



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Diseño preliminar para la actualización del sistema de calibración de luxómetros del Laboratorio de Ensayos Eléctricos Industriales (LABE)

Carlos Gabriel Pedraza Toro

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Bogotá, Colombia
2020

Diseño preliminar para la actualización del sistema de calibración de luxómetros del Laboratorio de Ensayos Eléctricos Industriales (LÁBE)

Carlos Gabriel Pedraza Toro

Trabajo final presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magíster en Ingeniería - Automatización Industrial

Director:
Fernando Augusto Herrera León

Línea de Investigación:
Automatización Industrial

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Bogotá, Colombia
2020

Este trabajo de final de maestría es dedicado a mis padres, José Pedraza y Adriana Toro, a mis tías, María Vega, Bernarda Vega, Cecilia Vega, Rosmira Vega y Sofia Vega, y a mi hermana, María Pedraza; quienes con su amor y apoyo incondicional, me han permitido llegar a donde estoy y me han hecho quien soy

Agradecimientos

Este trabajo final de maestría es el resultado de un gran esfuerzo y dedicación, que no habría podido realizarse, de no haber contado con el apoyo y ayuda de una gran cantidad de personas, quienes intervinieron tanto directa como indirectamente, y a los cuales me gustaría agradecer de manera breve, ya que no alcanzarían las palabras para reconocer la ayuda tan valiosa que me han brindado.

En primer lugar, quiero dar gracias a Dios, por darme una familia tan maravillosa, la cual, ha llenado de amor y apoyo cada momento de mi vida, y así mismo, por darme tantas oportunidades en la vida, entre las cuales esta el poder haber estudiado en la Universidad Nacional de Colombia.

También quiero agradecer a mi familia, y principalmente a mis padres, José Pedraza y Adriana Toro, a mis tías, María Vega, Bernarda Vega, Cecilia Vega, Rosmira Vega y Sofia Vega, y a mi hermana, María Pedraza, quienes me han dado siempre su amor y apoyo en todos los aspectos de mi vida, y más específicamente, en el ámbito académico, en el cual nunca me faltó nada, gracias a ellos.

Así mismo, agradezco a todos los compañeros y amigos conocidos a lo largo de mi paso por la universidad, quienes con su ejemplo y conocimiento, me han hecho un mejor profesional y un mejor ser humano.

También, le agradezco al profesor Fernando Herrera, mi director de trabajo de grado, por todo lo que ha hecho por mí, incluso desde la época de pregrado, en donde como docente inculco en mí conocimientos de vital importancia para mi carrera, e igualmente me apoyo de manera económica, al permitirme ser su estudiante auxiliar durante un semestre, donde se fortalecieron aun más mis conocimientos de asignaturas fundamentales vistas en el pasado.

Finalmente, quiero agradecerle a todos los integrantes del Laboratorio de ensayos eléctricos industriales de la Universidad Nacional de Colombia (LBE), y en especial al área de metrología, por todo el apoyo y colaboración dados durante el desarrollo de este trabajo de grado.

Resumen

En busca de una continua mejora y modernización, el laboratorio de ensayos eléctricos industriales de la Universidad Nacional de Colombia (LABE), y más específicamente su división de metrología, tiene como proyecto la actualización de su proceso de calibración de luxómetros, siendo aquí, donde encontramos el objetivo de este trabajo final de maestría.

Para actualizar el proceso de calibración, a lo largo de este documento, se trabajan dos objetivos principales, uno es la automatización del desplazamiento de las diferentes partes móviles del sistema, y el otro, es el aumento del rango de iluminancia dentro del cual se puede calibrar en el LABE.

Con el fin de cumplir el primer objetivo, se diseñaron diversos controladores, PID, ON/OFF y por ubicación de polos, para la posterior evaluación de las mejoras que estos producirían en el sistema. Así mismo, y con el fin de ampliar el rango de iluminancia para calibración, se probará como estrategia, el uso de fuentes de luz con diferentes valores nominales de potencia, pero igual temperatura de color.

Finalmente, todos los resultados obtenidos serán validados realizando una comparación entre el sistema actual de calibración, y un sistema de calibración actualizado, agregando igualmente un análisis económico que permita considerar el aspecto financiero en la evaluación.

Palabras clave: Calibración, control regulatorio, control secuencial, iluminancia, luxómetro, metrología, modelado de caja negra.

Abstract

In search of continuous improvement and modernization, the laboratory of electrical industrial tests of the Universidad Nacional de Colombia (LABE), and more specifically its metrology division, has as a project the update of its lux meter calibration process, being here, where we found the objective of this final master's work.

To update the calibration process, throughout this document, two main objectives are worked, one is the automation of the displacement of the different moving parts of the system, and the other is the increase of the range of illuminance within which the LABE can calibrate.

In order to meet the first objective, various controllers will be designed, PID, ON / OFF and by pole location, for the subsequent evaluation of the improvements that these would produce in the system. Likewise, and in order to broaden the illuminance range for calibration, the use of light sources with different nominal power values, but the same color temperature, will be tested.

Finally, all the results obtained will be validated by making a comparison between the current calibration system and an updated calibration system, adding an economic analysis that allows considering the financial aspect in the evaluation.

Keywords: Black box modeling, calibration, illuminance, luxmeter, metrology, regulatory control, sequential control.

Contenido

Agradecimientos	vii
Resumen	ix
1 Introducción	2
2 Identificación del problema	3
3 Solución	9
3.1 Aumento del rango de calibración	9
3.2 Control de posición del panel de pruebas	11
3.3 Control de posición de la fuente de luz	15
3.3.1 Controlador ON/OFF	15
3.3.2 Modelado de la planta	17
3.3.3 Controlador PID	25
3.3.4 Controlador por ubicación de polos	32
4 Implementación y evaluación	43
4.1 Implementación	43
4.2 Evaluación	49
5 Conclusiones y recomendaciones	52
Bibliografía	53

1 Introducción

La Universidad Nacional de Colombia, cuenta con diversos laboratorios, enfocados en varias ramas del conocimiento; este es el caso del Laboratorio de Ensayos Eléctricos Industriales (LABE), el cual, además de sus trabajos en investigación, cuenta con un componente empresarial, prestando varios servicios de calibración y ensayos eléctricos.

Uno de los servicios prestados por el LABE, y más específicamente, por su área de metrología, es la calibración de luxómetros, elementos empleados en la medición de iluminancia [10], el cual consta de una bombilla móvil, caracterizada para obtener una temperatura de color de 2856K, y un luxómetro patrón usado como referencia de comparación con los luxómetros a calibrar. Dicho proceso de calibración, ha tenido diversas mejoras y actualizaciones con el transcurrir de los años, pasando de ser un proceso completamente a manual, donde un operario desplazaba directamente la fuente de luz y los luxómetros, hasta ser un proceso, donde los desplazamiento se realizan con motores, controlados desde una consola.

Sin embargo, el área de metrología del LABE, tiene el proyecto de continuar con la actualización del proceso de calibración, trabajando en diferentes aspectos, como la reducción del error en las medición, el aumento del rango de calibración y la disminución de los tiempos de operación, entre otros, y es aquí donde se encuentra el nicho de operación este trabajo final de maestría, enfocado en dos objetivos, el aumento del rango de iluminancia dentro del que se puede calibrar en el laboratorio y la automatización del desplazamiento de las diferentes partes móviles del banco de pruebas.

Para el aumento del rango de calibración, se trabajará una estrategia considerada por el área de metrología desde hace un tiempo, pero que no había sido probada ni desarrollada, la cual consiste en el uso de bombillas del mismo tipo, y con la misma temperatura de color, a la usada actualmente, pero con valores nominales de potencia diferentes; mientras, para la automatización, se diseñarán diversos controladores, tanto secuenciales como regulatorios, y se validarán algunos dispositivos para una futura implementación.

Finalmente, se evaluarán los resultados obtenidos, realizando una comparación entre diversos parámetros, como el rango de calibración y el tiempo de operación, entre otros; y se complementará, con un análisis económico, bajo ciertas consideraciones, que permitiera determinar la viabilidad del proyecto a nivel financiero.

2 Identificación del problema

Con el fin de llevar a cabo un diseño preliminar para la actualización del sistema de calibración de luxómetros del LABE, se optó por llevar a cabo como metodología de trabajo, la descrita en los siguientes pasos:

1. Identificar: Donde expondremos claramente como funciona el sistema de calibración actual, con el fin de conocer los aspectos mejorables. Manejaremos su desarrollo en el capítulo 2, identificación del problema.
2. Idear: Ya conociendo los aspectos mejorables del proceso de calibración, determinaremos sobre cuales nos enfocaremos, y cual sería la manera de abordarlos, usando las herramientas aprendidas en el transcurso de la maestría.
3. Diseñar: Tras tener una idea general sobre los aspectos a mejorar y el cómo mejorarlos, se realizará el diseño de las herramientas encargadas de hacer realidad estas mejoras. Esta sección, junto a la de idear, se tratarán en el capítulo 3, solución.
4. Prototipar: Tras la obtención de los diseños, se plantearán diferentes dispositivos en los cuales poder implementarlos, teniendo en cuenta sus ventajas y desventajas. Describiremos la información obtenida en el capítulo 4, implementación.
5. Evaluar: Finalmente, se validarán los resultados obtenidos, mediante una comparación entre el sistema de calibración actual, y el sistema de calibración actualizado, logrado tras la implementación de las diferentes mejoras propuestas, generando así una serie de conclusiones y algunas recomendaciones para futuras actualizaciones. Esta sección la desarrollaremos en los capítulos 5, análisis, y 6, conclusiones y recomendaciones.

Para empezar con la primera etapa, identificar, es necesaria una revisión breve de algunos términos básicos, pero fundamentales, que serán usados a lo largo de documento, como son:

Luxómetros

Los luxómetros, o iluminancímetros, son instrumentos para medir la iluminancia [10], la cual se define como la relación del flujo luminoso sobre un área iluminada determinada, y su unidad de medida es el “lux” [4]. Estos dispositivos existen tanto digitales como análogos, aunque estos últimos son muy poco utilizados en la actualidad.

El tema de medir la cantidad de luz en un espacio comenzó a ser relevante con la creación de la fotografía, debido a la importancia e impacto que tiene la luz en una escena. Sin embargo, en un comienzo no se contaba con dispositivos capaces de dar una medida de la cantidad de luz de una manera precisa, siendo además, portátiles. Pero esto cambio con la aparición de las celdas fotovoltaicas, entre finales del siglo XIX y principios del siglo XX, las cuales convierten una cierta cantidad de luz (fotones) en una señal eléctrica [12].

Estas celdas, permitieron la creación de fotómetros de mano, como el diseñado por John Thomas Rhamstine, los cuales podían medir la cantidad de luz incidente en un punto; y ya a mediados del siglo XX, se les agregaron dispositivos, como la semiesfera de Norwood, para poder medir no solo luces frontales sino también las laterales, aumentando así la precisión de las medidas [13].

Los luxómetros han tenido diversas aplicaciones en diversos campos a través del tiempo, como:

- En fotografía, donde es de vital importancia conocer la cantidad de luz incidente sobre una escena [14].
- En el diseño de espacios (arquitectura), donde el saber cómo y dónde ubicar luminarias ayuda tanto a mejorar la calidad de espacios, como cuartos o fachadas, como al ahorro de energía.
- En la verificación de la correcta iluminación en espacios laborales, como una oficina o una fábrica, con el fin de lograr un mayor desempeño en los trabajadores [18].
- Y, ya más recientemente, en medicina y astronomía, donde se emplean luxómetros para generar índices de contaminación lumínica, la cual afecta los ritmos circadianos de los seres vivos [2] y dificulta la visualización de diferentes cuerpos celestes [3].

Calibración de luxómetros

Una calibración, es el conjunto de operaciones que establece, en base a unos estándares y en condiciones específicas, la relación existente, entre una indicación y el resultado de una medición [11]. Para el caso de los luxómetros, existen diversos métodos de calibración, aunque a nivel comercial, se usan principalmente dos: El método directo y el método comparativo.

- Método directo: En el cual, se coloca una bombilla de referencia, normalmente una lampara incandescente tipo FEL con una temperatura de color de 2856 K, como recomienda la Comisión Internacional de iluminación (CIE, por sus siglas en francés), en un soporte, y sobre un riel móvil, perfectamente alineado con la bombilla, se coloca el luxómetro a calibrar.

En este caso, se debe poder determinar con suficiente precisión la distancia entre la bombilla de referencia y el luxómetro a calibrar, para así, al saber el valor de intensidad luminosa de la bombilla, solo sea necesario variar la distancia para conseguir diferentes valores de iluminancia, los cuales, posteriormente serían comparados con los registrados en el luxómetro [17]. Finalmente, los resultados obtenidos son pasados por un tratamiento estadístico, para así determinar el error.

- Método comparativo: Por otra parte, en el método comparativo, el cual, es propuesto por el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de Estados Unidos (NIST, por sus siglas en ingles), se hace uso igualmente de una bombilla de referencia, tipo FEL, a una temperatura de color de 2856 K, siguiendo la recomendación de la CIE, ubicada en un riel móvil, perfectamente alineado con un soporte, sobre el cual, se colocaran entre uno y cinco luxómetros de referencia y el luxómetro a calibrar.

Así, a diferentes distancias, se toman varias muestras tanto con los luxómetros de referencia como con el luxómetro a calibrar; para luego, comparando los valores obtenidos, y después de considerar las posibles fuentes de incertidumbre, se pueda determinar el error correspondiente [15].

Laboratorio de ensayos eléctricos industriales (LABE)

El LABE hace parte del departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia y entró en funcionamiento en 1998. Este laboratorio presta servicios calibración y ensayos eléctricos a materiales y equipos, tanto para el sector industrial, como para la investigación. Además, el LABE sirve como sitio de formación teórico-práctica para estudiantes, tanto de pregrado como de posgrado [8, 9].

El área de metrología del LABE, implementa, para la calibración de luxómetros, el método comparativo, estandarizado por el NIST, haciendo uso de un solo luxómetro de referencia, o luxómetro patrón, el LMT B520, y reemplazan la lampara tipo FEL, por una bombilla halógena, de 50W, con características metrológicas adecuadas (estabilidad térmica y estabilidad ante pequeños cambios de la alimentación) de tal manera que cumpla con la condición de una temperatura de color de 2856 K. El laboratorio posee la acreditación para calibrar luxómetros entre los 125lx y los 1000lx. [6].

el proceso de calibración de luxómetros del LABE, consiste en:

1. Determinan los puntos de iluminancia sobre los cuales se quiere calibrar (son determinados por el cliente).
2. Se enciende la fuente de luz, la bombilla halógena de 50W, alimentándola con los valores de tensión y corriente correspondiente, logrando alcanzar la temperatura de color de 2856 K, mediante una fuente regulada; tras esto, se esperan 30 minutos, como mínimo, hasta la estabilización de su temperatura en el mismo valor del cuarto, el cual cuenta con un control de temperatura propio.
3. Se realiza el medición de cero del luxómetro patrón, cubriendo perfectamente sensor, y el ajuste de cero electrónico del luxómetro a calibrar, si cuenta con esta opción el equipo.
4. Se desplaza el panel de pruebas, mostrado en la figura **2-1**, hasta el extremo derecho, dejando el luxómetro patrón totalmente de frente a la fuente de luz, usando como referencia un láser, apuntado desde el centro de la fuente de luz hasta el centro del sensor del luxómetro. El desplazamiento de este panel se realiza de manera manual por un operario.
5. Se comienza a mover la fuente de luz, montada sobre un móvil, el cual se desplaza sobre un riel, representado en la figura **2-2**, y se va verificando la medida de iluminancia que muestra el luxómetro patrón, para detenerse una vez se alcanza el punto de iluminancia sobre el cual se quiere calibrar. El desplazamiento de este móvil se realiza mediante la activación de un motor de DC, manejado desde una consola, igualmente por un operario.

6. Se desplaza el panel de pruebas hasta el extremo izquierdo, dejando el luxómetro a calibrar totalmente de frente a la fuente de luz, utilizando el mismo sistema de láser mencionado en el punto 4, se esperan unos segundos la estabilización el valor de iluminancia medido y el operario toma el dato del valor mostrado por el luxómetro a calibrar.
7. Se repiten los pasos 3, 4, 5 y 6, un total de cinco veces, generando así, cinco muestras del valor medido por el luxómetro a calibrar, en un punto de iluminancia específico. Este proceso se realiza por cada punto de iluminancia escogido por el cliente.
8. Finalmente, las muestras obtenidas son pasadas por un tratamiento estadístico, para determinar así el porcentaje de error del luxómetro a calibrar.

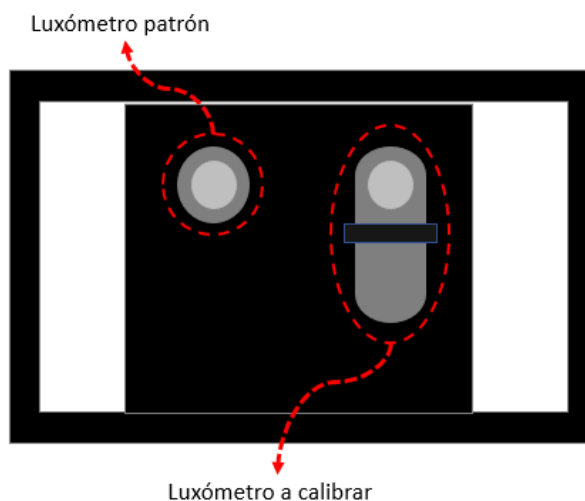


Figura 2-1: Vista frontal del panel de pruebas, esquemático

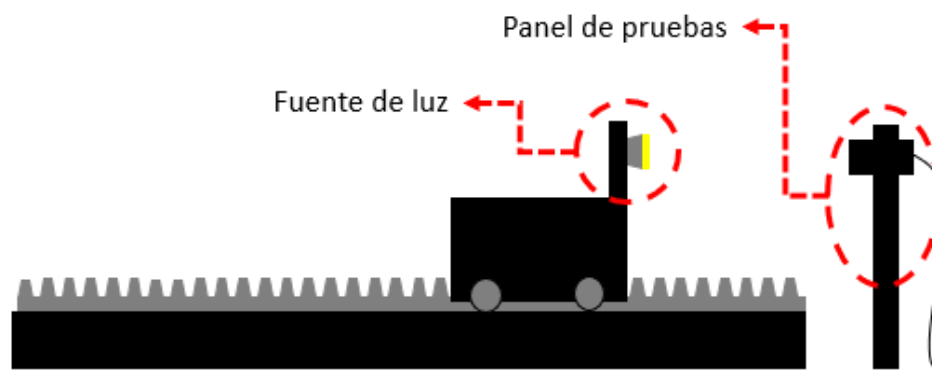


Figura 2-2: Vista lateral del banco de pruebas, esquemático.

Aunque el sistema de calibración de luxómetros del LABE es completamente funcional y cuenta con la correspondiente acreditación, se evidencia que hay algunos aspectos en los cuales se puede mejorar, como:

- En el punto 4, donde el desplazamiento del panel de pruebas se realiza de manera manual, generando un error en su ubicación.
- En el punto 5, donde al desplazar la fuente de luz mediante el movimiento de un motor, la precisión del valor de iluminancia obtenido, y el tiempo que tome llegar a este, dependerá totalmente de la habilidad del operario para activar y desactivar el motor mediante los pulsadores de la consola.
- En el punto 6, donde el registro del valor medido por el luxómetro a calibrar se toma de manera manual, para luego ser pasado a una tabla, lo cual implica más trabajo para el operario.
- El rango de iluminancia sobre el cual puede calibrar el LABE, el cual podría aumentarse.

Tras la identificación de los aspectos a mejorar, descritos anteriormente, se comienza con la revisión y evaluación de opciones que permitan llegar a esta mejora, haciendo uso de los conocimientos y herramientas aprendidos en el transcurso de la maestría en automatización industrial.

3 Solución

Tras evidenciar los aspectos de mejora del sistema actual de calibración de luxómetros del LABE, se propusieron dos soluciones:

1. La automatización del desplazamiento del panel de pruebas y de la fuente de luz, lo que permitiría reducir el error producido por la intervención humana, los tiempos de operación, el desgaste de la bombilla halógena y de la piezas móviles, y además, permitiría el manejo por un solo operario. Adicionalmente, se incluiría alguna herramienta para tomar los datos del luxómetro a calibrar de manera automática.
2. Aumentar el rango dentro del cual puede calibrar el LABE, tanto en la parte superior a los 1000lx, como en la inferior a los 125lx.

Por otra parte, al ver el proyecto de una manera general y como se trabajarían las soluciones propuestas, se establecieron dos condiciones: En primer lugar se debería buscar intervenir lo menos posible en la estructura general del banco de pruebas para calibración de luxómetros, pues al tratarse de una actividad económica del LABE, el área de metrología no puede permitirse tenerlo inoperativo por periodos prolongados de tiempo; y en segundo lugar, se debería trabajar inicialmente en la solución del aumento del rango de calibración del LABE, ya que dependiendo de la estrategia implementada, el diseño de la automatización se verá afectado.

