

Análisis comparativo de eficiencia entre un sistema de control de iluminación basado en replicadores dinámicos y controlador PID, sensibles a detección de presencia aplicados a un modelo a escala

Juan Camilo Salas Botina

Johan Sebastián Díaz Delgado

Universidad CESMAG

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Electrónica

San Juan de Pasto

2022

Análisis comparativo de eficiencia entre un sistema de control de iluminación basado en replicadores dinámicos y controlador PID, sensibles a detección de presencia aplicados a un modelo a escala

Juan Camilo Salas Botina

Johan Sebastián Díaz Delgado

Informe Final de Trabajo de Grado presentado ante el Comité de Investigaciones y Proyección Social para optar por el título de Ingeniero Electrónico.

Asesor:

William Arévalo.

Universidad CESMAG

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Electrónica

San Juan de Pasto

2022

Nota de Aceptación

Aprobado por el Comité de Investigaciones y Proyección Social en cumplimiento a los requisitos exigidos por la Universidad CESMAG.

William Andrés Arévalo Terán

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'William Andrés Arévalo Terán', written over a horizontal line.

Asesor

Nota de exclusión

Todo el contenido expresado en este trabajo de titulación es de única responsabilidad de los autores y no compromete los principios de la Universidad CESMAG.

Dedicatorias

Mi tesis la dedico a mis padres Octavio Marino Diaz Ordoñez y María Nelly Delgado Riascos, mis hermanos Carlos Andrés Diaz Delgado y Mayra Alejandra Diaz Delgado, ya que ellos son los pilares que construyeron la persona que soy hoy en día y los que siempre han estado en todos los momentos fundamentales de mi vida.

A mis compañeros y familia gracias por su amor, cariño y comprensión.

JOHAN SEBASTIAN DIAZ DELGADO

En primer lugar, agradecerle a Dios por brindarme la vida y la salud, y dedicar este logro a mis padres a Juan Giraldo Salas y Sonia Isabel Botina, mi hermana Carolina, ya que, con sus esfuerzos y sacrificios me han apoyado siempre, quienes con su amor y paciencia me han impulsado a ser mejor, y gracias a ellos hoy soy un profesional.

Quisiera agradecerle y dedicarle este logro a mi novia Vanessa, quien ha sido mi fuerza y apoyo siempre, la persona que me levanta y no ha dejado que me rinda en este camino, sino por el contrario es quien me anima a superarme cada día.

Dedicarle este logro a mi tío Francisco Salas, quien me apoyó en momentos cruciales en mi carrera y me permitió seguir adelante.

Agradecimientos a la Universidad CESMAG por abrirme sus puertas y ser el lugar donde me formé como ingeniero y también como persona.

JUAN CAMILO SALAS BOTINA

Contenido

Introducción.....	14
1. El problema de investigación	16
1.1 Objeto o Tema de investigación	16
1.2 Línea de investigación	16
1.3 Sub línea de investigación	16
1.4 Planteamiento o descripción del problema.....	17
1.5 Formulación del problema.....	18
1.5.1 Objetivos.....	19
1.5.2 Objetivo general.	19
1.5.3 Objetivos específicos.....	19
1.6 Justificación	19
1.7 Delimitación	21
2. Tópicos del Marco Teórico	23
2.1 Antecedentes.....	23
2.1.1 Plataforma para el control distribuido de iluminación en edificios inteligentes. 23	
2.1.2 Diseño e implementación de un controlador distribuido utilizando dinámicas de replicadores.	23
2.1.3 Ingeniería de control moderna.....	24
2.1.4 Optimización de enjambre de partículas basada en PID en Control de luz de oficinas.	24
2.1.5 Control de iluminación con detección y actuación inalámbricas distribuidas para la luz del día y la adaptación de ocupación.	24
2.1.6 Optimización distribuida utilizando dinámicas de población con una ecuación replicadora local.....	25
2.1.7 Control de iluminancia matizona basado en la dinámica del replicador.	25

2.1.8	Adaptación de un algoritmo de optimización basado en replicadores dinámicos aplicado al control de iluminación de recintos con presencia de individuos.....	25
2.2	Enunciado de supuestos Teóricos.....	26
2.2.1	Sistemas de control.....	26
2.2.2	Replicadores dinámicos.....	26
2.2.2.1	<i>Adaptación del replicador local a sistemas de iluminación.....</i>	27
2.2.3	Adaptación del replicador local a sistemas de iluminación.....	27
2.2.2.2	<i>Replicadores dinámicos sensibles a presencia de individuos.....</i>	28
2.2.2.3	<i>Discretización del modelo del replicador dinámico local.....</i>	30
2.2.5	Control PID.....	31
2.2.6	Diseño de PID a partir de lugar geométrico de las raíces (LGR.....)	33
2.2.7	Especificaciones de la respuesta transitoria.....	35
2.3	Definición de variables.....	36
2.3.1	Iluminancia.....	36
2.3.2	Índices de cavidades zonales.....	36
2.3.3	Coeficiente de Utilización (CU).....	37
2.3.4	Reflectancia Efectiva.....	37
2.3.5	Factor de Mantenimiento.....	37
2.3.6	Flujo Luminoso.....	38
2.3.7	Indicadores de desempeño.....	38
2.4	Hipótesis.....	40
3.	Metodología.....	41
3.1	Enfoque.....	41
3.2	Paradigma.....	41
3.3	Método.....	42

3.4	Tipo.....	42
3.5	Diseño	43
3.6	Población	43
3.7	Muestra	43
3.8	Técnicas de recolección e información	43
3.9	Instrumentos de recolección de información.....	44
4.	Resultados.....	45
4.1	Descripción del caso de estudio.....	46
4.1.1	Diseño de maqueta a modelo escala.....	47
4.1.2	Elaboración de maqueta a modelo escala.....	50
4.2	Implementación de los sistemas de control de iluminación.....	52
4.2.1	Modulo EP32.....	52
4.2.2	Sensor BH1750.....	53
4.2.4	Elaboración de tarjeta para los sistemas de control de iluminación.....	54
4.2.5	Descripción de Escenarios.....	56
4.2.5.1	<i>Descripción Escenario 1</i>	57
4.2.5.2	<i>Descripción escenario 2</i>	58
4.2.5.3	<i>Descripción escenario 3</i>	59
4.2.5.4	<i>Descripción escenario 4</i>	60
4.2.6	Implementación de Replicadores dinámicos sensible a presencia de individuos.....	62
4.2.6.1	<i>Topología de comunicación y obtención de datos</i>	62
4.2.6.2	<i>Implementación del algoritmo de replicadores en ESP32</i>	63
4.2.6.3	<i>Escenario 1 con replicadores dinámicos sensible a presencia de individuos</i> ..	64
4.2.6.4	<i>Escenario 2 con replicadores dinámicos sensible a presencia de individuos</i> ..	68
4.2.6.5	<i>Escenario 3 con replicadores dinámicos sensible a presencia de individuos</i> ..	72

4.2.6.6	<i>Escenario 4 con replicadores dinámicos sensible a presencia de individuos.</i>	76
4.2.7	Implementación de controlador PID.	80
4.2.7.1	<i>Función de transferencia de la planta y adaptación del controlador PID.</i>	80
4.2.7.2	<i>Topología de comunicación y obtención de datos PID.</i>	83
4.2.7.3	<i>Escenario 1 con controlador PID sensible a presencia de individuos.</i>	84
4.2.7.4	<i>Escenario 2 con controlador PID sensible a presencia de individuos.</i>	87
4.2.7.5	<i>Escenario 3 con controlador PID sensible a presencia de individuos.</i>	91
4.2.7.6	<i>Escenario 4 con controlador PID sensible a presencia de individuos.</i>	94
5.	Análisis de Resultados.	98
5.1	Indicador integral del error cuadrático (ISE)	98
5.2	Indicador integral del error cuadrático ponderado en el tiempo (ITSE)	101
5.3	Indicador integral del cuadrado de la variación total de la acción de control (ISU)	102
5.4	Indicador integral de la acción de control (IU)	105
	Conclusiones	107
	Recomendaciones	109
	Anexos	110
	Bibliografía	162

Lista de Figuras

Figura 1 Topología de conexión.....	29
Figura 2 Diagrama de bloques de un PID.....	31
Figura 3 Función de transferencia de lazo cerrado.....	34
Figura 4 Distribución de Lámparas y Zonas.....	46
Figura 5 Distancias y cavidades para la aplicación del coeficiente CU	48
Figura 6 Distribución de lámparas	50
Figura 7 Maqueta a modelo escala 4:1.....	51
Figura 8 Esp32 Diagrama de pines.....	53
Figura 9 Modulo BH1750.....	54
Figura 10 Diseño PCB.....	55
Figura 11 Placa del sistema de control de iluminación	56
Figura 12 Distribución de las zonas para cada escenario.....	57
Figura 13 Comunicación anillo bidireccional.....	62
Figura 14 Gráfica de presencias en cada zona para el escenario 1 RD.....	65
Figura 15 Gráfica de iluminación en cada zona para el escenario 1 RD.....	66
Figura 16 Gráfica de potencias en cada zona para el escenario 1 RD.....	67
Figura 17 Ubicación de las fuentes externas de luz	68
Figura 18 Gráfica de presencias en cada zona para el escenario 2 RD.....	69
Figura 19 Gráfica de iluminación en cada zona para el escenario 2 RD.....	70
Figura 20 Gráfica de potencias en cada zona para el escenario 2 RD.....	72
Figura 21 Gráfica de presencias en cada zona para el escenario 3 RD.....	73
Figura 22 Gráfica de iluminación en cada zona para el escenario 3 RD.....	74

Figura 23 Gráfica de potencias en cada zona para el escenario 3 RD.....	75
Figura 24 Gráfica de presencias en cada zona para el escenario 4 RD.....	76
Figura 25 Gráfica de iluminación en cada zona para el escenario 4 RD.....	78
Figura 26 Gráfica de potencias en cada zona para el escenario 4 RD.....	79
Figura 27 Step aplicado al modelo de la planta.	81
Figura 28 Plano complejo y ubicación de los polos LGR.....	82
Figura 29 Comunicación del controlador PID.....	84
Figura 30 Gráfica de presencia en cada zona para el escenario 1 PID.....	85
Figura 31 Gráfica de iluminación en cada zona para el escenario 1 PID.....	86
Figura 32 Gráfica de potencias en cada zona para el escenario 1 PID	87
Figura 33 Gráfica de presencia en cada zona para el escenario 2 PID.....	88
Figura 34 Gráfica de iluminación en cada zona para el escenario 2 PID	89
Figura 35 Gráfica de potencia en cada zona para el escenario 2 PID.....	90
Figura 36 Gráfica de presencia en cada zona para el escenario 3 PID.....	91
Figura 37 Gráfica de iluminación en cada zona para el escenario 3 PID.....	92
Figura 38 Gráfica de potencia en cada zona para el escenario 3 PID	93
Figura 39 Gráfica de presencia en cada zona para el escenario 4 PID	94
Figura 40 Gráfica de iluminación en cada zona para el escenario 4 PID.....	95
Figura 41 Gráfica de potencia en cada zona para el escenario 4 PID.....	97
Figura 42 Valores de ISE de replicadores y PID.....	99
Figura 43 Comparación de iluminaciones de los 4 escenarios	100
Figura 44 Valores de ITSE de replicadores y PID.....	101
Figura 45 Valores de ISU de replicadores y PID.....	103

Figura 46 Comparación de potencias de los 4 escenarios.....	104
Figura 47 Valores de IU de replicadores y PID.....	105
Figura 48 Especificaciones técnicas.....	111
Figura 49 Maqueta	111
Figura 50 Gráfica de iluminancia	113
Figura 51 Curva de calibración zona 1.....	116
Figura 52 Constante de Zona 1	117
Figura 53 Curva de calibración zona 2.....	119
Figura 54 Constante de zona 2.....	119
Figura 55 Curva de calibración zona 3.....	121
Figura 56 Constante de zona 3.....	122
Figura 57 Curva de calibración zona 4.....	124
Figura 58 Constante de zona 4.....	124
Figura 59 Curva de calibración zona 5.....	126
Figura 60 Constante de zona 5.....	127
Figura 61 Curva de calibración zona 6.....	129
Figura 62 Constante de zona 6.....	129
Figura 63 Diagrama de flujo comunicación de RD.....	130
Figura 64 Fitness del escenario 1.....	154
Figura 65 Fitness del escenario 2.....	154
Figura 66 Fitness del escenario 3.....	155
Figura 67 Fitness del escenario 4.....	155

Lista de Tablas

Tabla 1 Niveles de iluminancia	47
Tabla 2 Factores de utilización CU	49
Tabla 3 Descripción escenario 1 RD	58
Tabla 4 Descripción escenario 2 RD	59
Tabla 5 Descripción escenario 3 RD.	60
Tabla 6 Sets points para el escenario 4.....	60
Tabla 7 Descripción escenario 4 RD.	61
Tabla 8 Reflectancias porcentuales.....	110
Tabla 9 Especificaciones Generales ESP32.....	112
Tabla 10 Especificaciones generales BH1750.	114
Tabla 11 Datos calibración sensor en Zona 1	115
Tabla 12 Datos calibración sensor en Zona 2	117
Tabla 13 Datos calibración sensor en Zona 3	120
Tabla 14 Datos calibración sensor en Zona 4	122
Tabla 15 Datos calibración sensor en Zona 5	125
Tabla 16 Datos calibración sensor en Zona 6	127

Introducción

El presente trabajo de investigación tiene como objeto de estudio la comparación de eficiencia entre dos sistemas de control de iluminación, el primero basado en replicadores dinámicos y un sistema de iluminación controlado mediante PID (proporcional integral derivativo) ambos sistemas sensibles a presencia, para la ejecución de los sistemas de iluminación se incluyen lámparas, actuadores, y sensores los cuales interactuaban en los diferentes escenarios planteados.

