refrigerada por ventilación, recibe alimentación configurable de 125Vca o 220Vca a 60Hz, 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 8.



Figura 8. Fuente de poder conmutada múltiples salidas de tensión TB-05003 500W/ATX. **Fuente:** Autores

Fuente conmutada elevadora (boost).

Consiste en un convertidor estático de potencia del tipo elevador (boost), capaz de suministrar una potencia de salida de 600W, con una eficiencia del 85%, puede recibir una tensión de entrada desde 10vcd a 60vcd y podrá entregar a la salida una tensión regulada desde 12vcd hasta 80vcd, permitiendo una corriente máxima de 10A, 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 15A, 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 12vcd de la fuente principal y entregar una tensión de 48vcd 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 1.2A, la figura 9, ilustra el aspecto físico del elevador de tensión conmutado.



Figura 9. Fuente de poder conmutada boost de 600W. **Fuente:** Autores

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 1lux, hasta 65535lux, 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, se observa su imagen en la figura 10.



Figura 10.- Sensor de intensidad luminosa. **Fuente:** Autores

Método de aproximación experimental de modelos dinámicos de orden superior a modelos dinámicos de segundo orden, método RSC, siglas de su autor: Dr. Rubén Salas Cabrera.

Este método es una aproximación, mediante experimentación, en la que podemos observar el comportamiento de diferentes sistemas de orden superior y que en base a un análisis detallado de controlabilidad, observabilidad y todas las rigurosas pruebas como sistemas implementables en la realidad, se busca un modelo imperfecto, dicho modelo se lleva a una gráfica de respuesta de segundo orden aproximada, mediante la obtención de gráficas de su valor de salida con respecto al tiempo, a partir de excitación de escalones en el setpoint, en lazo abierto, para lograr una colección de graficas en todo su rango de operación, pudiendo de estas deducir las ecuaciones de estado, considerando en todo

momento la riqueza de valores encontrados en el tiempo transitorio de su respuesta, por lo que es muy importante, lograr muestras, las mas posibles en este tiempo transitorio.

Con esta colección de datos, se construye una curva de respuesta, de un sistema de segundo orden conocido y ya estudiado, para buscar una aproximación, considerando que los errores que pudieran existir de coincidencias, pueden ser compensados por la robustez de un controlador proporcional más integral.

Puede ser cuestionable la experimentación, así como la cantidad de datos que se obtienen en la caracterización, pero el método basa su sencillez, en la posibilidad de implementar un controlador digital en un sistema micro procesado de baja escala, sin demandas excesivas de hardware o software complejo, dicho método ha sido probado con diversidad de sistemas SISO, de variables muy lentas como temperatura o variables ultra veloces como un haz de luz.

Con la obtención del modelo de segundo orden imperfecto, se procesa para discretizar el modelo mediante las herramientas de Matlab, donde se integran para un lazo cerrado la estrategia de control proporcional más integral, procediendo a utilizar, igual con ayuda de Matlab, la conocida técnica de control, por reubicación de polos, arrojando así, una par de ecuaciones simples, constituidas de la suma de dos productos escalares, en los que destacan las ganancias “K”, que nos arroja Matlab, así como la posibilidad de observar los parámetros de respuesta en una simulación, en la que podemos ajustar los tiempos de muestreo o las constantes de integración, para evitar la exigencia física de los componentes instalados en el sistema electrónico que funge como controlador físico.

Resultados y discusión.

Diagrama a bloques del proyecto.

Consta de 7 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 obscura, 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 traslucida 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 120vca a 60Hz, 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 11.

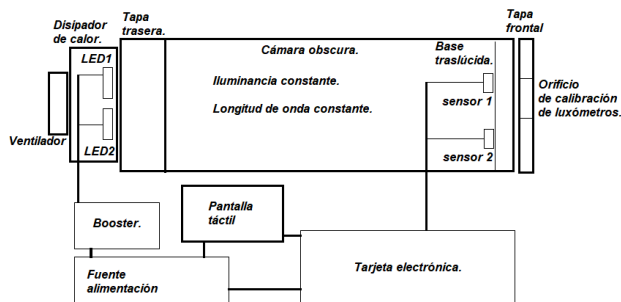


Figura 11.- Esquema en bloques del proyecto. **Fuente:** Autores

Diagrama electrónico

Con respecto al diagrama electrónico, ilustrado en la figura 12, 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.

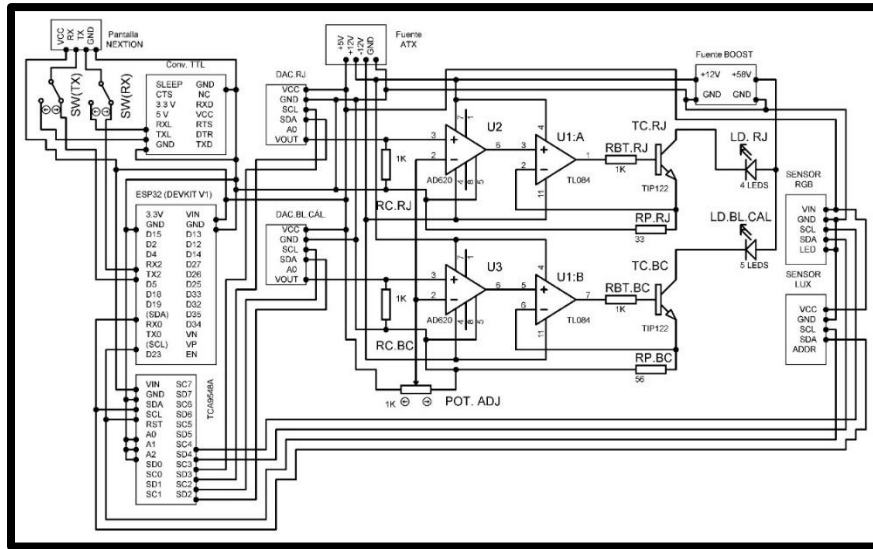


Figura 12.- Esquema electrónico completo. **Fuente:** Autores

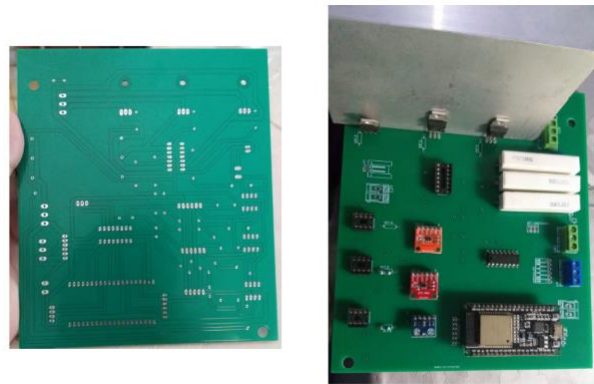


Figura 13.- Aspecto de la placa de circuito impreso. **Fuente:** Autores

Aspecto físico del prototipo

Se ha diseñado un chasis a base de policarbonato de 6mm 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 31cm de longitud, un ancho de 22cm y una altura de 24cm, realizada en tres secciones con maquinados y cortes para instalación de demás componentes.

