



Sistema de control para eficiencia energetica y confort luminico

The control system for energy efficiency and lighting comfort

Sistema de controle para eficiência energética e conforto de luz

Gabriel Vinicio Moreano-Sánchez^I
gabriel.moreano@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-9331-8223>

Cristian Javier Lalón-Asqui^{III}
cristian.lalon@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-5446-8368>

Julio Eduardo Cajamarca-Villa^{II}
julio.cajamarca@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-6568-6037>
Jacqueline Viviana Tobar-Escobar^{IV}
vivian-tobar@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-1969-0481>

Correspondencia: gabriel.moreano@esPOCH.edu.ec

Ciencias técnicas y aplicadas
Artículos de investigación

***Recibido:** 16 de marzo de 2021 ***Aceptado:** 22 de abril de 2021 ***Publicado:** 05 de mayo de 2021

- I. Máster Universitario en Automática y Robótica, Máster Universitario en Diseño y Gestión de Proyectos Tecnológicos, Ingeniero en Electronica y Control, Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- II. Master Universitario en Ingeniería Electromecánica, Ingeniero Electrónico, Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- III. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- IV. Investigador Independiente, Ecuador.

Resumen

El confort dentro de un ambiente de trabajo es un eje fundamental en la respuesta que las personas darán durante su tiempo de permanencia del mismo, de manera análoga un estudiante al recibir clases debe de tener las condiciones ambientales más adecuadas para desarrollar su máximo de atención, es por esto que se ha tomado uno de los factores que interfieren en el aula como es la iluminación para el presente estudio, basados en la norma INEN se ha realizado la medición de luxes que se presenta en el aula en el transcurso del día con luminosidad natural, para luego analizar la necesidad de iluminación artificial y el consumo de energía eléctrica que se necesita, esto se realizó en un modelo a escala que nos permite realizar varias pruebas con un circuito de luz led blanca y posteriormente la regulación con un sistema de control automático realizado en un microprocesador, que nos asegura el mantener una cantidad de luxes en el transcurso del día así como el confort y una eficiencia energética.

Palabras Clave: Modelo; Circuito; Led; Control; PID; Sintonización; Luxes; Nivel de Luminosidad.

Abstract

Comfort within a work environment is a fundamental axis in the response that people will give during their time of permanence, likewise a student when receiving classes must be in the most appropriate environmental conditions to have maximum attention, This is why one of the factors that interfere in the classroom, such as lighting, has been taken for the present study, based on the INEN standard, the measurement of luxes that is presented in the classroom in the course of the day with natural light, to then analyze the need for artificial lighting and the consumption of electrical energy that is needed, this was carried out in a scale model that allows us to carry out several tests with an LED light circuit and later the regulation with a PID controller made in Arduino, which ensures us to maintain a number of luxes throughout the day as well as comfort and energy efficiency.

Keywords: Model; Circuit; Led; Control; PID; Set Point; Tuning; Luxes; Luminosity Level; Luminous Flux; Gain.

Resumo

O conforto dentro de um ambiente de trabalho é um eixo fundamental na resposta que as pessoas irão dar durante o seu tempo de permanência no mesmo, da mesma forma um aluno ao receber aulas deve ter as condições ambientais mais adequadas para desenvolver a sua atenção máxima, por isso um dos fatores que interferem na sala de aula, como a iluminação, foi considerado para o presente estudo, com base no padrão INEN, foi realizada a medição dos luxos que se apresentam na sala de aula ao longo do dia com a luz . natural, para então analisar a necessidade de iluminação artificial e o consumo de energia elétrica que é necessário, esta foi realizada em uma maquete que nos permite realizar vários testes com um circuito de luz LED branco e posteriormente a regulação com um controle Sistema Automático realizado em microprocessador, o que garante a manutenção de uma série de luxos ao longo do dia, bem como conforto e eficiência energética. ética.

Palavras-chave: Model; O circuito; Conduziu; Ao controle; PID; Tuning; Luxos; Nível de brilho.

Introducción

La norma (NEC, 2011) al hablar de confort lumínico, refleja en la recomendación de un nivel de luminosidad general y está graduada por dos factores lumínicos, el natural y el artificial, el cual esta normalizado bajo rangos expuestos en (NEC, 2018), dichos valores están establecidos para diferentes lugares de trabajo, cabe mencionar que para realizar los cálculos de la intensidad luminosa se debe de analizar el color de luz, el espectro de incidencia de la luminaria, las superficies de reflexión entre otras ((INSHT), 2013), considerándose que los techos deben de tener un factor de reflexión del 75%, los suelos y paredes entre el 20 y 25%, equipos de trabajo entre el 20 y 40% (Martínez & Valencia, 2010). El enfoque de la presente investigación es mantener un nivel lumínico controlado a lo largo del tiempo (Sanz Arranz, 2010), en función al cambio de luz natural(Lopez Fernandez & Mideros, 2018), que se genera en el transcurso del día en el aula de A7 de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo y así analizar “la iluminación correcta y reflexión adecuada del ambiente, además de otros parámetros de la calidad de la iluminación como son la uniformidad, el índice de deslumbramiento y el rendimiento del color apropiados permiten al hombre, en condiciones confortables de confort, desempeñar su trabajo de forma más segura y alto rendimiento en el trabajo, ya que incrementa la visibilidad en el entorno del trabajo y permitiendo vigilar mejor el medio ambiente laboral utilizado” (Munive Álvarez, 2020).

El ahorro del coste energético es de vital importancia para reducir ese presupuesto en facturación anual por consumo energético (Ministerio de Electricidad y Energías Renovables et al., 2016), ya que al no tener el control de la cantidad de luxes que existen en el ambiente de trabajo, esto se vería reflejado en un consumo excesivo de energía eléctrica, además de provocar fatiga visual por exposición a cantidades de luxes no recomendables, también en centros de estudios podría provocar una falta de atención en los estudiantes (Gualla & Jiménez, 2019), al igual que un cambio en su actividad psicológica normal (Guadalupe Obregón Sánchez Misaela Francisco Márquez, 2018).