Este proyecto se enfoca en simular el ambiente de un aula de clase, es por esto, se lleva a cabo las pruebas en un modelo a escala la cual conserva las proporciones de un aula real promedio, al mismo tiempo, se toma como referencia la iluminación recomendada por el Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público (RETILAP) para este tipo de espacios académicos.

Para un mejor estudio del comportamiento de estos sistemas de iluminación se establece recrear diferentes escenarios, en los cuales se propone que determinadas zonas, adquieran y pierdan presencia en diferentes tiempos, también se dispone de lámparas adicionales al interior del modelo, las cuales simulan la luz externa que puede afectar el aula debido a la hora del día o el estado climático.

En cuanto a, la forma de desarrollar el proyecto de investigación comienza con la construcción de la maqueta, la cual se elabora con las dimensiones en proporción a un aula real, así como también se toma en cuenta los criterios de distribución de las iluminarias, sugeridos por RETILAP, del mismo modo, se toma en cuenta los materiales usados para el cálculo del flujo luminoso.

Es así que, para el diseño de los sistemas de iluminación, se hace la caracterización del sensor de luz BH1750, para así obtener las funciones de transferencia de cada lámpara. Al mismo tiempo, se hace uso de un módulo ESP32 por su alta frecuencia de trabajo, fácil programación y, además, este cuenta con la ventaja de poseer comunicación Wifi y Bluetooth, por último, se añade el uso del módulo LM298 para cada lámpara, con el fin de regular la potencia con una señal PWM y cambiar la iluminación de las diferentes zonas.

Por otra parte, para el análisis comparativo de estos sistemas de iluminación con sus determinados datos, se hace uso de indicadores de desempeño como lo son ISE, ITSE, ISU, IU los cuales evalúan criterios como tiempo de respuesta, error de seguimiento y consumo de potencia. Así también se propone hacer una comparación con los antecedentes de simulación realizados por Arévalo (2020).

Pues bien, los sistemas de control de iluminación se conforman por diversos elementos que permiten mejorar algunos aspectos relevantes como seguridad, eficiencia, salud y confort, características que pueden variar dependiendo de los elementos que lo conforman y su diseño, así también, cabe resaltar que un ambiente el cual cuenta con una adecuada iluminación contribuye a un estado de bienestar, y un buen desempeño de las personas en sus labores diarias, además de prevenir problemas de salud asociados a la visión, y a su vez, los accidentes laborales provocados por la inapropiada iluminación.

Más, sin embargo, el objetivo principal desde el punto de vista ingenieril, es orientar la investigación a mejorar la eficiencia y el óptimo uso del recurso energético, teniendo como propósito encontrar una solución matemática que, no comprometa los aspectos anteriormente mencionados, sino por el contrario, conserve el mantenimiento de estos factores, y primordialmente se obtenga un funcionamiento más eficiente.

1. El problema de investigación

1.1 Objeto o Tema de investigación

Sistema de control de iluminación basado en replicadores dinámicos y un sistema controlado por PID sensibles a presencia.

1.2 Línea de investigación

Para abordar el siguiente proyecto de investigación se realiza desde el área o línea de investigación: Sistema de automatización y control, retomando a Abarca, P. (s.f.), tiene como propósito:

El control automático es el mantenimiento de un valor deseado para una cantidad o condición física, midiendo su valor actual, comparándolo con el valor referencia, y utilizando la diferencia para proceder a reducirla mediante una acción correctiva. En consecuencia, el control automático exige un lazo cerrado de acción y reacción que funcione sin intervención humana (p. 2).

Como lo menciona la Universidad CESMAG, un sistema de automatización y control desarrolla procesos investigativos orientados al modelamiento, simulación, diseño, desarrollo y evaluación de algoritmos de control, sistemas de control, sistemas inteligentes, control de procesos industriales, sistemas embebidos, acondicionamiento y procesamiento de señales, robótica, domótica e inteligencia artificial (CESMAG, p. 4).

1.3 Sub línea de investigación

Al abordar la investigación se orienta la sub línea desde la optimización dinámica, la cual se toma como referencia de Ait, M. & Tadeo, F. (s.f.) quienes afirman que:

Esta línea de trabajo está asociada al desarrollo de herramientas para optimización dinámica de procesos, asociadas al entorno de simulación. Se busca la integración eficiente de métodos de optimización, en particular mixta-entera, que permitan abordar la resolución de problemas de control y optimización y la generación de código para la implementación en tiempo real de las soluciones obtenidas en el marco de sistemas (Pàrr.7).

A partir de esta sub línea de investigación, se plantea el diseño e implementación de controladores que permitan regular las variables de un sistema, con el fin de alcanzar un funcionamiento óptimo, buscando mejorar la eficiencia de los procesos, como también la reducción de consumos energéticos.

1.4 Planteamiento o descripción del problema

Actualmente la población no es consciente de la cantidad de energía que se desperdicia a diario, ni de la procedencia de dicha energía. Según estudios el 31% del consumo energético pertenece a la iluminación en el sector terciario (Fuente: UPME 2013), en los sectores industriales y residenciales se consume una gran cantidad de energía eléctrica y gran parte de esta energía es empleada para la iluminación, donde no se cumplen los requerimientos para una óptima iluminación y esto hace que se derroche valiosos recursos como la energía eléctrica.

Además, una iluminación inadecuada puede traer varias consecuencias, causar enfermedades como trastornos oculares, cefalalgias, fatiga, falta de energía, agotamiento, entre otros, además de aumentar considerablemente las probabilidades de accidentes laborales (Beltrán Molina & Merchán Arévalo, 2013). Una medida que permite corregir esta problemática es mediante la implementación de estrategias de control, las cuales permiten adecuar de manera

inteligente la potencia suministrada a cada punto de iluminación. Un sistema de control de iluminación apropiado influye en cierta medida en el ahorro energético y la salud de los usuarios.

Es así que, en la actualidad se han realizado estudios, que proponen una solución alternativa para el control de luminarias, este es el uso la estrategia de optimización basada en replicadores dinámicos, como por ejemplo, en el estudio de N, España y A, Pantoja utilizan el replicador dinámico, que logra el control de varios puntos lumínicos en un determinado espacio, y además, estos se ajusten en diferentes ambientes con la información captada por el sensor de luz, para así, preservar niveles de iluminación adecuados ya establecido y realizar un eficiente uso de recursos energéticos.

Así también, en un estudio más reciente como “Adaptación de un algoritmo de optimización basado en replicadores dinámicos aplicado al control de iluminación de recintos con presencia de individuos” realizado por (Arévalo, 2020). Simultáneamente, se compara el desempeño de los replicadores dinámico y el desempeño de PID como sistemas de control lumínicos. Al realizar este estudio se encontraron favorables resultados a nivel de simulación, por lo tanto, se desea que este proyecto lleve a implementación y así evaluar el resultado del consumo energético, y comparar en un modelo a escala los dos sistemas de control antes mencionados, y demostrar de manera exitosa cuál de estos dos sistemas es una mejor solución en criterios de eficiencia y funcionamiento.

1.5 Formulación del problema

¿Qué tan eficiente es un prototipo de control de iluminación basado en replicadores dinámicos en relación con un control de iluminación PID, sensibles a presencia de individuos en un prototipo a escala?

1.5.1 Objetivos.

1.5.2 Objetivo general.

Comparar la eficiencia de un algoritmo de control óptimo de iluminación basado en replicadores dinámicos y un sistema de control de iluminación PID sensibles a presencia de individuos aplicados a un modelo real a escala.

1.5.3 Objetivos específicos.

Construir un modelo de aula a escala adecuado para la implementación de las estrategias de control objeto de estudio.

Implementar los sistemas de control de iluminación con replicadores dinámicos y con un controlador PID sensibles a presencia de individuos, aplicado en el modelo a escala.

Evaluar la eficiencia de cada uno de los sistemas de iluminación frente a diferentes factores de estudio, entre los cuales se resaltan: tiempo de respuesta, error de seguimiento y consumo de energía.

1.6 Justificación

En el día a día la ejecución de las actividades diarias dependen en gran parte de las condiciones del entorno, de las características del ambiente en el que la persona se encuentra, y como se resaltó anteriormente en este documento, la inadecuada iluminación puede ser razón de problemas de salud en la visión, como también causante de accidentes laborales, ya que, en muchos casos no se tiene en cuenta una normativa, administrando la iluminación requerida por los diferentes espacios, donde se tenga en cuenta componentes como la distribución uniforme de

las luminarias, cantidad de flujo luminoso según la actividad a realizar, y el gestionamiento de la potencia total suministrada.

Además, en la actualidad el consumo de energía por iluminación en edificaciones y diversas industrias ha sido uno de los factores más relevantes en cuanto a eficiencia energética. Por tanto, Lighthouse Lamp (2013) especifica que: “cuando se habla de consumo de energía en iluminación el porcentaje es alto si se tiene en cuenta que el consumo de un edificio común, puede llegar hasta el 40% del consumo total de la edificación” (citado en España, N., 2014), demuestra que este porcentaje puede reducirse con la implementación de sistema control de iluminación basado en replicadores dinámicos, haciendo un aprovechamiento de los recursos energéticos como a la vez, minimizar el gasto económico.

A causa de ello, nace la necesidad de mejorar los sistemas de iluminación, partiendo de una comparación de eficiencia entre dos sistemas de control de iluminación, un sistema distribuido basado en replicadores dinámicos, y el otro mediante un controlador PID. Por esta razón, los sistemas se desarrollan en un modelo a escala, con el fin de implementarlos en un entorno real.

Por lo tanto, se busca la implementación de un modelo a escala con las dimensiones y espacios adecuados, y así, por medio de este se pueda llegar a una aproximación de un modelo escala real, como lo trabaja (España, N., 2014) en su desarrollo de proyecto “*Diseño e implementación de un controlador distribuido utilizando dinámicas de replicadores*”, en el cual se obtuvieron valores aproximados a un entorno real.

Es así como, se pretende determinar el sistema más eficiente que contribuya en dos puntos importantes; el principal enfocado consumo energético con el uso óptimo del recurso, una distribución uniforme, teniendo en cuenta el rendimiento, a fin de completar el análisis de indicadores de desempeño estándar como lo son ISE, ITSE, ISU; y el segundo, disminuir a nivel

social el impacto generado por la inadecuada iluminación, mejorando aspectos relevantes como seguridad, salud y confort.

1.7 Delimitación

Es necesario establecer que el trabajo de investigación se pretende desarrollar un prototipo real a escala, se toma como referencia un aula de clases convencional. Para el desarrollo del prototipo, se plantea que las dimensiones de la maqueta quedaron ligadas a la naturaleza de las luminarias de pequeño tamaño y la correcta distribución de estas, con el fin de diseñar y emular un diseño luminotécnico según la norma RETILAP. Por ello, que se realizó la proporción de 4:1 en la construcción de este modelo.

Es así que, el modelo está compuesto por 6 lámparas led dimerizables, es decir, lámparas las cuales se pueden regular y cambiar su intensidad lumínica, además, cada lámpara cuenta con un sensor de luz BH1750, el cual compruebe la cantidad de luxes en cada zona. Por tanto, la presencia en cada zona está controlada por señales booleanas, las cuales fueron controladas manualmente por un interruptor para los diferentes escenarios.

De manera que, cada lámpara cuenta con un microcontrolador ESP32, programados por medio de Arduino, y este microcontrolador se conecta a un módulo LM298 (Puente H). De ahí que, los datos de presencia e iluminación son interpretados, y por medio de una señal PWM, ambos sistemas de control regulan la dimerización de las lámparas.

Además, se incorpora el uso de la herramienta Matlab para visualizar y graficar los datos tomados en los diferentes escenarios por ambos sistemas de control de iluminación, facilitando así el análisis de los datos para su comparación.

Finalmente, se plantea el uso de indicadores de desempeño como son ISE, ITSE, ISU, los cuales se enfocan en analizar el tiempo de respuesta, error de seguimiento y consumo de potencia,

para determinar, que sistema se puede considerar más eficiente, entre el sistema de iluminación basado en replicadores dinámicos y el sistema de iluminación PID.

Por tal motivo, se considera que el tiempo de desarrollo de este proyecto comprende desde el segundo periodo del año 2019, hasta el segundo periodo del año 2022, para un estimado de 3 años.

2. Tópicos del Marco Teórico

2.1 Antecedentes

2.1.1 Plataforma para el control distribuido de iluminación en edificios

Para el desarrollo del proceso investigativo, se estudiaron varios antecedentes como referencia, que de manera significativa aportan y son base a la investigación, por ello debe mencionarse que en la revisión se encontró a Mejía, J. (2014) que en su estudio “plataforma para el control distribuido de iluminación en edificios inteligentes”

Aporte:

La implementación de un sensor que pueda medir los niveles de iluminación y que su respuesta sea lineal, para luego obtener la curva de respuesta del sensor y así obtener el modelo de todo el sistema.

2.1.2 Diseño e implementación de un controlador distribuido utilizando dinámicas de replicadores.

Desarrollo e implementación de una estrategia de control distribuido basada en dinámicas poblacionales aplicada a la regulación de la iluminación en sistemas de edificaciones. En el cual, propone diversas dinámicas del controlador utilizando actuadores y sensores.

Aporte:

La explicación de cada uno de los conceptos primordiales y los diversos procesos implementados en este documento son primordiales para el desarrollo del proyecto investigativo.

2.1.3 Ingeniería de control moderna.

En el libro de Ogata, K (2010) , en el capítulo 10 se hace una introducción completa a los controladores PID.

Aporte:

Se nos introduce al control robusto, también de las reglas de sintonización para controladores PID además de modificaciones de los esquemas de control PID, siendo más robusto su enfoque para la parte de esta investigación.