Se puede observar en la figura 14, 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

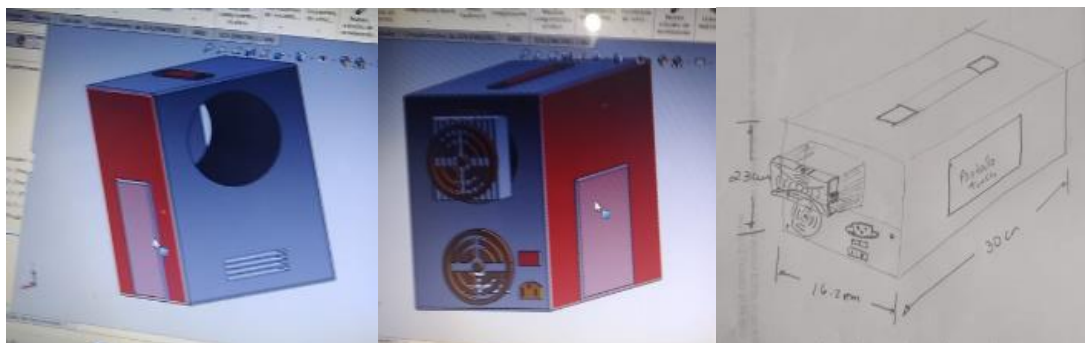


Figura 14.- Aspecto del chasis a partir de un dibujo a mano alzada. **Fuente:** Autores

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 15, 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 15.- 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 16.

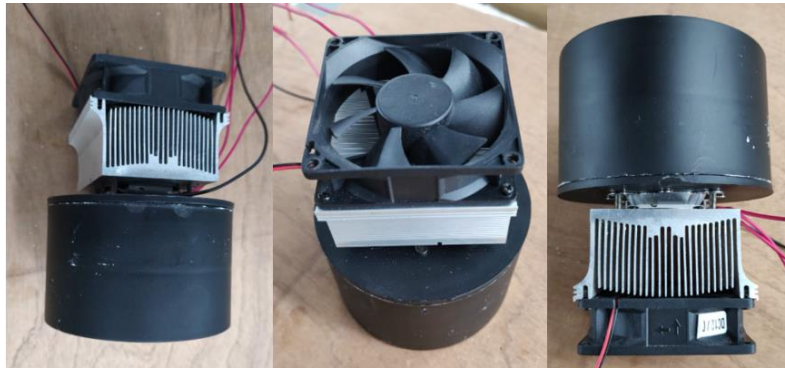


Figura 16.- Instalación la matriz de leds de potencia y sus complementos en una de las tapas de la cámara aislante de la luz exterior. **Fuente:** Autores

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 17.



Figura 17.- 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. **Fuente:** Autores

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 5in, los detalles se observan en la figura 18.



Figura 18.- 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. **Fuente:** Autores

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 ergonomica del teclado e imágenes de la interface gráfica HMI, que al finalizar la operación, puede ser resguardada en un receptaculo de esta misma tapa lateral, para evitar daños durante el traslado del prototipo, ya que esta característica de portabiolidad es la mas importante, para una ilustración a detalle, se puede observar la figura 19.

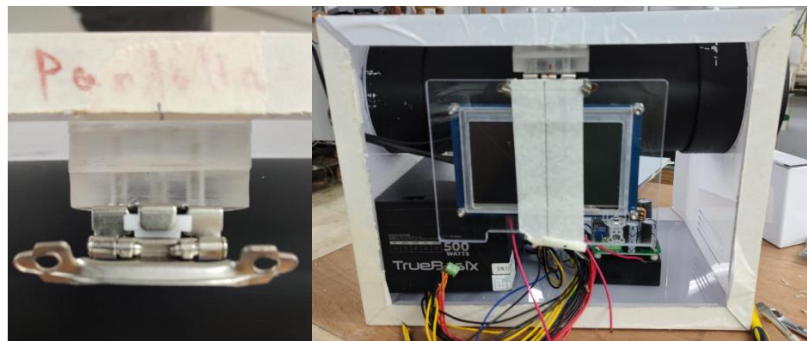


Figura 19.- Instalación de la pantalla touch en la bisagra, para formar parte de una de las tapas laterales del chasis.

Fuente: Autores



Figura 20.- Instalación de la base soporte de los sensores RGB y de intensidad luminosa, dentro de la cámara de aislamiento de luz del medio ambiente. **Fuente:** Autores

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 21.

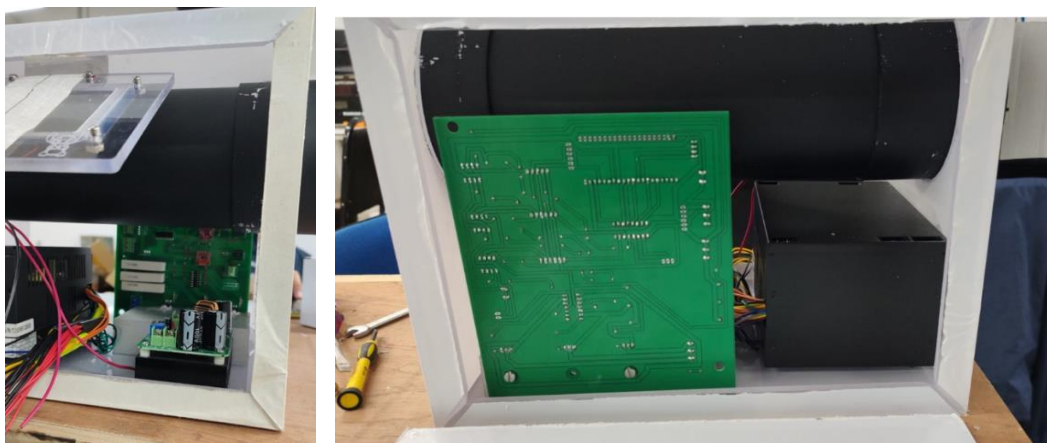


Figura 21.- Instalación de la tarjeta electrónica, fijación del módulo boost y de los disipadores de calor en el chasis.

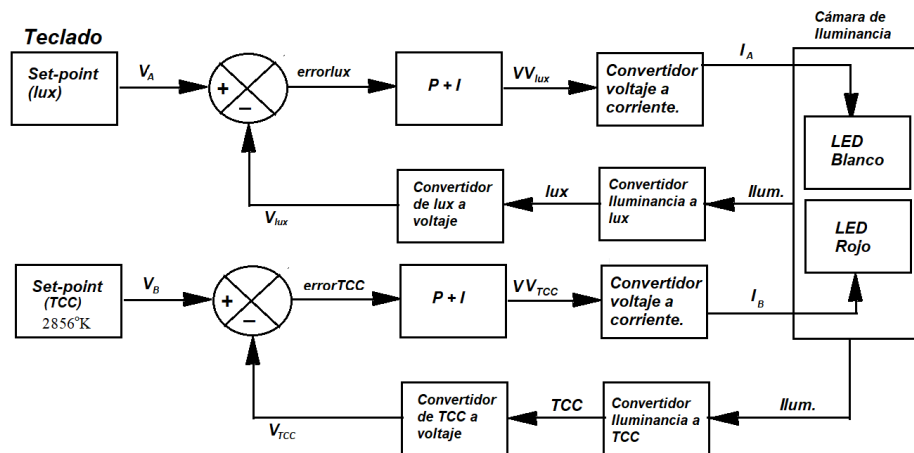
Fuente: Autores

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.

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 22.