El proyecto en si busca generar un control automático en donde dicha cantidad lumínica sea de confort para el personal que se encuentre en dicho ambiente según lo establezca la norma (RETILAP, 2010) y a su vez esta disminuir el consumo energético, presto a que una vez seteado la cantidad de luxes en el ambiente el control PID mandara más brillo a los focos led si la cantidad de luminosidad natural es menor y así evitar un sobresfuerzo visual por falta de luminosidad (GERALDO & PANIZA, 2014), de igual manera si existe mayor cantidad de energía lumínica natural el controlador disminuirá el brillo en dichos focos, y así reducirá el coste por consumo eléctrico, manteniendo el ambiente a la luminosidad que sea comfortable para el personal.

El proyecto se plasmó en una maqueta a escala (Figura. 7), la construcción de dicha maqueta se la realizo en cartón prensado y cabe mencionar que es monocromática y se le ha implementado de inmuebles también a escala para poder acercarnos más a la realidad del aula y por ende a una realidad del sistema de control.

Mediante Arduino se realizó el control PID el cual se encarga de regular los valores de que generen disturbios para el control del sistema (Soto Latorre & Velásquez Duque, 2012), a su vez mediante Matlab y Simulink se realizado la sintonización de nuestra función de transferencia, para que el modelado tenga un tiempo de respuesta mínimo antes cambios y bifurcaciones que se presenten.

Materiales y Métodos

La presente investigación tiene como objetivo analizar el comportamiento de iluminación natural que presenta un aula de clases, así como el comportamiento con luz artificial, para mediante un controlador PID estabilizar el nivel de luxes que presenta el mismo, para ello se ha realizado una revisión bibliográfica de diferentes investigaciones realizadas en aulas, edificios y ambientes de

trabajo donde interviene la iluminación como factor decisivo en el desempeño de las personas, además se toma en consideración la realización de una maqueta en cartón prensado. La planta cuenta con una base rectangular donde se encuentra toda el área de control y la segunda parte está conformada por una caja que simula el ambiente de un cuarto en la vida real, dentro de la misma se tiene el panel de led, la cámara que permite visualizar las pruebas y los LEDs de perturbación externa. Para alimentar este sistema se utilizó una fuente de 5v voltios a 640 mA. La señal es regulada por una fotorresistencia (LDR) para alimentar el circuito de control que medirá la cantidad de luxes del entorno.

Para el desarrollo del proyecto se realizaron las siguientes actividades:

- Generar una base datos con las medidas necesarias basadas en el plano (Figura. 3).
- Señalar en los planos los puntos de luz medidos, con estos puntos de medición al momento de generar la simulación, da como resultado una asimilación más real ya que el estado del Aula A7 (Figura. 2) con respecto a la iluminación tanto natural como artificial es diferente según su ubicación (Figura. 1), pues esta aula posee de ventanales grandes y tienen persiana, por lo cual es necesario apuntar todas las observaciones, además se medirá el aula.

Figura 1: Plano 080 de la ubicación del Edificio de la E.I.M(Espoch-Riobamba).

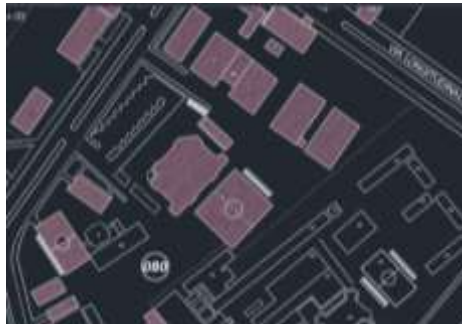


Figura 2: Plano D. de la ubicación del Aula A7 de la E.I.M (Espoch-Riobamba).

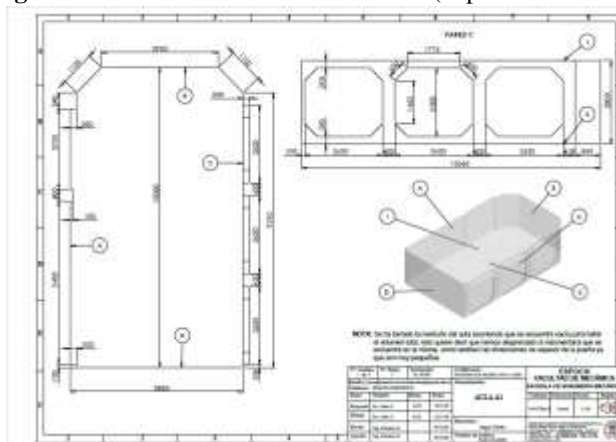


Diseño y Estructura

La parte física (Figura. 7) de la planta está conformada por un circuito (Figura. 5), actuadores en la forma de LEDs (Diodos Emisores de Luz), Arduino, Potenciómetro, Resistencias y una fotorresistencia LDR (Figura. 6) que se encargara de variar su resistencia en conforme a la cantidad de luxes que se encuentren en el ambiente.

Dicha resistencia está conectada de forma que, mientras más luminosidad se encuentre en el ambiente, en la conexión del puente enviará un menor voltaje y mientras que se esté en mayor oscuridad o menor cantidad de luxes sucederá lo contrario, enviando más voltaje al circuito.

Figura. 3: Plano del Aula A7 de la E.I.M(Espoch-Riobamba).