3.1. Aumento del rango de calibración

Actualmente, el LABE hace uso de una bombilla halógena de 50W, caracterizada para cumplir con la condición de temperatura de color de 2856 K; y con la cual, se alcanzan valores de iluminancia entre 125lx y 1000 lx, sin embargo, debido a la cantidad de tiempo de operación acumulada por esta bombilla, se ha producido un desgaste natural, el cual termina afectando negativamente el rango de calibración.

Por este motivo, y con el objetivo de aumentar el rango de calibración, el LABE ya tenía como proyecto hacer pruebas usando bombillas halógenas, pero con diferentes valores nominales de potencia. Es así, que se procede a realizar una búsqueda en el mercado, de bombillas halógenas, capaces de manejar una temperatura de color cercana a los 2856 K, una forma

igual a la de la bombilla se uso actual, MR16, una base igual para todas y valores nominales de potencia diferentes entre sí. Tras esta búsqueda, se obtienen bombillas de 10 W, 20 W, 50 W y 75 W, con las siguientes características.

Potencia nominal (W)	Tensión (v)	Forma	Base	Temperatura de color (K)
10	12	MR16	GU5.3	3000
20	12	MR16	GU5.3	2925
50	12	MR16	GU5.3	2925
75	12	MR16	GU5.3	3050

Tabla 3-1: Bombillas seleccionadas para pruebas de aumento de rango

A continuación, y con el apoyo del equipo de fotometría del LABE, se realiza la caracterización de las bombillas, determinado así, el valor de tensión exacto, con el cual cada una de las bombillas alcanza la temperatura de color de 2856K. Se obtuvieron los siguientes resultados:

Potencia nominal (W)	Tensión (v)	Corriente (A)	Potencia (W)	Temperatura de color (K)
10	14.342 ± 0.03	0.9526 ± 0.0017	13.661 ± 0.024	2857 ± 11
20	9.666 ± 0.02	1.5032 ± 0.0046	14.580 ± 0.060	2857 ± 11
50	10.480 ± 0.02	3.9489 ± 0.0072	41.390 ± 0.090	2857 ± 11
75	9.666 ± 0.02	5.6160 ± 0.0094	54.300 ± 0.200	2855 ± 11

Tabla 3-2: Tensiones y corrientes necesarias para lograr la temperatura de color, muy cercana a los 2856 K, con cuatro bombillas de diferente potencia nominal; tomado de [7]

Usando los datos de la tabla **3-2**, se proceden a realizar pruebas sobre el banco de calibración, bajo el siguiente procedimiento:

1. En primer lugar, se ubica la bombilla a probar en el soporte correspondiente, sobre el móvil, y se alimenta con la tensión determinada en la tabla **3-2**, mediante un fuente regulada.
2. A continuación, se da una espera de 30 minutos, para la estabilización de la temperatura de la bombilla.
3. Posteriormente, se verifica la medida de cero lux del luxómetro patrón, tapando su sensor, para no permitir el ingreso de ninguna luz.

4. Luego, se ubica la fuente de luz en el extremo final del riel, el punto más alejado al panel de pruebas, y se anota la medida de iluminancia dada por el luxómetro patrón.
5. A continuación se repite el paso 3.
6. Finalmente, se ubica la fuente de luz en el extremo contrario del riel, el más cercano al panel de pruebas, y se anota la medida de iluminancia entregada por el luxómetro patrón.

Este procedimiento se realiza 4 veces, con cada bombilla, y se saca un promedio en cada posición, obteniendo los siguientes resultados.

Bombilla	Límite menor de iluminancia (lx)	Límite superior de iluminancia (lx)
10W	31.79	341.8
20W	17.40	176.4
50W	129.7	1320
75W	430.6	675.1

Tabla 3-3: Valores máximos y mínimos de iluminancia obtenidos con las bombillas de 10W, 20W, 50W y 75W.

Es así, como tras las pruebas, se evidencio que al usar en conjunto las bombillas de 20W y de 50W, se podría aumentar el rango de calibración, cambiándolo de 125lx a, aproximadamente, 18lx, y de 1000lx a 1320lx, logrando así un aumento tanto en el límite superior, como en el límite inferior. Por otra parte, las bombillas de 10W y 75W, serían descartadas al no aportar ningún aumento al rango, generando valores de iluminancia alcanzable con las bombillas de 20W y 50W en conjunto.

3.2. Control de posición del panel de pruebas

Actualmente, el desplazamiento del panel de pruebas, en el cual van ubicados el luxómetro patrón, de referencia LMT B520, y el luxómetro a calibrar, se realiza de manera manual, y la forma de ubicar cada luxómetro directamente al frente de la fuente de luz es apuntando un láser desde el centro de la fuente de luz, hasta el centro del sensor del luxómetro.

Sin embargo, la estrategia del láser presenta algunos inconvenientes, primero, el alineamiento del haz de luz del láser con el centro del sensor del luxómetro, lo realiza el operario, desplazando el panel de pruebas hasta evidenciar que el láser toca una marca previamente hecha como el centro, dejando la ubicación final en la apreciación visual del operario; y en

segundo lugar, el láser no permanece fijo en el banco de pruebas, esta instalado sobre una estructura, la cual se ajusta al riel al momento de realizar cada prueba y luego es retirada, el constante manejo de esta estructura, termina generándole un desgaste mecánico y afectando directamente la correcta posición del láser.

Tras evidenciar esto, y con el fin de disminuir el error del sistema provocado por los elementos ya mencionados, se comenzó el diseño de un controlador encargado de automatizar el desplazamiento del panel pruebas. Para este diseño, se evaluaron en un inicio dos posibilidades, un control secuencial y un control regulatorio.

El control regulatorio permitiría un manejo de tiempos de asentamiento y sobrepicos, pero su implementación implicaría el uso de sensores analógicos de distancia, los cuales necesitarían una inversión importante de dinero y para su instalación, se necesitaría intervenir fuertemente la estructura del banco de pruebas, lo que estaría en contra de una de las consideraciones establecidas al principio del proyecto. Por otra parte, el control secuencial, generaría un comportamiento no lineal, pero se podría implementar con sensores lógicos, más económicos en comparación a los analógicos y con una instalación más simple, donde no serían necesarias modificaciones fuertes del banco de pruebas.

Tras optar por el control secuencial, se plantea la instalación de un láser en la parte final del riel, como se muestra en la figura **3-1**, la parte más alejada del panel pruebas, y ajustarlo de tal manera que su haz de luz pase justo sobre un agujero ubicado en la parte superior de la fuente de luz. Así mismo, se ubicaría dos sensores láser en el panel de pruebas, uno sobre el luxómetro patrón y otro sobre el luxómetro a calibrar. Adicionalmente se ubicaría una cámara, apuntada hacia el luxómetro a calibrar, encargada de tomar un registro fotográfico de los datos medidos. Finalmente, sería necesaria la instalación de un motor, cuya tarea sería el desplazamiento del panel de pruebas.

Para este control se utilizará en todo momento el valor de iluminancia medido por el luxómetro patrón, para lo cual, se utilizaría la salida digital RS232 que tiene este. Dicha salida envía, cada 0.4 segundos, y en formato ASCII, un bloque de texto con información del valor de iluminancia medido en ese momento por el luxómetro patrón. Este texto es acondicionada y transformado en un valor numérico, mediante líneas de código, obteniendo, al final, una variable para interactuar matemáticamente con el controlador diseñado.

En la figuras **3-1** y **3-2** se describe la instalación de los sensores láser en el panel de pruebas, los dos puntos rojos, y en donde se ubicaría el láser, al final del riel.

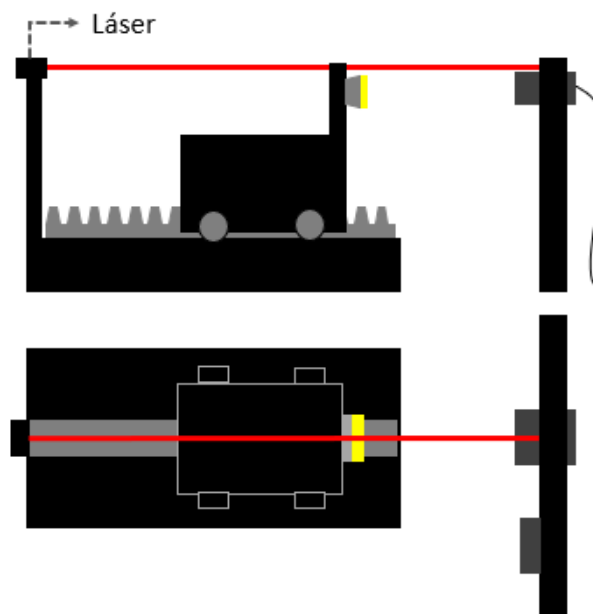


Figura 3-1: Vista lateral y superior del banco de pruebas con láser instalado, esquemático.

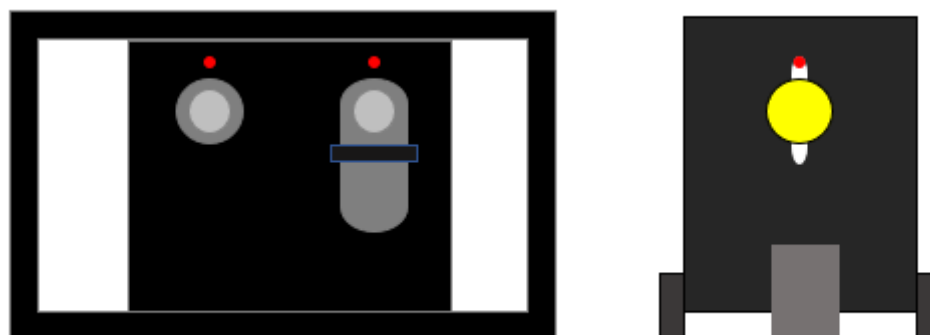


Figura 3-2: Vista frontal del panel de pruebas con sensores láser instalados, y vista frontal de la fuente de luz, con el haz láser pasando por encima, esquemático.

Ya con los sensores y actuadores instalados, como se describe en las figuras, el control realizaría el siguiente algoritmo, descrito igualmente con el diagrama de flujo de a figura **3-3**

1. El panel de pruebas se desplazará, mediante un motor, hasta que el sensor láser 1, ubicado sobre el luxómetro patrón, se active, en ese momento, se detendrá.
2. A continuación, se tomará una muestra del valor de iluminancia medido por el luxómetro patrón cada 0.4 segundos, y una vez 10 muestras sean iguales, se considerará que la fuente de luz esta fija en un punto sobre el cual se desea calibrar.

3. Luego, tras confirmar que la fuente de luz esta fija, el panel se desplazará en el sentido contrario, hasta que el sensor láser 2, ubicado sobre el luxómetro a calibrar, se active, en ese momento, se detendrá.
4. Posteriormente, se esperaran 20 segundos, para que se esta estabilice la medida de iluminancia del luxómetro a calibrar.
5. Finalmente, se tomará una foto de la medida de dicho luxómetro, y se guardará en una carpeta, para su posterior registro y análisis.

Este proceso se realizará 5 veces por cada punto de calibración que desee el cliente.

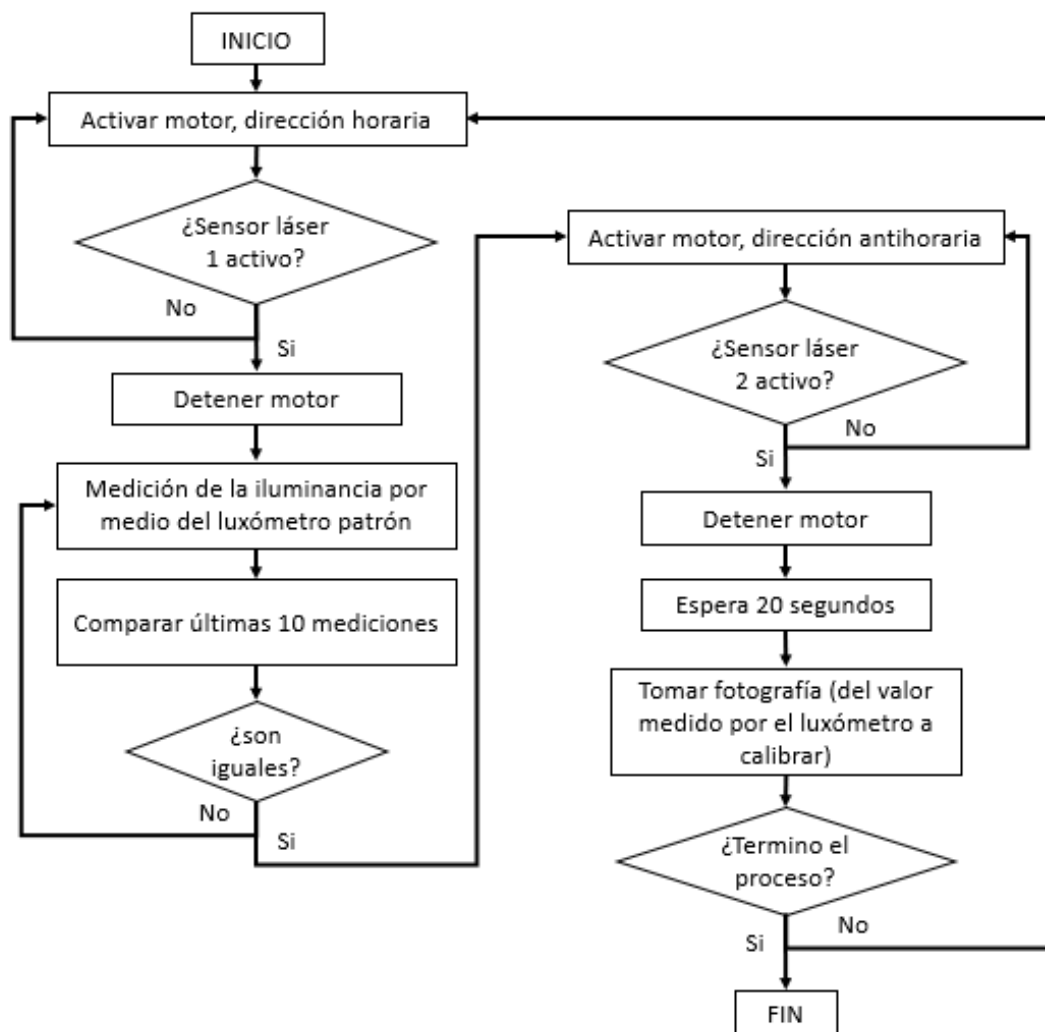


Figura 3-3: Diagrama de flujo, control secuencial.

3.3. Control de posición de la fuente de luz

Actualmente, en el sistema de calibración de luxómetros del LABE, el desplazamiento de la fuente de luz se realiza mediante un motor, el cual, mueve la bombilla halógena, acoplada en un móvil, sobre un riel. Un operario, usando dos pulsadores en una consola, dirige el movimiento del motor en un sentido u otro, mientras va verificando el valor de iluminancia que mide el luxómetro patrón; una vez el valor medido es igual a un punto de calibración, determinado por el cliente, detiene el motor.

Este modo de desplazamiento puede presentar algunos inconvenientes, en primer lugar, al intentar ubicar valores de iluminancia cada vez más grandes, y considerando que la iluminancia en función de la distancia es no-lineal, se vuelve más complicado fijarlo, ya que, al acercarse la fuente de luz al luxómetro patrón, la iluminancia varía más rápidamente de un punto a otro; y por otra parte, la efectividad de esta etapa, depende totalmente de la habilidad del operario para encontrar el punto de iluminancia para calibrar, haciendo uso, únicamente de dos pulsadores, que según la calidad de estos, pueden afectar en la velocidad de respuesta. Sumando todo esto, al final, se ven afectados directamente los tiempos que toma hacer la prueba.

Teniendo en cuenta esta problemática, se propuso la implementación de un controlador, capaz de manejar la ubicación de la fuente de luz, usando como referencia la iluminancia medida por el luxómetro. En este caso, se validan nuevamente dos caminos, un control secuencial y un control regulatorio, y teniendo en cuenta que ambos podrían ser implementados sin necesidad de intervenir fuertemente el banco de pruebas, se decide diseñar ambos tipos, y tener así, en un futuro, diversas opciones de control para ser evaluadas, en función del máximo beneficio del LABE.

Como control secuencial se trabajará un control ON/OFF, y como control regulatorio, se pondrán un control PID y un control por ubicación de polos, siendo necesario para estos dos últimos una representación matemática del proceso, es decir, una caracterización del sistema.

3.3.1. Controlador ON/OFF

El control ON/OFF es un tipo de control secuencial, que se caracteriza por su sencilla implementación, al poder ser programado en varios tipos de lenguajes, como Python, C, Ladder o GRAFSET, y en gran variedad de dispositivos, como RaspberryPI o PLC, adicionalmente, el control ON/OFF puede adaptarse a variaciones en el sistema, como por ejemplo un aumento en la distancia recorrida por la fuente de luz, ya que al no tener retroalimentación, el buscará mantener su referencia sin considerar que está haciendo la planta.

Sin embargo, también presenta desventajas, como que tiende a generar oscilación en torno a la referencia, tema que puede ser corregido al implementarse una correcta programación, o que su comportamiento es no-lineal, lo que hace muy difícil predecir su comportamiento matemáticamente.

La operación que realizaría el controlador sería la siguiente:

1. En primer lugar, se establece el valor de referencia, “ r ”, el cual es un una medida de iluminancia sobre la cual se quiere calibrar.
2. A continuación, se verifica la medida de iluminancia que esta tomando el luxómetro patrón, esto se realiza tomando la salida digital que genera el luxómetro LMT B50, en formato ASCII, se realiza el correspondiente tratamiento y se transforma en un valor numérico, “ y ”.
3. Posteriormente, se resta el valor medido de iluminancia del valor de referencia, obteniendo una variable “ e ”.

$$e = r - y$$

4. Si “ e ” es negativo, diferente de cero, implica que el valor medido por el luxómetro es mayor a la referencia, en este caso se activa el motor, alejando la fuente de luz del luxómetro patrón. Si “ e ” es positivo, diferente de cero, implica que el valor medido por el luxómetro es menor a la referencia, en este caso se activa el motor, acercando la fuente de luz del luxómetro patrón. Finalmente, si “ e ” es igual a cero, implica que el valor medido y la referencia son iguales, por lo que deja el motor bloqueado, quieto.

Este proceso se realiza en bucle de manera automática hasta que el error, “ e ”, sea igual a cero, momento en que se detiene el motor y se da paso al control del panel de pruebas, para que realice su trabajo. El proceso se describe igualmente mediante un diagrama de flujo, mostrado a continuación.

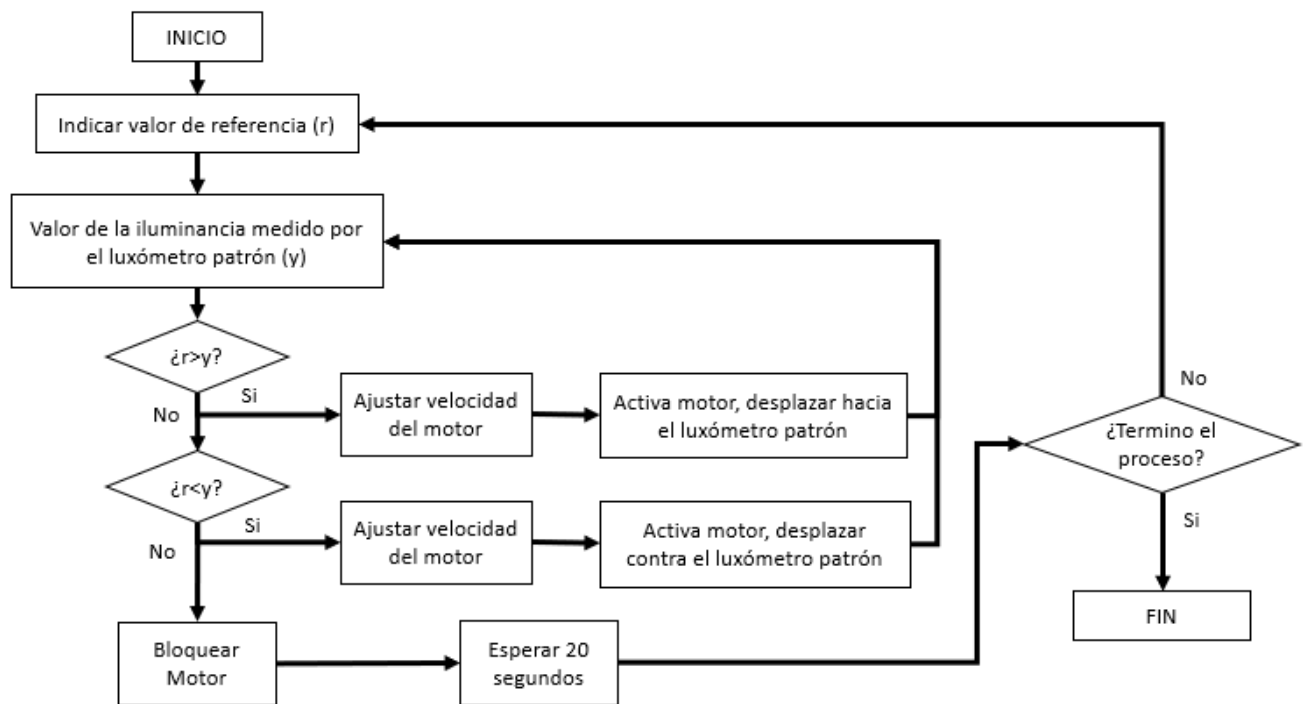


Figura 3-4: Diagrama de flujo, control ON/OFF.