2.1.4 Optimización de enjambre de partículas basada en PID en Control de luz de oficinas.

Thi & Ionescu, (2018), este artículo da un enfoque de un sistema PID, usado como controlador de un sistema de iluminación.

Aporte:

Por tanto, habla de la importancia del uso de la luz en oficinas donde es preferible proporcionar una iluminación uniforme en todo el puesto de trabajo combinando.

2.1.5 Control de iluminación con detección y actuación inalámbricas distribuidas para la luz del día y la adaptación de ocupación.

De la misma manera, Peruffo, A., Pandharipande, A., Caicedo, D, Schenato, L. (2015), postulan el trabajo “Control de iluminación con detección y actuación inalámbricas distribuidas para la luz del día y la adaptación de ocupación”, en la cual se evalúa el uso de control en la iluminación que sea adaptativo.

Aporte:

El estudio propone un sistema de control centralizado el cual usa sensores inalámbricos interconectados.

2.1.6 Optimización distribuida utilizando dinámicas de población con una ecuación replicadora local.

De igual manera que Pantoja Andrés, Quijano Nicanor (2012), donde realizan una investigación del uso de replicadores dinámicos en un sistema de control para iluminación.

Aporte:

Por tanto, esta investigación contempla las bases para el diseño e implementación del uso de replicadores dinámicos, los cuales son necesarios aplicarlos adecuadamente en el sistema a implementar.

2.1.7 Control de iluminancia matizona basado en la dinámica del replicador.

España y Pantoja (2015), justifican el uso de un control de iluminación descentralizado para mayor efectividad.

Aporte:

De este modo, con el uso de Replicadores Dinámicos se preserva los niveles de iluminancia apropiados junto con la comodidad requeridas en cada área aprovechando la luz del día y las influencias entre zonas.

2.1.8 Adaptación de un algoritmo de optimización basado en replicadores dinámicos aplicado al control de iluminación de recintos con presencia de individuos.

Finalizando con, Arévalo, W. (2020) hace mención de la comparación con un controlador PID sensible a presencia de individuos y un control de replicadores dinámicos

sensible a presencia de individuos, pero esta investigación se realiza a nivel de simulación con ayuda de Matlab.

Aporte:

Se usa como base para este trabajo de investigación, puesto que, es el puente para el desarrollo y la implementación, debido a que se realizó la adaptación del algoritmo basado en replicadores dinámicos, comparado a un controlador PID.

2.2 Enunciado de supuestos Teóricos

2.2.1 Sistemas de control.

Se requiere de un modelado matemático, una búsqueda de soluciones inteligentes a partir de los conocimientos de ingeniería moderna, que permita la ejecución de un diseño que asegure la gestión energética adecuada, es por esto que, se opta por un sistema de control con la propiedad intervenir de forma autónoma, el cual sea capaz de generar respuestas a partir del cálculo, manejo y análisis de una o más variables, y que de forma adicional optimice que el consumo de energía, y conserve parámetros ideales establecidos.

Por ello, los sistemas de control son conjuntos de componentes enfocados a lograr un objetivo determinado, administran, ordenan, dirigen o regulan el comportamiento de otro sistema o de sí mismos. Los sistemas de control de lazo cerrado (realimentado) son aquellos que mantienen una relación directa entre la entrada y la salida, comparándolas y usando la diferencia como medio de control (Ogata, 2010).

2.2.2 Replicadores dinámicos.

Una de estas estrategias es la técnica de control basada en dinámica de replicadores, que se aplicará a un sistema de control distribuido, el cual optimiza el proceso de iluminación en

interiores sensible a presencia de individuos, esta metodología de control hace parte de la Teoría de Juegos Evolutivos (Arévalo, 2020), que es considerablemente utilizada en modelamiento matemático, comportamiento económico y social. Para el control de iluminación se toma como referencia las bases de “Optimización distribuidas utilizando Dinámica de Poblaciones” (Pantoja & Quijano, 2012), el cual es aplicado a zonas con diferentes niveles de iluminancia definidas por un conjunto de lámparas y sensores que garantiza la convergencia del algoritmo. El principio básico de esta idea es la caracterización de comportamiento de la población de individuos, y proporcionar una distribución de recursos, este principio tiende a encontrar un punto de equilibrio, donde todos los individuos alcanzan un mismo fitness para obtener un bienestar común social para la población total (Pantoja & Quijano, 2012). Esta teoría se ajusta al asunto de iluminación, al estimar la población como voltaje proporcionado y en subgrupos como las zonas establecidas en el área de trabajo, es como se obtiene el nivel de voltaje que evoluciona buscando el punto de equilibrio, por consiguiente se logra una iluminación uniforme en el área de trabajo (Arévalo, 2020), observando la convergencia de la ecuación, analizando la factibilidad al utilizar esta estrategia y como se ha llegado a un resultado óptimo, en problemas de redistribución de recursos, siendo la potencia eléctrica regulada, con un límite superior que se entregada a las luminarias, y obtener una propagación de luz en todo el ambiente con un mínimo de alejamiento desde un set point implantado.

2.2.2.1 Adaptación del replicador local a sistemas de iluminación.

Para la adaptación del modelo a un sistema de iluminación interior que cuente con actuadores y sensores se establecen diferentes parámetros, en donde, se asume una potencia máxima (P_{Tot}) disponible en el sistema, de igual manera, la potencia entregada a cada una de las lámparas (P_i), y cada nodo del sistema cuenta con una estructura de control, que depende de la

función de aptitud (2), la dinámica del replicador (1) y la función aptitud promedio (3) (Arévalo, 2020).

$$\dot{p}_i = p_i (f_i(p) - \bar{f}(p)) \quad (1)$$

$$f_i(p) = S_i - E_i + B \quad (2)$$

$$\bar{f}(p) = \sum_{j \in Da} f_j(p) p_j \quad (3)$$

Donde:

P_i : Potencia entregada a cada una de las lámparas

S_i : Referencia de iluminación en la i -ésima zona

E_i : Iluminación Registrada por el i -ésimo sensor

B : Constante muy grande

2.2.2.2 Replicadores dinámicos sensibles a presencia de individuos.

La mayoría de los trabajos preliminares basados en algoritmos de optimización con replicadores dinámicos no tenían en cuenta el aspecto fundamental de la presencia de individuos en las diferentes zonas de iluminación, de manera que, únicamente se enfocan al seguimiento de referencias de iluminación (España, 2014). Por tal motivo, Arévalo (2020) incluye el parámetro de presencia como un factor booleano en la función de aptitud del sistema (4), en el cual, se define si en una zona hay o no hay presencia.

$$f_i(p) = S_i - E_i + B - (1 - \gamma_i)S_i \quad (4)$$

Donde:

P_i : Potencia entregada a cada una de las lámparas

S_i : Referencia de iluminación en la i -ésima zona

E_i : Iluminación Registrada por el i -ésimo sensor

B : Constante muy grande

γ_i : Variable booleana de presencia o ausencia

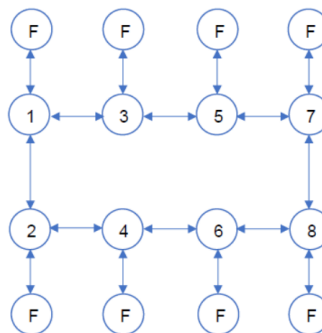
Además, al incluir el parámetro de presencia hay que tener en cuenta una restricción de potencia mínima en los agentes reales (5), con el fin de conservar la dinámica del sistema, estableciendo una P_{i_min} que, para efectos de implementación, se escogería un valor muy pequeño, que visualmente apague la lámpara, pero numéricamente dentro del sistema no sea cero.

$$f_i(p) = \{P_i > P_{i_min} \quad S_i - E_i + B - (1 - \gamma_i)S_i \quad (5)$$

Así mismo, se escoge una topología de conexión en anillo bidireccional entre agentes reales con su respectivo agente ficticio, el cual, para implementación real, cada lámpara tendrá un sistema embebido que programaría el agente ficticio internamente. como se muestra en la siguiente figura.

Figura 1

Topología de conexión.



Nota. Tomado de Grafo de conexión agente ficticio asociado a cada agente real (Arévalo, 2020).

2.2.2.3 Discretización del modelo del replicador dinámico local.

Se obtiene el siguiente sistema con el fin de implementar una solución, se discretiza el replicador dinámico local para que un dispositivo digital pueda ejecutar este algoritmo, como lo plantea Arévalo (2020).

$$p_i(k + 1) = p_i(k) \left(\frac{T_m B}{P_{Tot}} \left(f_i(k) \sum_{j \in N_i} p_j(k) - \sum_{j \in N_i} f_j(k) p_j(k) \right) + 1 \right) \quad (6)$$

Donde:

T_m : Tiempo de muestreo

P_{Tot} : Potencia total del sistema

P_i : Potencia de la lampara local

P_j : Potencia de las lámparas adyacentes o vecinas

f_i : Fitness o función de aptitud de lampara local

f_j : Fitness o función de aptitud de lámparas adyacentes o vecinas

B : Constante muy grande

2.2.2.4 Restricción de potencia mínima en agentes ficticios.

Para garantizar el funcionamiento adecuado del replicador asociado al agente ficticio, se implementa una restricción de potencia mínima garantizando que esta no se vuelva cero de la siguiente manera:

Si

$$p_{f_i}(k + 1) \leq p_{f_{min}} \quad (7)$$

Entonces:

$$p_{f_i}(k + 1) = p_{f_i}(k + 1) + p_{add} \quad (8)$$

$$p_{r_i}(k + 1) = p_{r_i}(k + 1) - p_{add} \quad (9)$$

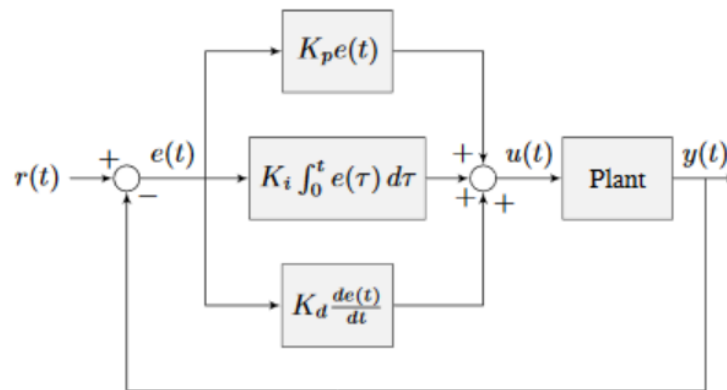
Donde P_{add} es un valor de potencia muy pequeño.

2.2.5 Control PID

Un controlador PID está compuesto por una acción proporcional, integral y derivativa, de ahí su nombre, este es un modelo de control que a través de un lazo de retroalimentación permite regular la variable de salida un proceso en general. El controlador PID calcula la diferencia entre la variable real $y(t)$ contra la variable deseada $r(t)$. El valor proporcional depende del error actual, el integral depende de los errores pasados y el derivativo es una predicción de los errores futuros.

Figura 2

Diagrama de bloques de un PID.



2.2.5.1 Acción proporcional.

La parte proporcional consiste en el producto entre la señal de error y una ganancia para lograr que el error en estado estacionario se aproxime lo mejor posible a cero, sin embargo, en la mayoría de los casos, estos valores solo serán óptimos en una determinada porción del rango total de control, siendo distintos los valores óptimos para cada porción del rango. La parte proporcional no considera el tiempo, por lo tanto, la mejor manera de solucionar el error permanente y hacer que el sistema contenga alguna componente que tenga en cuenta la variación respecto al tiempo, es incluyendo y configurando las acciones integral y derivativa.

La fórmula del proporcional está dada por:

$$P_{sal} = K_p e(t) \quad (10)$$

Donde:

K_p : Ganancia proporcional, valor de sintonización

$e(t) = SP - PV(t)$: Error (SP punto de establecimiento, y $PV(t)$ variable de proceso)

2.2.5.2 Acción integral.

La parte de control integral tiene como propósito reducir y eliminar el error en estado estacionario, provocado por perturbaciones exteriores y los cuales no pueden ser corregidos por el control proporcional. El control integral actúa cuando hay una desviación entre la variable medida y el valor asignado también llamado "Set Point", integrando esta desviación en el tiempo y sumándola a la acción proporcional.

La fórmula de la integral está dada por:

$$I_{sal} = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (11)$$

Donde:

K_i : Ganancia integral, un parámetro de ajuste

τ : Variable de integración (valor desde el instante 0 hasta el instante t)

2.2.5.3 Acción derivativa.

La acción derivativa se manifiesta cuando hay un cambio en el valor absoluto del error; (si el error es constante, solamente actúan los modos proporcional e integral). El error es la desviación existente entre la variable de medida y el Set Point. La función de la acción derivativa es mantener el error al mínimo corrigiéndolo proporcionalmente con la misma velocidad que se produce; de esta manera evita que el error se incremente.

La fórmula del derivativo está dada por:

$$D_{sal} = K_d \frac{de}{dt} \quad (12)$$

Donde:

K_d : Ganancia derivativa, un parámetro de ajuste

t : Tiempo (instante 0 o el instante t)

2.2.6 Diseño de PID a partir de lugar geométrico de las raíces (LGR).

El lugar de las raíces es una técnica que permite conocer la posición que ocupan las raíces de la ecuación característica, sobre el plano complejo s , a medida que se varía alguno de los parámetros de la función de transferencia de lazo abierto. Normalmente, el parámetro a variar es la ganancia estacionaria del sistema (lo que se conoce como "Lugar de las raíces") aunque también es posible observar la posición de estas raíces cuando varía

un polo o cero de la función de transferencia de lazo abierto (lo que se denomina como "Contorno de las raíces") (Llata. José, 2013).