Panel de accionamiento LED

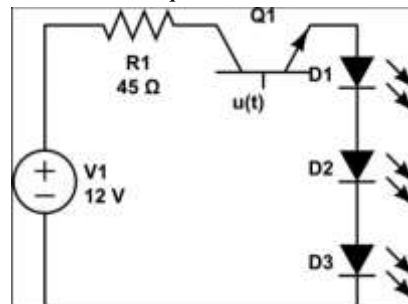
El panel consta de 33 LEDs (Figura. 4) y una resistencia de limitación de corriente para su protección (Figura. 5; Error! No se encuentra el origen de la referencia.), la red de LED's se encuentra conectada en paralelo para asegurar el mismo nivel de voltaje en cada uno de los 33 diodos lumínicos. Cada diodo lumínico de color blanco funciona con un voltaje nominal de 3.7 V y cada uno soporta una corriente nominal de 20mA, la regulación de intensidad lumínica se gobierna por la variación de voltaje que se le entregará a cada uno mediante el circuito de control que a su vez será comandado por el microprocesador. El sistema opera con una fuente de 12 voltios de potencia por lo que se acomodaron tres luminarias en paralelo por cada rama, en la Figura. 5 se puede observar el circuito representativo para cada rama de conexión, en total son 11 ramas para implementar el sistema lumínico completo.

Figura 4: Panel Led.



Para poder controlar el nivel de iluminación del entorno se debe variar el valor de voltaje que alimenta a cada LED, en este caso se controlará la cantidad de voltaje que alimenta a cada rama de LED's, esto se logra con transistores que actúan como dispositivos de acoplamiento entre las etapas de control y potencia en cada rama del circuito (Figura. 5), se utiliza un transistor en cada rama con la misma señal de control para asegurar que la distribución de voltaje y corriente del circuito sea equitativa, en otro trabajo se podría independizar los sectores de iluminación del entorno.

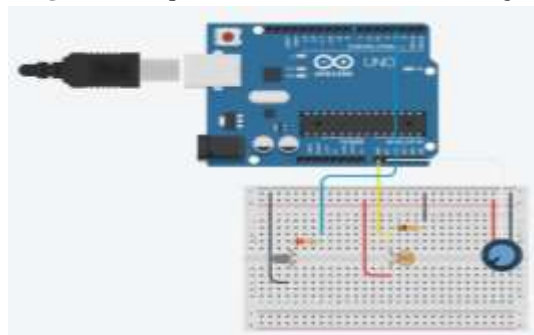
Figura 5: Circuito Equivalente de Diodos Lumínicos.



Diseño del sistema control

La etapa de control está compuesta principalmente por el microprocesador que en este caso es un Arduino, el cual recibe la señal acondicionada del LDR para conocer el valor de luminiscencia real que existe en el entorno, a su vez recibe el valor de consigna o set point de un potenciómetro también acondicionado para generar una señal de entrada dentro de ciertos límites de iluminación, la señal de salida será una señal PWM que alimentará a cada uno de los 11 transistores de los paneles de iluminación (Figura. 6).

Figura 6: Esquema del circuito de control digital.



Niveles de Luminosidad

Los niveles de luminosidad permisibles garantizan una visibilidad adecuada para el desarrollo de las actividades cotidianas en las diferentes áreas del edificio. es muy importante la utilización de iluminación eficiente, mediante luminarias de alto rendimiento, que incorporen equipos de bajo consumo y lámparas de alta eficacia luminosa (lumen/watio), unidas al uso de sistemas de regulación y permitirá tener unos buenos niveles de confort sin sacrificar la eficiencia energética.

Figura 7: Maqueta realizando el control Lumínico.



Los niveles de luminosidad deben ser basados al origen de todos los proyectos de iluminación para lugares de trabajo en interiores, por lo que se recomienda el cumplimiento no solo cuantitativo, sino cualitativo de dos aspectos de la tarea visual que se resumen brevemente:

- a. Confort visual.
- b. Rendimiento de colores

Dentro del confort visual estarán englobados parámetros tales como la relación de luminancias entre tarea y entorno, o el control estricto del deslumbramiento producido por las fuentes de luz, o incluso el modo de evitar deslumbramientos reflejados en las pantallas de ordenadores. En un aspecto más materialista se describe de modo muy detenido la importancia de la utilización de factores de mantenimiento correctos a emplear en las instalaciones de alumbrado, teniendo en

cuenta las pérdidas propias de envejecimiento de los componentes o el ensuciamiento de sus superficies ópticas.

Pero lo que de verdad introduce una novedad notable, por lo que significa de mejora para el usuario de las instalaciones, es el aspecto relativo al rendimiento de colores. Como todo el mundo probablemente conoce existen una serie de fuentes de luz, masivamente empleadas en la iluminación de interiores, por razones exclusivamente crematísticas que no cumplen con unos índices mínimos de reproducción cromática, y lo que esta norma plantea es la prohibición de dichas fuentes de luz en iluminaciones de tareas visuales. Las cuales están expuestas a continuación en la Tabla 1.

Tabla 1: Cantidad mínima de luxes para diferentes lugares de trabajo.

Lugar iluminado	Tipo o lugar de trabajo	Rango de intensidad lumínica
Escuelas	Realización de experimentos	700 - 1500
	Trabajos en la pizarra	700 - 1500
	Realización de dibujos o diseños gráficos	700 - 1500
	Pasillos	150 - 300
	Aulas en general	150 - 300
	Sala de lectura	700 - 1500
	Comedor	300 - 700
		1500 - 3000
Oficinas	Sala y trabajos con ordenadores	1500 - 3000
	Realización de dibujos o diseños gráficos	300 - 700
	Reuniones	150 - 300
	Comedor	300 - 700
		1500 - 3000
Fábrica	Recepción	700 - 1500
	Naves de producción	700 - 1500
	Oficina de desarrollo	1500 - 3000
	Oficina de planificación	700 - 1500
	Realización de trabajos en laboratorio	300 - 700
	Empaquetado de productos	150 - 300
	Almacén	300 - 700
		300 - 700
Hospitales	Salas eléctricas	700 - 1500
	Sala de visitas	700 - 1500
	Formación	150 - 300
	Formación anatómica	70 - 150
	Sala de tratamientos y primeros auxilios	150 - 300
	Farmacia	700 - 1500
	Lectura en cama (pacientes)	300 - 700
Hoteles	Sala de rayos X	150 - 300
	Lavandería	150 - 300
	Recepción	150 - 300
	Entrada	150 - 300

	Sala de banquetes	70 - 150
	Oficinas	70 - 150
	Restaurante	70 - 150
	Baños	1500 - 3000
	Lavandería	1500 - 3000
	Bar	700 - 1500
	Pasillos	300 - 700
	Escaleras	300 - 700
Ocios	Escaparate	150 - 300
	Salas de exposición	70 - 150
	Empaquetados	
	Sala de espera	
	Sala de reuniones	
	Baños	
	Escaleras	

PID

El controlador proporcional, integral, derivado o controlador PID, es una técnica de control de procesos que combina acciones integrales, derivativas y ganancias sobre el error existente en una variable de un proceso, provocando que esta señal de error sea minimizada por una acción de control enviada a un actuador o dispositivo reprogramable.