Finalmente, para solucionar el problema de la oscilación, que genera este tipo de controlador, se debe realizar, al momento de programar, una ajuste en la velocidad del motor, de tal forma que al hacerse el valor absoluto de “ e cada vez más pequeño, el motor se mueva más lentamente, lo que produciría, que los ajustes que realice el controlador sean más precisos, y sea posible alcanzar un error, “ e ”, igual a 0.

3.3.2. Modelado de la planta

Con el fin de generar más opciones que solucionen los problemas del desplazamiento de la fuente de luz, se proponen dos controladores de carácter regulatorio, un control PID y un control por ubicación de polos. Para el diseño de este tipo de controladores, es necesaria una representación matemática del proceso, un modelo de la planta.

Para el modelado, se definió como planta, “ $h(t)$ ”, el conjunto formado por la fuente de luz, el móvil que la desplaza, incluyendo su motor y cualquier fricción que se genere por las ruedas o por el riel, y el luxómetro patrón. Así mismo, se definió como entrada, “ $u(t)$ ”, un escalón unitario con amplitud 12, ya que la alimentación del motor, que desplaza el móvil donde va la fuente de luz, se realiza con 12V, y como salida, “ $y(t)$ ”, la iluminancia medida por el luxómetro patrón. Se consideraron dos modelos diferentes, uno para la bombilla de 20W y

otro para la de 50W, ya que ambas generaría su propia dinámica en la planta.

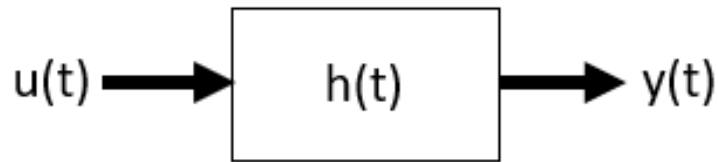


Figura 3-5: Modelo de la planta, diagrama de bloques

Ya con esta definición, se decidió realizar el modelado del sistema mediante una caja negra, ya que era la opción que implicaba menos intervención en el banco de pruebas, lo que permitía que el LABE pudiera seguir realizando sus calibraciones sin ninguna interrupción.

Una vez definido el sistema, y la manera de modelarlo, se realizó el siguiente procedimiento:

1. En primer lugar, se diseñó un programa para Arduino, con el cual se toma la salida digital generada por el luxómetro patrón, se le hace un tratamiento que permite transformar esta información en un valor numérico, el cual luego es almacenado en un vector de MATLAB.
2. Ya con el programa de Arduino funcionando, y registrando datos en MATLAB, se comienza la prueba, alimentando la fuente luz, con los valores de tensión y corrientes, especificados en la tabla **3-2**, para lograr la temperatura de color de 2856K, y se deja estabilizar su temperatura térmica por 30 minutos.
3. A continuación, se fija el cero del luxómetro patrón, tapando el sensor del luxómetro patrón.
4. Posteriormente, se ubica la fuente de luz, en la posición más alejada del luxómetro patrón, al final del riel, y se desbloquea su sensor.
5. Luego, se activa el motor y se desplaza la fuente de luz, del extremo del riel más alejado hasta el extremo más cercano del panel de pruebas, y se guardan los datos obtenidos mediante MATLAB.
6. Finalmente, se fija, nuevamente, el cero del luxómetro patrón, se esperan unos segundos, se desbloquea el sensor del luxómetro, y se desplaza la fuente de luz, nuevamente hacia el extremo más alejado del panel de pruebas, guardando los datos obtenidos con MATLAB.

Este procedimiento se realiza cuatro veces, con la bombilla de 20W y con la de 50W, obteniendo los siguientes resultados.

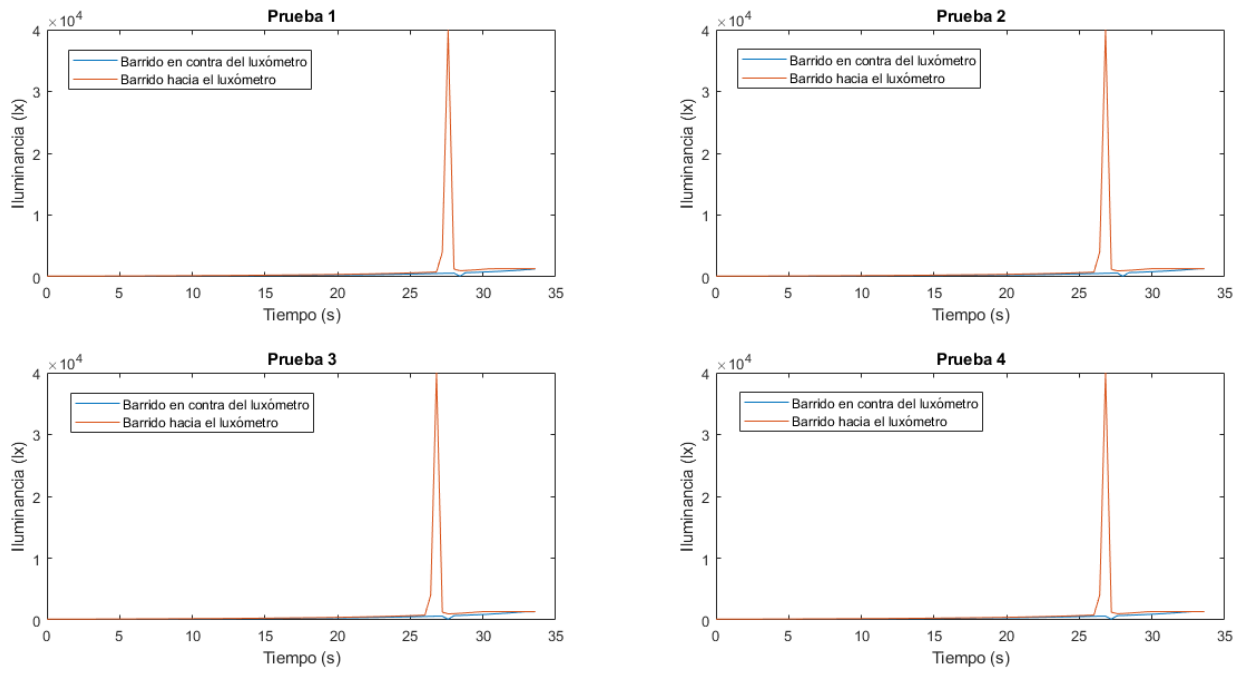


Figura 3-6: Iluminancia en función del tiempo de muestreo - Bombilla 50W

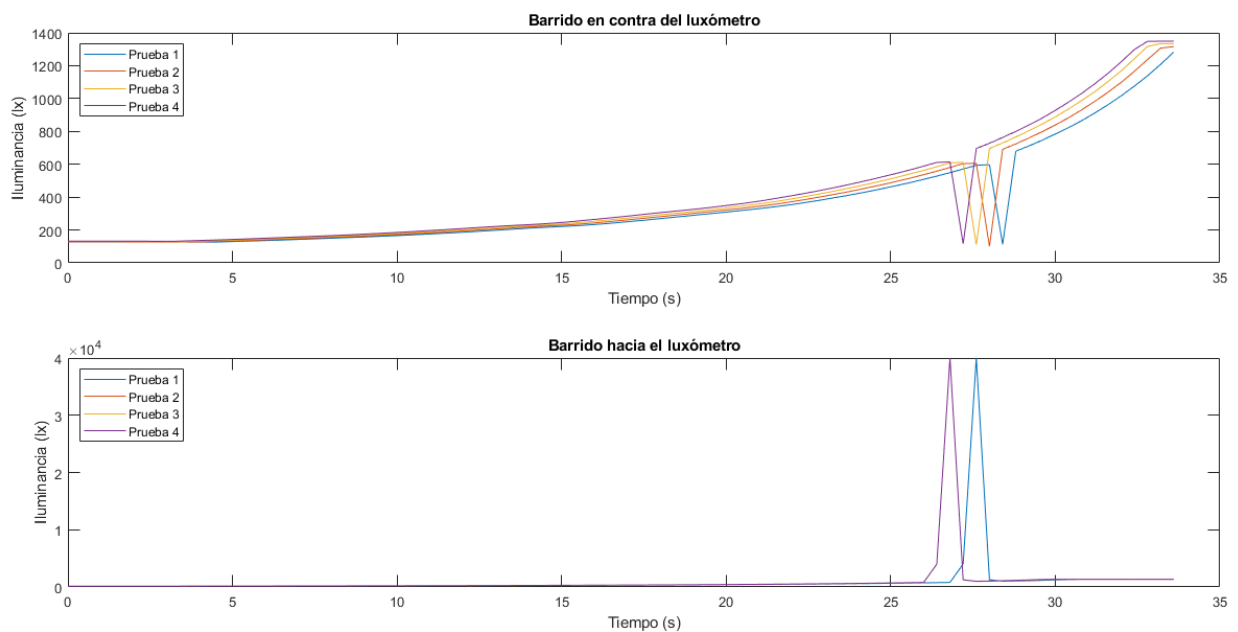


Figura 3-7: Iluminancia en función del tiempo de muestreo - Bombilla 50W

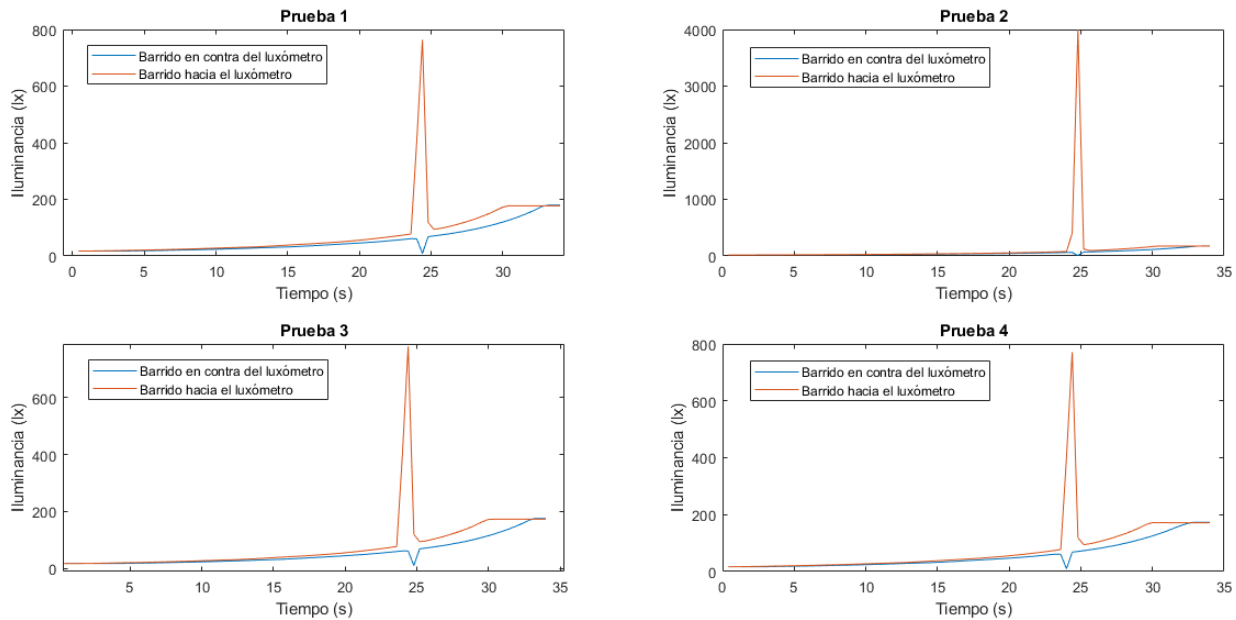


Figura 3-8: Iluminancia en función del tiempo de muestreo - Bombilla 20W

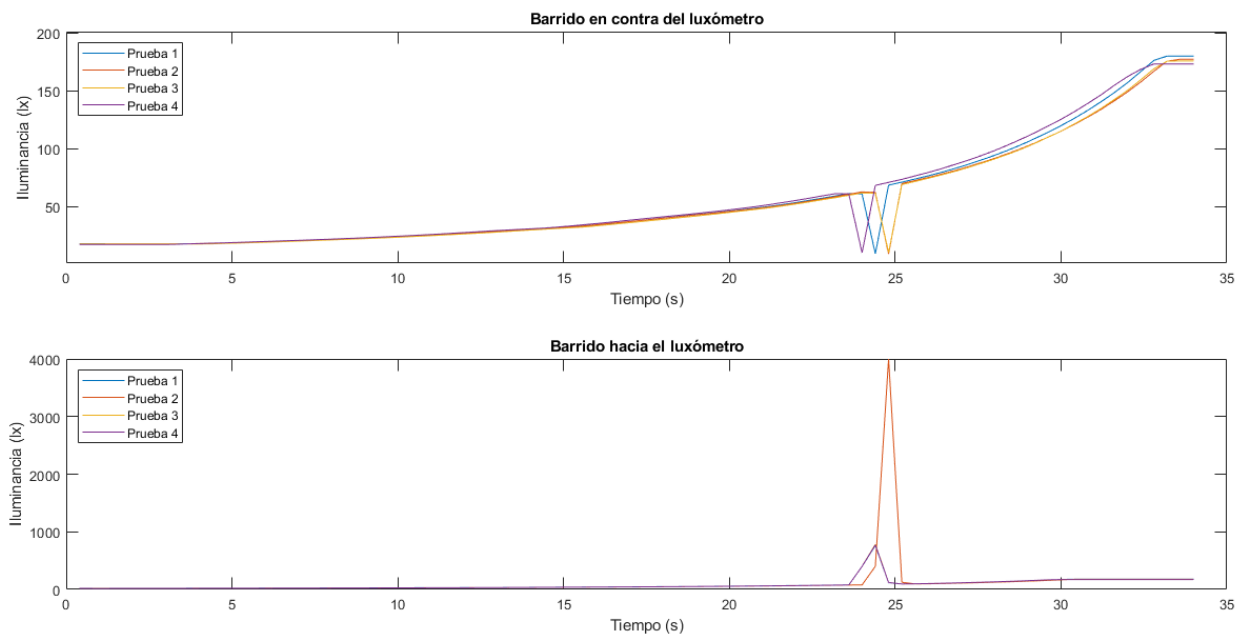


Figura 3-9: Iluminancia en función del tiempo de muestreo - Bombilla 20W

Como se observa la figura 3-6, en todas las pruebas se produce un dato atípico, que es mucho más notorio cuando se hace movimiento de la fuente de luz hacia el luxómetro patrón, pero igualmente se produce en ambos sentidos. Así mismo en la figura 3-7, se evidencia que estos

valores atípico se producen casi al mismo tiempo en las 4 pruebas.

Este dato atípico, se debe a que el luxómetro patrón, al enviar el valor de iluminancia medido mediante el RS232, lo hace en forma serial, y en formato ASCII, con un numero fijo de dígitos, decenas, unidades, punto, décimas, centésimas, milésimas, y al final multiplicado por una potencia de 10, para así poder enviar el bloque de información del mismo tamaño; el problema se presenta cuando se necesita pasar de una escala a otra, por ejemplo de lx a klx, ya que el luxómetro tiene que realizar un ajuste rápido de los dígitos, sin embargo, durante este, se llenan con números todos los espacios disponibles del display, 4 dígitos, en un tiempo extremadamente corto, valores enviados igualmente como un bloque de información, y, al final es almacenado, en MATLAB. Este valor atípico es realmente una dato falso.

A nivel de modelado, se procede a eliminar este valor atípico en cada prueba y se reemplaza por un promedio entre los valores obtenidos antes y después. Este ajuste debe ser tenido en cuenta al momento de implementar el controlador, ya que el programa que obtenga, del luxómetro patrón, el valor medido de iluminancia, debe ser capaz de eliminar estos datos falsos.

Realizando el ajuste correspondiente, se obtienen las siguientes curvas.