2.2.6.1 Criterio de Ángulo y Magnitud.

En la Figura 3 se ilustra un sistema típico de control retroalimentado en lazo cerrado.

Figura 3

Función de transferencia de lazo cerrado.

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{kG(s)}{1 + kG(s)H(s)}$$

La ecuación característica para este sistema de lazo cerrado se obtiene al igualar cero el denominador de la función de transferencia de lazo cerrado, es decir

$$1 + kG(s)H(s) = 0 \quad (13)$$

O también;

$$kG(s)H(s) = -1 \quad (14)$$

Los valores de s que cumplen las condiciones de ángulo y magnitud, son las raíces de la ecuación característica o polos de lazo cerrado. El diagrama de los puntos del plano complejo que sólo satisfacen la condición de ángulo, constituye el Lugar de las Raíces.

2.2.6.2 Criterio de Ángulo.

$$\angle G(s)H(s) = \pm 180^\circ (2k + 1) \quad (k = 0,1,2,3 \dots) \quad (15)$$

2.2.6.2 Criterio de Magnitud.

$$|G(s)H(s)| = 1 \quad (16)$$

2.2.7 Especificaciones de la respuesta transitoria.

Se presenta a continuación algunas fórmulas utilizadas para el diseño del PID en conjunto con LGR.

$$\xi = \frac{\ln\left(\frac{SP}{100}\right)}{\sqrt{\pi^2 + \left[\ln\left(\frac{SP}{100}\right)\right]^2}} \quad (17)$$

$$\omega_n = \frac{4}{\xi t_s} \quad (18)$$

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad (19)$$

$$S_d = -\xi \omega_n \pm \omega_n \sqrt{\xi^2 - 1} \quad (20)$$

$$SP [\%] = 100 e^{\frac{-\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}} \quad (21)$$

$$t_s = \frac{4}{\xi \omega_n} \quad (\text{criterio del 2\%}) \quad (22)$$

Donde:

ξ : Coeficiente de amortiguamiento

ω_n : Frecuencia natural

ω_d : Frecuencia natural amortiguada

S_d : Polos de la función de transferencia

SP: Sobrepico porcentual

t_s: Tiempo de asentamiento

2.3 Definición de variables

A continuación, se presentan los referentes conceptuales en los cuales se basa la presente investigación.

2.3.1 Iluminancia

Es el nivel de iluminación o flujo de luz que incide sobre una superficie determinada, siendo este un tipo específico de medición de luz; la unidad de medida a la iluminancia hace referencia al lux (lx).

El nivel de iluminancia se debe expresar en función de la iluminancia promedio en el plano de trabajo y se la calcula de la siguiente manera (RETILAP, 2017):

$$E_{prom} = \frac{(\Phi_{tot} * CU * FM)}{A} \quad (23)$$

Donde:

Φ_{tot} : Flujo luminoso total de las lámparas

CU: Coeficiente o factor de utilización para el plano de trabajo

FM: Factor de mantenimiento.

A: Área del plano de trabajo en m²

2.3.2 Índices de cavidades zonales.

Es un método utilizado para los cálculos de iluminación, dividido en 3 volúmenes: techo,

local y piso. Los cuales se calculan mediante las siguientes ecuaciones:

$$\text{Indice de cavidad de techo} = \frac{[5 h_c(l + a)]}{l * a} \quad (24)$$

$$\text{Indice de cavidad de local} = \frac{[5 h_m(l + a)]}{l * a} \quad (25)$$

$$\text{Indice de cavidad de piso} = \frac{[5 h_f(l + a)]}{l * a} \quad (26)$$

Donde:

h_c : Altura de la cavidad de techo

h_m : Altura de la cavidad de local

h_f : Altura de la cavidad de piso

l : Longitud del local

a : Ancho del local

2.3.3 Coeficiente de Utilización (CU).

El coeficiente de utilización, también se conoce como factor reducido de utilización y es la relación entre el flujo luminoso que cae sobre un plano de trabajo y el flujo luminoso suministrado por la lámpara. Este coeficiente representa la cantidad de flujo luminoso.

2.3.4 Reflectancia Efectiva.

La reflectancia de una superficie es definida como la razón entre el flujo luminoso reflejado por la superficie y el flujo que incide sobre ella.

2.3.5 Factor de Mantenimiento.

Es definido como la relación entre la iluminancia media en la zona iluminada después de un determinado periodo de funcionamiento de la instalación. El factor de mantenimiento tiene en

cuenta la depreciación del flujo luminoso de la luminaria a consecuencia del ensuciamiento de la misma.

2.3.6 Flujo Luminoso

Es la potencia luminosa, que es el brillo que emite una fuente de luz y es medido a través de lúmenes (lm). El flujo luminoso de una lámpara se define mediante la siguiente ecuación:

$$\phi_l = \frac{E_{prom} * A}{N * n * CU * FM} \quad (27)$$

Donde:

Φ_{tot} : Flujo luminoso total de las lámparas

CU : Coeficiente o factor de utilización para el plano de trabajo

FM : Factor de mantenimiento.

A : Área del plano de trabajo en m^2

N : Número de luminarias en el establecimiento

n : Número de lámparas por luminaria

2.3.7 Indicadores de desempeño.

Los indicadores de desempeño son una medida cuantitativa, que verifica el desempeño de un sistema y que da énfasis en especificaciones importantes del mismo, como también, son importantes para evidenciar el comportamiento de las estrategias de control (Rodríguez et al., 2015) (Arévalo, 2020).

2.3.7.1 Integral del error cuadrático (ISE).

Este criterio, evalúa la capacidad total del seguimiento de referencia que tiene el sistema en

un determinado tiempo, entre más grande sea el valor de ISE, significa que el error de seguimiento es mayor.

$$ISE = \sum_k^N e^2(k) \quad (28)$$

2.3.7.2 Integral del error cuadrático ponderado en el tiempo (ITSE).

Evalúa el error de seguimiento de referencia, penalizando la persistencia de errores grandes de seguimiento y la velocidad de estabilización de un sistema. Es decir, a medida que el tiempo va avanzando, el error es penalizado con mayor severidad.

$$ITSE = \sum_k^N t(k)e^2(k) \quad (29)$$

2.3.7.3 Integral del cuadrado de la variación total de la acción de control (ISU).

Este indicador sanciona la variación del esfuerzo de control en el tiempo, como también, evalúa una respuesta de control lenta que presenta cambios pequeños en intervalos de tiempos prolongados.

$$ISU = \sum_k^N [u(k) - u(k - 1)]^2 \quad (30)$$

2.3.7.4 Integral de la acción de control (IU).

Este indicador busca evaluar el consumo de potencia total realizado por cada lámpara.

$$IU = \sum_k^N u(k) \quad (31)$$

La magnitud de los indicadores ISE y ITSE define la capacidad de seguimiento de referencia que logra el sistema al aplicar el controlador. Entre mayor sea el valor del indicador, peor es la capacidad de seguimiento de referencia del controlador.

Para las magnitudes de ISU e IU, se debe tener en cuenta que entre mayor sea el valor de ISU peor es su comportamiento en la variación del esfuerzo de control y en la respuesta del sistema. Por otro lado, el IU se define que entre mayor sea el valor, tendrá mayor consumo (Arévalo, 2020).

2.4 Hipótesis

Hipótesis de investigación (Hi): En el sistema implementado, el sistema de control PID es más eficiente al menos un 50% que el sistema de replicadores dinámicos, puesto que es uno de los controladores más comunes y relativamente fácil de implementar.

Hipótesis Nula (Ho): En el sistema implementado, el sistema de replicadores dinámicos es más eficiente al menos un 50% que el sistema de control PID.

Hipótesis Alternativa (Ha): En el sistema implementado, el sistema de control PID es más eficiente al menos un 30% que el sistema de replicadores dinámicos, puesto que es uno de los controladores más comunes y relativamente fácil de implementar.

3. Metodología

3.1 Enfoque

Este proyecto de investigación tiene un enfoque cuantitativo, se puede afirmar esto ya que es acorde con la definición que otorga de Hernández, Fernández & Baptista en su libro “metodología de la investigación” (Hernandez, Fernandez.)

El enfoque cuantitativo (que representa un conjunto de procesos) es secuencial y probatorio. Cada etapa precede a la siguiente y no puede eludirse pasos. El orden es riguroso, aunque desde luego, se puede redefinir alguna fase. Parte de una idea que va acotándose y, una vez delimitada, se derivan objetivos y preguntas de investigación, se revisa la literatura y se construye un marco o una perspectiva teórica. De las preguntas se establecen Hipótesis y determinan variables; se traza un plan para probarlas (diseño); se miden las variables en un determinado contexto; se analizan las mediciones obtenidas utilizando métodos estadísticos, y se extrae una serie de conclusiones respecto de la o las Hipótesis.

En esta investigación se realiza la comparación de eficiencia entre dos sistemas de control lumínico, en estos dos sistemas se desprenden tres variables que pueden probarse, cuantificarse, recolectarse y a su vez, medirse con la finalidad de definir cuál de dos sistemas planteados es más eficiente e idóneo, el cual permite la optimización de recursos energéticos.

3.2 Paradigma

Esta investigación tiene un paradigma positivista, como describe el positivismo (Ramos, n.d.) en su artículo “investigación científica” habla que , el paradigma positivista sustentará a la

investigación que tenga como objetivo comprobar una hipótesis por medios estadísticos o determinar los parámetros de una determinada variable mediante la expresión numérica.

En este trabajo la hipótesis a comprobar es cual sistema de control es más eficiente en cuanto como aprovecharían mejor manera el uso de sus recursos, en este caso hablamos de la potencia energética, también se han determinado los parámetros con las variables ya determinadas.

3.3 Método

El método que se usa en esta investigación es el método científico, Jenny Bedoya en su libro “Métodos y técnicas de investigación” (Lima, n.d.) habla que, el método científico se define como un estudio riguroso y sistemático de la naturaleza, en el que se aplican reglas de observación y experimentación que llevan a la contrastación teórica.

Puesto que, esta investigación es un proceso, que parte de la experimentación donde se asimilan y relacionan datos para determinar la eficiencia de dos sistemas de control lumínicos.

3.4 Tipo

Este proyecto de investigación es tipo descriptivo, ya que, compara una variable en dos sistemas de control de iluminación, esta variable es la eficiencia del consumo, se proponen dos sistemas los cuales son probados en un entorno a escala y en este se evalúan la eficiencia de los dos sistemas.

3.5 Diseño

Se analiza 2 Sistemas de control (replicadores dinámicos y control proporcional integral derivativo). Se desarrolla un tipo de investigación experimental pura debido a que consta de un grupo experimental, un tratamiento experimental y una medición.

RG: Sistema de control de iluminación

X1: Replicadores Dinámicos

X2: Control PID

O1 = O2: Evaluación de variable: eficiencia de funcionamiento del sistema

RG1 - X - O1 y *RG2 - X - O2*

3.6 Población

La población seleccionada para el desarrollo del proyecto es el sistema de control de iluminación.

3.7 Muestra

La muestra seleccionada es no probabilística, debido a que se utilizaran dos sistemas de control de iluminación distintos, como lo es PID y Replicadores dinámicos.

3.8 Técnicas de recolección e información

Para este estudio se opta por la observación directa, esta consiste en visualizar el fenómeno y el contexto en el que este, ya que es un procedimiento táctico práctico que permiten describir,

evaluar y verificar las verdades, en el caso de la observación directa esta permite obtener información de primera mano ya que el observador se encuentra en el campo de estudio.

3.9 Instrumentos de recolección de información

Se hace uso de Matlab como instrumento para la recolección, almacenamiento y tratamiento de datos, ya que algunas hojas de cálculo convencionales no cuentan con las mismas herramientas de análisis que cuenta ese programa, además de ser uno de los programas más prácticos usados en ingeniería. Adicionalmente, se requiere de algunas tarjetas como apoyo opcional, como lo es la tarjeta de desarrollo ESP-32 que cuenta con funciones más avanzadas a la de un Arduino, pero de igual forma se programa desde la interfaz de Arduino.

4. Resultados

En la etapa 1 se realiza una documentación y reconocimiento bibliográfico del comportamiento de la luz en un entorno cerrado, y se revisa la teoría de funcionamiento de los replicadores dinámicos, control proporcional integral derivado y de los antecedentes realizados sobre el tema.

En la etapa 2 se lleva a cabo la construcción de un modelo de aula en pequeñas proporciones, en este modelo se tiene en cuenta los parámetros adecuados para implementar un ambiente real, además, se considera materiales de construcción como lámparas, los sensores que se utilizan, actuadores proporcionen un ambiente ideal de funcionamiento.

En la etapa 3 corresponde a la caracterización y calibración de cada uno de los sensores a utilizar en el sistema de control. Así también, se realiza la implementación de replicadores dinámicos como sistema de control de iluminación distribuido, en el cual, se tiene en cuenta la comunicación entre los módulos ESP32 por medio del transmisor receptor asíncrono universal (UART), que es uno de los aspectos principales para el funcionamiento correcto del replicador.

En la etapa 5 que contempla la implementación del mecanismo de control PID, este se ejecuta en cada uno de los ESP-32 de manera individual, se define la comunicación wifi cliente-servidor, en donde existen 6 clientes y un servidor encargado de recibir los datos y visualizarlos por medio de la herramienta Matlab.

4.1 Descripción del caso de estudio

El caso de estudio propuesto, se basa en un salón de clase el cual contiene unas dimensiones de:

- Largo 7 m
- Ancho 4.48 m
- Altura 3 m

En el cual se plantean adecuar 6 lámparas led dimerizables dispuestas de manera homogénea como se indica en la Figura 4.

Figura 4

Distribución de Lámparas y Zonas.