Generalmente el control PID es aplicado a sistemas SISO donde se tendrá una única variable controlada en función de una única variable de control, se trata del control más aceptado y documentado a nivel industrial y a nivel de sistemas embebidos también debido a su bajo coste computacional y relativa facilidad de sintonización. En este proyecto se simula un control de luminiscencia en base a un Arduino y la matriz de LED's antes indicadas, el sistema se expondrá a acciones externas que simularán perturbaciones como sombras o luz excesiva en el sensor o en el ambiente o incluso bloquear el sensor.

La acción de control pretende mantener un error de cero en régimen permanente y debido a su modelo dinámico pretende eliminar las perturbaciones de la manera más eficaz posible, para evaluar el comportamiento dinámico del sistema se generan perturbaciones como:

- Disminución de la luz incidente en el LDR (simulada por una sombra en LDR), el sistema aumentará automáticamente el brillo del LED tratando de mantener una iluminación ambiental constante.
- Aumento de la luz incidente en el LDR (una linterna puede aumentar el brillo con fines de simulación), el sistema reducirá el brillo del LED tratando de mantener una iluminación ambiental constante.

La presente investigación presenta un sistema de control más que un sistema regulador por lo que el valor de la consigna o set point podrá ser modificable dentro de los parámetros de confort lumínico indicados en el punto 2.4.

Modelado matemático

Para hallar nuestra función de transferencia, se realizó la toma de datos de los valores de Luxes en el ambiente y se midió el voltaje de salida para los actuadores (Leds), tal como se indica en la (Figura. 8), donde con la ayuda del luxómetro se obtiene la cantidad de luminosidad en el ambiente a distintas horas del día y a su vez el valor de voltaje con el que se están alimentando los LED's. Los datos obtenidos fueron almacenados generando la Tabla 2, la cual entregará una curva característica de nuestro sistema y con esta se determinó la función de transferencia donde la salida es el voltaje y la entrada es la cantidad de luxes.

Figura 8: Maqueta realizando la toma de datos de Luxes y Voltaje entregado.

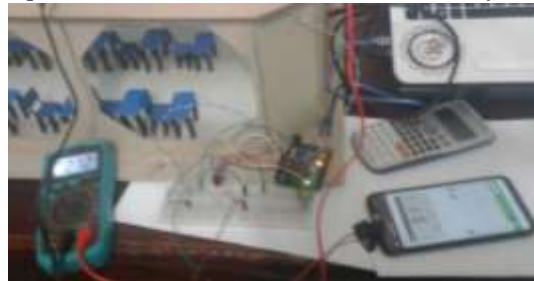


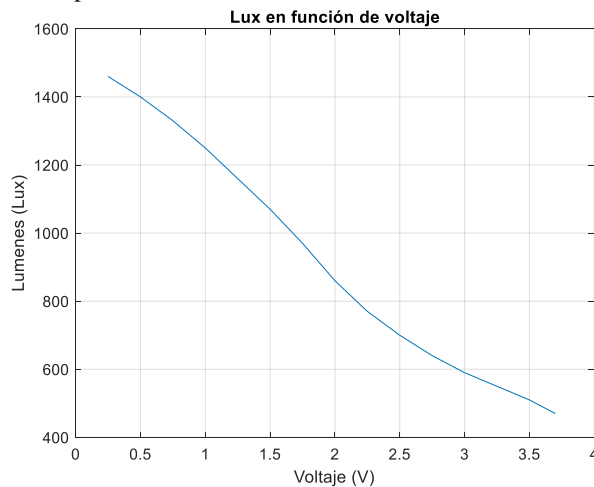
Tabla 2: Valores medidos en lazo abierto

<i>No</i>	<i>LUX*100</i>	<i>V</i>
1	0	2.731
2	15	2.632
3	18	2.612
4	21	2.599
5	24	2.574
6	27	2.062
7	30	1.989
8	33	1.914
9	36	1.656
10	39	1.644
11	42	1.642
12	45	1.639
13	48	1.635
14	51	1.407
15	54	1.174
16	57	1.046
17	60	1.017

<i>18</i>	<i>63</i>	<i>1.085</i>
<i>19</i>	<i>66</i>	<i>0.758</i>
<i>20</i>	<i>69</i>	<i>0.457</i>

Se grafica los luxes vs. el voltaje de la Tabla 2, obteniendo (Figura. 9), la curva es decreciente producto del efecto del LDR, esta curva es sumamente útil para poder determinar el comportamiento del sistema en el caso del prototipo y en general para cualquier ambiente ya que se puede obtener la ecuación de comportamiento de la iluminación en función del voltaje que alimenta a los LED's, el modelo matemático se obtiene de esta forma experimental ya que no existe una relación física lo suficientemente documentada y aceptada entre la luminiscencia y la intensidad lumínica de una fuente artificial como para poder utilizar su principio en obtener el modelo dinámico del sistema.

Figura 9: Curva de respuesta del sistema de iluminación artificial más iluminación natural.



Una vez obtenida la gráfica del sistema se puede obtener la ecuación (1) que representa el comportamiento dinámico y estático del sistema.