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 2856 °K , su estrategia de control es mediante un proporcional integral.



$$TCC(2856K) = (A1(3200K)lux - A2(1400K))/2$$

$$I(intensidad) = A1lux + A2lux$$

Figura 22.- Esquema de los dos controladores del proyecto. **Fuente:** Autores

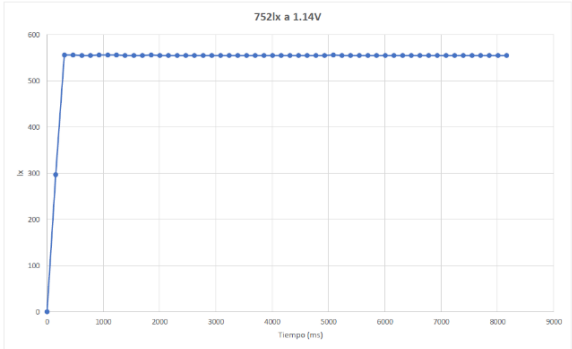
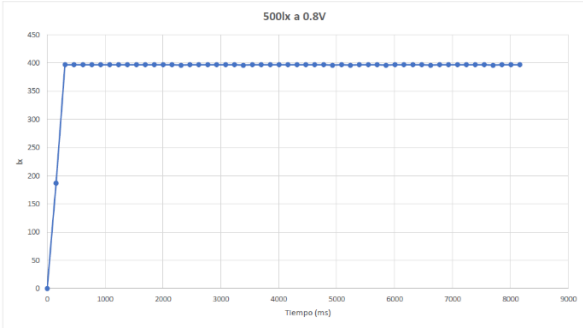
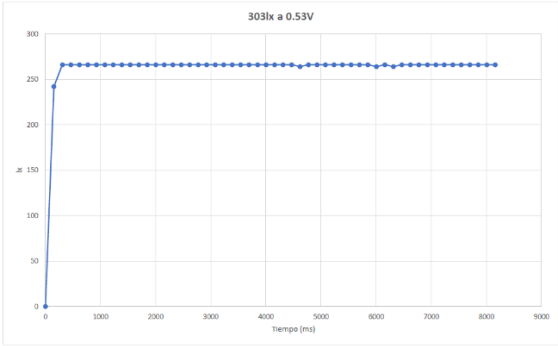
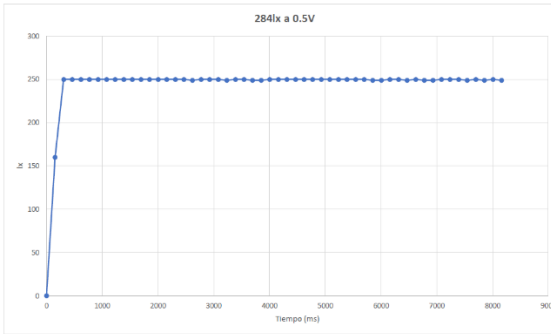
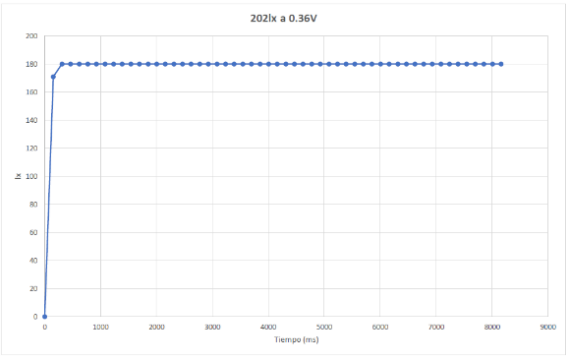
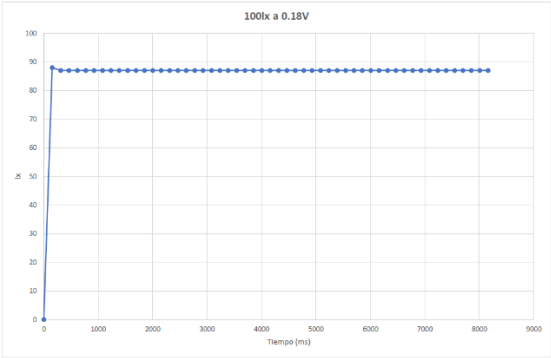
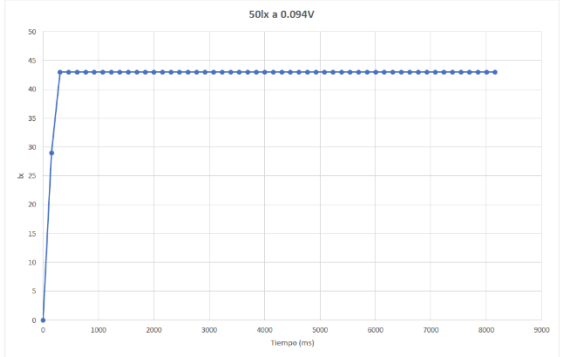
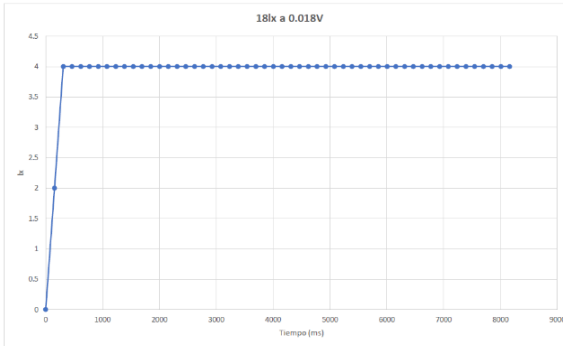
Para el correcto diseño del controlador, se lleva a cabo una identificación dinámica del sistema, aplicando una secuencia experimental de excitación de entrada en cada uno de los sistemas, considerando el otro constante, para la obtención de respuesta en lazo abierto, considerando necesario realizar 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.

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 154ms, 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: 20lx, 50lx, 100lx, 200lx, 300lx, 500lx, 750lx, 1000lx y 2000lx, 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 las gráficas de la figura 23, podemos observar 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.