En el caso particular de estudio, la implementación del modelo se realiza en una proporción 4:1 las medidas que se obtuvieron fueron de:

- Largo 1.75m

- Ancho 1.12m
- Altura 0.75m

Consecuentemente, también se tienen en cuenta requisitos generales de (RETILAP, 2017) para la ejecución al momento de efectuar el diseño arquitectónico de la maqueta, se establece que esta cuenta con 6 lámparas, y cada una acompañadas por un sensor de iluminación BH1750 y para el control con un módulo ESP-32, esto se realiza para garantizar el funcionamiento adecuado de los sistemas de control de iluminación.

4.1.1 Diseño de maqueta a modelo escala.

El primer aspecto que se tiene en cuenta para la implementación del sistema de control es el nivel de iluminación adecuado que dictamina la norma, en este caso, corresponde a un aula de clases y según el reglamento técnico establece que el valor medio para este tipo de espacios es de 500 luxes (Ver Tabla 1).

Tabla 1

Niveles de iluminancia

Tipo de Recinto	Mínimo	Medio	Máximo
Colegios y centros educativos	300 lux	500 lux	750 lux

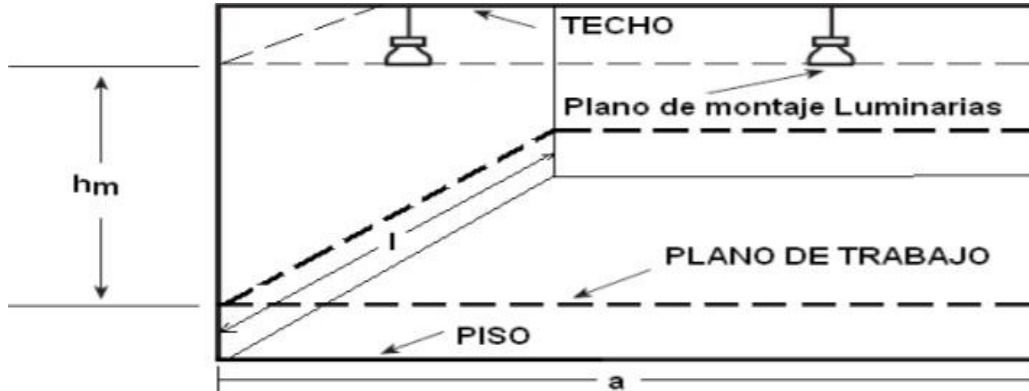
Nota. Adaptado de Índice UGR máximo, IRC mínimos admisibles y Niveles de iluminancia requeridos para diferentes áreas y actividades. (RETILAP, 2017).

Como siguiente paso, se utiliza el método de cavidades zonales para el cálculo de la iluminación con las ecuaciones (24), (25) y (26), en donde se consideran 3 cavidades: cavidad

del techo, del local y del piso como se muestra en la Figura 5.

Figura 5

Distancias y cavidades para la aplicación del coeficiente CU.



Nota. Tomado de Distancias y cavidades para aplicación del método del Coeficiente de local. (RETILAP, 2017).

Por ende, se definen los valores para cada uno de los: $h_c = 0\text{ m}$ debido a que son lámparas de incrustar las cuales no generan distancia entre ella y el techo, $h_f = 0.1875\text{ m}$ siendo esta la cavidad del piso y donde debe ir el plano de trabajo, por lo tanto, al ser un modelo a escala 4:1 se define dicha altura recomendada para los planos de trabajo y escritura como lo estipula (Chavarría, 2018); $h_m = 0.5625\text{ m}$ siendo esta la diferencia entre la altura total de la maqueta y la cavidad del piso; $l = 1.75\text{ m}$ y $a = 1.12\text{ m}$ las dimensiones de largo y ancho de la maqueta.

$$h_c = 0\text{ m} \quad h_m = 0,5625\text{ m} \quad h_f = 0,1875\text{ m} \quad l = 1,75\text{ m} \quad a = 1,12\text{ m}$$

$$\text{Índice de la cavidad del techo} = \frac{[5 * 0(1,75\text{ m} + 1,12\text{ m})]}{1,75\text{ m} * 1,12\text{ m}} = 0$$

$$\text{Índice de la cavidad del local} = \frac{[5 * 0,5625\text{ m}(1,75\text{ m} + 1,12\text{ m})]}{1,75\text{ m} * 1,12\text{ m}} = 4,1183$$

$$\text{Índice de la cavidad del piso} = \frac{[5 * 0,1875\text{ m}(1,75\text{ m} + 1,12\text{ m})]}{1,75\text{ m} * 1,12\text{ m}} = 1,3$$

En consecuencia, para maximizar la efectividad de luz suministrada es conveniente tener en cuenta colores claros en las superficies, de esta manera se logra una buena reflectancia efectiva, la cual se debe determinar mediante los valores de reflectancia porcentuales (Ver Tabla 8) para cada unade las cavidades calculadas anteriormente.

Reflectancia del techo [p_{cc}]: 80%

Reflectancia de la pared [p_w]: 70%

Reflectancia piso [p_{fc}]: 30%

Índice de la cavidad del local: 4

Ahora bien, el coeficiente de utilización (CU), se obtiene mediante la extrapolación de datos en la siguiente tabla.

Tabla 2

Factores de utilización CU

Reflectancia efectiva cavidad del techo p_{cc} (%)	80				70				50			30			10		
	70	50	30	10	70	50	30	10	50	30	10	50	30	10	50	30	10
Reflectancia paredes p_w (%)	Para 10% de reflectancia efectiva de la cavidad del piso (20% : 1,00)																
Indice del local																	
1	1.092	1.082	1.075	1.068	1.077	1.070	1.064	1.059	1.049	1.044	1.040	1.028	1.026	1.023	1.012	1.010	1.008
2	1.079	1.066	1.055	1.047	1.068	1.057	1.048	1.039	1.041	1.033	1.027	1.026	1.021	1.017	1.013	1.010	1.006
3	1.070	1.064	1.042	1.033	1.061	1.048	1.037	1.028	1.034	1.027	1.020	1.024	1.017	1.012	1.014	1.009	1.005
4	1.062	1.045	1.033	1.024	1.055	1.040	1.029	1.021	1.030	1.022	1.015	1.022	1.015	1.010	1.014	1.009	1.004
5	1.056	1.038	1.026	1.018	1.050	1.034	1.024	1.015	1.027	1.018	1.012	1.020	1.013	1.008	1.014	1.009	1.004
6	1.052	1.033	1.021	1.014	1.047	1.030	1.020	1.012	1.024	1.015	1.009	1.019	1.012	1.006	1.014	1.008	1.003
7	1.047	1.029	1.018	1.011	1.043	1.026	1.017	1.009	1.022	1.013	1.007	1.018	1.010	1.005	1.014	1.008	1.003
8	1.044	1.026	1.015	1.009	1.040	1.024	1.015	1.007	1.020	1.012	1.006	1.017	1.009	1.004	1.013	1.007	1.003
9	1.040	1.024	1.014	1.007	1.037	1.022	1.014	1.006	1.019	1.011	1.005	1.016	1.009	1.004	1.013	1.007	1.002
10	1.037	1.022	1.012	1.006	1.034	1.020	1.012	1.005	1.017	1.010	1.004	1.015	1.009	1.003	1.013	1.007	1.002
	Para 30% de reflectancia efectiva de la cavidad del piso (20% : 1,00)																
Indice del local																	
1	0.923	0.929	0.935	0.940	0.933	0.939	0.943	0.948	0.956	0.960	0.963	0.973	0.976	0.979	0.989	0.991	0.993
2	0.931	0.942	0.950	0.958	0.940	0.949	0.957	0.963	0.962	0.968	0.974	0.976	0.980	0.985	0.988	0.991	0.995
3	0.939	0.951	0.961	0.969	0.945	0.957	0.966	0.973	0.967	0.975	0.981	0.978	0.983	0.988	0.988	0.992	0.996
4	0.944	0.958	0.969	0.978	0.950	0.963	0.973	0.980	0.972	0.980	0.986	0.980	0.986	0.991	0.987	0.992	0.996
5	0.949	0.964	0.976	0.983	0.954	0.968	0.978	0.985	0.975	0.983	0.989	0.981	0.988	0.993	0.987	0.992	0.997
6	0.953	0.969	0.980	0.986	0.958	0.972	0.982	0.989	0.977	0.985	0.992	0.982	0.989	0.995	0.987	0.993	0.997
7	0.957	0.973	0.983	0.991	0.961	0.975	0.985	0.991	0.979	0.987	0.994	0.983	0.990	0.996	0.987	0.993	0.998
8	0.960	0.976	0.986	0.993	0.963	0.977	0.987	0.993	0.981	0.988	0.995	0.984	0.991	0.997	0.987	0.994	0.998
9	0.963	0.978	0.987	0.994	0.965	0.979	0.989	0.994	0.983	0.990	0.996	0.985	0.992	0.998	0.988	0.994	0.999
10	0.965	0.980	0.985	0.980	0.967	0.981	0.990	0.995	0.984	0.991	0.997	0.986	0.993	0.998	0.988	0.994	0.999

Nota. Tomado de Factores de Corrección cuando la Reflectancia efectiva de Piso difiere del 20%.

(RETILAP, 2017).

Por ende, según la Tabla 2 se determina el valor de $CU=0.944$ y se define el $FM=0.82$

acorde a la clasificación de la luminaria (ERCO, 2018), dando lugar a calcular el flujo luminoso (27) del modelo escala.

$$\phi_l = \frac{500 \text{ lx} * 1,96 \text{ m}^2}{6 * 1 * 0,944 * 0,82} = 211 \text{ lumen (lx * m}^2)$$

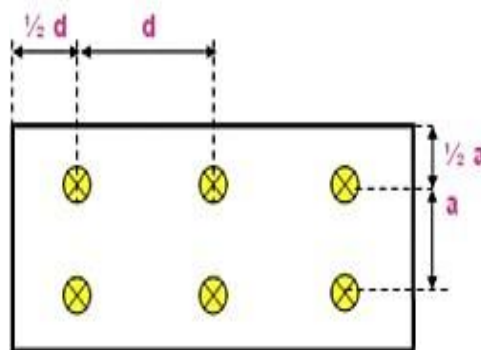
4.1.2 Elaboración de maqueta a modelo escala.

Se realiza una maqueta a escala aproximada 4:1, basada en parámetros anteriormente calculados y conservando los detalles fundamentales de modo que se pueda examinar condiciones reales. Por esta razón, para el modelo de implementación las lámparas a utilizar son “Ojo de buey led”, las cuales cumplen con los requerimientos de lúmenes necesarios, en la sección del Anexo B se pueden visualizar las especificaciones técnicas de la lámpara.

Finalmente, se realiza la distribución uniforme de lámparas sobre el modelo (Ver Figura 6), para dar por culminado el diseño de la maqueta.

Figura 6

Distribución de lámparas.



Nota. Distribución homogénea de las lámparas. Adaptado de (García, 2020).

$$\frac{d}{2} + d + d \frac{d}{2} = 1,75 \text{ m}$$

$$3d = 1,75 \text{ m}$$

$$d = \frac{1,75m}{3} = 58,334 \text{ cm}$$

$$\frac{a}{2} + a + \frac{a}{w} = 1,12 \text{ m}$$

$$2a = 1,12 \text{ m}$$

$$a = \frac{1,12 \text{ m}}{2} = 56 \text{ cm}$$

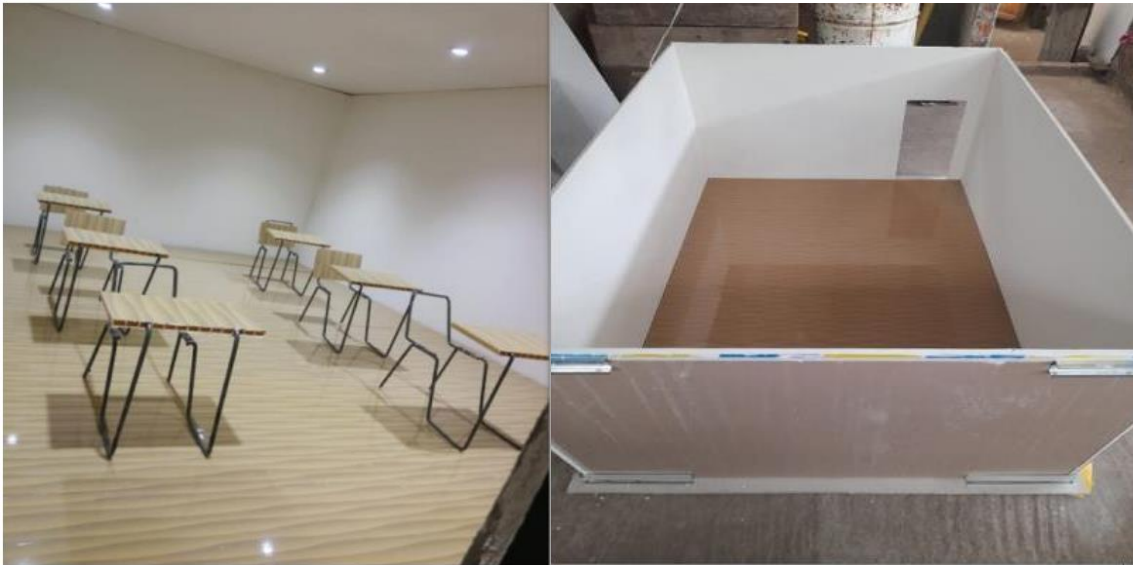
Donde:

d : Es la distancia entre lámparas a lo largo de la maqueta

a : Es la distancia entre lámparas a lo ancho de la maqueta

Figura 7

Maqueta a modelo escala 4:1.