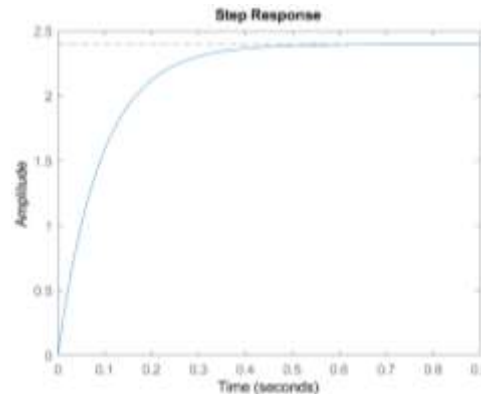
$$y = 25.97e^{-0.1387} \quad (1)$$

Si se conoce la señal de respuesta del sistema ante la señal de entrada y asumiendo que la entrada al sistema fue una rampa se puede obtener la función de transferencia del sistema por cualquier método de aproximación, en este caso la función de transferencia del sistema resulta la mostrada en la ecuación (2).

$$G(s) = \frac{25.97}{s+10837} \quad (2)$$

De la función de transferencia se observa que se trata de un sistema estable lo que concuerda con la lógica de operación, la respuesta del sistema ante una entrada escalón unitario en lazo abierto resulta la curva mostrada en la Figura. 10.

Figura 10: Respuesta escalón unitario del sistema de iluminación en lazo abierto.

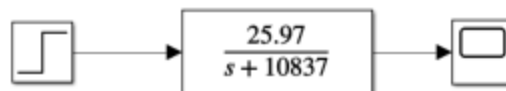


De la Figura. 10 se puede deducir que si bien el sistema es estable también tiene un error en régimen permanente en lazo abierto extremadamente grande más del 200%, por otra parte, su tiempo de estabilización es sumamente rápido lo que se demuestra en la realidad dado que son sistemas rápidos.

Desarrollo del controlador

En Simulink de Matlab se diseña el circuito de lazo abierto conformado por una entrada STEP, la ecuación característica (1), aplicada en la (Figura. 11) y un Scope para poder observar el comportamiento a la salida.

Figura 11: Sistema en lazo abierto del sistema.



Por la forma de la función de transferencia (1), se puede deducir que es una función de primer orden (3).

$$G(s) = \frac{ke}{Ts+1} \quad (3)$$

Teniendo los valores que representan a la misma:

$$k_e = 2.396 \quad (4)$$

$$T = 0.0922 \quad (5)$$

Además, se considera que la realimentación será unitaria ya que el sistema es digital y el análisis del controlador se valorará en el dominio discreto. Bajo esta consideración el error en régimen estacionario del sistema resulta:

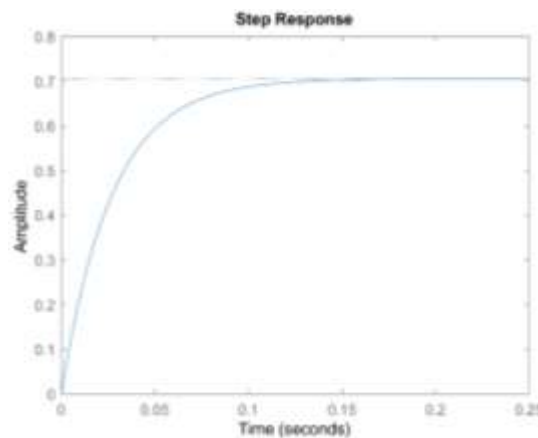
$$E_p = \frac{1}{1+2.396} * 100 = 29.41\% \quad (6)$$

Una vez que se considere el sistema con el sensor de luminiscencia y asumiendo la realimentación unitaria se tiene la función de transferencia en lazo cerrado que se muestra en la ecuación (7)

$$M(s) = \frac{25.97}{s+36.81} \quad (7)$$

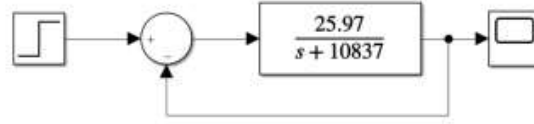
La respuesta al escalón unitario de dicho sistema realimentado se muestra en la Figura. 12 donde se puede observar que el sistema se mantiene estable al tener un polo real negativo y además se comprueba que el error en régimen permanente bordea el 29%.

Figura 12: Respuesta escalón unitario del sistema realimentado.



El diagrama de lazo cerrado del sistema queda de la siguiente manera (Figura. 13):

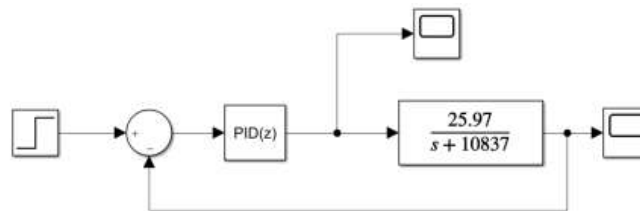
Figura 13: Respuesta escalón unitario del sistema realimentado.



Debido a la dinámica estable del sistema se añade un controlador PID para intentar reducir un poco el tiempo de estabilización, de ser posible, pero más que nada para intentar corregir el error en estado estable del sistema. Se conecta el controlador en serie la función de transferencia y esta genera una retroalimentación dando el circuito de lazo cerrado.

La implementación del control para simulaciones y la sintonización del regulador se muestra en la Figura. 14, donde se puede apreciar que el controlador es discreto pero la planta es continua, esta diferenciación de señales no perjudica al sistema ya el regulador discreto a su salida posee un retenedor de orden cero que convertirá la acción de control nuevamente a continua antes de ingresar a la planta.

Figura 14: Diseño del sistema en lazo cerrado con la función de transferencia encontrada



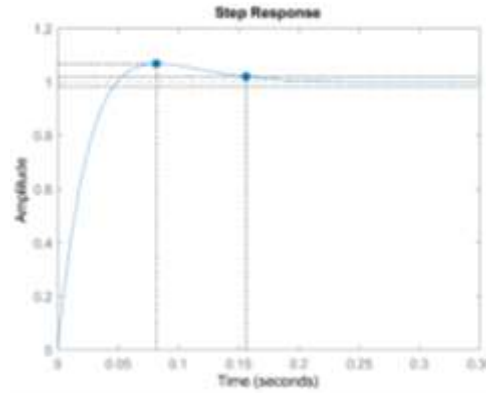
Sintonización PID

Para la sintonización del regulador PID se tienen varias alternativas muy conocidas y documentadas como los modelos de Ziegler-Nichols pero que son más adoptadas para sistemas de segundo orden.