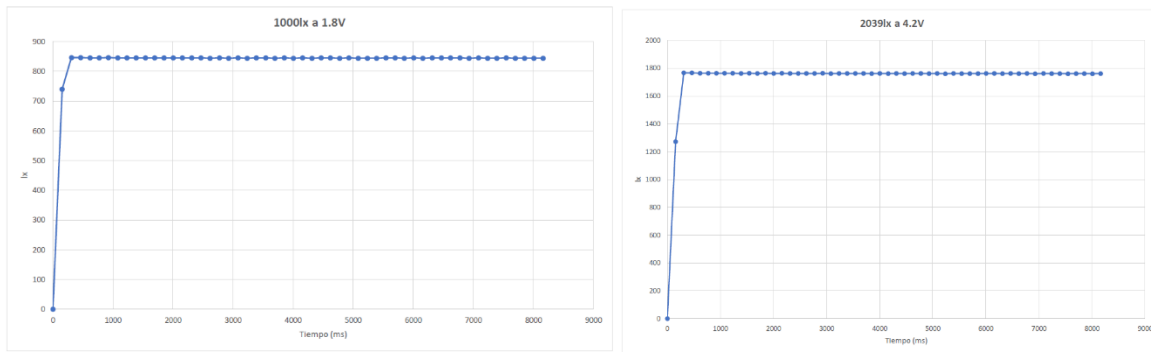


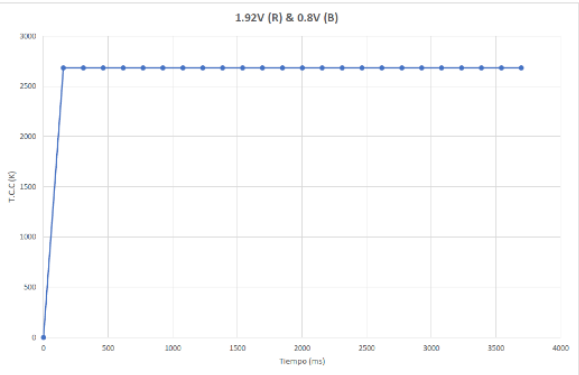
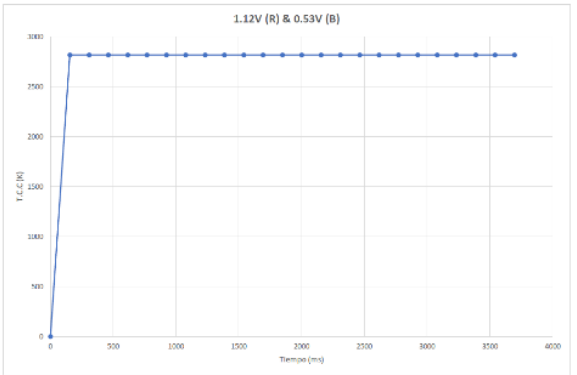
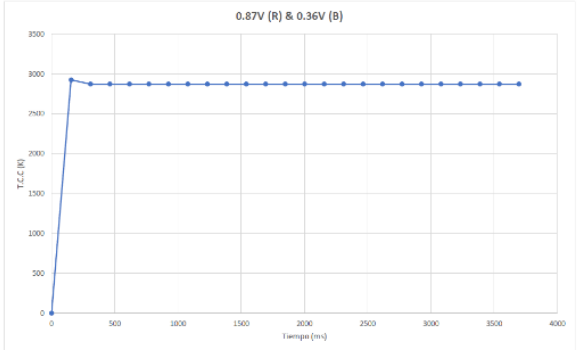
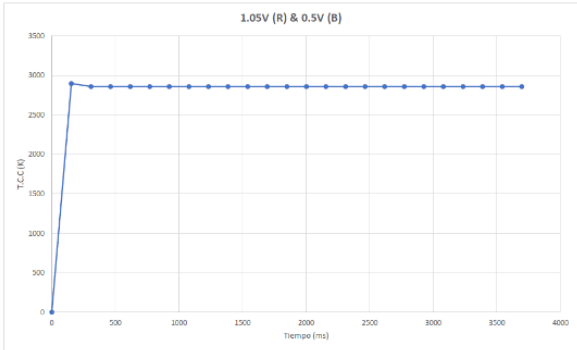
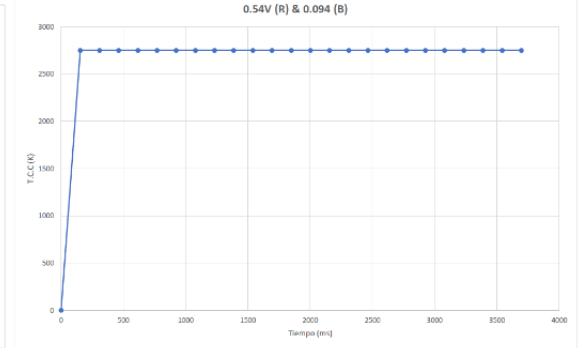
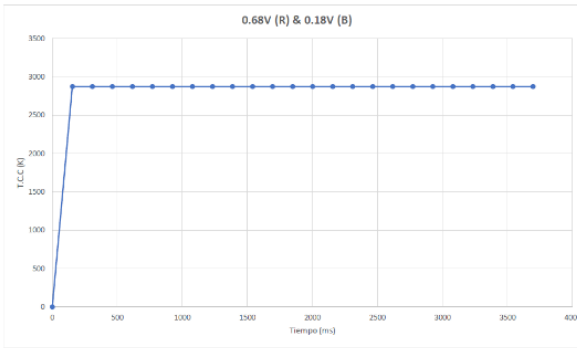
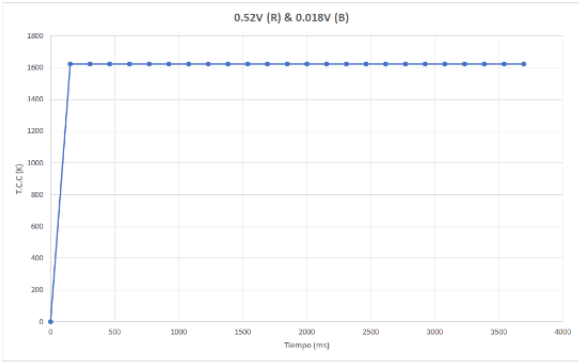
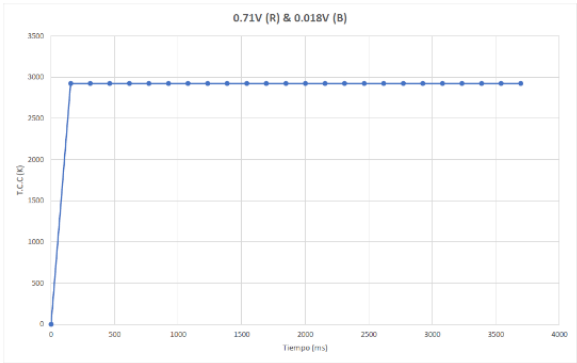
Figura 23.- Graficas de respuesta ante excitación tipo escalón de iluminancia al sistema en lazo abierto.

Fuente: Autores

Por otro lado, se realizó la experimentación similar, ahora considerando que la longitud de onda es constante 2856 °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 30, 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 29 y 30 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.



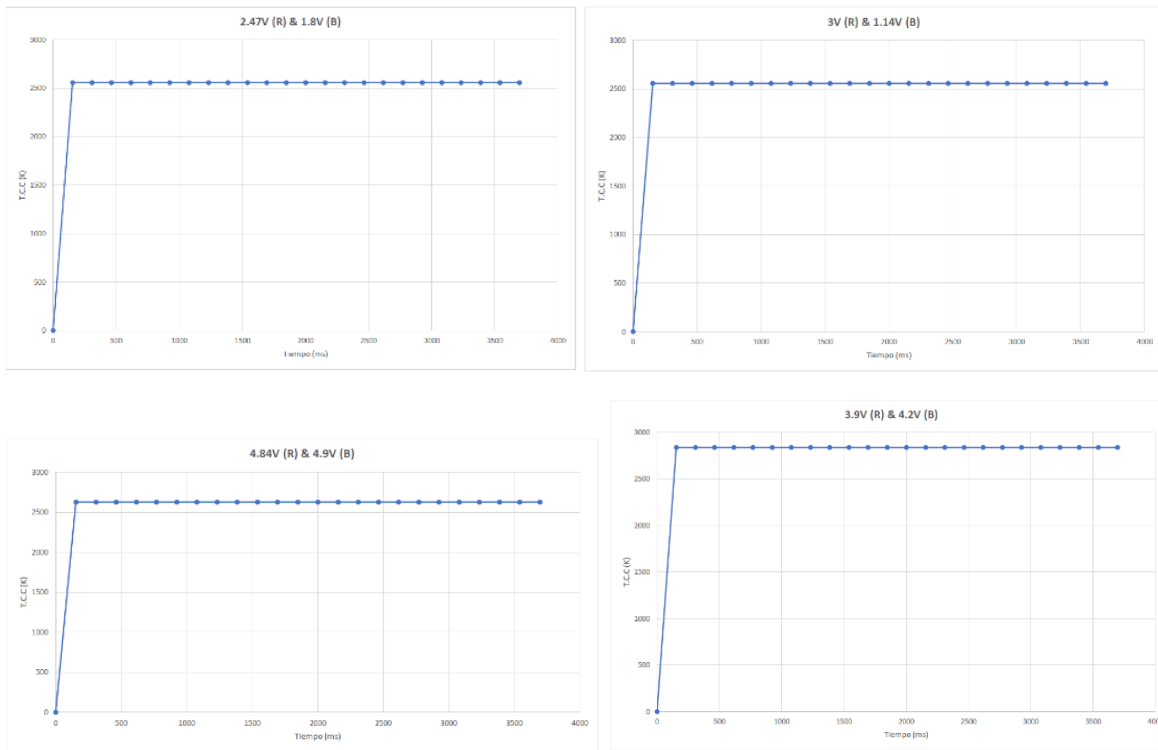


Figura 24.- Excitación escalón de la longitud de onda, para observar el periodo transitorio de respuesta en lazo abierto.