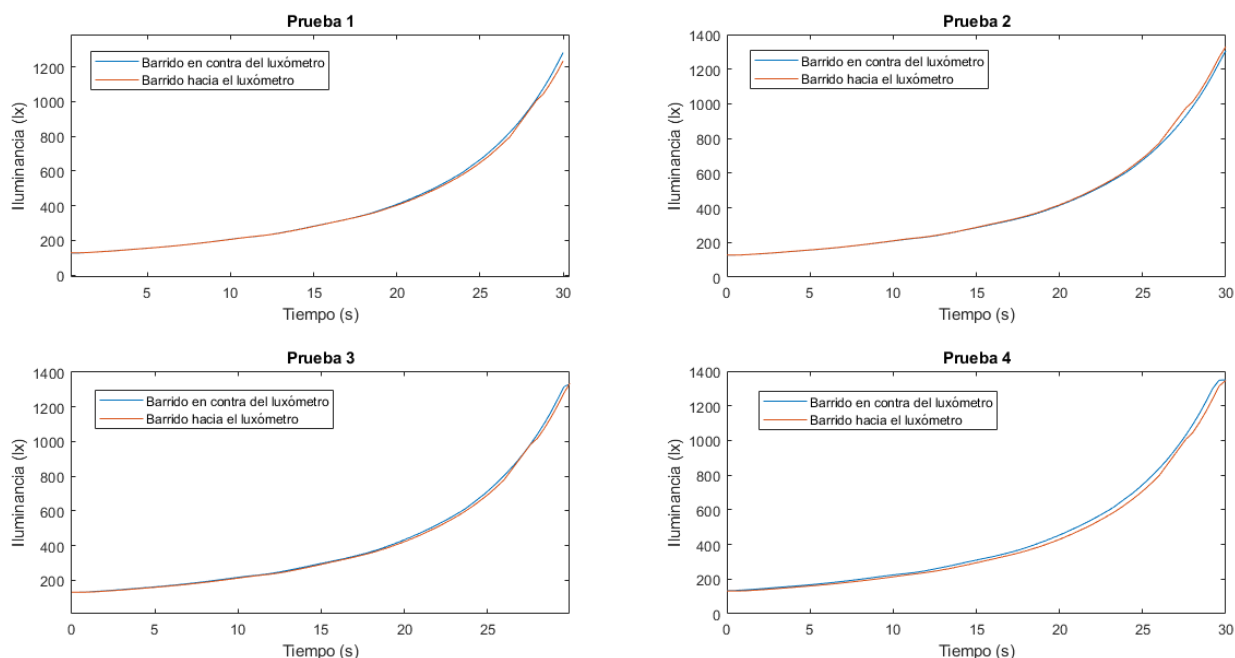


Figura 3-10: Iluminancia en función del tiempo de muestreo - Bombilla 50W

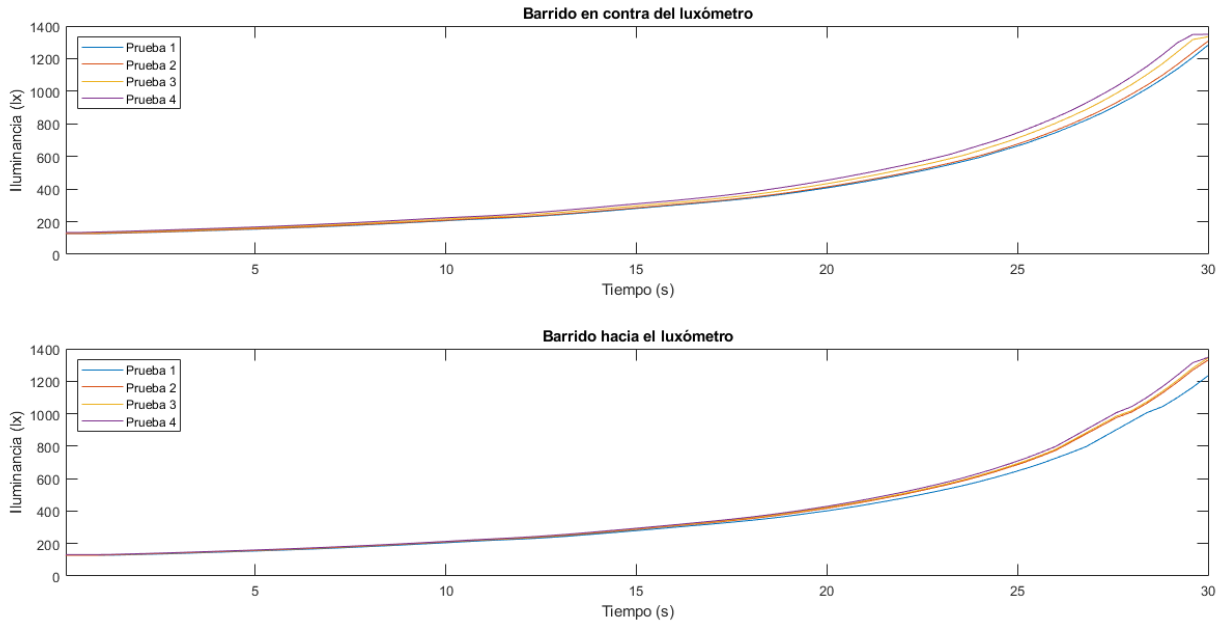


Figura 3-11: Iluminancia en función del tiempo de muestreo - Bombilla 50W

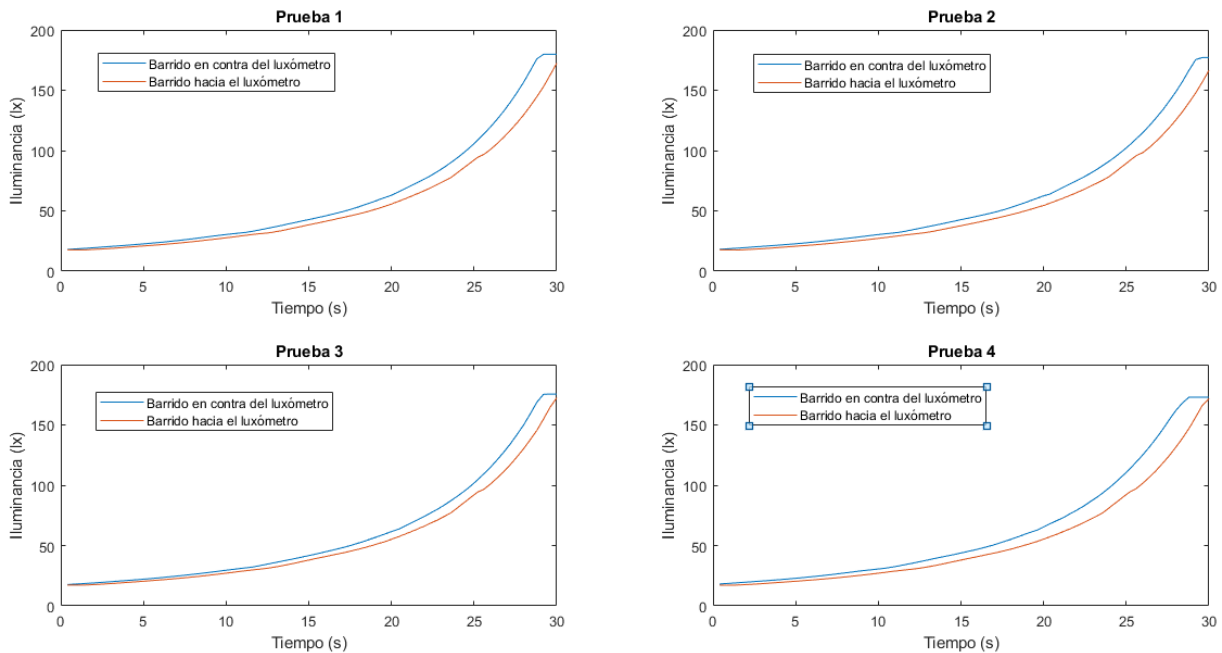


Figura 3-12: Iluminancia en función del tiempo de muestreo - Bombilla 20W

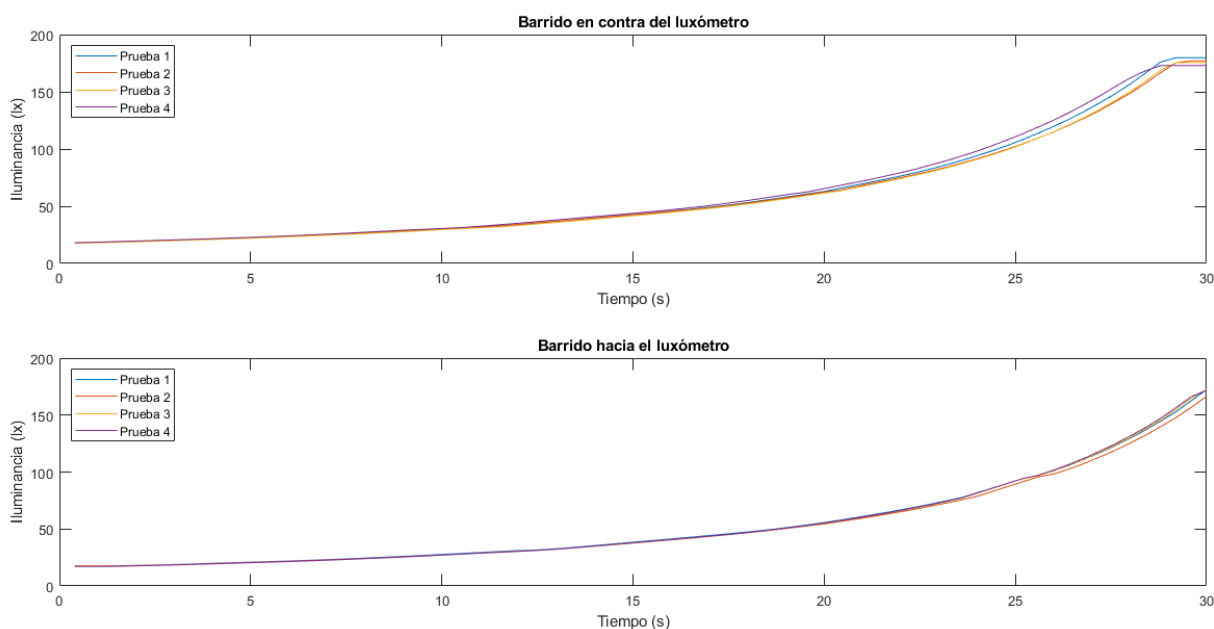


Figura 3-13: Iluminancia en función del tiempo de muestreo - Bombilla 20W

Ya con las curvas corregidas, se procede a hacer el promedio, para así obtener la curva de salida del sistema, la cual, se parametriza usando la herramienta “Curve fitting” de MATLAB y así generar la función correspondiente. La función obtenida es una aproximación a la salida real del sistema, la cual, debería ser no-lineal, debido al componente que agrega la iluminancia en función de la distancia; sin embargo, al ser un sistema que no pasará de ciertos límites en la distancia, se puede modelar la sección necesaria como un sistema lineal, teniendo en cuenta que a mayor grado, se acercará más a la función real. Las ecuaciones obtenidas son las siguientes, siendo función 3-1 para la bombilla de 50W y la función 3-2 para la bombilla de 50W

$$y_a(t) = 0,004612t^4 - 0,1803t^3 + 2,798t^2 - 6,852t + 138,2 \quad (3-1)$$

$$y_a(t) = 0,00057t^4 - 0,02197t^3 + 0,3543t^2 - 0,8995t + 19,04 \quad (3-2)$$

Los resultados gráficos obtenidos son mostrados a continuación, donde la línea puntada muestra los valores reales de salida del sistema $y(t)$, mientras que la línea azul representa la aproximación realizada, dentro del intervalo correspondiente, $y_a(t)$:

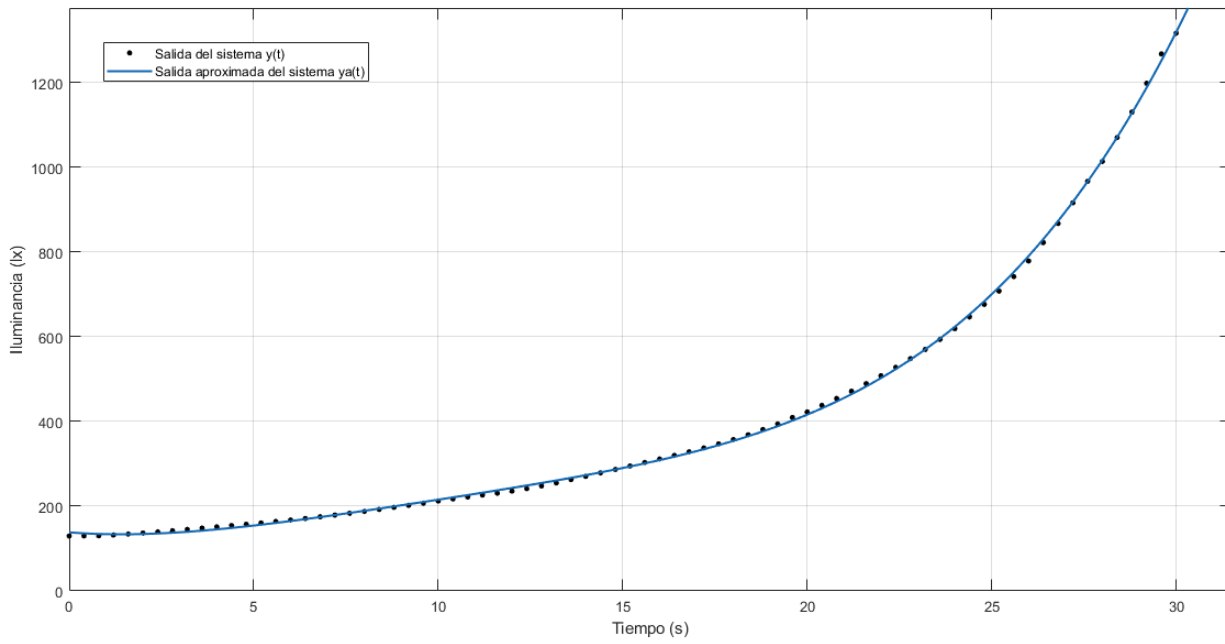


Figura 3-14: Salida del sistema $y(t)$ vs curva aproximada $y_a(t)$ - Bombilla 50W

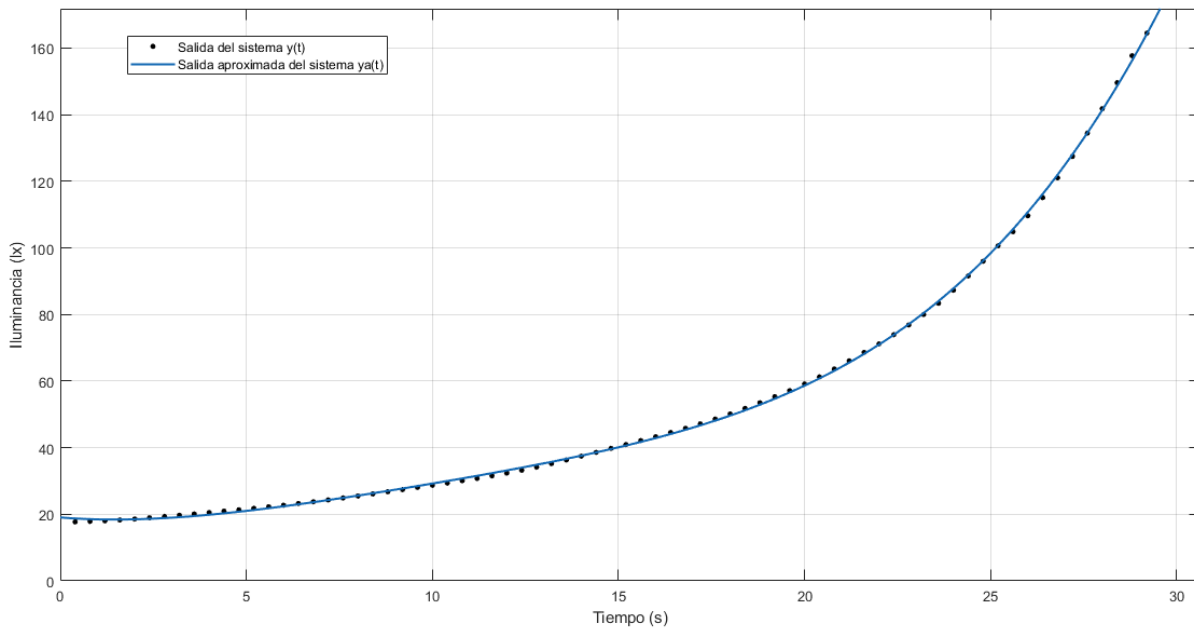


Figura 3-15: Salida del sistema $y(t)$ vs curva aproximada $y_a(t)$ - Bombilla 20W

Finalmente, usando la función de salida del sistema y la función de entrada, un escalón unitario, procedemos a determinar la función de transferencia de la planta, pasando todo en primer lugar al espacio de la frecuencia, para facilidad en los cálculos. Comenzamos trabajando con la bombilla de 50W.

$$y_a(t) = x(t) * h(t) \quad (3-3)$$

$$0,004612t^4 - 0,1803t^3 + 2,798t^2 - 6,852t + 138,2 = 12u(t) * h(t) \quad (3-4)$$

$$\mathcal{L}\{y_a(t)\} = \mathcal{L}\{x(t) * h(t)\} \quad (3-5)$$

$$Y(s) = X(s)H(s) = \frac{138,2s^4 - 6,836s^3 + 5,592s^2 - 1,0812s + 0,1107}{s^5} = \frac{12}{s}H(s) \quad (3-6)$$

$$H(s) = \frac{11,5167s^4 - 0,5697s^3 + 0,466s^2 - 0,0901s + 0,0092}{s^4} \quad (3-7)$$

Así mismo, se realizan los cálculos, para obtener la función de transferencia de la planta, con la bombilla de 20W

$$H(s) = \frac{1,5867s^4 - 0,0749s^3 + 0,0595s^2 - 0,0109s + 0,0011}{s^4} \quad (3-8)$$

3.3.3. Controlador PID

A continuación, y ya con la planta modelada, se procede con el diseño del controlador PID, cuyo objetivo inicial será lograr la estabilización del sistema, luego, se evaluarían tiempos de asentamiento y sobrepicos.

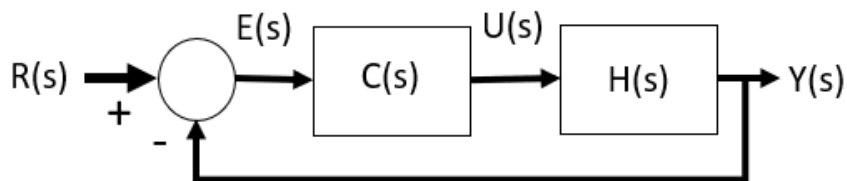


Figura 3-16: Modelo del sistema con el controlador implementado y con retroalimentación, diagrama de bloques

$U(s) : Tensión(v)$

$Y(s) : Iluminancia(lx)$

$H(s) : Modelo\ de\ la\ planta(lx/v)$

$E(s) : Error(lx)$

$C(s) : Controlador(v/lx)$

$R(s) : Referencia(lx)$

$G(s) = Y(s)/R(s) : Sistema\ de\ control$

Se comienza usando el criterio de estabilidad de Routh Hurwitz, una herramienta que nos permite determinar la estabilidad del sistema una vez integramos un controlador al sistema, y realizamos la correspondiente retroalimentación. En una primera instancia, validaremos la estabilidad con un controlador proporcional, " K_p ", y posteriormente con el controlador integral, " K_i ".

Para esto, en primer lugar definimos el polinomio característico del sistema $\Delta(s)$, que es lo mismo que el denominador del sistema completo incluyendo el controlador, como:

$$\Delta(s) = (\text{denominador de } H(s)) + (\text{Controlador})(\text{numerador de } H(s))$$

Posteriormente, se realiza la tabla correspondiente, y se evalúan los signos de los elementos de la primera columna, donde, si se mantienen iguales todos, el sistema sería estable, de lo contrario, será inestable.

Se realiza la prueba de Routh Hurwitz con ambas bombillas, la de 50W y la de 20W, y con ambos controladores, el proporcional y el integral. Adicionalmente, se prueban los resultados, con el lugar geométrico de las raíces, una herramienta gráfica que nos permite en donde se ubican los polos un sistema en un plano, con eje real y eje imaginario, y como se moverían en dicho plano al variar el valor de la constante del controlador; si en el plano del lugar geométrico de las raíces queda algún polo en el semiplano de los reales positivos, el sistema será inestable. Los resultados obtenidos son descritos a continuación:

▪ **Bombilla de 50W (controlador proporcional):**

$$\Delta(s) = s^4 + K_p(11,5167s^4 - 0,5697s^3 + 0,466s^2 - 0,0901s + 0,0092) \quad (3-9)$$

$$\Delta(s) = (11,5167K_p + 1)s^4 - 0,5697K_p s^3 + 0,466K_p s^2 - 0,0901K_p s + 0,0092K_p \quad (3-10)$$

$$\begin{array}{l|lll} s^4 & 11.5167K_p+1 & 0.466K_p & 0.0092K_p \\ s^3 & -0.5697K_p & -0.0901K_p & \\ s^2 & b_1 & 0.0092K_p & \\ s^1 & c_1 & & \\ s^0 & 0.0092K_p & & \end{array}$$

Siendo:

$$b_1 = \frac{(-0,5697K_p)(0,466K_p) - (11,5167K_p + 1)(-0,5697K_p)}{(-0,5697K_p)} \quad (3-11)$$

$$b_1 = -1,3554K_p - 0,1581 \quad (3-12)$$

$$c_1 = \frac{b_1(-0,0901K_p) - (0,0092K_p)(-0,5697K_p)}{b_1} \quad (3-13)$$

$$c_1 = -\frac{0,1274K_p^2 + 0,0142K_p}{1,3554K_p + 0,1591} \quad (3-14)$$

A continuación, se establecen las correspondientes desigualdades, con el fin de determinar cuales valores debería tomar K_p , para que todos los elementos de esa primera columna tengan el mismo signo, determinando al final, los valores de K_p capaces de hacer el sistema estable. Sin embargo, al resolver dichas desigualdades, no se obtiene ningún conjunto de valores para K_p apto para cumplir con la condición señalada, lo cual, indica que no hay forma de hacer estable el sistema, usando solamente un controlador proporcional.

Finalmente, respaldamos lo anteriormente mencionado, usando la herramienta del lugar geométrico de las raíces, las cual, nos muestra como siempre habrá dos polos en el semiplano de los reales positivos, sin importar el valor de K_p utilizado, mostrando

así, como al usar únicamente un controlador proporcional no se podría estabilizar el sistema.

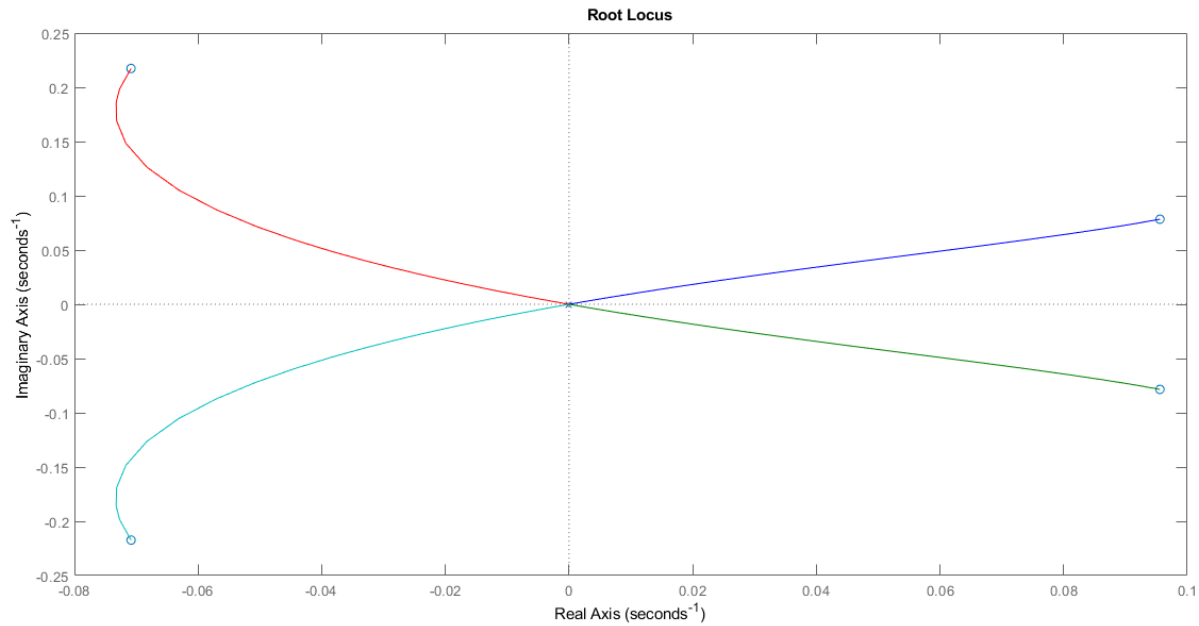


Figura 3-17: Lugar geométrico de las raíces $H(s)$ y controlador proporcional - Bombilla 50W

■ Bombilla de 50W (controlador integral):

Ahora realizamos la misma revisión pero agregando un integrador, $\frac{1}{s}$, obteniendo los siguientes resultados:

$$\Delta(s) = s^5 + 11,5167K_i s^4 - 0,5697K_i s^3 + 0,466K_i s^2 - 0,0901K_i s + 0,0092K_i \quad (3-15)$$

$$\begin{array}{l|lll} s^5 & 1 & -0.5697K_i & -0.0901K_i \\ s^4 & 11.5167K_i & 0.466K_i & 0.0092K_i \\ s^3 & b_1 & b_2 & \\ s^2 & c_1 & 0.0092K_i & \\ s^1 & d_1 & & \\ s^0 & 0.0092K_i & & \end{array}$$

$$b_1 = -0,57K_i - 0,04 \quad (3-16)$$

$$b_2 = 0,09K_i - 0,0008 \quad (3-17)$$

$$c_1 = -\frac{-0,775K_i^2 + 0,011K_i}{0,57K_i + 0,04} \quad (3-18)$$

$$d_1 = \frac{c_1 b_2 - 0,0092K_i b_1}{c_1} \quad (3-19)$$

Y volvemos a encontrarnos con el mismo problema del caso de controlador proporcional, ya que, los valores que puede tomar K_i , para hacer positiva la expresión $11,5167K_i$, no coinciden con los que puede tomar para hacer positivo a b_1 .