Antes de identificar una estrategia de sintonización conviene entender que el sistema es de primer orden y estable en lazo cerrado sin un sobrepico por lo que no tendría sentido incluir una etapa derivativa en primera instancia, un segundo aspecto a determinar es que el sistema tiene un error en régimen estacionario grande por lo que será más que seguro que se necesitará una etapa integradora, es decir, bajo este se sintonizaría un controlador PI.

Al ser un sistema estable de bajo riesgo de aplicación bastará con una sintonización heurística ZN para establecer los valores de las ganancias k_p y k_i , en primera instancia se buscó una ganancia proporcional crítica y se acomodó la ganancia integradora a fin de eliminar el error en estado estable, estas ganancias se comprobaron en el modelo de simulación obteniendo la curva de respuesta mostrada en la Figura. 15.

Figura 15: Curva estabilizada por un controlador PID.



Los valores de sintonía del regulador PI que arrojaron la mejor respuesta son los mostrados en la Tabla 3.

Tabla 3: Valores de parámetros K_p , K_i , K_d .

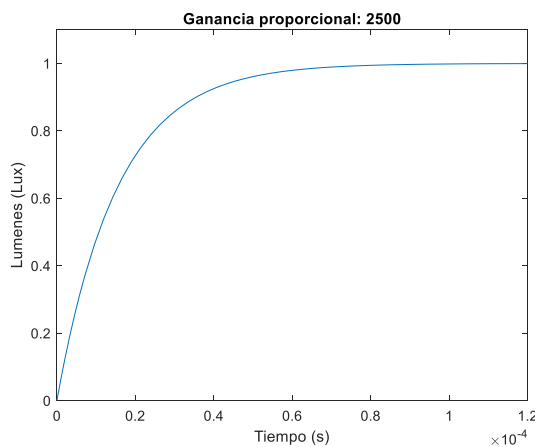
Parámetros de controlador	
k_p	1.752
k_i	37.26
N	n/a

El controlador PI junto con sus ganancias obtenidas del proceso de sintonización eliminan el error en estado estacionario del sistema y genera una buena respuesta dinámica donde se observa que hay un sobrepico de no más del 6.5% y un tiempo de estabilización de aproximadamente 0.155 segundos, estas características son ideales para este tipo de sistemas y quiere decir que el sistema lumínico tendrá un control casi ideal e imperceptible para el ojo humano en cambios pequeños de la consigna, dentro de los resultados se valorará la capacidad que tiene el sistema de responder ante situaciones de perturbación.

Resultados y Discusión

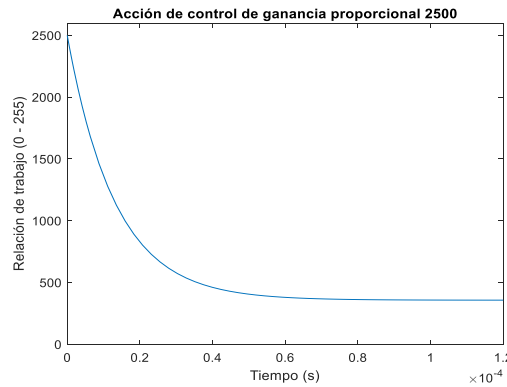
El primer caso de prueba consiste en analizar el controlador de tipo P (Proporcional), al ser un sistema de primer orden y estable en lazo cerrado es lógico pensar que se pueda eliminar el error en estado estable del sistema con una acción proporcional (Figura. 16), en esta prueba se añadió una ganancia máxima de 2500, con lo que se puede apreciar que efectivamente se reduce considerablemente el error, pero no del todo.

Figura 16: Gráfica de la reacción de la planta en lazo cerrado con constante proporcional de 2500.



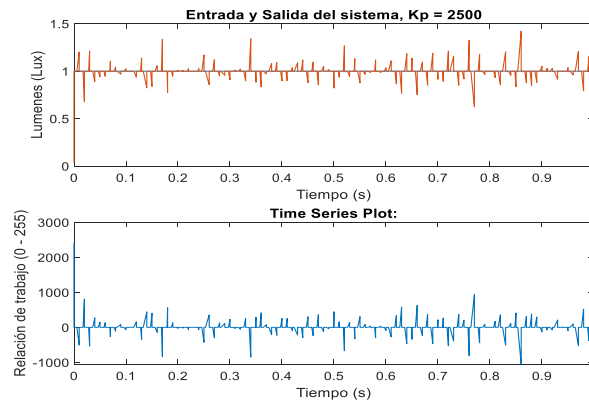
El control proporcional no elimina el error en estado estable del sistema, aunque si lo vuelve mucho más rápido como se puede ver en la Figura 26, el tiempo de estabilización no va más allá de $0.1 \mu\text{s}$. A más del problema del error en estado estacionario este controlador de excesiva ganancia proporcional genera el problema en la acción de control, al tratarse de una ganancia tan grande la acción de control intentará llevar la señal PWM a un valor imposible de generar por el microprocesador (una señal PWM de un Arduino envía una relación de trabajo variable entre los valores unitarios de 0 255), tal como se ve en la Figura. 17 que muestra la acción de control enviada a los transistores para regular el voltaje en los LED's.

Figura 17: Acción de control de ganancia proporcional de 2500.



Como prueba final se analizará el comportamiento del sistema ante ruido blanco que representa las perturbaciones que puede experimentar el sistema en operación continua, es decir, variaciones en la luz ambiental al atardecer o al amanecer, sombras iluminación excesiva, etc. En la Figura. 18 se muestra la respuesta del sistema de control en un sistema perturbado.