Nota. Este gráfico muestra la construcción total de la maqueta, si desea ver más gráficas del diseño de la maqueta, diríjase al Anexo C.

4.2 Implementación de los sistemas de control de iluminación.

En esta etapa, se realizan varios procesos que son importantes para un buen funcionamiento de los sistemas de control de iluminación, entre ellos se destacan.

- La programación del módulo ESP32.
- La caracterización de cada sensor de iluminación BH1750.
- La obtención del modelo de la planta.

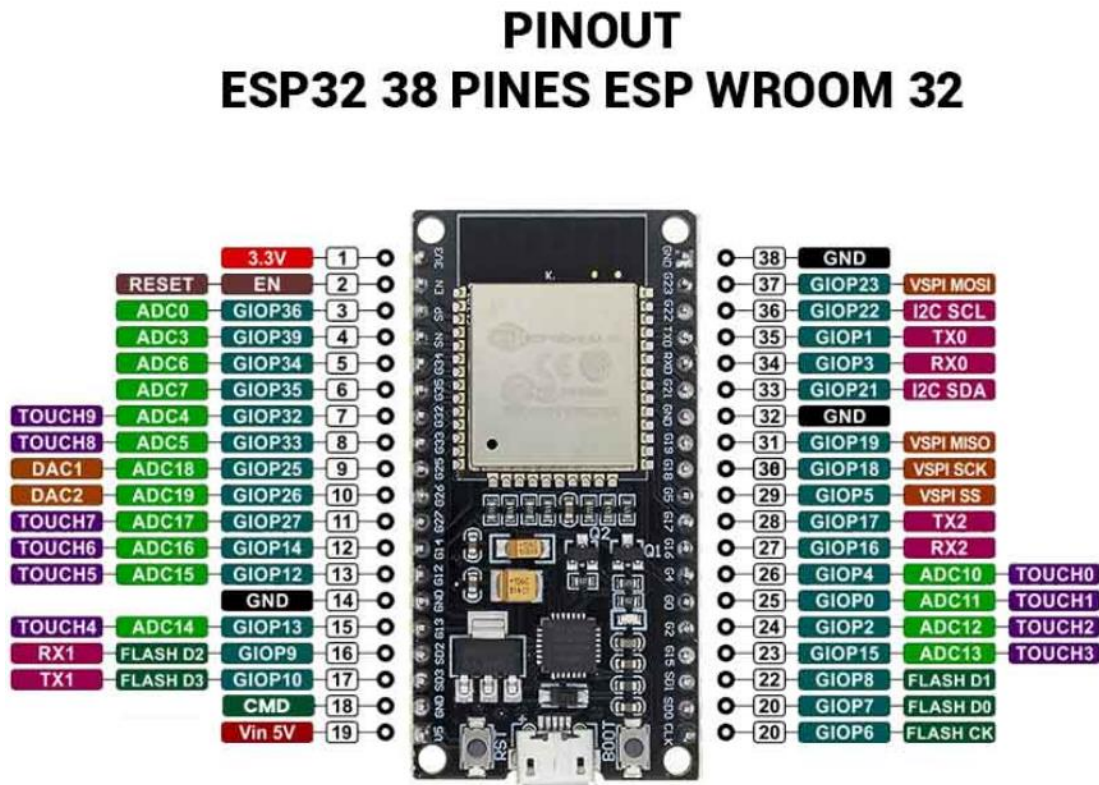
Se resalta, que se realiza la caracterización en cada sensor de iluminación, debido a que la ubicación del sensor es en el techo y tiene una lectura diferente con respecto al puesto de trabajo, por ende, se utiliza un luxómetro que es el encargado de estimar el valor real de luxes en el puesto de trabajo, acorde a la iluminación arrojada por la lámpara con respecto a la variación de potencia, y así, poder caracterizar los valores medidos del sensor BH1750 con respecto a los valores reales del luxómetro.

4.2.1 Modulo EP32.

El módulo Esp32, es una serie de microcontroladores de bajo costo y bajo consumo, el cual cuenta con capacidades superiores con respecto a Arduino en procesamiento y diferentes interfaces de conexión. Las características específicas y Técnicas del módulo ESP32 pueden consultarse en el Anexo D.

Figura 8

Esp32 diagrama de pines.



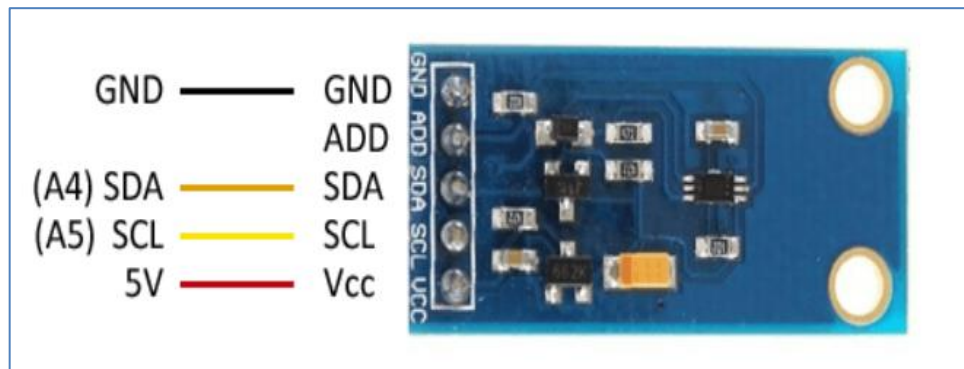
El módulo ESP32, en los sistemas de control de iluminación, es el encargado de procesar cada uno de los controladores y adicional se establece comunicación Wifi para la obtención de datos de los mismos.

4.2.2 Sensor BH1750.

Es un sensor de iluminación digital para medición de iluminancia, el cual entrega valores en unidades de lux equivalente a lumen/m². Por esta razón, es uno de los elementos principales que ayuda a obtener la iluminación real en el puesto de trabajo, y que los sistemas de control a implementar tengan un funcionamiento adecuado.

Figura 9

Módulo BH1750.



Nota. Tomado de (Rohm, 2011).

4.2.3 Calibración del sensor BH1750 en las diferentes zonas.

La calibración de los sensores se realiza con la ayuda del luxómetro UNIT-UT382, el cual se toma como instrumento patrón para la medición de iluminación sobre el área de trabajo respectiva a cada lámpara. Para cada una de las zonas se establece un entorno sin intervención de alguna fuente de luz o luz natural, en donde, se varía la potencia en Watts (W) proporcionada a las lámparas de 0W a 3W por medio del ESP32. De modo, que se realiza un registro del valor obtenido en el sensor BH1750 en la zona y el valor arrojado por el luxómetro. A partir de estos datos obtenidos se determina para cada sensor una constante que multiplique el valor obtenido. El procedimiento descrito anteriormente para cada uno de los sensores puede consultarse en los Anexos: Anexo F, Anexo G, Anexo H, Anexo I, Anexo J y Anexo K.

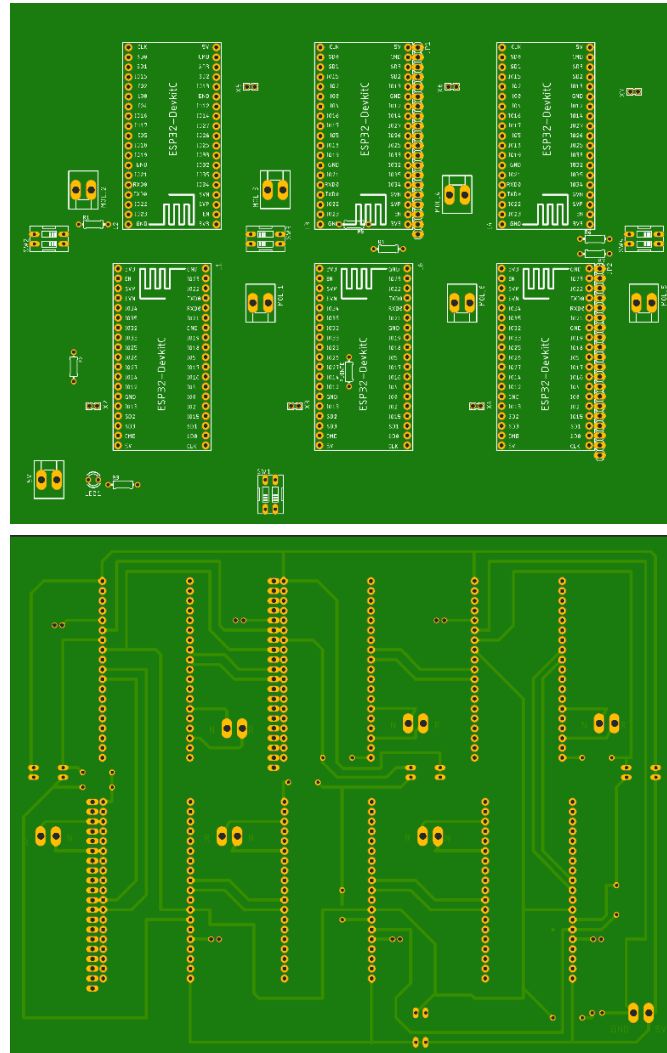
4.2.4 Elaboración de tarjeta para los sistemas de control de iluminación.

Se diseñó una placa conformada por los 6 módulos ESP32, leds indicadores de presencia en cada una de las lámparas, dip-switch que reemplazarán la función de un sensor pir, con el fin de validar presencia y los demás elementos complementarios para cada uno de los sensores. Por lo

tanto, se realiza el siguiente diseño.

Figura 10

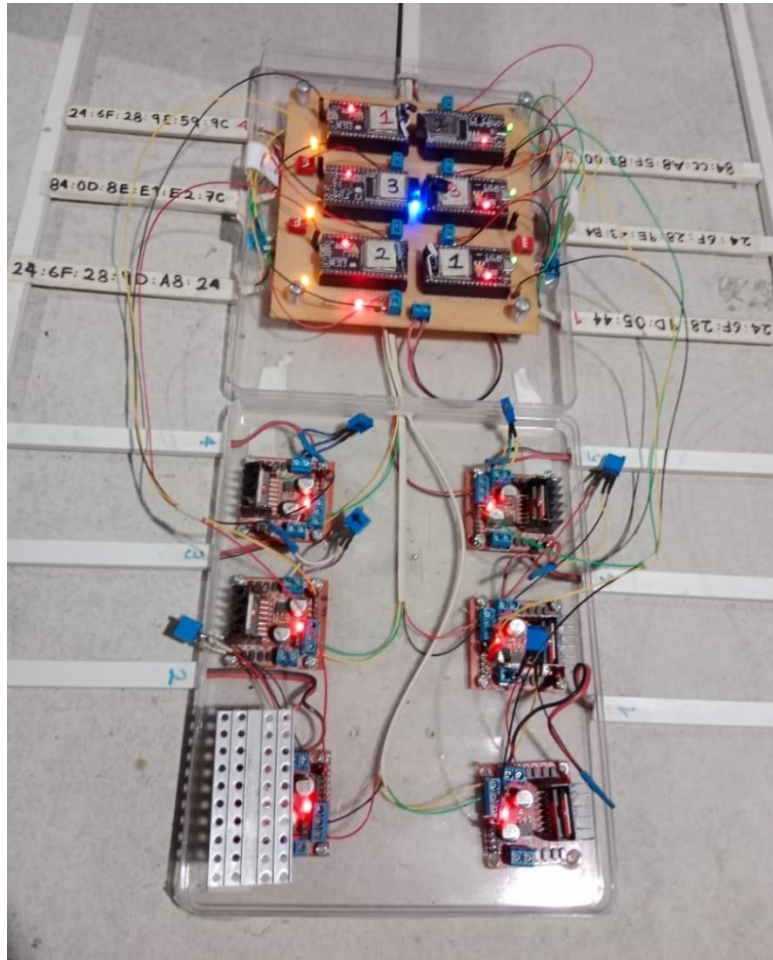
Diseño PCB



Así mismo, se hace la construcción de los sistemas de control de iluminación con cada uno de sus componentes electrónicos, como se puede observar en la Figura 11.

Figura 11

Placa del sistema de control de iluminación.



4.2.5 Descripción de Escenarios.

Con el propósito de realizar una comparación entre los dos controladores a implementar, se realiza cuatro escenarios de prueba, los cuales serán los mismos para cada uno, y así, evaluar cómo se estabiliza el sistema frente a los parámetros de cada escenario y la respuesta frente a la presencia y ausencia de individuos.

Para una mejor descripción de los escenarios se utiliza la siguiente distribución de zonas:

Figura 12

Distribución de las zonas para cada escenario.



4.2.5.1 Descripción Escenario 1.

En el escenario 1, se pretende comprobar que el comportamiento del controlador se estabilice en los sets points establecidos de 500 luxes para todas las zonas, como también, verificar la respuesta del sistema frente a la presencia y ausencia de individuos en las zonas 3 y 6.

Es decir, se inicia el sistema sin presencia de individuos en todas las zonas en un rango de tiempo de 0s a 20s, al llegar a los 20s se da presencia en todas las zonas, durante 30s, al culminar los 30s se quita presencia a las zonas 3 y 6 durante 30s. Por último, al transcurrir los 30s se vuelve a dar presencias a las zonas 3 y 6, culminando de esta manera el escenario 1.

Para facilitar la comprensión del escenario acorde a los cambios realizados durante la

prueba, se diseña la siguiente tabla.