Fuente: Autores

Una segunda opción en la experimentación sería encontrar el valor de la matriz A , para cada curva de respuesta, calcular un valor promedio de la matriz 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.

Conclusiones.

A continuación, se muestran los resultados emitidos por el equipo totalmente funcional, a partir de ingresar un valor de setpoint, como referencia, para que este genere el haz luminoso y que mediante los dos controladores diseñados, entregue a su salida el valor deseado, que a su vez es medido como una referencia, con el luxómetro: Extech modelo 407026, con certificado de calibración vigente hasta enero 2024, de lo que se podrá concluir lo siguiente:

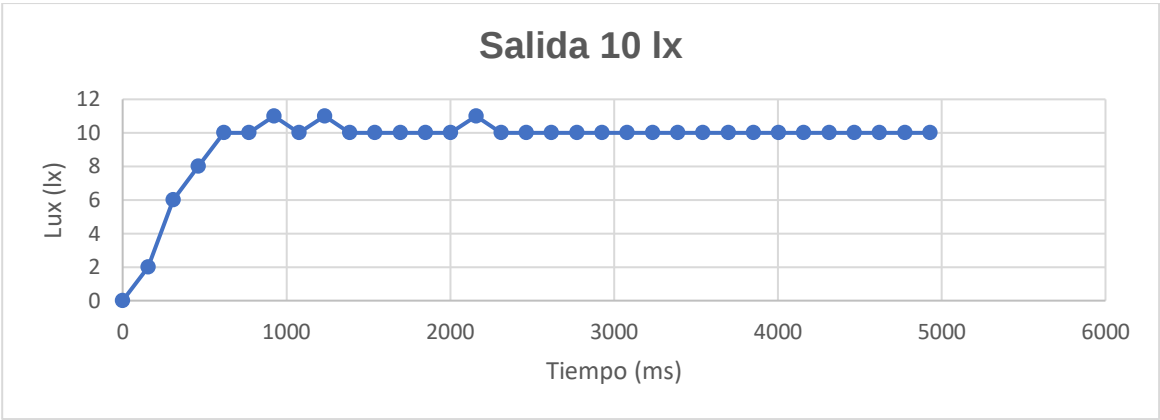
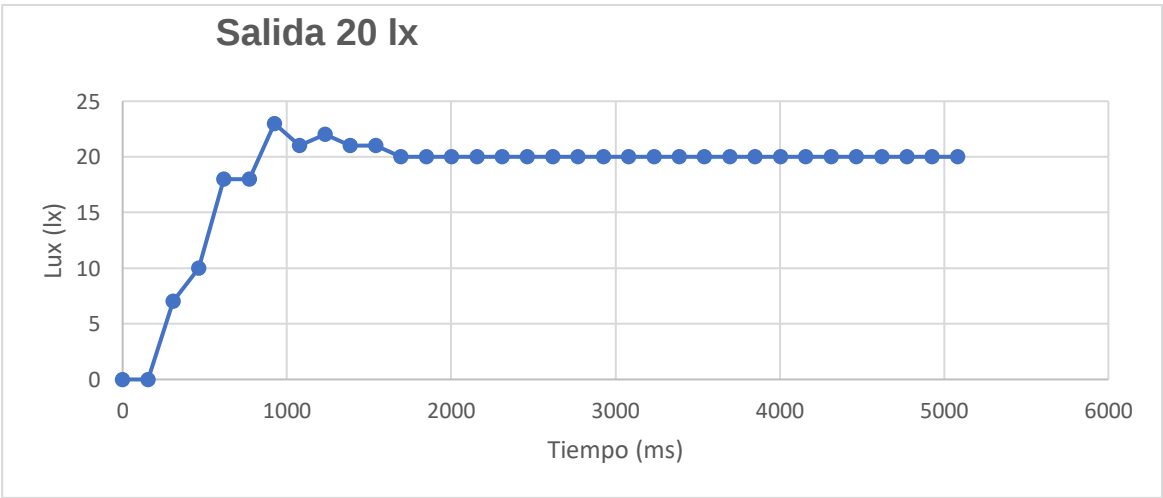


Figura 25. Gráfico de salida para set point 10lux. Fuente: Autores

Observaciones.

Setpoint seleccionado	10lux
Tiempo transitorio	2400mS
Salida alcanzada en tiempo estable.	10lux
Máximo sobreimpulso	11.6lux
Medición en el luxómetro patrón.	10lux
Error calculado(*)	0%
Número de experimentos	10
Tiempo de prueba de estabilidad.	20min

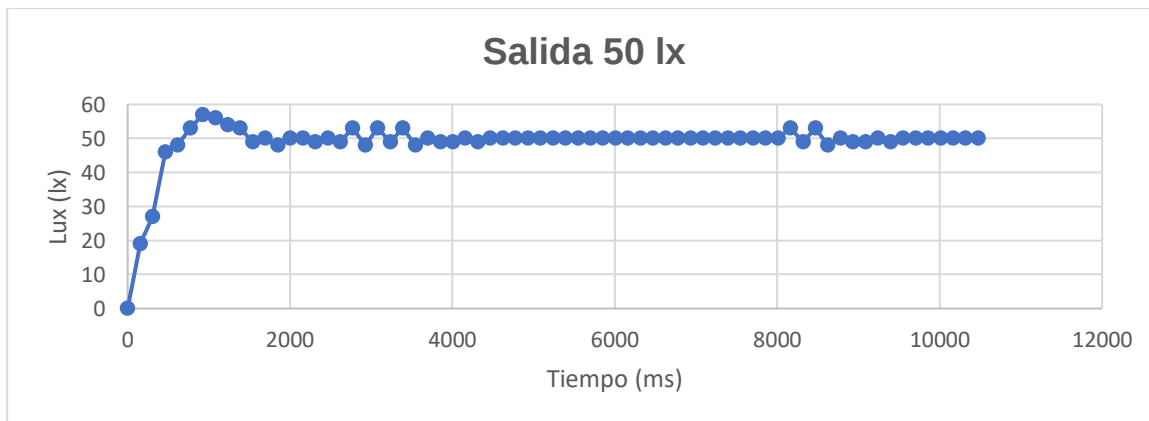
$$*error = \left(\frac{lect. luxómetro - lect. equipo}{lect. luxómetro} \right) * 100\%$$