Figura 18: Grafica de la entrada, salida y acción de control del sistema con $K_p = 2500$, ante ruido blanco.

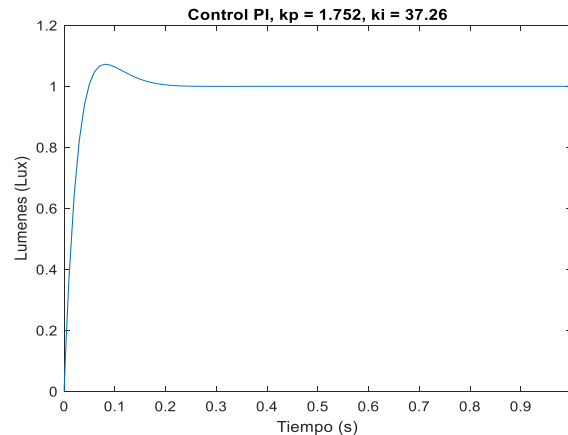


En la Figura 18 se observa que la repuesta del sistema ante el ruido blanco es bastante rápida, si es verdad no se elimina la perturbación, pero no las deja actuar por demasiado tiempo, esta repuesta rápida a costa de tener acciones de control sumamente grandes que impediría su implementación en el sistema real.

Para eliminar el error en estado estacionario tratando de no elevar de manera exagerada la acción de control se utiliza la componente integral que trabaja no solo en función del error del sistema sino también sobre el error pasado o acumulado del sistema, reduciendo la ganancia proporcional

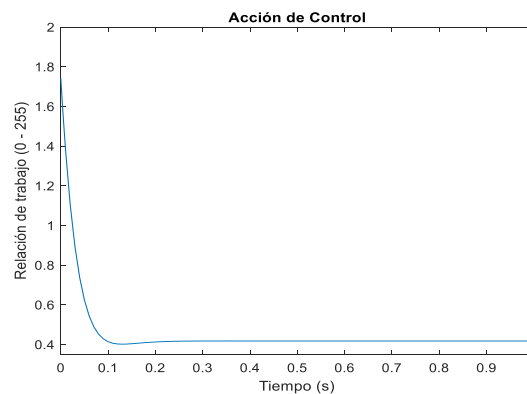
e incluyendo la ganancia integral mostrada en la Tabla 3 se obtiene la curva de respuesta mostrada en la Figura. 19.

Figura 19: Respuesta del sistema con controlador PI, $k_p = 1.752$, $k_i = 37.26$.



Como se puede ver en la Figura. 19 el sistema se vuelve mucho más lento que cuando integraba únicamente el control proporcional, pero sin dejar de ser una respuesta adecuada ya que el tiempo de estabilización está por debajo del medio segundo lo que lo convierte en imperceptible al ojo humano, además el control PI logra eliminar el error en estado estable de manera eficiente, esto se puede asegurar al ver la curva de la señal de control enviada a los actuadores (ver Figura. 20).

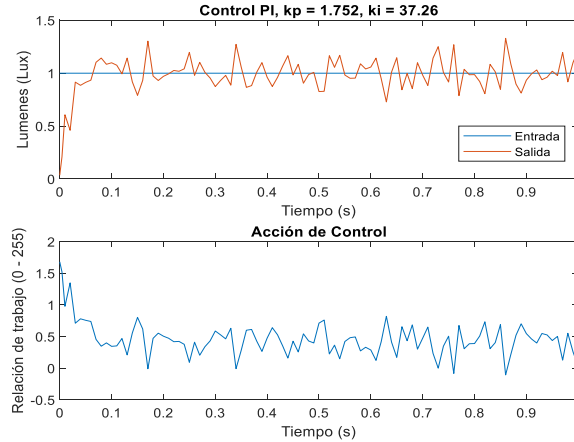
Figura 20: Gráfica de la acción del control, $k_p = 1.752$, $k_i = 37.26$.



La Figura. 20 muestra que la acción de control que se debe enviar a los actuadores para tener la luminiscencia de 1 lumen no llegaría al valor numérico de 2 hablando de la relación de trabajo de la señal PWM, cuestión que mejora indiscutiblemente respecto al control proporcional. Para

terminar la comparación de resultados se vuelve a incluir el ruido blanco al controlador para conocer la respuesta del control PI.

Figura 21: Grafica de respuesta del controlador PI ($k_p = 1.752$, $k_i = 37.26$) ante ruido blanco.

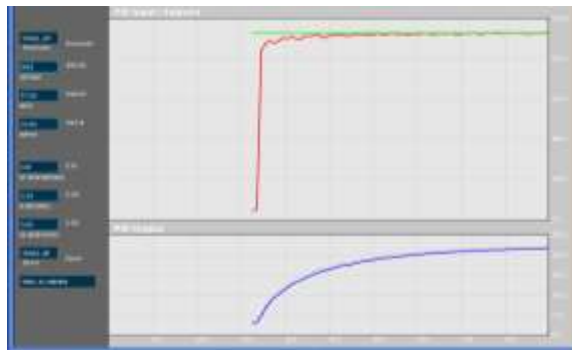


La Figura. 21 muestra que el control PI es menos rápido ante el ruido blanco que perturba al sistema, pero lo reduce considerablemente como para que no afecte al funcionamiento del sistema, además la señal de acción de control no tiene valores irreales o inalcanzables como el control proporcional, es decir, el control PI es fácilmente construible.

Implementación y resultados reales

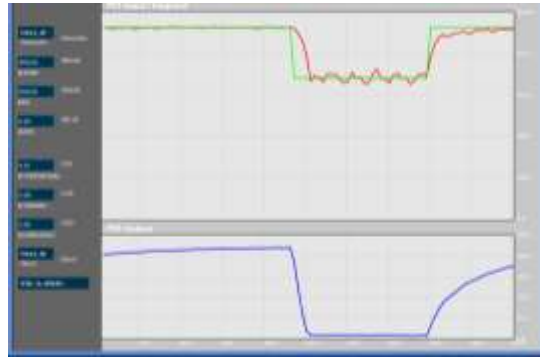
En la Figura. 22, se pueden observar las curvas de respuesta del sistema a una consigna de 950 lux, la entrada del sistema (línea verde) se mantiene constante el valor de consigna mientras la curva de respuesta la alcanza y se estabiliza en menos de un segundo, en la segunda gráfica (línea azul) se puede observar la variación de la acción de control del sistema.