Por lo tanto, usando un integrador, tampoco podemos lograr que el sistema sea estable, lo cual reforzamos, al ver el lugar geométrico de las raíces, donde nuevamente encontramos que siempre habrá dos polos en el semiplano positivo de los reales, lo que implica inestabilidad.

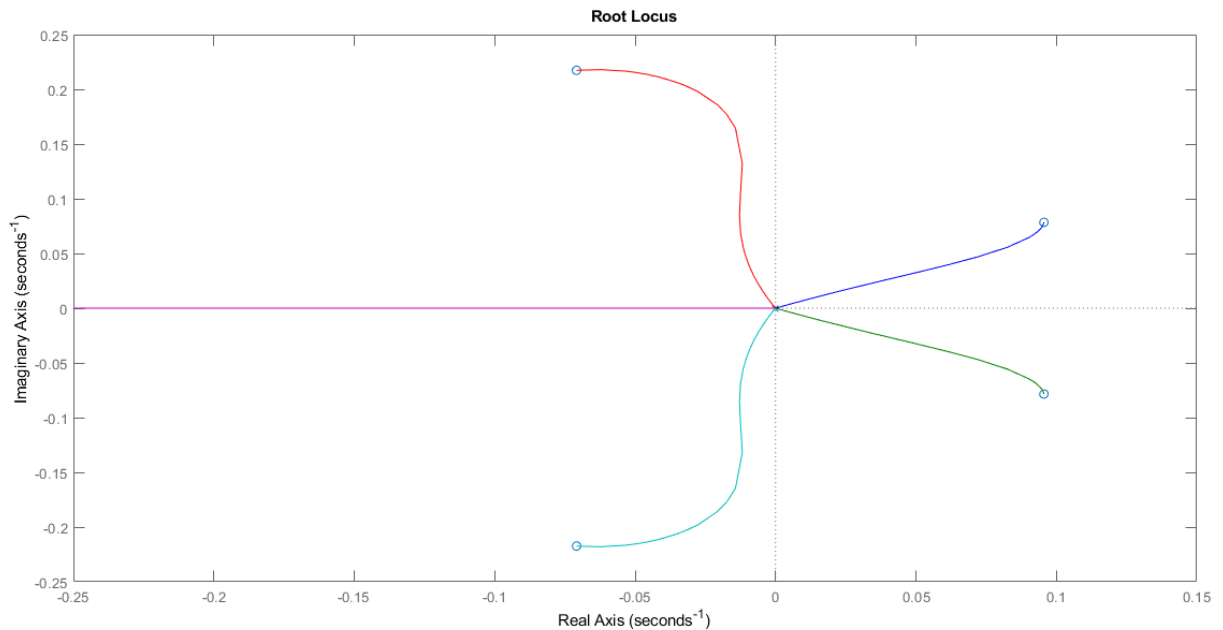


Figura 3-18: Lugar geométrico de las raíces $H(s)$ y controlador integral - Bombilla 50W

■ Bombilla de 20W (controlador proporcional):

Realizamos los mismos cálculos y herramientas para el sistema obtenido para la bombilla de 20W, pero los resultados son exactamente iguales; no es posible estabilizar el sistema usando un control proporcional.

$$\Delta(s) = (1,5867K_p + 1)s^4 - 0,0749K_p s^3 + 0,05953K_p s^2 - 0,0109K_p s + 0,001K_p \quad (3-20)$$

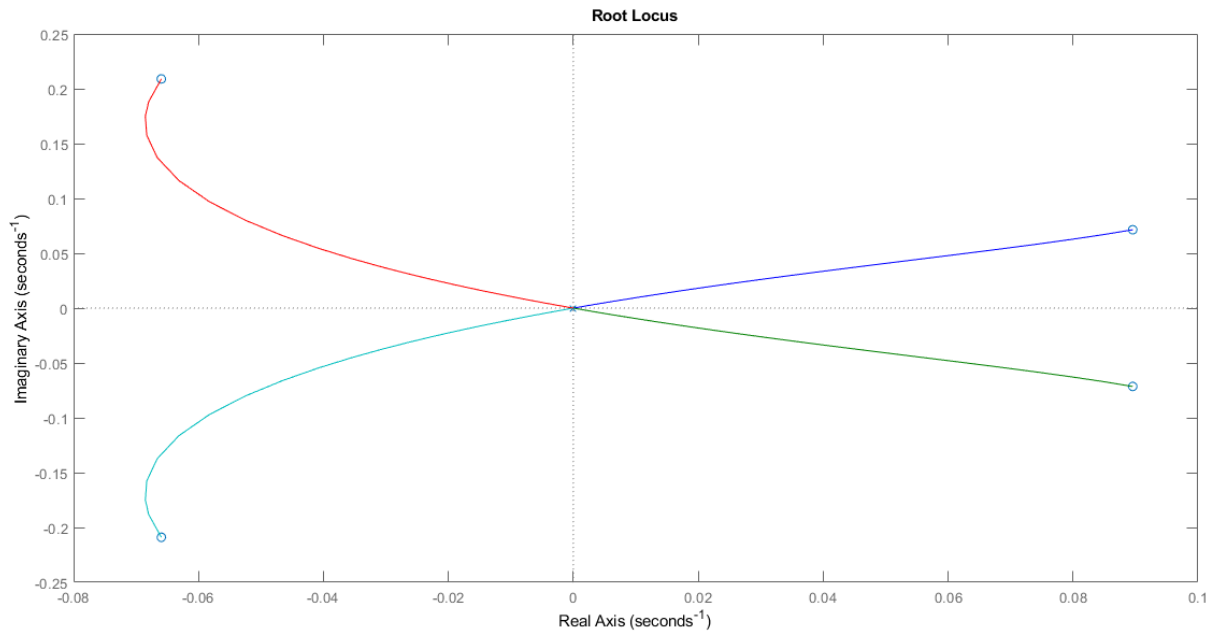


Figura 3-19: Lugar geométrico de las raíces $H(s)$ y controlador proporcional - Bombilla 20W

■ Bombilla de 20W (controlador integral):

Al igual que el caso anterior, no es posible estabilizar el sistema usando un integrador como controlador.

$$\Delta(s) = s^5 + 1,5867K_i s^4 - 0,0749K_i s^3 + 0,05953K_i s^2 - 0,0109K_i s + 0,001K_i \quad (3-21)$$

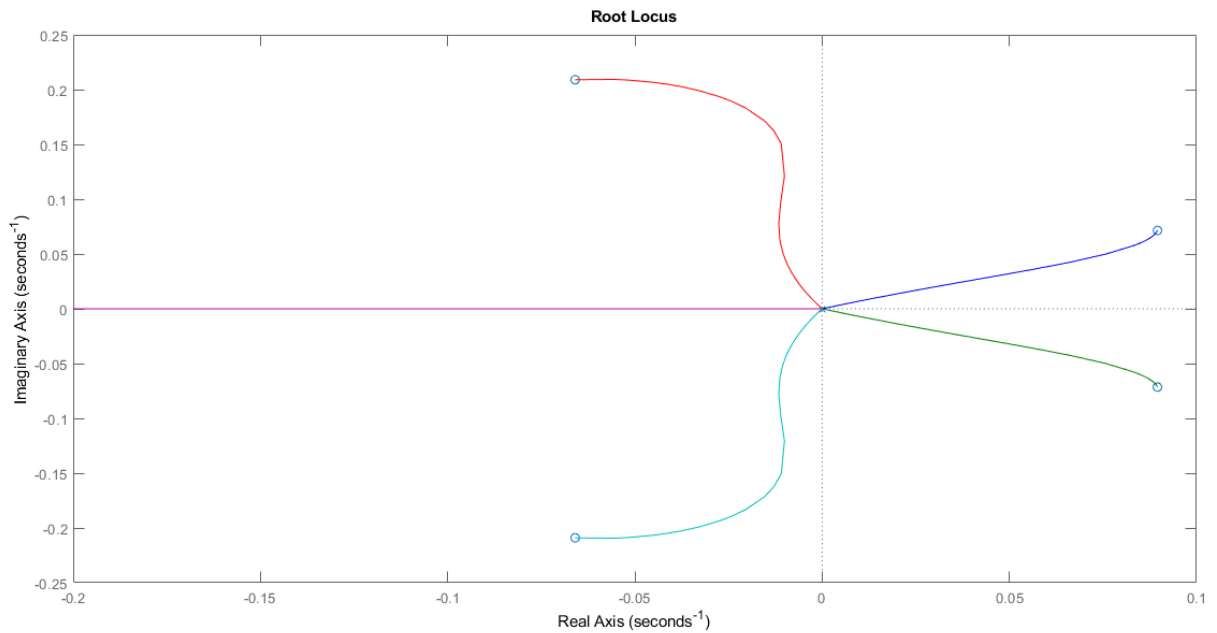


Figura 3-20: Lugar geométrico de las raíces $H(s)$ y controlador integral - Bombilla 20W

De las pruebas realizadas, se pudo deducir, que debido a las características del sistema y su dinámica, no es posible implementar un controlador PID, ya que no existen constantes que permitan estabilizar el sistema y llevarlo a un valor de referencia deseado.

3.3.4. Controlador por ubicación de polos

Como una alternativa al control PID, y manteniéndose en la línea de un control regulatorio, se decidió diseñar un controlador por ubicación de polos. Esta herramienta tiene como principal característica que sin importar la dinámica y estructura que tenga la planta, es posible estabilizarla y hacerla trabajar el sistema completo con los polos que uno desee, lo que permite igualmente tener control de que tan rápido será dicho sistema, y que sobrepicos manejará.

Sin embargo, el control por ubicación de polos tiene como principal desventaja, que cualquier cambio en la planta, haría que los polos del sistema completo cambiarán, provocando que los tiempos de asentamiento y sobrepicos calculados cambien, o incluso se podría llegar a desestabilizar el sistema. Este problema se podría presentar también, si la planta fuera mal modelada, ya que, de suceder esto, la función de transferencia no representaría la dinámica real del sistema.

Al igual que con el control PID, es necesario realizar un diseño de controlador diferente para cada una de las plantas, la obtenida con la bombilla de 50W y la obtenida con la bombilla de 20W.

- **Bombilla 50W:**

Para comenzar, se define el grado que tendrá el controlador $C(s)$, teniendo en cuenta el grado de $H(s)$ y el grado que tendrá el sistema final $G(s)$; y para esto contamos con la siguiente ecuación:

$$H(s) = \frac{N(s)}{D(s)} \quad C(s) = \frac{B(s)}{A(s)} \quad G_0(s) = \frac{N_0(s)}{D_0(s)}$$

$$\text{Grado de } A(s) = m$$

$$\text{Grado de } D(s) = n$$

$$m \geq n - 1$$

En nuestro caso, el grado del denominador de $H(s)$ es 4, por lo que nos daría como resultado $m \geq 3$. A continuación, se realiza un sistema de ecuaciones, basado en la denominada matriz de Sylvester, el cual tendrá solución única si consideramos $m = 3$, e infinitas para $m > 3$. En nuestro caso, usaremos la solución única, ya que el sistema

sobre el que estamos trabajando, tiene la ventaja de que su denominador es la multiplicación de varios integradores, esto hace que el sistema final tenga error de posición igual a cero, si se logra estabilizar, y esto podría extenderse a error de velocidad y de aceleración iguales a cero, al ser un total de 4 integradores en el denominador de $H(s)$.

Ahora, se determinan cuales son los polos que deseamos tenga el sistema final $G(s)$, teniendo en cuenta que deben ser 7, debido a que el total de polos corresponderá con el grado final del denominador del sistema, que es igual al grado del denominador de $C(s)$, "m", y el grado del denominador de $H(s)$, "n".

Para determinar los polos que implementaríamos en el sistema, con la bombilla de 50W, se establecieron 4 condiciones de diseño:

1. Polos con parte real negativa, para que el sistema sea estable.
2. Sobrepico menor a los 100 lx, ya que al usar la bombilla 50W, el rango de calibración es amplio, desde, aproximadamente, los 130 lx hasta los 1300 lux, y quitar 100 lux de la parte superior del rango no afectaría la sección de aumento de rango, ya que seguiría siendo un valor mayor al alcanzado hoy en día.
3. Tiempo de asentamiento menor a 2 minutos, ya que este es el tiempo promediado que lo toma al operario desplazar la fuente de luz hasta encontrar el valor de iluminancia medido deseado.
4. Error de posición igual a cero, para asegurar que el controlador ubicará la fuente de luz en el lugar exacto para genera un valor de iluminancia igual al puesto como referencia.

Al determinar los polos, hay que tener en cuenta que si son muy pequeños, el sistema tendría sobrepicos bajos, pero una respuesta más lenta, y al ser polos muy grandes, el sistema sería muy rápido, pero con sobrepicos más grandes.

Para establecer los valores de los coeficientes del controlador, se genera la siguiente operación de matrices, que representa el sistema de ecuaciones ya mencionado, donde B_0 , B_1 , B_2 y B_3 serán los coeficientes del numerador, A_0 , A_1 , A_2 y A_3 serán los coeficientes del denominador, p_0 , p_1 , p_2 , p_3 , p_4 , p_5 , p_6 y p_7 serán los coeficientes del polinomio característico, generado por los polos escogidos; y en la matriz de Sylvester, se distribuyen los coeficientes del numerador y denominador de $H(s)$.

$$C(s) = \frac{B_3s^3 + B_2s^2 + B_1s + B_0}{A_3s^3 + A_2s^2 + A_1s + A_0} \quad (3-22)$$

$$\Delta(s) = p_7s^7 + p_6s^6 + p_5s^5 + p_4s^4 + p_3s^3 + p_2s^2 + p_1s + p_0 \quad (3-23)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0,0092 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0,0901 & 0 & 0,0092 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,466 & 0 & -0,0901 & 0 & 0,0092 & 0 & 0 \\ 0 & -0,5697 & 0 & 0,466 & 0 & -0,0901 & 0 & 0,0092 \\ 1 & 11,5167 & 0 & -0,5697 & 0 & 0,466 & 0 & -0,0901 \\ 0 & 0 & 1 & 11,5167 & 0 & -0,5697 & 0 & 0,466 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 11,5167 & 0 & -0,5697 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 11,5167 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_0 \\ B_0 \\ A_1 \\ B_1 \\ A_2 \\ B_2 \\ A_3 \\ B_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \\ p_7 \end{bmatrix} \quad (3-24)$$

Bajo las condiciones mencionadas, se evaluaron diversos grupos de polos, con los cuales, y como respuesta a un escalón unitario, daban como resultado las salidas mostradas a continuación, denominadas de $y_0(t)$ a $y_4(t)$, en donde el error de posición siempre fue cero, pero se veían grandes diferencias entre los tiempos de asentamiento y el sobrepico. La simulación fue realizada con la herramienta MATLAB

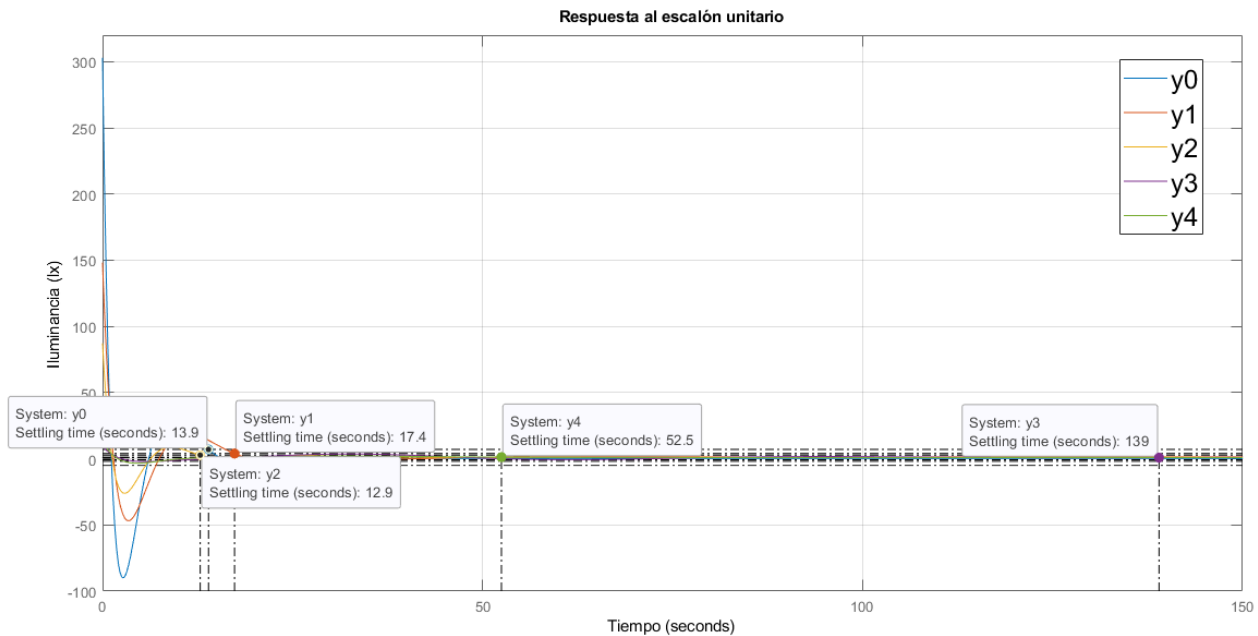


Figura 3-21: Respuesta al escalón unitario del sistema final $G(s)$, con diferentes polos. Revisión de tiempos de asentamiento

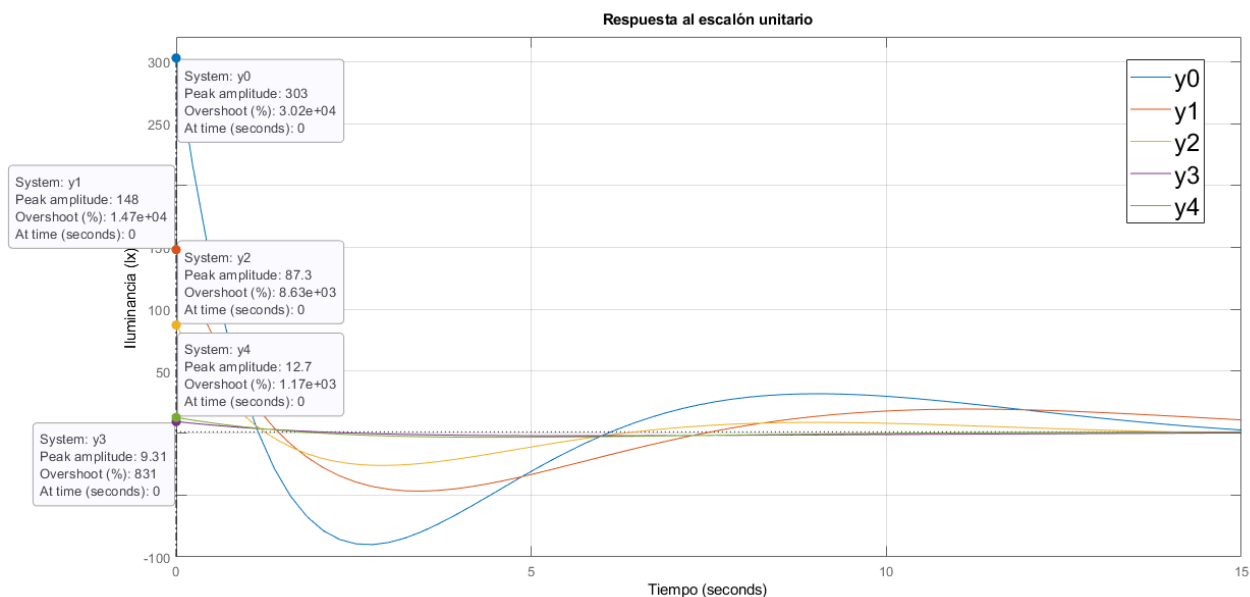


Figura 3-22: Respuesta al escalón unitario del sistema final $G(s)$, con diferentes polos. Revisión de sobrepicos