Observaciones

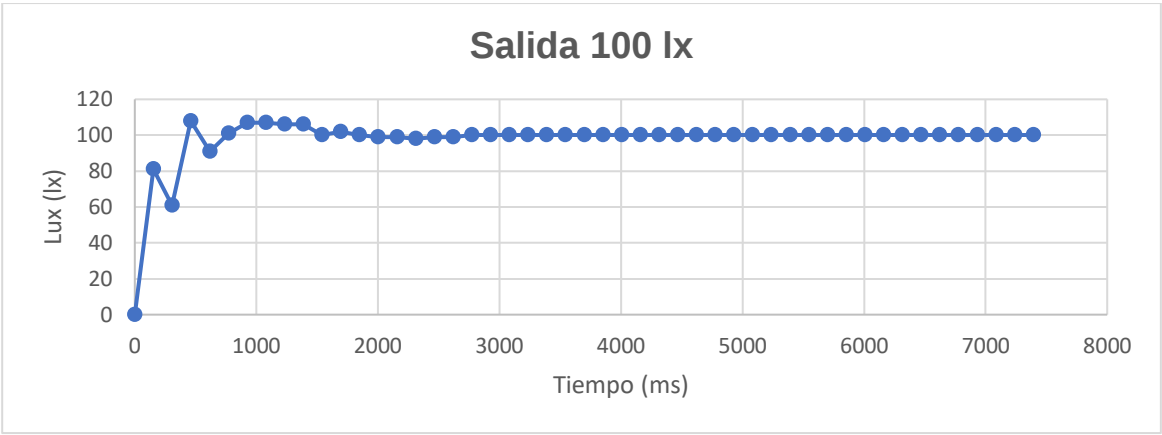
Setpoint seleccionado	20lux
Tiempo transitorio	1800mS
Salida alcanzada en tiempo estable.	20lux
Máximo sobreimpulso	23lux
Medición en el luxómetro patrón.	20lux
Error calculado(*)	0%
Número de experimentos	10
Tiempo de prueba de estabilidad.	20min

$$*error = \left(\frac{lect.luxómetro - lect.equipo}{lect.luxómetro} \right) * 100\%$$

**Observaciones**

Setpoint seleccionado	50lux
Tiempo transitorio	9500mS
Salida alcanzada en tiempo estable.	50lux
Máximo sobreimpulso	28lux
Medición en el luxómetro patrón.	50lux
Error calculado(*)	0%
Número de experimentos	10
Tiempo de prueba de estabilidad.	20min

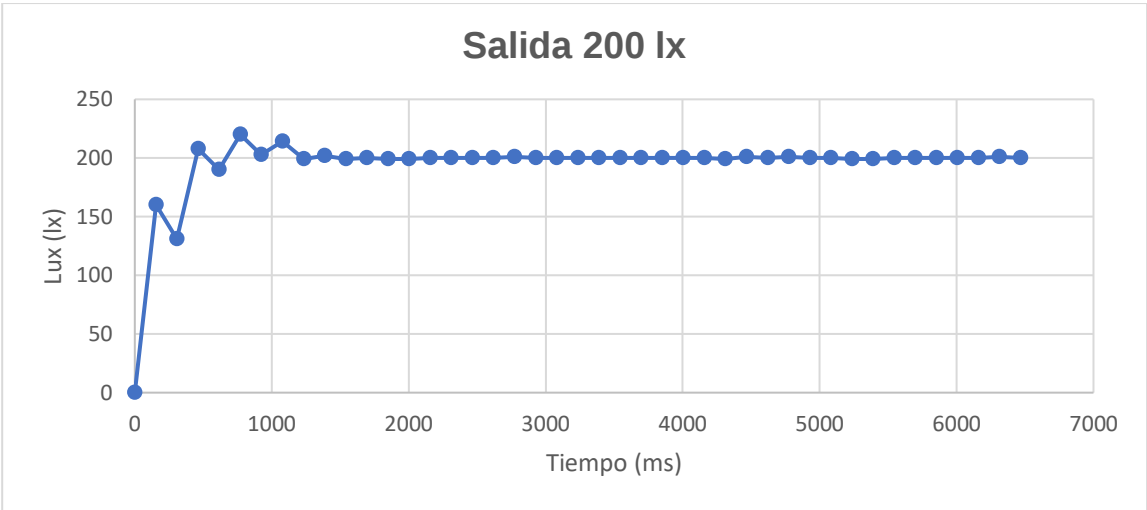
$$*error = \left(\frac{lect.luxómetro - lect.equipo}{lect.luxómetro} \right) * 100\%$$



Observaciones

Setpoint seleccionado	100lux
Tiempo transitorio	1900mS
Salida alcanzada en tiempo estable.	100lux
Máximo sobreimpulso	110lux
Medición en el luxómetro patrón.	99-100lux
Error calculado(*)	1%
Número de experimentos	10
Tiempo de prueba de estabilidad.	20min

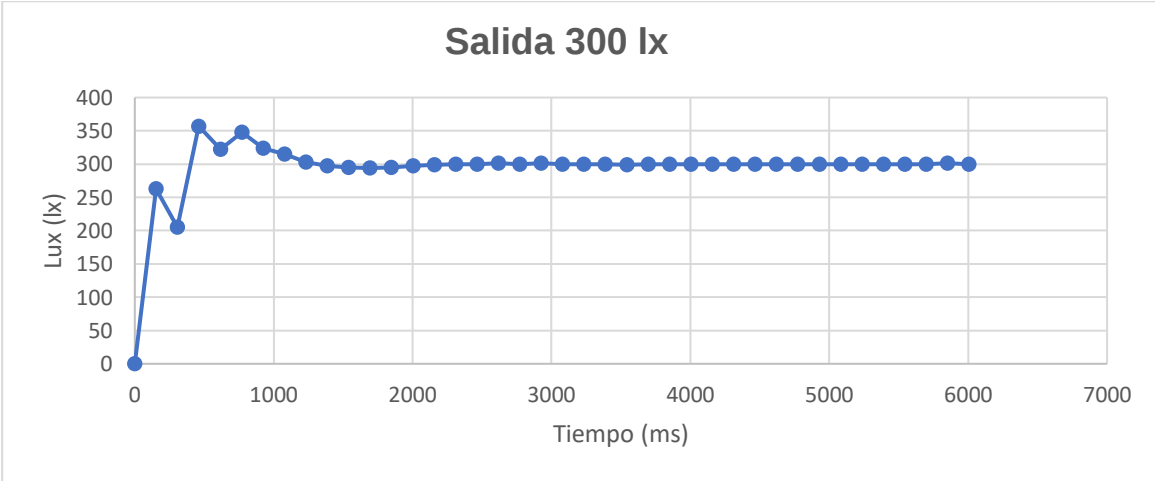
**error = $\left(\frac{\text{lect. luxómetro} - \text{lect. equipo}}{\text{lect. luxómetro}} \right) * 100\%$*



Observaciones

Setpoint seleccionado	200lux
Tiempo transitorio	1500mS
Salida alcanzada en tiempo estable.	200lux
Máximo sobreimpulso	225lux
Medición en el luxómetro patrón.	199lux
Error calculado(*)	0.5%
Número de experimentos	10
Tiempo de prueba de estabilidad.	20min

$$*error = \left(\frac{lect. \text{ luxómetro} - lect. \text{ equipo}}{lect. \text{ luxómetro}} \right) * 100\%$$