Tabla 3

Descripción escenario 1 RD

Tiempo [s]	Presencia o Ausencia en las zonas					
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6
0s - 20s	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia
+20s - 50s	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia
+50s - 80s	Presencia	Presencia	Ausencia	Presencia	Presencia	Ausencia
+80s - 120s	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia

4.2.5.2 Descripción escenario 2.

En el escenario 2, se pretende comprobar que el comportamiento del controlador se estabilice en los sets points establecidos de 500 luxes en todas las zonas, verificar la respuesta del sistema frente a la presencia y ausencia de individuos en las zonas extremas, al igual que, se realizan perturbaciones de iluminación externa en dos zonas, para validar la respuesta del sistema frente dichas condiciones

Es decir, se inicia el sistema sin presencia de individuos en todas las zonas en un rango de tiempo de 0s a 10s, al llegar a los 10s se da presencia en todas las zonas, durante 30s, al culminar los 30s se quita presencia a las zonas extremas 1 y 4 durante 30s. Por consiguiente, al transcurrir los 30s se vuelve a dar presencias a las zonas 1 y 4, después de 20s se ingresan 2 perturbaciones que simularan la luz ambiente de una ventana en la zona 6 y en la zona 2 durante 10s. por último, se quitan las perturbaciones externas para culminar de esta el escenario 2. Para facilitar la

comprensión del escenario acorde a los cambios realizados durante la prueba, se diseña la siguiente tabla.

Tabla 4

Descripción escenario 2 RD

Tiempo [s]	Presencia o Ausencia en las zonas					
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6
0s - 10s	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia
+10s - 40s	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia
+40s - 70s	Ausencia	Presencia	Presencia	Ausencia	Presencia	Presencia
+70s - 90s	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia
+90s - 100s	Presencia	Presencia Luz Externa	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia Luz Externa
+100s - 120s	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia

4.2.5.3 Descripción escenario 3.

En el escenario 3, se pretende comprobar el comportamiento del controlador al instante de apagarse 2 lámparas a la vez en diferentes instantes de tiempo y verificar si el sistema se estabiliza en los sets points establecidos de 500 luxes en todas las zonas.

Es decir, se inicia el sistema sin presencia de individuos en todas las zonas en un rango de tiempo de 0s a 10s, al llegar a los 10s se da presencia en todas las zonas, durante 30s, al culminar los 30s se quita presencia a las zonas del fondo 4 y 5 durante 30s. Por consiguiente, al transcurrir 30s se quita presencia las zonas del medio 3 y 6, después de 30s se realiza la misma acción de

quitar presencia a las dos últimas zonas 1 y 2 durante 20s, y de esta manera, culminar el escenario 3. Para facilitar la comprensión de este escenario acorde a los cambios realizados durante la prueba, se diseña la siguiente tabla.

Tabla 5

Descripción escenario 3 RD.

Tiempo [s]	Presencia o Ausencia en las zonas					
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6
0s - 10s	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia
+10s - 40s	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia
+40s - 70s	Presencia	Presencia	Presencia	Ausencia	Ausencia	Presencia
+70s - 100s	Presencia	Presencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia
+100s - 120s	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia

4.2.5.4 Descripción escenario 4.

En el escenario 4, se pretende comprobar el comportamiento del controlador cuando se determina que cada zona cumpla una referencia de iluminación diferente, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 6

Sets points para el escenario 4

Escenario	Referencias de iluminación para cada zona					
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6
4	500 luxes	500 luxes	400 luxes	300 luxes	300 luxes	400 luxes

En este escenario, se inicia el sistema sin presencia de individuos en todas las zonas en un rango de tiempo de 0s a 10s, al llegar a los 10s se da presencia a todas las zonas durante 30s, al culminar los 30s se quita presencia a tres zonas 2, 3 y 4 durante 20s, después, a los 60s se da presencia en las zonas anteriores. Posteriormente, transcurridos 90s se incluyen perturbaciones externas cercanas a las zonas 2 y 6, pero que también afectarían a las zonas aledañas, las cuales, estarán activas durante 10s, transcurrido ese tiempo se apagarán las fuentes de luz externas y se dejará estabilizar el sistema. Para facilitar la comprensión del escenario acorde a los cambios realizados durante la prueba, se diseña la siguiente tabla.

Tabla 7

Descripción escenario 4 RD.

Tiempo [s]	Presencia o Ausencia en las zonas					
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6
0s - 10s	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia
+10s - 40s	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia
+40s - 70s	Presencia	Ausencia	Ausencia	Ausencia	Presencia	Presencia
+70s - 90s	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia
+90s - 100s	Presencia	Presencia Luz Externa	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia Luz Externa
+100s - 120s	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia	Presencia

4.2.6 Implementación de Replicadores dinámicos sensible a presencia de individuos.

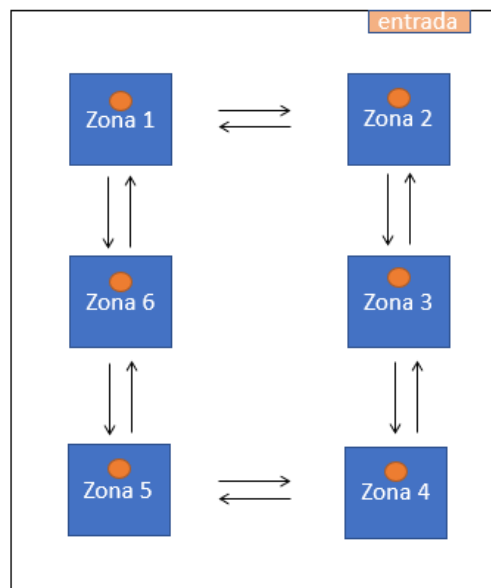
Para la implementación del algoritmo de replicadores dinámicos sensible a presencia de individuos, se realiza un proceso por diversas etapas, en donde se garantiza el funcionamiento correcto del algoritmo y dar paso a los resultados del controlador en los diferentes escenarios.

4.2.6.1 Topología de comunicación y obtención de datos.

El algoritmo de replicadores con presencia de individuos se fundamenta en una comunicación tipo anillo bidireccional entre los agentes reales de cada zona como se observa en la Figura 13, cabe resaltar, que cada una de las zonas se encuentra constituida por un sensor, un ESP32 y una lámpara dimerizable. Por ende, cada zona será un agente real, que obtendrá información de los dos agentes adyacentes, por ejemplo, el agente real de la zona 1, enviará información (Potencia local y Fitness local) a la zona 2 y 6, como también, recibirá información de las mismas, para realizar el cálculo del replicador (6).

Figura 13

Comunicación anillo bidireccional



Para ello, los módulos ESP32 son los encargados de ejecutar cada uno de estos procedimientos por medio de comunicación UART en full dúplex. Y así, poder realizar los cálculos del replicador en cada uno de los agentes. Además, se define una comunicación ESP-NOW donde se tiene un ESP32-Maestro y múltiples ESP32-Eslavos, permitiendo una comunicación inalámbrica que consuma menos recursos y se realice de una manera rápida (Expressif Systems, 2021). De esta manera, únicamente para el manejo de datos las zonas serán declaradas como dispositivos esclavos, que enviarán los datos necesarios por medio de un vector a un ESP32-Maestro, el cual, será el encargado de recibir todos los datos de los dispositivos esclavos y enviarlos por comunicación serial a MATLAB, para poder visualizar el comportamiento del sistema de control de iluminación.

4.2.6.2 Implementación del algoritmo de replicadores en ESP32.

La implementación del algoritmo de replicadores dinámicos sensible a presencia de individuos se realiza en el módulo ESP32, teniendo en cuenta las respectivas fórmulas de (5), (6) y (8). En primer lugar, se inicializa el sistema estableciendo unas condiciones iniciales de dar valores de potencia muy pequeños a cada agente real, para que el sistema visualmente se inicie apagado y la potencia restante se distribuya a los agentes ficticios.

De igual manera, se da un valor de $B=4000000$ para garantizar la positividad de la función de aptitud, una $P_{Tot}=18$ la cual es la potencia total que trabajará el sistema que cuenta con 6 lámparas de 3W cada una y $S_i=500$ que será el valor de referencia de iluminación estipulado para varios de los escenarios que se describirán más adelante. Después, se inicializa la comunicación de ESP-NOW y serial para poder comunicar los agentes con sus respectivos “vecinos” y poder enviar los datos de todos los esclavos al módulo maestro encargado de enviar los datos a Matlab.

Ahora bien, en la programación se evalúa la presencia de individuos, la cual se define mediante un switch que simulara el funcionamiento de un sensor de presencia. De esta manera, podemos obtener el valor booleano de 1 o 0 para cumplir con el funcionamiento adecuado del fitness local (5). Por consiguiente, se hace la lectura de iluminación con el sensor y así, obtener el valor de la función de aptitud local, que por consiguiente enviará los datos de potencia y fitness a cada uno de sus agentes aledaños y de igual manera, recibirá la misma información de estos por mediode la comunicación UART.

Una vez se obtienen todos los datos de los vecinos, se procede a calcular el replicador en el agente ficticio y real respectivamente, que serán datos que se irán actualizando y guardando a medida que los valores de iluminación y presencia cambien. Cabe aclarar, que se realiza la saturación del actuador y se establecen las restricciones de potencia establecidas por Arévalo (2020). No obstante, se hace él envió de datos por medio de comunicación ESP-NOW al ESP32 definido como maestro, para que por medio de este se puedan enviar los datos a Matlab.

Por último, cada uno de los valores obtenidos en el proceso se guardan y se actualizan para realizar de esta manera un proceso cíclico. Si desea consultar el código implementado en los módulos ESP32 y el código de visualización de datos en Matlab diríjase a los anexos Anexo L y Anexo N.

A continuación, se presentan los resultados de implementación del algoritmo basado en replicadores dinámicos sensible a presencia de individuos, frente a los diferentes escenarios, en los cuales, se tendrán en cuenta algunos parámetros.

4.2.6.3 Escenario 1 con replicadores dinámicos sensible a presencia de individuos.

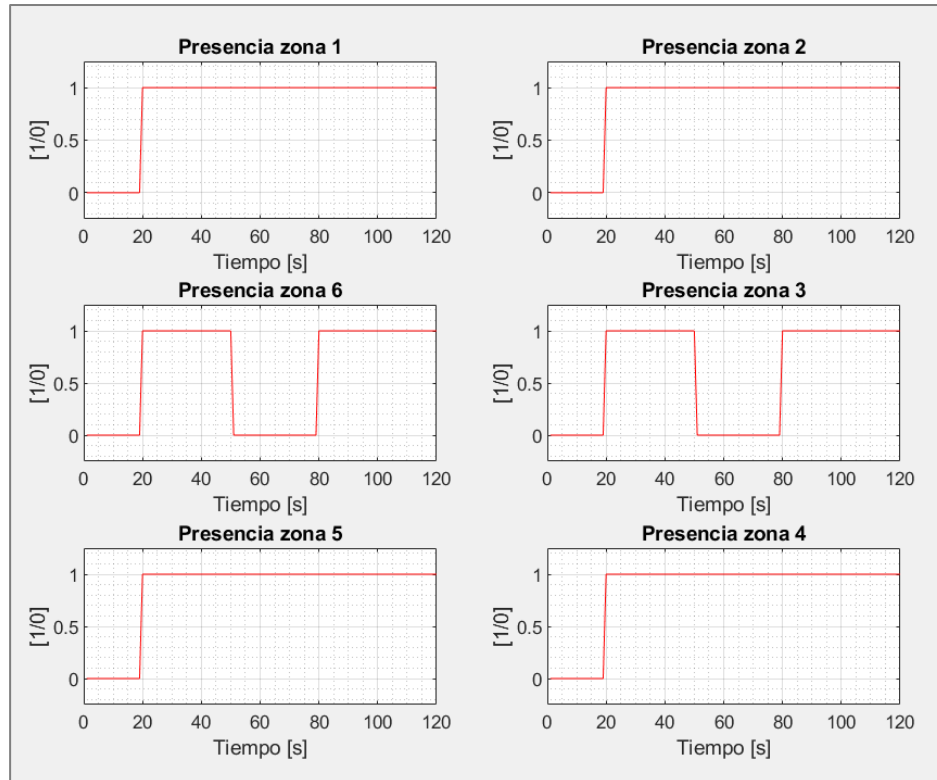
Ahora bien, entendido la descripción del escenario 1 (4.2.5.1), se muestran los resultados de los datos obtenidos por medio de Matlab, acorde al comportamiento del controlador en las

siguientes gráficas.

En la Figura 14, se tiene el comportamiento de las presencias descritos en la Tabla 3, simulando el comportamiento de un sensor de presencia con respecto al tiempo.

Figura 14

Gráfica de presencia en cada zona para el escenario 1 RD.