Con los resultados obtenidos, se dejaron, como propuesta para posterior implementación, los controladores que generaron $y_2(t)$ y $y_3(t)$, ya que presentan sobrepicos, que no afectarían tanto el rango de iluminancia que se tienen, el sobre pico de $y_2(t)$ llega a los 87.3lx, y el de $y_3(t)$ alcanza los 9.31lx; y, adicionalmente, su tiempo de asentamiento no sería tan alto, en comparación con el tiempo que toma hacer el desplazamiento de la fuente de luz de manera manual, 12.9 segundos con $y_2(t)$ y 139 segundos con $y_3(t)$,

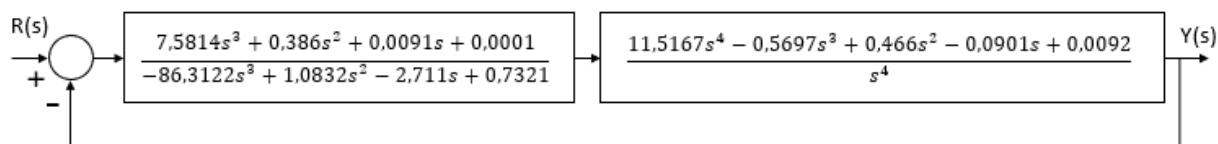


Figura 3-23: Sistema con controlador $C_2(s)$

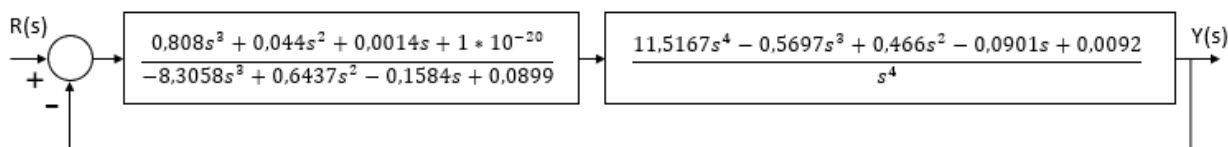


Figura 3-24: Sistema con controlador $C_3(s)$

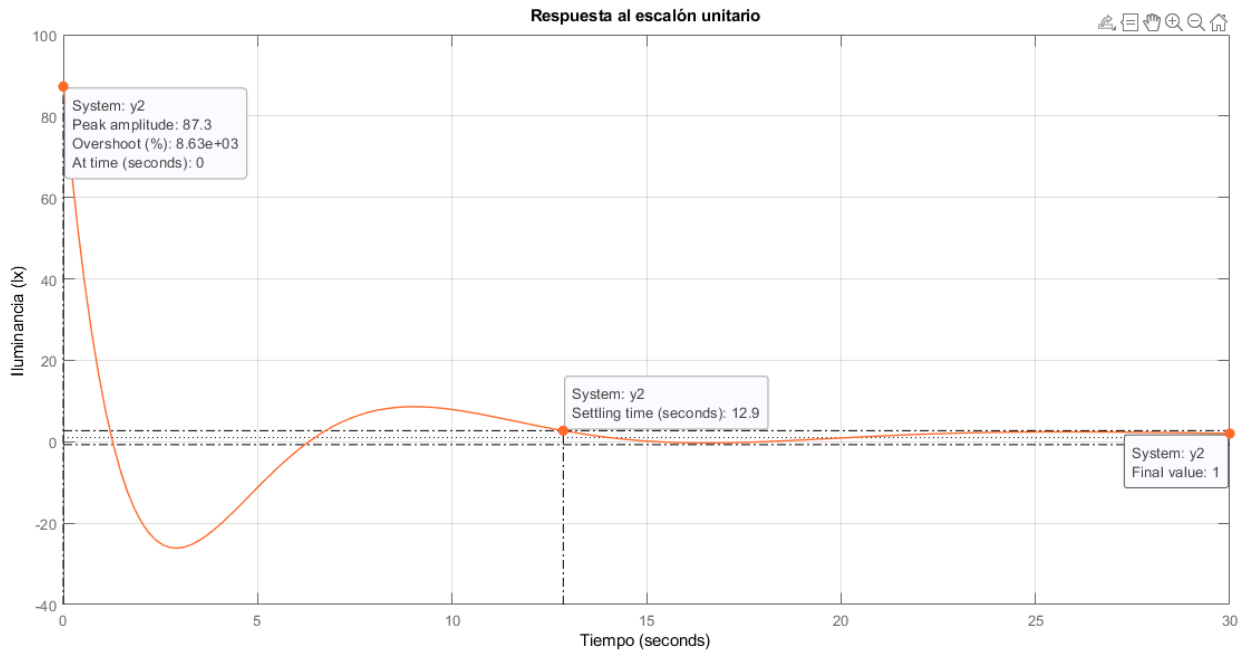


Figura 3-25: Salida del sistema, $y_2(t)$, producida con controlador $C_2(s)$

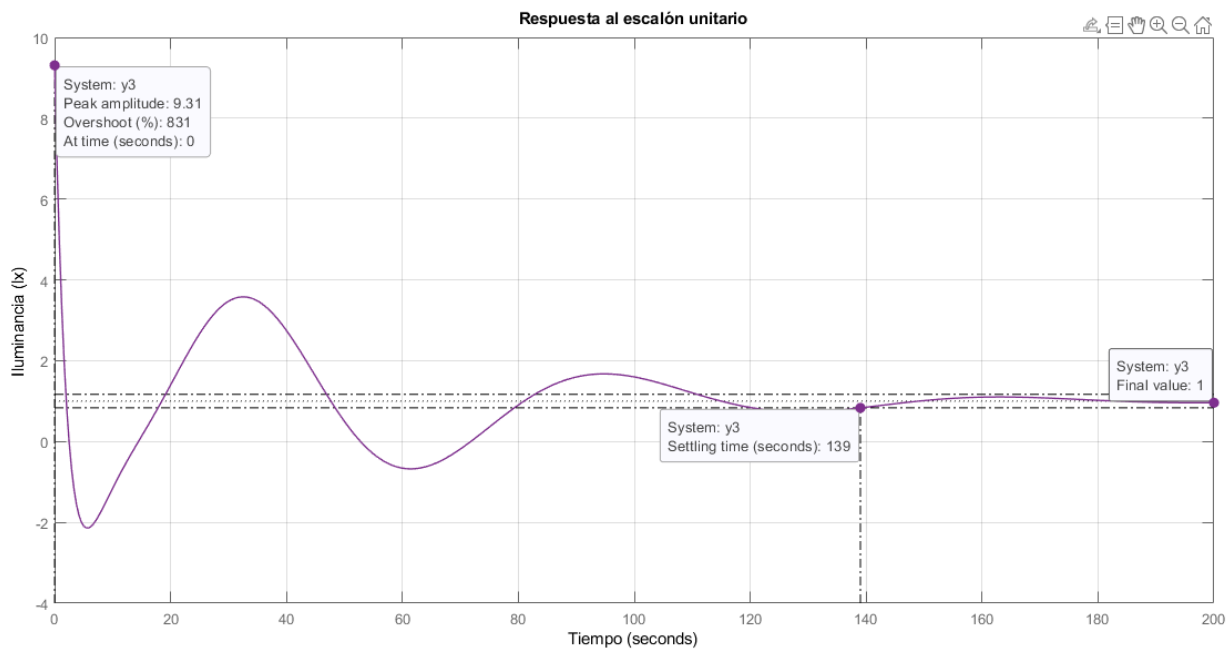


Figura 3-26: Salida del sistema, $y_3(t)$, producida con controlador $C_3(s)$

Aunque los resultados vistos con ambos controladores se pueden considerar buenos, se evidencio, que, al usar la herramienta MATLAB, esta determina el tiempo de asentamiento según una convención de control, que dicta que el tiempo de asentamiento se

produce en el momento en que la salida cae en un rango de $\pm 2\%$ de la referencia y no vuelve a salir de este margen. Esta convención, no es conveniente para el proyecto, ya que este $\pm 2\%$, en una fuente de error.

Por tal motivo, se módica el margen sobre el cual MATLAB toma el tiempo de asentamiento, bajándolo lo máximo que permite la herramienta, $\pm 0,1\%$; con esta modificación, se verifican nuevamente los tiempos de asentamiento producidos con ambos controladores, 44.4 segundos $C_2(s)$ y 243 segundos con $C_3(s)$, aclarando que igualmente ambos controladores provocan error final igual a 0, es decir, si se dan más segundos de espera, el la salida del sistema será exactamente igual a la referencia que coloquemos.

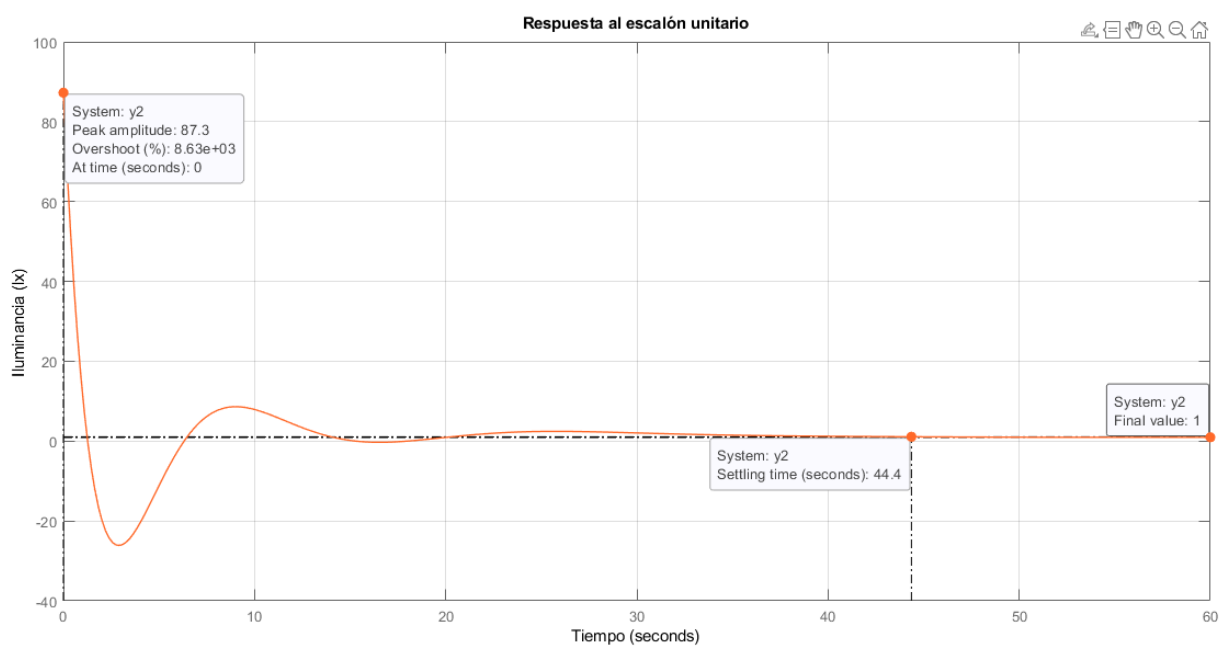


Figura 3-27: Salida del sistema, $y_2(t)$, producida con controlador $C_2(s)$, corrección del tiempo de asentamiento.

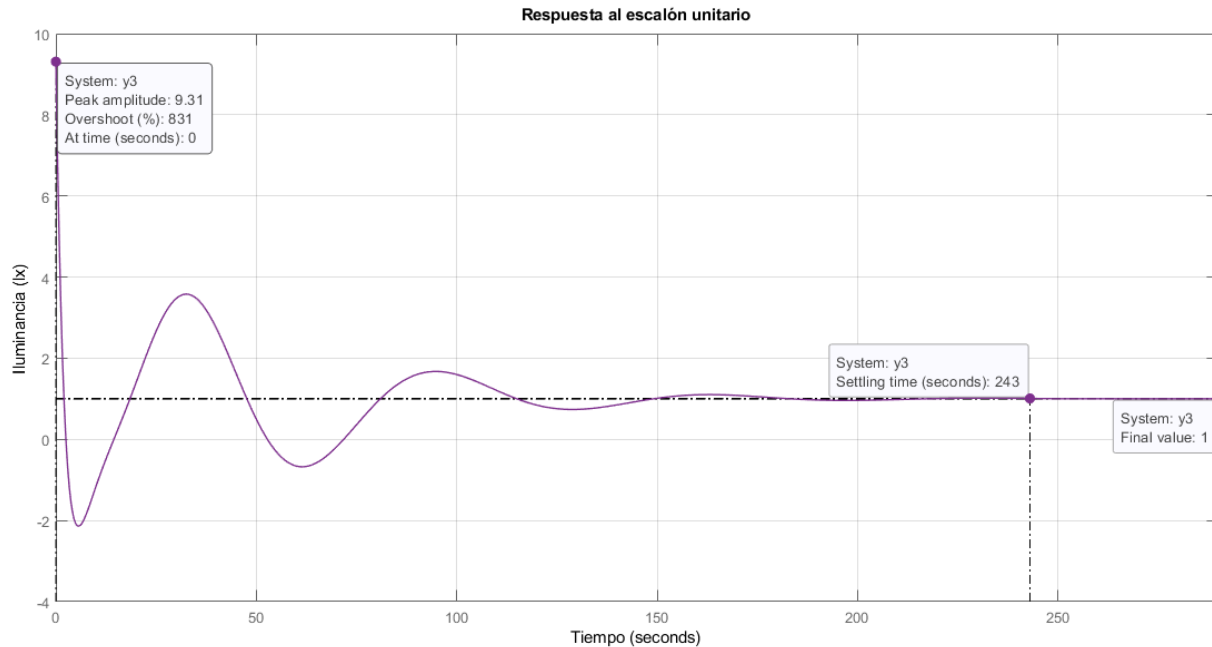


Figura 3-28: Salida del sistema, $y_3(t)$, producida con producida controlador $C_3(s)$, corrección del tiempo de asentamiento.

■ **Bombilla 20W:**

Ahora, realizamos el mismo proceso, usando el $H(s)$ obtenido con la bombilla de 20W, y probando con diferentes grupos de polos, teniendo en cuenta para este caso, las siguientes condiciones de diseño:

1. Polos con parte real negativa, asegurando la estabilidad del sistema.
2. El sobrepico tendrá una relevancia mayor a la presentada en el caso de la bombilla de 50W, ya que los límites de iluminancia que permite esta bombilla, van desde los 17lx hasta los 170 lx, aproximadamente, obteniendo un rango de operación menor donde sería más fácil saturar el sistema.
3. Tiempo de asentamiento cercano a 2 minutos, teniendo en cuenta que al cumplir la condición 2, sobrepicos pequeños, provocaremos inevitablemente tiempos de asentamiento mayores.
4. Error de posición igual a cero, para asegurar la ubicación de fuente de luz en el lugar exacto, para genera un valor de iluminancia igual al puesto como referencia.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

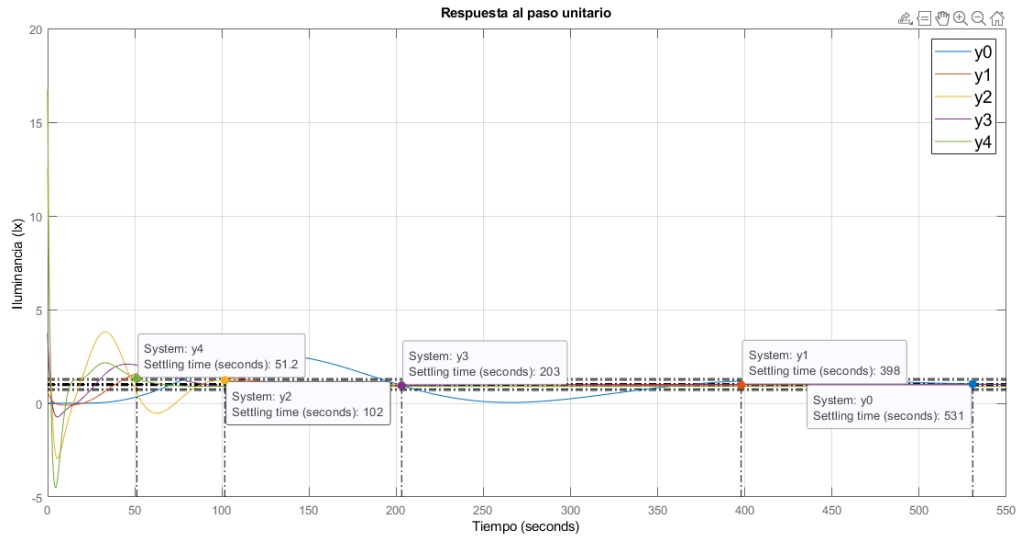


Figura 3-29: Respuesta al escalón unitario del sistema final $G(s)$, con diferentes polos.
Revisión de tiempos de asentamiento

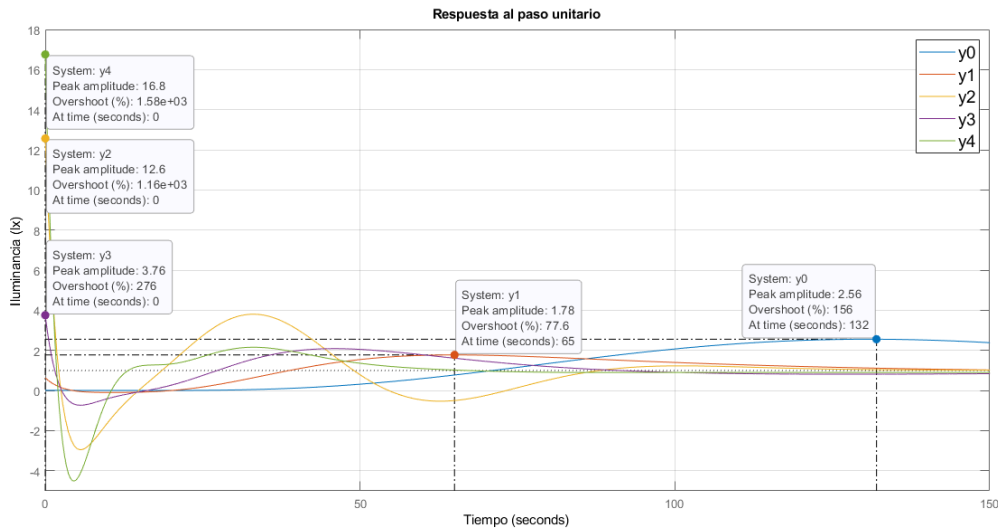


Figura 3-30: Respuesta al escalón unitario del sistema final $G(s)$, con diferentes polos.
Revisión de sobrepicos

Con los resultados obtenidos, se dejaron, como propuesta para posterior implementación, los controladores que generaron $y_1(t)$ y $y_3(t)$, ya que, aunque son los más lentos, tiempos de asentamiento de 398 segundos con $C_1(s)$ y 203 segundos con $C_3(s)$, generaron sobrepicos pequeños, 1.78 lx con $C_1(s)$ y 3.76 con $C_3(s)$, lo que al final, permitirá aprovechar mejor el rango disponible de iluminancia.