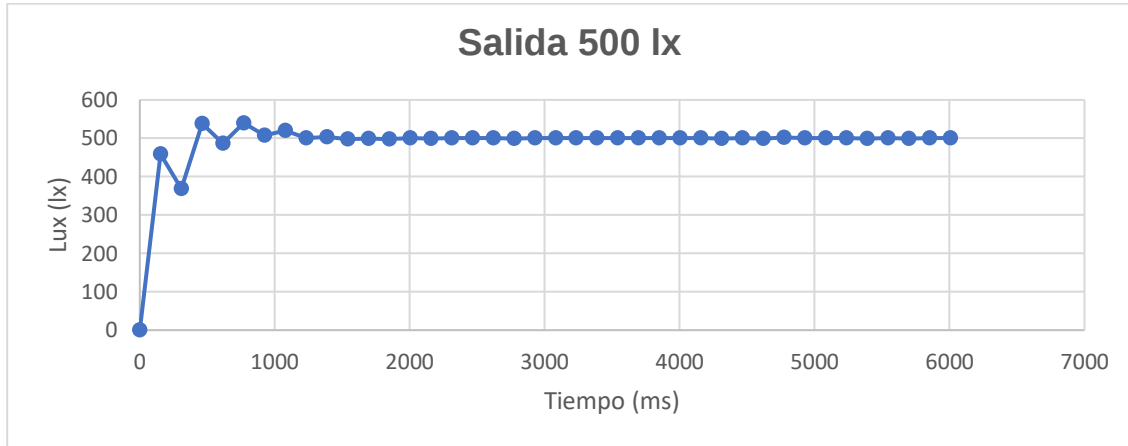


Observaciones

Setpoint seleccionado	300lux
Tiempo transitorio	1500mS

Salida alcanzada en tiempo estable.	300lux
Máximo sobreimpulso	360lux
Medición en el luxómetro patrón.	298lux
Error calculado(*)	0.67%
Número de experimentos	10
Tiempo de prueba de estabilidad.	20min

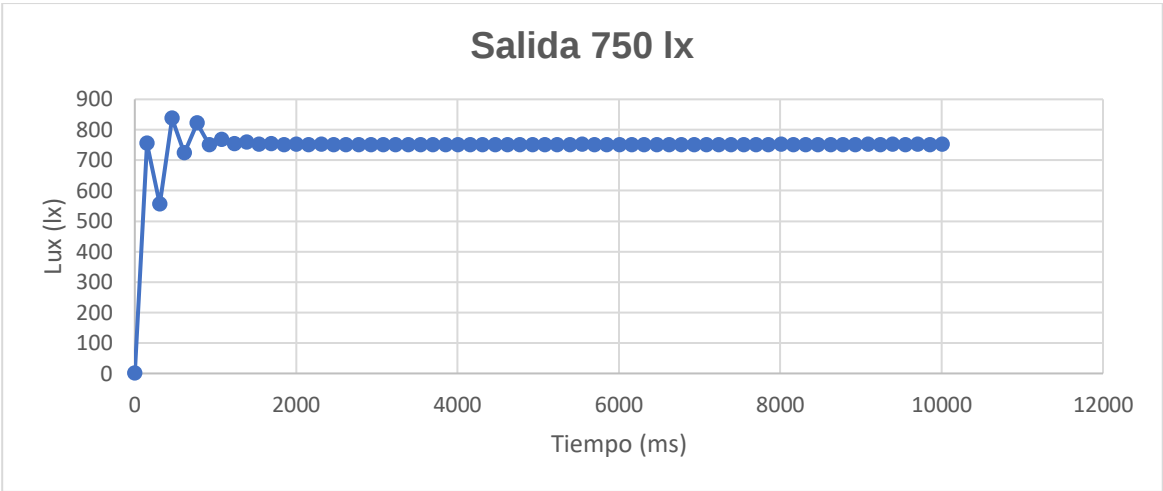
$$*error = \left(\frac{lect. luxómetro - lect. equipo}{lect. luxómetro} \right) * 100\%$$



Observaciones

Setpoint seleccionado	500lux
Tiempo transitorio	1200mS
Salida alcanzada en tiempo estable.	500lux
Máximo sobreimpulso	550lux
Medición en el luxómetro patrón.	499lux
Error calculado(*)	0.2%
Número de experimentos	10
Tiempo de prueba de estabilidad.	20min

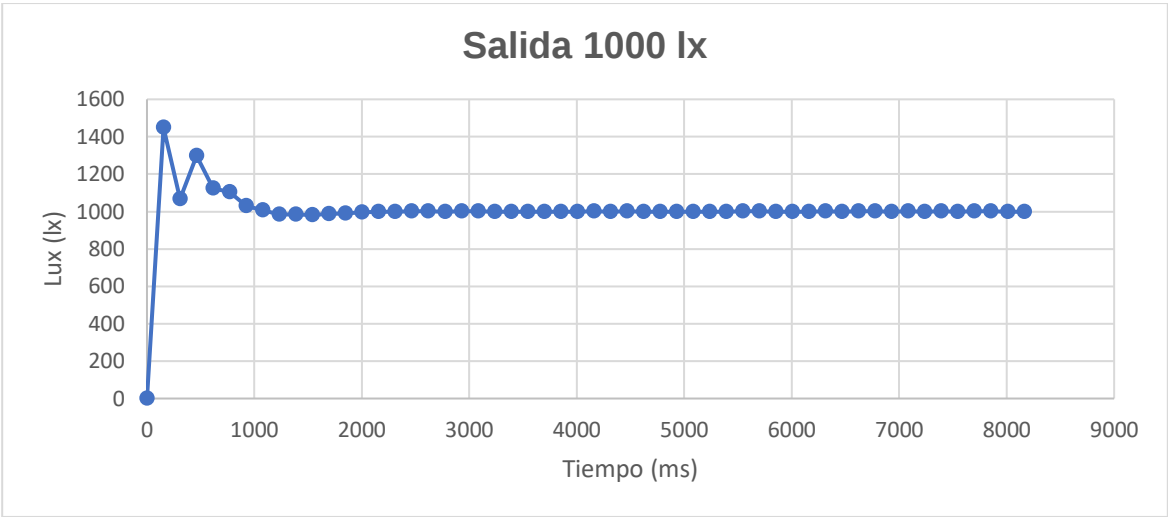
$$*error = \left(\frac{lect. luxómetro - lect. equipo}{lect. luxómetro} \right) * 100\%$$



Observaciones

Setpoint seleccionado	750lux
Tiempo transitorio	1200mS
Salida alcanzada en tiempo estable.	750lux
Máximo sobreimpulso	860lux
Medición en el luxómetro patrón.	749-750lux
Error calculado(*)	0.13%
Número de experimentos	10
Tiempo de prueba de estabilidad.	20min