Figura 22: Respuesta del sistema real ante una variación del SP.



En la Figura. 23 se muestra otra prueba del sistema con dos variaciones del punto consigna para apreciar la curva de respuesta del sistema y la estabilidad que pudiese presentar en estado estable.

Figura 23: Respuesta del sistema ante perturbaciones reales.



La curva de respuesta de la Figura. 23, indica que el sistema tiene bastante ruido a pesar de que el sistema se mantiene alrededor del punto de consigna el error en estado estable no se elimina del todo, esto se debe en general al ruido electromagnético existente en el sensor ya que los actuadores no generan mayores interferencias al ser dispositivos LED de bajo consumo.

La acción de control del sistema se observa con una respuesta rápida y atractiva para conservar el punto de consigna del sistema.

En general el sistema responde de manera casi imperceptible a los cambios de iluminación por lo que se considera viable su implementación en sistema con mayores requerimientos con las respectivas mejoras de componentes como sensores y el dispositivo de control.

Conclusiones

- El modelo matemático de un sistema lumínico es difícil identificación analítica puesto que las leyes físicas que definen este tipo de sistemas son influenciadas por varios factores ajenos al comportamiento dinámico del sistema como puede ser sombras difíciles de detectar o modelar o como la inclinación con que se percibe la luz en el entorno, razón por la cuál la mejor forma para identificar este tipo de sistemas es la experimental.
- El modelo de los sistemas lumínicos se puede representar de manera adecuada y sencilla como un sistema de primer orden, esta conclusión también incide en que la mejor manera de identificación es la experimental.

- Un sistema lumínico resulta ser un sistema de primer orden sumamente rápido, pero con un alto error en régimen permanente, en lazo cerrado todos sus polos se encuentran en el semiplano negativo del plano real-imaginario por lo que se deduce que el sistema, esto quiere decir que el controlador que se le asocie deberá únicamente reduciendo el error en estado estable sin modificar de manera exagerada la dinámica del sistema.
- La implementación real del sistema es sumamente didáctica ya que es un sistema rápido y se puede observar que el sistema se estabiliza en cualquier punto de consigna que se le asigne dentro de los límites de operación (confort lumínico), el ruido presentado por el sistema real podría mejorar con un mejor acondicionamiento de las señales de consigna y de actuación.

Referencias

1. (INSHT), I. N. de S. e H. en el T. (2013). Iluminación en el Puesto de Trabajo. Iluminación En El Puesto de Trabajo, 43. <https://www.insst.es/documents/94886/96076/Iluminacion+en+el+puesto+de+trabajo/9f9299b8-ec3c-449e-81af-2f178848fd0a>
2. GERALDO, A. P., & PANIZA, G. M. (2014). ERGONOMÍA AMBIENTAL: Iluminación y confort térmico en trabajadores de oficinas con pantalla de visualización de datos. <http://ojs.urepublicana.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/228/207>
3. Guadalupe Obregón Sánchez Misaela Francisco Márquez, M. (2018). Impacto Del Factor Iluminación Y Psicosocial En El Desempeño Laboral Del Personal De Apoyo Y Asistencia A La Educación. Caso: UPIICSA. European Scientific Journal, 14(4), 1857–7881. <https://doi.org/10.19044/esj.2018.v14n4p223>
4. Gualla, M., & Jiménez, O. (2019). Evaluación de la influencia de los niveles de iluminación y temperatura del color en la atención a clases, aplicado en un caso en la universidad politécnica salesiana sede cuenca.
5. Lopez Fernandez, D. F., & Mideros, D. (2018). Diseño de un Sistema Inteligente y Compacto de Iluminación. Enfoque UTE, 9(1), 226–235. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v9n1.283>

6. Martínez, M., & Valencia, M. (2010). El Confort Luminico en la Restauración de Edificaciones Históricas del Siglo XVI de la Ciudad de Loja. June, 1–156.
7. Munive Álvarez, J. M. (2020). Calidad de la iluminación en las aulas de clase en una Institución de Educación Superior. *Investigación e Innovación En Ingenierías*, 8(1 SE-Artículos), 192–201. <https://doi.org/10.17081/invinno.8.1.3409>
8. NEC. (2011). Eficiencia energética en la construcción en Ecuador. <https://inmobiliariadja.files.wordpress.com/2016/09/nec2011-cap-13-eficiencia-energic3a9tica-en-la-construccic3b3n-en-ecuador-021412.pdf>
9. NEC. (2018). Eficiencia energética en Edificaciones Residenciales (EE). <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/03/NEC-HS-EE-Final.pdf>
10. RETILAP. (2010). CAPÍTULO 4 DISEÑOS Y CÁLCULOS DE ILUMINACIÓN INTERIOR . Continuación Anexo General del Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público. Ministerio de Minas y Energía República de Colombia, 180540, 77–115. <https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/23517/20729-7853.pdf>
11. Sanz Arranz, Á. (2010). Diseño de una herramienta con Matlab para la adquisición y procesamiento de señales: aplicación a sistema de detección de fallos de rodamientos. 105. <http://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/10474>
12. Soto Latorre, A. C., & Velásquez Duque, D. (2012). CONTROL DE ILUMINACIÓN Y TEMPERATURA POR MEDIO DE UN SISTEMA DOMÓTICO PARA HABITACIÓN DE HOSPITAL ANDRÉS CAMILO SOTO LATORRE DANIEL VELÁSQUEZ DUQUE ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA INGENIERÍA MECATRÓNICA INGENIERÍA INFORMÁTICA ENVIGADO 2012.