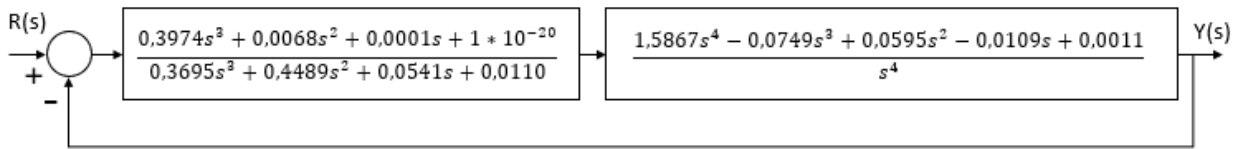


Figura 3-31: Sistema con controlador $C_1(s)$

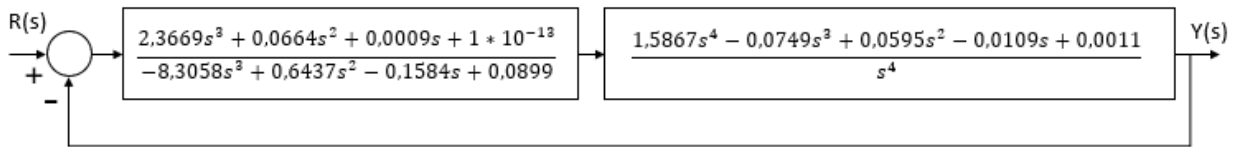


Figura 3-32: Sistema con controlador $C_3(s)$

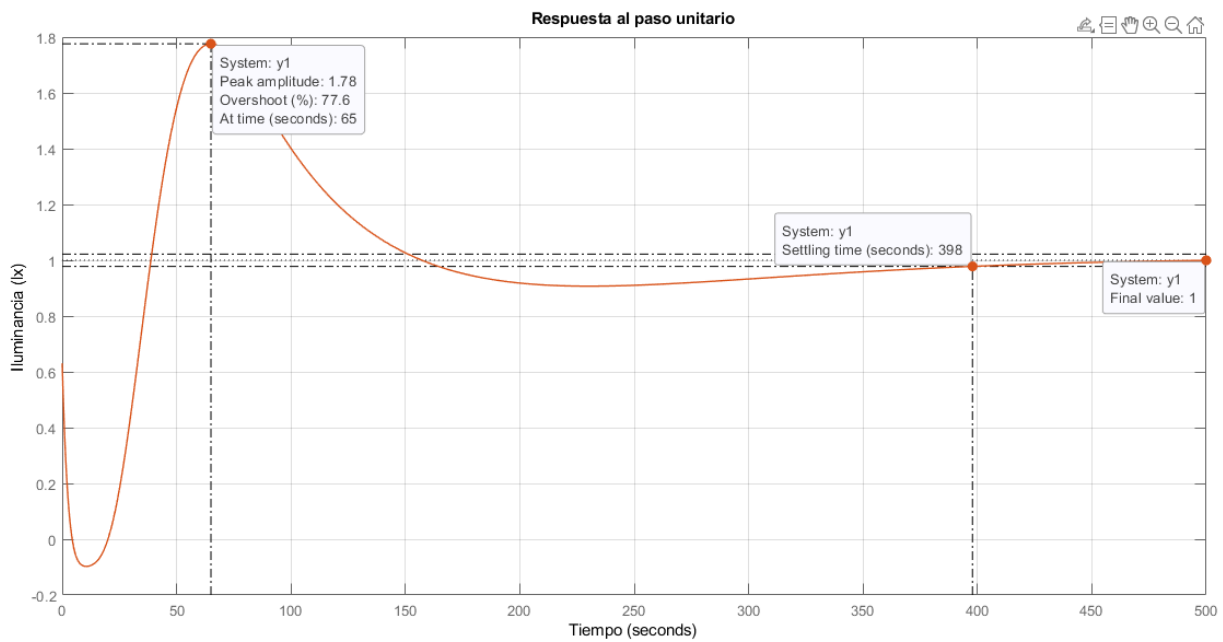


Figura 3-33: Salida del sistema, $y_1(t)$, producida con controlador $C_1(s)$

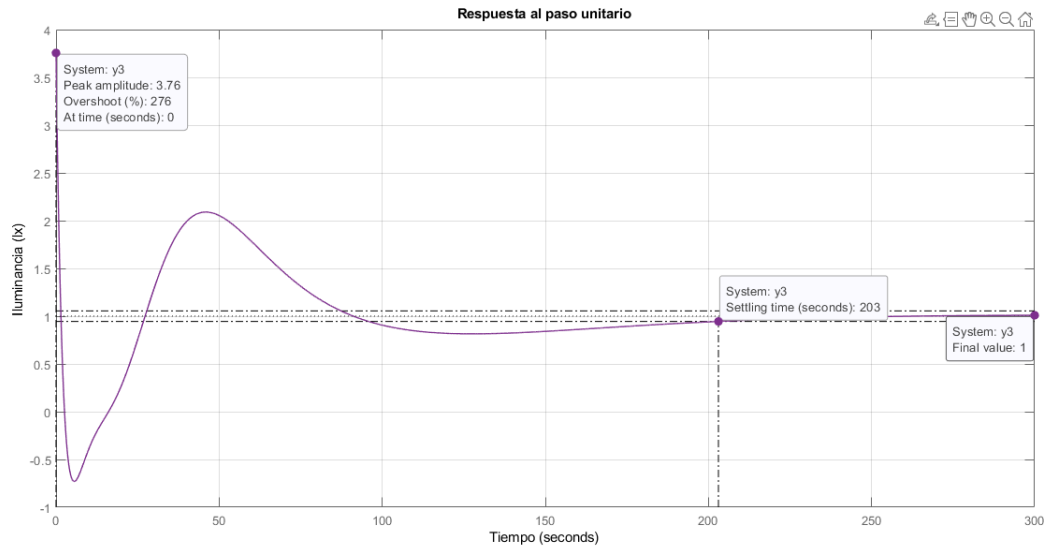


Figura 3-34: Salida del sistema, $y_3(t)$, producida con controlador $C_3(s)$

Tras identificar la respuesta al escalón unitario, ahora con usando la planta con la bombilla de 20W, se vuelve a presentar el mismo inconveniente del caso anterior, donde se estaba definiendo el tiempo de asentamiento al llegar al $\pm 2\%$ de la referencia. Por lo tanto se vuelve a realizar el ajuste del tiempo de asentamiento, considerando $\pm 0,1\%$, y agrando , que el error final del sistema sigue siendo cero, es decir, tras unos segundos más, la salida sera exactamente igual a la referencia colocada. Los tiempos de asentamiento obtenidos son 469 segundos con $C_1(s)$ y 243 segundos con $C_2(s)$

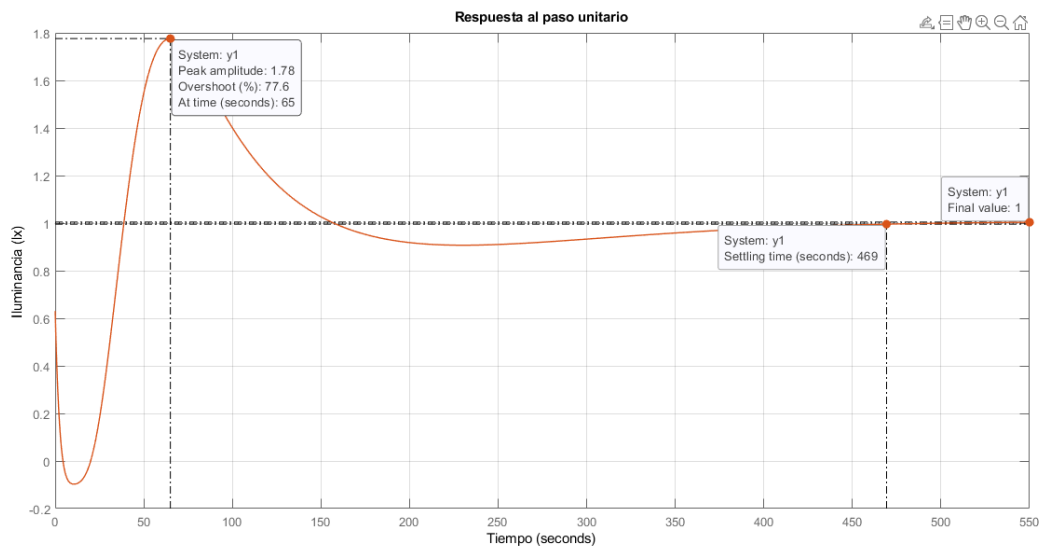


Figura 3-35: Salida del sistema, $y_1(t)$, producida con controlador $C_1(s)$, corrección del tiempo de asentamiento.

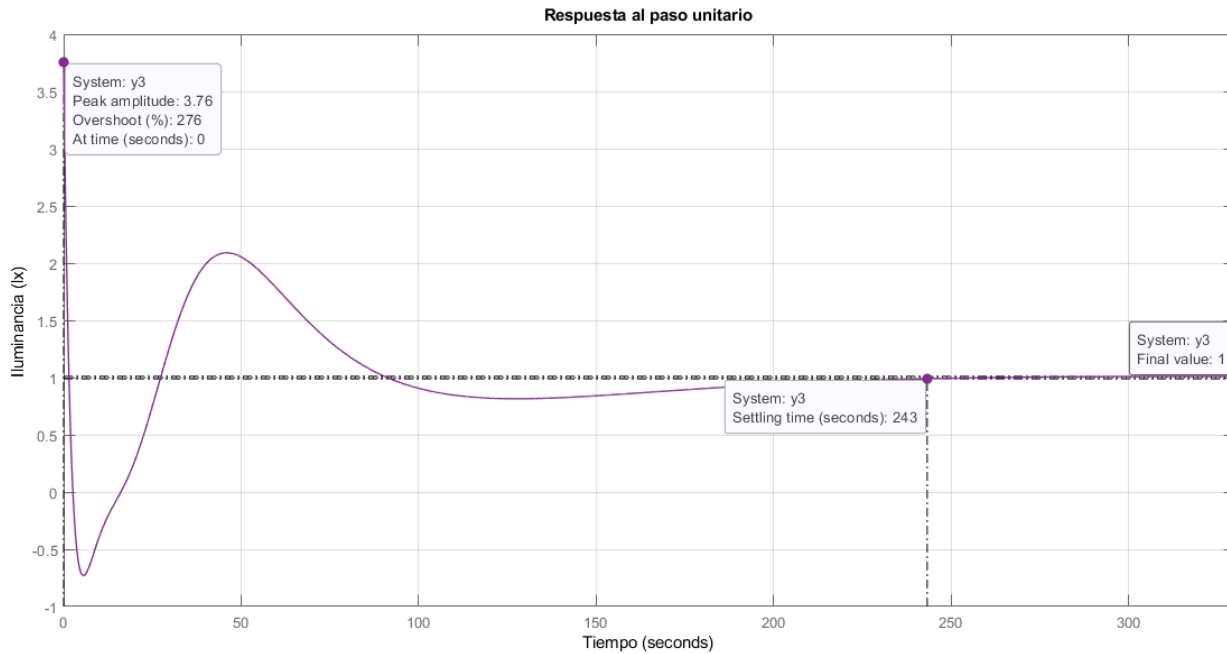


Figura 3-36: Salida del sistema, $y_3(t)$, producida con producida controlador $C_3(s)$, corrección del tiempo de asentamiento.

Con los elementos expuestos en este capítulo, bombillas halógenas de 20W y 50W y controladores para la ubicación de la fuente de luz y del panel de pruebas, siendo utilizados en conjunto, es posible realizar una actualización del sistema de calibración de luxómetros, generando una disminución en el error de medida, y en los tiempos de operación, y un aumento en el rango de calibración.

Sin embargo, para todo esto, se deben tener en cuenta ciertas consideraciones, principalmente enfocadas a los controladores regulatorios; debido a su dependencia del modelo de la planta, es importante no cambiar las bombillas, ni los límites físicos de operación, pues esto produciría cambios en la planta, y por consiguiente los controladores deberían ser diseñados nuevamente.

4 Implementación y evaluación

Con el fin de validar el funcionamiento de los controladores propuestos, y su capacidad de manejar, de manera confiable, el desplazamiento de la fuente de luz y del panel de pruebas, se proponen tres dispositivos para su futura implementación, Arduino, Raspberry Pi y PLC, los cuales, serán evaluados según sus capacidades de procesamiento, rebutes y precio.

4.1. Implementación

Arduino:

Es una plataforma electrónica, de código abierto, conformada por tarjetas de desarrollo y su propio lenguaje de programación. Las tarjetas de desarrollo de Arduino son capaces de leer entradas, tanto analógicas como digitales, y generar salidas igualmente digitales o analógicas; y su lenguaje de programación esta basado en Wiring[1].

La herramienta Arduino presenta grandes ventajas, como bajo costo, ya que tanto las tarjetas de desarrollo como sus periféricos son diseñados para un ambiente más académico, ajustando sus características y precios a este mercado, o software libre, manejando un lenguaje de programación libre y una herramientas de compilación gratuitas. Estas ventajas han generado una enorme comunidad en internet, la cual, de manera activa, comparte código para el manejo de sensores, motores, comunicación serial, etc.

Por otra parte, también presenta serias desventajas, como una nula protección ante sobrecargas o campos electromagnéticos, una baja velocidad de procesamiento, de alrededor de 16 MHz en los modelos de tarjeta más comunes, o reconocimiento a nivel industrial prácticamente nulo.

En cuanto al proyecto, se utilizó una tarjeta Arduino UNO, para la evaluación inicial de la salida digital generada por el luxómetro patrón, figura 4-2, obteniendo información del formato y la velocidad de transmisión, la cual, posteriormente sería usada para realizar un programa capaz de transformar los datos enviados por el luxómetro, figura 4-2, una frase en formato ASCII con el valor de iluminancia medido, en una variable numérica.

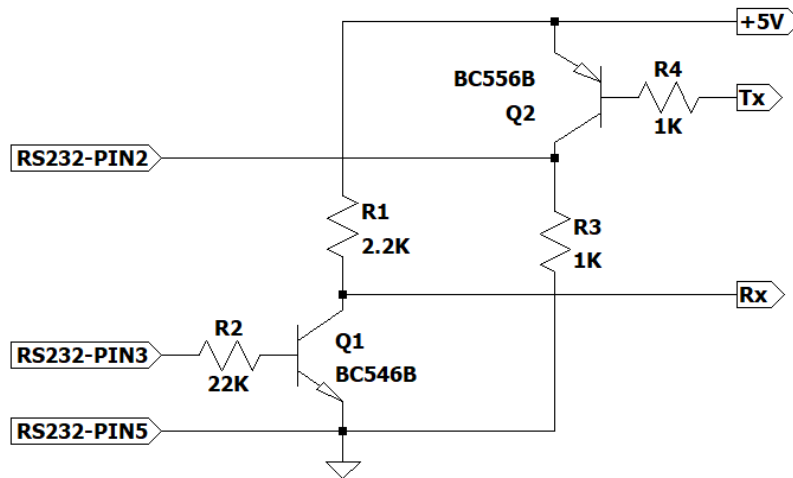


Figura 4-1: Circuito conversor, RS232 a serial.

```

RealTerm: Serial Capture Program 2.0.0.70
+01.484 E+02 lx Input A^%Q^%1 +01.483 E+02 lx Input A^%U^%1 +01.481 E+02 lx
Input A^%I^%1 +01.480 E+02 lx Input A^%0^%1 +01.479 E+02 lx Input A^%S^%1 +01.47
8 E+02 lx Input A^%R^%1 +01.476 E+02 lx Input A^%N^%1 +01.475 E+02 lx Input A^%
^%1 +01.474 E+02 lx Input A^%^%1 +01.474 E+02 lx Input A^%^%1 +01.473 E+02 lx
Input A^%W^%1 +01.472 E+02 lx Input A^%X^%1 +01.472 E+02 lx Input A^%X^%1 +01.47
1 E+02 lx Input A^%I^%1 +01.470 E+02 lx Input A^%Z^%1 +01.470 E+02 lx Input A^%Z
^%1 +01.470 E+02 lx Input A^%Z^%1 +01.470 E+02 lx Input A^%Z^%1 +01.470 E+02 lx
Input A^%Z^%1 +01.470 E+02 lx Input A^%Z^%1 +01.470 E+02 lx Input A^%Z^%1 +01.47
0 E+02 lx Input A^%Z^%1 +01.470 E+02 lx Input A^%Z^%1 +01.470 E+02 lx Input A^%Z
^%1 +01.470 E+02 lx Input A^%Z^%1 +01.470 E+02 lx Input A^%Z^%1 +01.470 E+02 lx
Input A^%Z^%1 +01.470 E+02 lx Input A^%Z^%1 +01.470 E+02 lx Input A^%Z^%1 +01.46
9 E+02 lx Input A^%R^%1 +01.469 E+02 lx Input A^%R^%1 +01.468 E+02 lx Input A^%S
^%1 +01.468 E+02 lx Input A^%S^%1 +01.467 E+02 lx Input A^%N^%1 +01.467 E+02 lx
Input A^%N^%1 +01.467 E+02 lx Input A^%N^%1 +01.466 E+02 lx Input A^%I^%1 +01.46
5 E+02 lx Input A^%I^%1 +01.464 E+02 lx Input A^%I^%1 +01.464 E+02 lx Input A^%I
^%1 +01.463 E+02 lx Input A^%I^%1

```

Figura 4-2: Información entregada por el luxómetro patrón LMT B520 mediante la salida digital RS232.

Sin embargo, esta herramienta no podría usarse para implementar todo el sistema de automatización, teniendo en cuenta que, aunque a nivel de código podría llegar a realizarse, la robustez de las tarjetas de Arduino, al no contar con ninguna protección, es de un bajo nivel.

Raspberry Pi:

Es una tarjeta de desarrollo, diseñada para poder emplearse como un computador simple, manejado mediante periféricos como “mouse” y teclado, y capaz de manejar señales analógicas y digitales, entradas y salidas, como motores DC o sensores de distancia[16].

Esta herramienta tiene como ventajas, su alta capacidad de procesamiento, usando procesadores de hasta 1.5 Ghz, en su versión más reciente, una programación basada en software libre, Python en este caso, y tanto la tarjeta como sus periféricos maneja costos accesibles.

Pero, también tiene ciertas desventajas, como su estructura, la cual es más sólida que una de Arduino, pero sigue sin contar con protección contra sobrecargas, campos electromagnéticos o vibraciones, lo cual continúa afectando su reconocimiento a nivel industrial, y quedando más como una herramienta de carácter académico.

Teniendo en cuenta las ventajas y desventajas de la herramienta Raspberry, se decidió probar una implementación inicial del control de sensores y actuadores para determinar su funcionamiento en un montaje real. Los periféricos probados son:

- Un motor paso a paso NEMA 17, de alta potencia, encargado, al momento de una implementación final, de desplazar el panel de pruebas, con el sensor del luxómetro patrón y el luxómetro a calibrar montados.
- Motor DC genérico de 12V, para simular el usado para desplazar la fuente de luz.
- Driver de potencia, para el manejo de cada uno de los motores, figura 4-3.
- Convertidor de RS232 a serial, encargado de tomar los datos enviados desde el luxómetro patrón, y transformarlos en información manejable desde la Raspberry.
- Láser y sensores láser, encargados de determinar cuando el sensor del luxómetro se encuentra ubicado justo al frente de la bombilla de pruebas.
- Cámara 5mpx para Raspberry Pi, para la toma de registro fotográfico de las pruebas, figura 4-4.

Con los elementos mencionados, se realizaron diversas pruebas, en las cuales se manejaban ambos motores, y al momento de ser necesario poder, tomar fotografías. El movimiento de los de los motores es limitado, en el caso del paso a paso los sensores láser delimitarían el punto donde el sensor del luxómetro, tanto el patrón o el que se desea calibrar, se encuentra perfectamente alineados con la bombilla de pruebas, mientras en el caso del motor DC, el límite lo generan dos interruptores, usados como finales de carrera, ubicados en los extremos del riel sobre el cual se desplaza la fuente de luz.