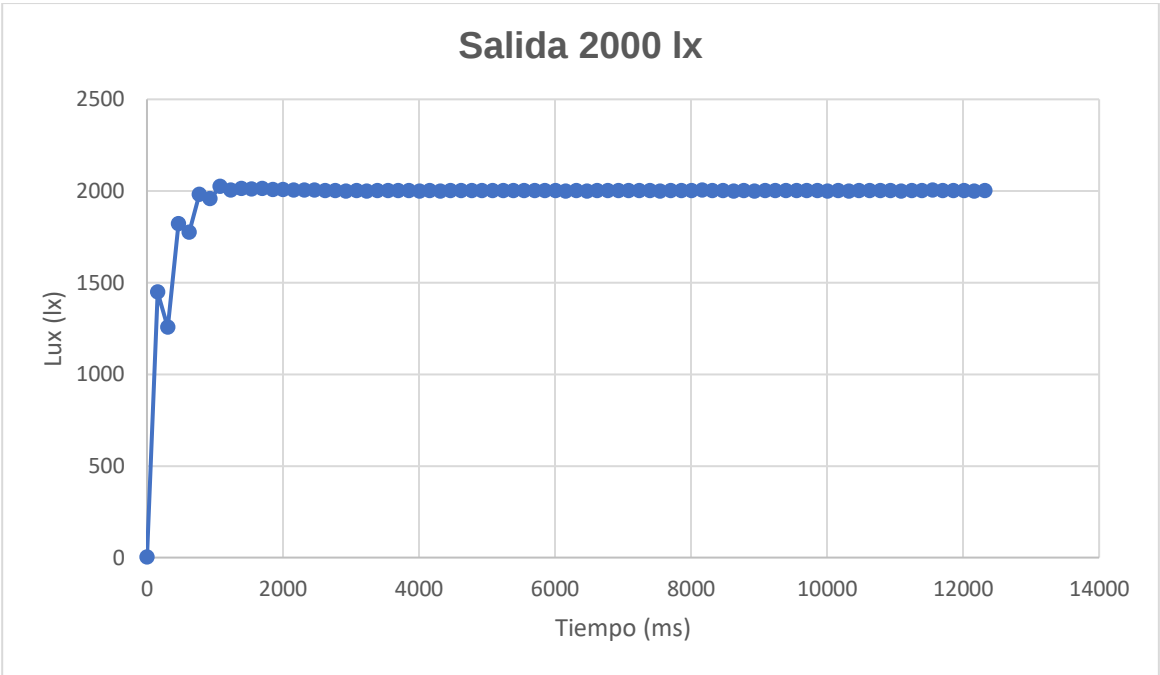
**error = $\left(\frac{\text{lect. luxómetro} - \text{lect. equipo}}{\text{lect. luxómetro}} \right) * 100\%$*



Observaciones

Setpoint seleccionado	1000lux
Tiempo transitorio	1300mS
Salida alcanzada en tiempo estable.	1000lux
Máximo sobreimpulso	1490lux
Medición en el luxómetro patrón.	999lux
Error calculado(*)	0.1%
Número de experimentos	10
Tiempo de prueba de estabilidad.	20min

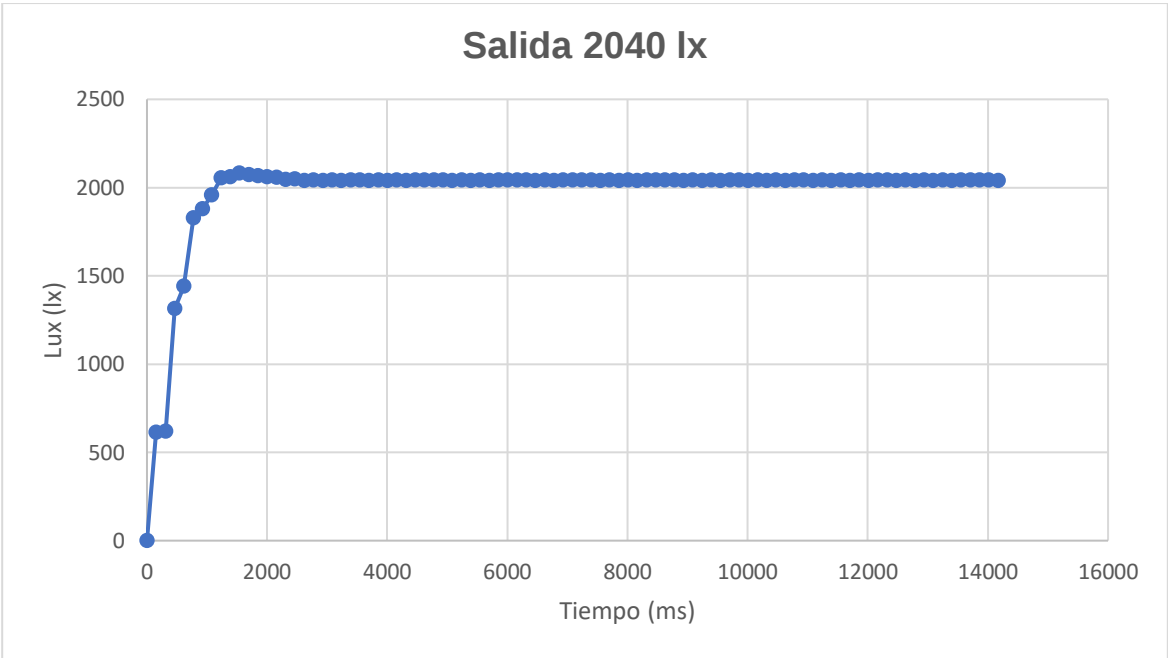
**error = $\left(\frac{\text{lect. luxómetro} - \text{lect. equipo}}{\text{lect. luxómetro}} \right) * 100\%$*



Observaciones

Setpoint seleccionado	2000lux
Tiempo transitorio	1600mS
Salida alcanzada en tiempo estable.	2000lux
Máximo sobreimpulso	2010lux
Medición en el luxómetro patrón.	1997ux
Error calculado(*)	0.15%
Número de experimentos	10
Tiempo de prueba de estabilidad.	20min

**error* = $\left(\frac{lect.luxómetro - lect.equipo}{lect.luxómetro} \right) * 100\%$



Observaciones

Setpoint seleccionado	2040lux
Tiempo transitorio	2100mS
Salida alcanzada en tiempo estable.	2040lux
Máximo sobreimpulso	2110lux
Medición en el luxómetro patrón.	2038ux
Error calculado(*)	0.09%
Número de experimentos	10
Tiempo de prueba de estabilidad.	20min

**error = $\left(\frac{\text{lect. luxómetro} - \text{lect. equipo}}{\text{lect. luxómetro}} \right) * 100\%$*

Bibliografía.

- [1] *LEY FEDERAL DEL TRABAJO.*
- [2] *LEY DE INFRAESTRUCTURA DE LA CALIDAD.* 2020.
- [3] NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-001-SCFI-2018, APARATOS ELECTRÓNICOS REQUISITOS DE SEGURIDAD Y METODOS DE PRUEBA, 2019.
- [4] *Norma Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008, Condiciones de iluminación en los centros de trabajo.* 2008.
- [5] Katsuhiko Ogata, *INGENIERÍA DE CONTROL MODERNA*, 5a ed. Madrid, España: PEARSON EDUCACION.
- [6] Ossenbrink H. 2003 Calibration procedures—state of the art. Proceedings of the 3rd WCPE (Osaka, Japan) 2177–2181.
- [7] Calibration of a pyranometer using a pyrhelimeter 1993 ISO 9846 Solar Energy
- [8] Jay L. Devore, *PROBABILIDAD Y ESTADÍSTICA PARA INGENIERÍA Y CIENCIAS*, 7ma ed, California Politechnyc State University, San Luis Obispo, CENGAGE Learning, 2008.
- [9] Gabriel Jaime Posada Hernández, *ELEMENTOS BÁSICOS DE ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA PARA EL ANALISIS DE DATOS*, Medellín, Colombia, Editorial Luis Amigo, 2016
- [10] Chi-Tsong Chen, *Linear System Theory and Design*, CBS College Publishing, Holt. Rinehart and Winston, 1984.
- [11] Hassan K. Khalil, *Nonlinear Systems*, Prentice Hall, 3 edition, 2001.
- [12] Steven M. Lavalle, *Planning Algorithms*, Cambridge University Press, 2006.
- [13] Rubén Salas-Cabrera, *Personal communication*, 2009-2015.
- [14] Tayfun Cimen, [www.researchgate.net/post/What does affine in the control mean when used to describe a system](http://www.researchgate.net/post/What_does_affine_in_the_control_mean_when_used_to_describe_a_system), 2015.