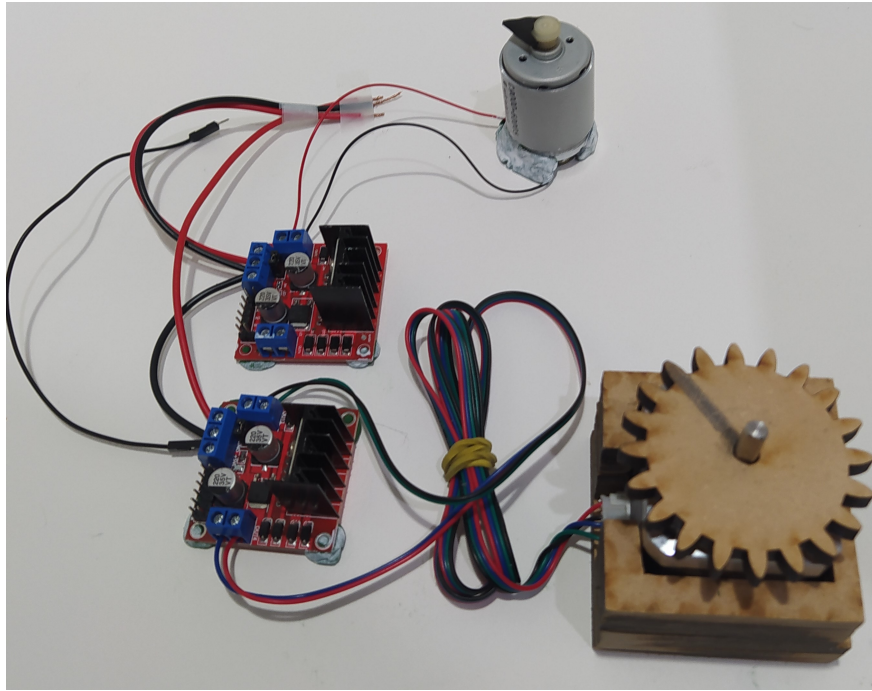
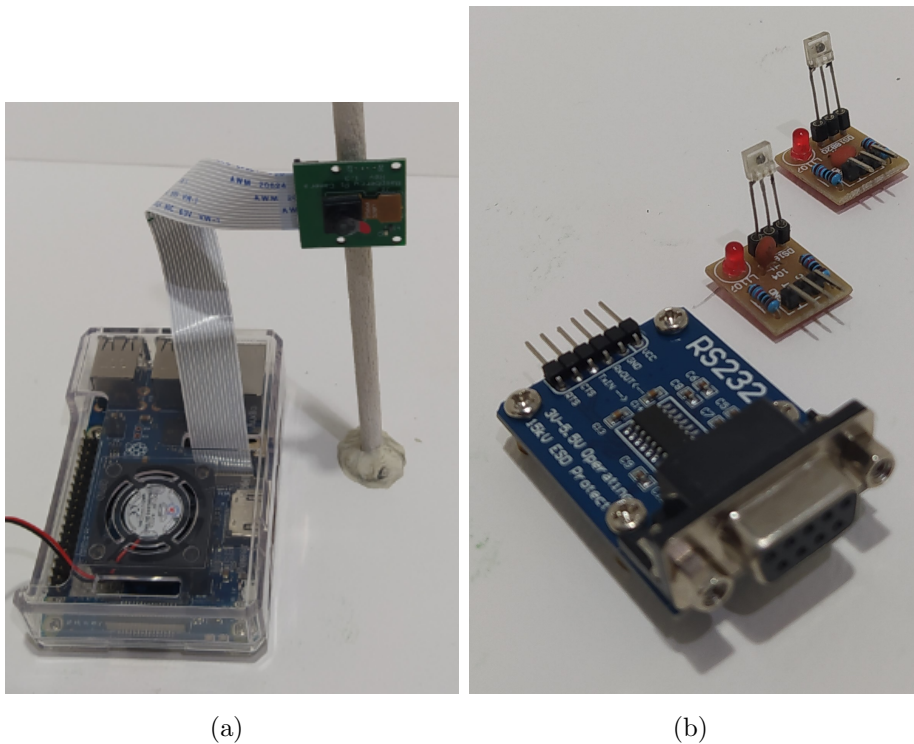


Figura 4-3: Motor paso a paso, motor DC y drivers de potencia.



(a)

(b)

Figura 4-4: (a) Raspberry Pi B+ y cámara de 5mpx. (b) Sensores láser y convertidor RS232-Serial.

Finalmente, haciendo uso de un PC, como transmisor de información, y simulando el luxómetro patrón, se implementa el convertor de RS232 a serial, y se verifica su interacción con la tarjeta Raspberry Pi, usando los datos recibidos para mover los motores, tanto el paso a paso como el DC, todo esto, haciendo parte de un montaje completo, en el cual, es posible manejar todo el proceso de calibración de manera manual, aunque remota mediante una consola, o automática, aplicando los controladores diseñado para el desplazamiento de la fuente de luz y del panel de pruebas.

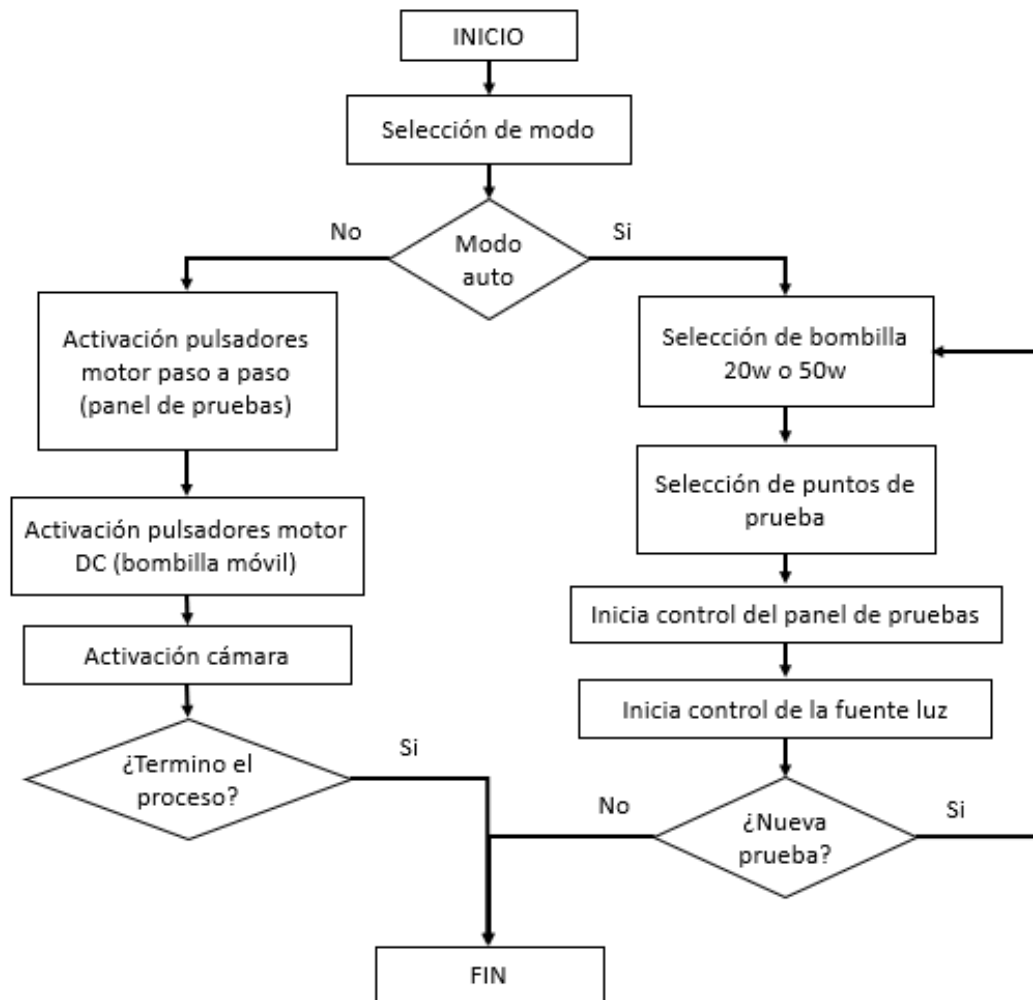


Figura 4-5: Diagrama de flujo del funcionamiento del sistema completo.

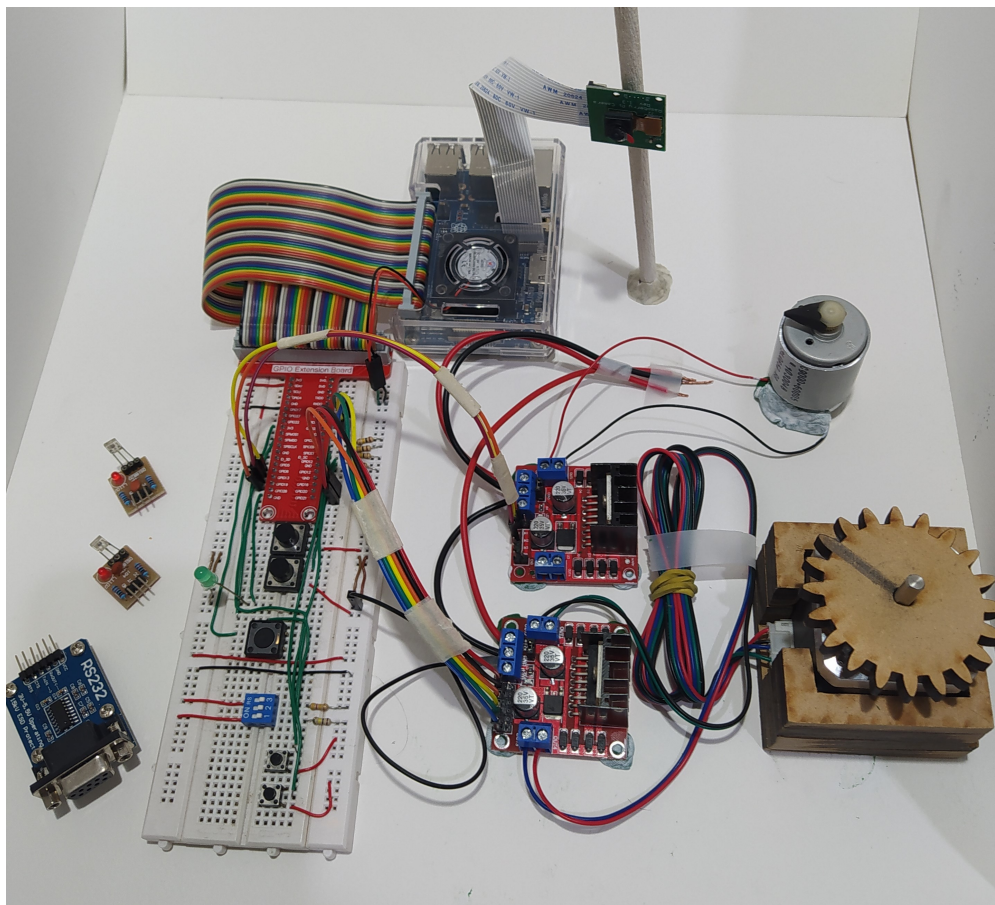


Figura 4-6: Montaje de simulación.

PLC:

Un PLC, o controlador lógico programable, por sus siglas en ingles, es un ordenador usado para la automatización de procesos electromecánicos, al ser capaz de manejar y procesar múltiples señales de entrada y salida, tanto analógicas como digitales[5].

El PLC cuenta con diversas ventajas como buena velocidad de procesamiento, variable de un fabricante a otro, o lenguajes de programación estandarizados, como Ladder o GRAFTSET; pero su mayor cualidad son las protecciones contra ruido electromagnético, sobrecargas, cambios de temperatura y vibraciones, lo cual, en conjunto, lo hace una herramienta perfecta para trabajar en ambientes industriales.

Sin embargo, también presenta algunas desventajas como su alto precio, la necesidad de un software especializado, pago y propio para cada fabricante, con el cual realizar la programación, o la necesidad, en algunos casos, de periféricos extras para el manejo de señales más especializadas, los cuales, suelen tener también costos elevados.

En el ámbito del proyecto, en busca de dar mucho peso a la robustez de la herramienta implementación, y del sistema en general, por encima de los temas de costo; se presenta el PLC como gran opción de implementación, la cual, a nivel computacional, puede manejar los controladores diseñados, con algunas variaciones según el fabricante del PLC, y a nivel físico, contaría con las protecciones necesarias contra sobrecargas, vibraciones, cambios de temperatura y ruido electromagnético.

4.2. Evaluación

Tras concluir con la presentación de soluciones, se realiza una evaluación de los resultados obtenidos y se comparan los parámetros del sistema de calibración de luxómetros actual, con los obtenidos del sistema actualizado.

Parámetro	Valores identificados	Valores obtenidos
Método de calibración	Comparativo (NIST)	Comparativo (NIST)
Tipo de bombilla	Halógena (50W)	Halógena (50W y 20W)
Temperatura de color	2856 K	2856 K
Luxómetro patrón	LMT B520	LMT B520
Rango de calibración	Desde 125 lx hasta 1000 lx	Desde 18 lx hasta 1320 lx
Tiempo del procedimiento	75 minutos (aproximadamente)	35 minutos (aproximadamente)

Tabla 4-1: Comparación de parámetros entre sistema actual de calibración de luxómetros y sistema actualizado.

En la tabla 4-1, se evidencia como el rango de calibración sería aumentando, tanto en la parte superior como en la inferior, siendo esta última un espacio sobre el cual el área de metrología del LABE tenía más intención de incursionar, debido a la existencia de diversos áreas donde se emplean luminarias con estos valores de iluminancia, como, por ejemplo, las luces de seguridad de espacios cerrados.

Por otra parte, tiempo de operación, considerado como la suma del tiempo de desplazamiento del panel de pruebas, más los segundos de espera dados hasta lograr la estabilización los valores medidos por los luxómetros y más el tiempo de desplazamiento de la fuente de luz, todo multiplicado por 5 pruebas y por 5 puntos a calibrar, se lograría reducir hasta algo menos de la mitad.

Sin embargo, existe otro parámetros no considerado en la tabla, pero de igual, o incluso mayor importancia, como lo es la disminución del error, ya que al no dejar el desplazamiento y la ubicación de la fuente de luz y del panel de pruebas, en manos de la habilidad visual de un operario, es posible garantizar ubicaciones más precisas. Esta precisión en la ubicación, mejoraría también reproducibilidad y repetibilidad de las pruebas; aunque sería necesario un estudio más profundo, para determinar con exactitud el error producido con el sistema actualizado, teniendo en cuenta la intervención de otras fuentes de error, como la herramienta de implementación o los periféricos usados.

Finalmente, se realiza un análisis económico, para tener una visión más completa del proyecto, tomando las siguientes consideraciones:

- El proceso actual de calibración necesita de dos operarios a la hora de realizar las pruebas, uno realiza los desplazamientos de la fuente de luz y de los luxómetros, mientras otro toma el registro de los datos medidos con el luxómetro a calibrar. Posteriormente, solo uno de los operarios realiza el análisis de los datos obtenidos.
- El tiempo de calibración se considera como la suma entre el tiempo tomado para hacer la pruebas de calibración, más el tiempo usado en el análisis (aproximándolo a 30 minutos).
- A los operarios se les pagan dos salarios mínimos legales vigentes, de 2020.

Manejando estas consideraciones, se realiza un flujo de caja, para cada uno de los sistemas, el sistema actual y el sistema actualizado. El ingreso, para ambos casos, sería de \$582,000, costo actual de una calibración de luxómetro realizada por el LABE[19]; mientras para egresos, en primer lugar se descuenta 1/3 del pago, el cual es dado a la universidad, esto para ambos casos, y posteriormente, para la realización de las pruebas, con el sistema actualizado, ya no sería necesario ningún operario, y solo se utilizaría el disponible para hacer el análisis de los datos.

Con las condiciones mencionadas, se obtienen con el sistema actual ganancias de \$364,224, por calibración, mientras con el sistema actualizado las ganancias llegarían a los \$382,513, 15 por prueba.

Ahora, se revisa este flujo de caja a nivel anual y se verifica cuanto tiempo tomaría recuperar una inversión, “Payback”, de \$12'000,000, precio del proyecto implementado en un PLC. Para esto se consideraron dos escenarios, de varios posibles, y se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla **4-2**.

- Escenario 1: Se realizan dos calibraciones semanales con ambos sistemas, el actual y el actualizado.
- Escenario 2: Se realizan dos calibraciones con el sistema actual, pero el sistema actualizado, al tener un rango más amplio, se comienza a realizar una calibración más cada tres semanas.

	Escenario 1	Escenario 2
Sistema actual (ganancia anual)	\$ 37'879.304	\$ 37'879.304
Sistema actualizado (ganancia anual)	\$ 39'781.367	\$ 45'748.572
Diferencia entre los sistemas	\$ 1'902.062	\$ 7'869.267
Payback	6 años y 4 meses	1 año y 7 meses

Tabla 4-2: Resultado de ganancia anual y payback, para escenarios 1 y 2.

En la tabla 4-2, se puede apreciar como al aumentar el número de calibraciones por semana, lo cual sería resultados de tener un producto más completo de frente al mercado, se lograría pagar el proyecto en 1 año con 7 meses, todo esto considerando tan solo una calibración más cada 3 semanas.

5 Conclusiones y recomendaciones

- Tras la implementación de bombillas con diferentes valores nominales de potencia y caracterizadas para obtener 2856 K, de temperatura de color, fue posible el aumento del rango de calibración, tanto en la parte superior, de 1000lx a 1320lx, como en la inferior, de 125lx a 17.40lx.

Así mismo, y con el fin de lograr un aumento aún mayor del rango de calibración, sería recomendable la realización de pruebas con bombillas halógenas de valores nominales de potencia diferentes a los ya expuestos en este trabajo, o la revisión de estrategias diferentes, como el aumento de la distancia disponible para el desplazamiento de la fuente de luz.

- El controlador diseñado, para la automatización del desplazamiento de panel de pruebas, implementable tanto en Raspberry Pi como en PLC, genera una disminución en el error de posición de los luxómetro, al igual que aminora los tiempos de operación, al eliminar actividades innecesarias como la ubicación y retiro del láser al tomar cada medición.

En este caso, se recomienda la instalación de sensores láser de acción rápida, y un láser de haz de luz delgada, al ser estos parámetros los encargados de determinar el error presentado en la posición de los luxómetros, así como el correcto posicionamiento de los sensores y el láser en el banco de pruebas.

- El controlador diseñado para la automatización del desplazamiento de la fuente de luz, garantiza un error de posición igual cero y la disminución en los tiempos de operación, llegando a utilizar únicamente, cerca de, 45 segundos, con el controlador de menor tiempo de asentamiento, para alcanzar un error de posición del 0.1 %.

En este aspecto es recomendable una revisión constante de la literatura de control, ya que constantemente se generan nuevas estrategias, capaces de aumentar la robustez del controlador, disminuir los tiempo de asentamiento, sin depender tanto del sobrepico, o incluso ser diseñadas específicamente para sistemas no-lineales, como es el caso del sistema aquí evaluado.

- Finalmente, al incluir una cámara, capaz de registrar los valores de iluminancia medidos por el luxómetro a calibrar, se elimina una etapa de la calibración actual, el operario registrando de maneara manual cada valor medido, y genera una evidencia fotográfica de las pruebas realizadas,

Bibliografía

- [1] ARDUINO.CC. 2020. Recuperado de <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>. What is Arduino?
- [2] ASSOCIATION, International Dark-Sky. *Human Health*. Recuperado de <https://www.darksky.org/light-pollution/human-health/>. 2019
- [3] ASSOCIATION, International Dark-Sky. *Measuring Light Pollution*. Recuperado de <https://www.darksky.org/light-pollution/measuring-light-pollution/>. 2019
- [4] DE L'ECLAIRAGE. CIE, Commission I. *International lighting vocabulary*. Recuperado de <http://www.cie.co.at/publications/international-lighting-vocabulary>. 2011
- [5] ELECTRIC, Innergy. 2020. Recuperado de <https://innergy-global.com/es/divisiones/innergy-electric/soluciones/software/plc>. PLC: Controlador lógico programable (programmable logic controller)
- [6] LABORATORIO DE ENSAYOS ELÉCTRICOS INDUSTRIALES, LABE. *Manual de procedimiento para la calibración de luxómetros*. Versión 2.6. 2017
- [7] LABORATORIO DE ENSAYOS ELÉCTRICOS INDUSTRIALES, LABE. *INFORME DE ENSAYO LABE04IE8328*. Tablas 1, 2 y 4. 2019
- [8] LABORATORIO DE ENSAYOS ELÉCTRICOS INDUSTRIALES, LABE. *Objetivos*. Recuperado de <http://www.labe.unal.edu.co/objetivos.html>. 2019
- [9] LABORATORIO DE ENSAYOS ELÉCTRICOS INDUSTRIALES, LABE. *¿Quiénes somos?* Recuperado de <http://www.labe.unal.edu.co/generalidades.html>. 2019
- [10] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, IEC. *Illuminance meter*. Recuperado de <http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=845-05-16>. 1987
- [11] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, IEC. *Calibration*. Recuperado de <http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=311-01-09>. 2001
- [12] ENERGY LATIN AMERICA, Green. *Historia del desarrollo de células solares*. Recuperado de <https://www.greenenergy-latinamerica.com/historia-del-desarrollo-celulas-solares/>. 2018

-
- [13] MCGOWAN, N.M. *Medir la luz: la evolución hacia el fotómetro moderno*. Recuperado de <https://revistas.ucm.es/index.php/ARIS/article/viewFile/54857/50995>. 2017
- [14] MCGOWAN, N.M. *Medir la luz: la evolución hacia el fotómetro moderno*. Recuperado de <https://revistas.ucm.es/index.php/ARIS/article/viewFile/54857/50995>. 2017
- [15] OHNO, Y. *Nist Measurement Services*. <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.250-89>. 1997
- [16] RASPBERRYPI.ORG. 2020. Recuperado de <https://www.raspberrypi.org/help/what-is-a-raspberry-pi>. What is a Raspberry Pi?
- [17] ROSAS, R. *Calibración de Luxómetros y su uso en la medición de niveles de iluminación*. Recuperado de <http://www.cenam.mx/publicaciones/gratuitas/descarga/pdf/callux.pdf>. 2010
- [18] TESTO. 2019. Recuperado de <https://www.testo.com/es-ES/productos/luxometro>. Luxómetros de Testo: rápidos, fiables y precisos
- [19] UNAL, LABE. 2020. Recuperado de <https://labe.unal.edu.co/index.php/solicitudes-y-tarifas>. Solicitudes y tarifas