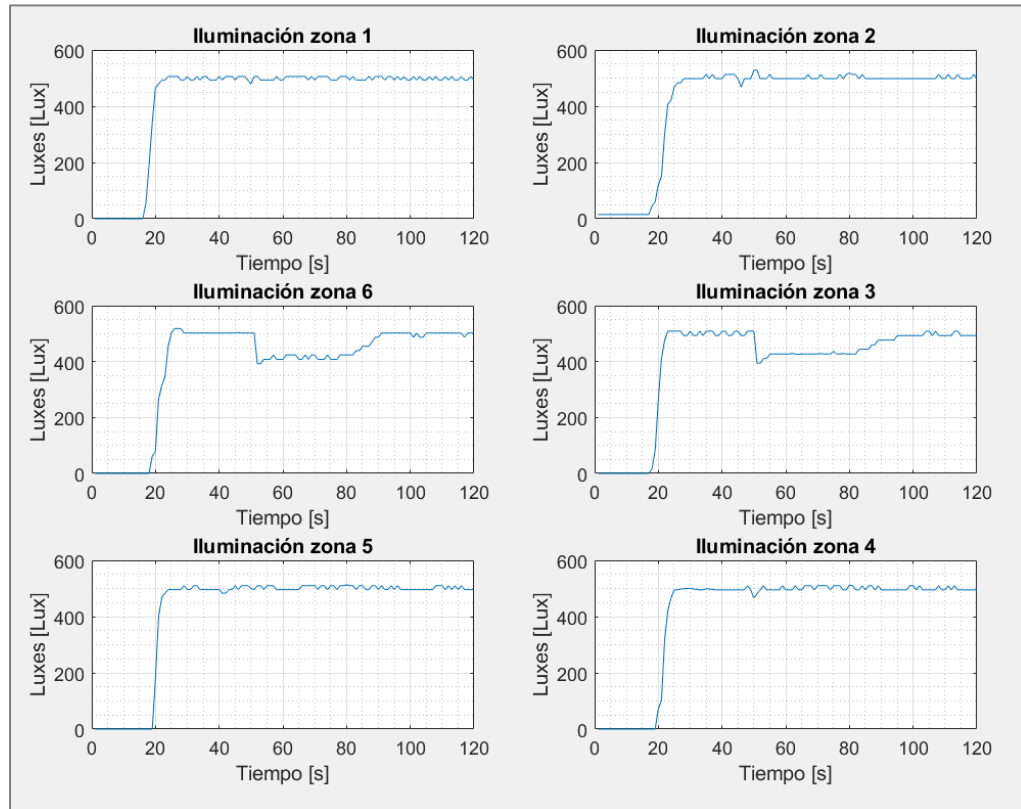


Así mismo, en la Figura 15 se puede evidenciar que el controlador responde de manera adecuada a las condiciones estipuladas en el escenario 1. En otras palabras, al momento de dar presencia a todas las zonas, el sistema llega al valor de referencia de iluminación (500 luxes). Además, satisface las condiciones de ausencia de individuos en las zonas 3 y 6, llegando al punto de que la lámpara se apaga visualmente, sin embargo, internamente cuenta con un valor de potencia muy pequeño como se puede observar en la Figura 16, cumpliendo de esta manera las restricciones de potencia para los agentes reales y ficticios, estipulados en (8) y (9). Cabe

resaltar, que el sistema responde perfectamente a la ausencia y presencia de individuos, tal y como sucede a los 80s, que se da presencia nuevamente a dichas zonas, y el controlador estabiliza el sistema en los sets points determinados en el escenario 1.

Figura 15

Gráfica de iluminación en cada zona para el escenario 1 RD.

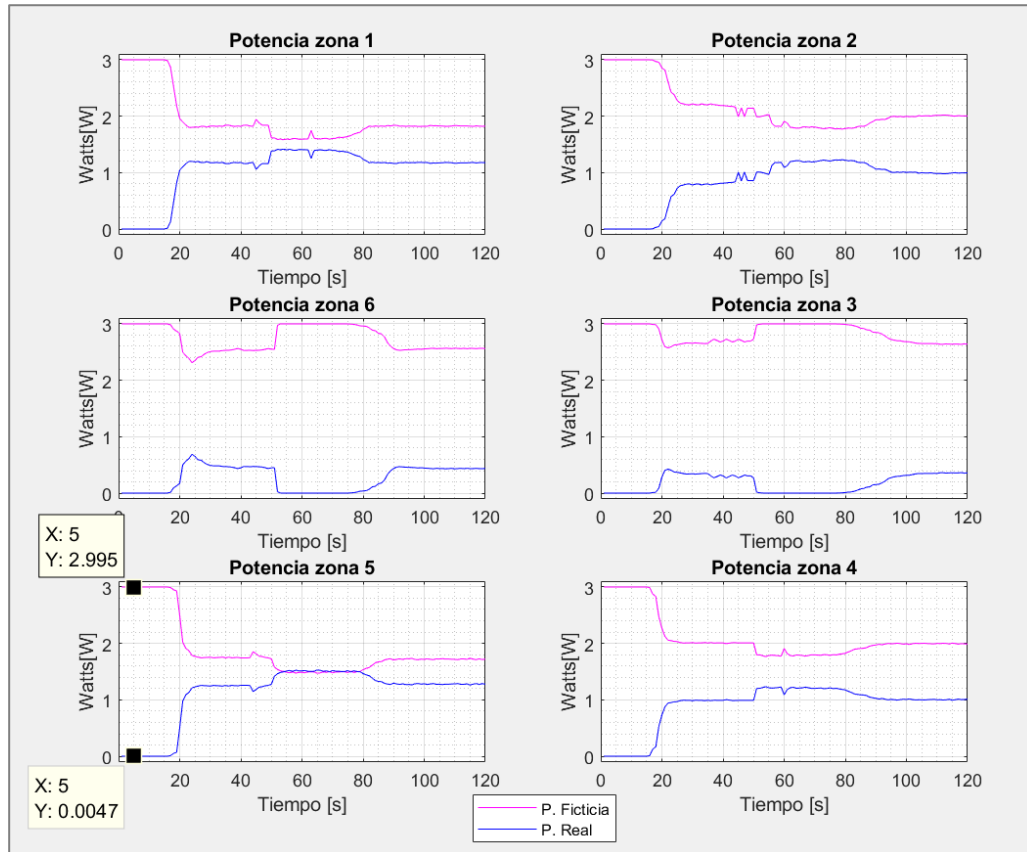


La Figura 16, permite observar el comportamiento de las potencias reales y ficticias del sistema en cada zona, teniendo una respuesta inversamente proporcional entre las mismas. Además, el comportamiento de la potencia real es similar al de la iluminación en la Figura 15. Ya que, al momento de detectar presencia en el sistema de iluminación, la potencia real aumenta en todas las zonas que tengan presencia, hasta el punto en que la lámpara obtenga la potencia necesaria para llegar a los sets points establecidos. De igual manera, se observa que el sistema a no detectar presencia, la potencia real se distribuye a sus agentes ficticios respectivamente, con

el fin de apagar visualmente la lámpara, y que, cuando se detecta nuevamente presencia, esta potencia que se encuentra en el agente ficticio, se distribuya al agente real hasta llegar al set point de cada zona.

Figura 16

Gráfica de potencias en cada zona para el escenario 1 RD.



Si desea consultar las gráficas de fitness para el escenario 1, puede evidenciarlas en el Anexo O.

Como se observa en la gráfica el valor de la potencia real nunca es igual a cero a pesar de no haber presencia en la zona, esto con el fin de evitar error en los cálculos internos del replicador dinámico, sin embargo, con el valor despreciable de potencia no genera iluminación en la lámpara.

4.2.6.4 Escenario 2 con replicadores dinámicos sensible a presencia de individuos.

Ahora bien, entendido la descripción del escenario 2 (4.2.5.2), se muestran los resultados de los datos obtenidos por medio de Matlab, acorde al comportamiento del controlador en las siguientes gráficas.

Figura 17

Ubicación de las fuentes externas de luz.

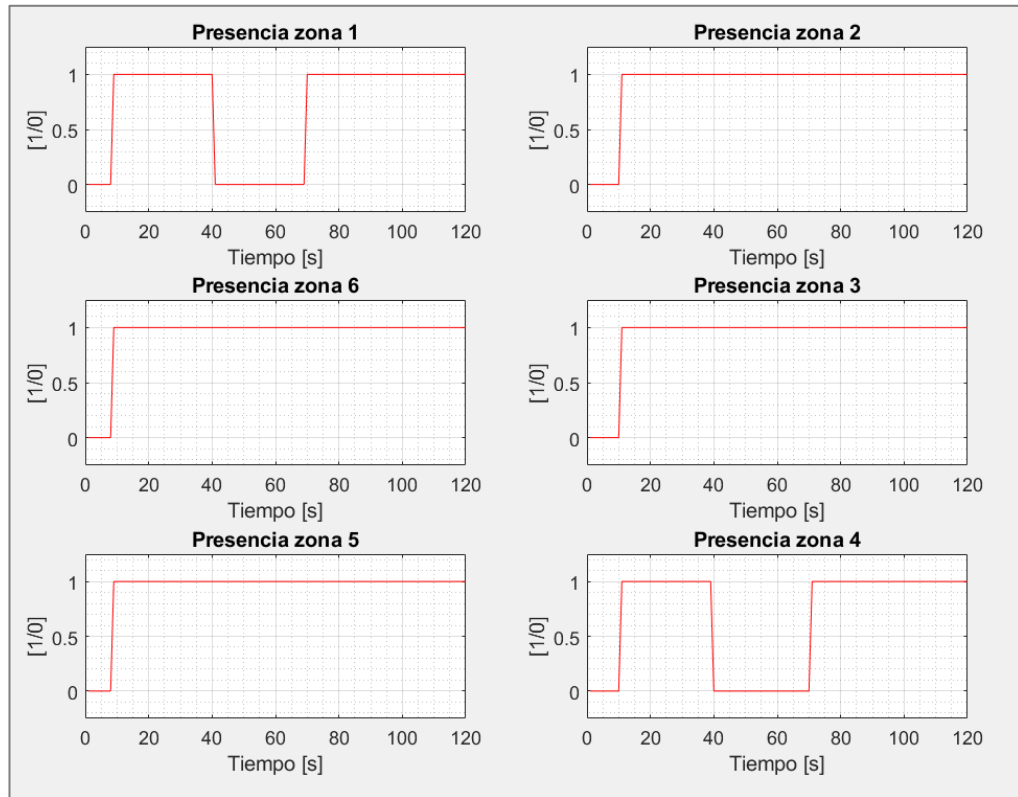


Nota. Ubicación de las fuentes de iluminación externas, que simularan la perturbación de luz ambiente.

En la Figura 18, se tiene el comportamiento de las presencias descritos en la Tabla 5, simulando el comportamiento de un sensor de presencia con respecto al tiempo.

Figura 18

Gráfica de presencia en cada zona para el escenario 2 RD.



Así mismo, en la Figura 19 se tiene el comportamiento de la iluminancia con respecto al tiempo como resultado de la segunda implementación del controlador de replicadores dinámicos sensible a presencia de individuos en un modelo a escala real.

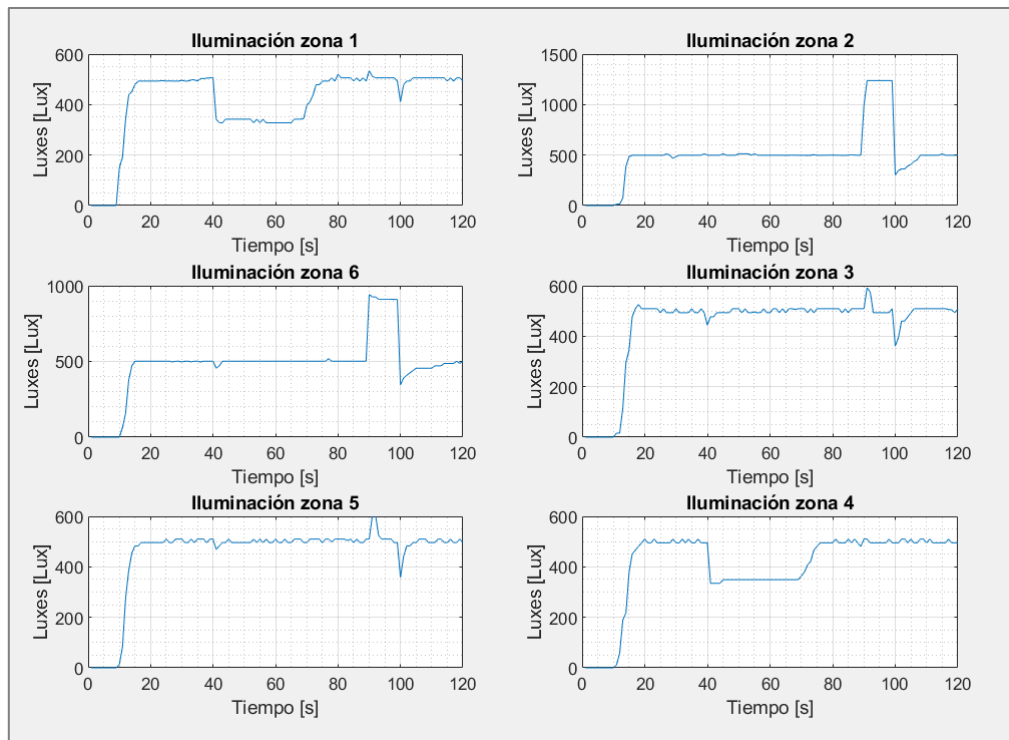
En donde, puede evidenciar que el sistema de control de iluminación responde de manera adecuada a las condiciones estipuladas en el escenario 2. En otras palabras, al momento de dar presencia a todas las zonas, el sistema llega al valor de referencia de iluminación (500 luxes). Además, satisface las condiciones de ausencia de individuos en las zonas 1 y 4, llegando al punto de que la lámpara se apaga visualmente pero internamente cuenta con un valor de potencia muy pequeño como se puede observar en la Figura 18 cumpliendo de esta manera las restricciones de potencia para los agentes reales y ficticios, estipulados en (8) y (9). Además, cuando el sistema

de control de iluminación no tiene presencia en las zonas 1 y 4, la iluminación reduce debido a que la lámpara se apaga visualmente, pero en dichas zonas se mantiene un valor de iluminación, es debido a que las demás lámparas se encuentran encendidas cumpliendo su punto de referencia de iluminación.

De igual manera, se observa en las zonas 2 y 6 que la iluminación sobrepasa el puntode referencia estipulado y en algunas de las otras zonas se evidencia un pequeño pico, debido a que en el instante de 90s se afecta al sistema con perturbaciones externas de luz ubicadas en puntos cercanos a dichas zonas (Ver Figura 17), reflejando de esta manera un entorno real en el cual se debe tener en cuenta el aporte de la luz ambiente. Cuando se retiran las iluminaciones externas en las zonas 2 y 6, la iluminación disminuye en algunas que se encuentren cercanas y retornan a su punto de referencia hasta estabilizarse terminando así el escenario 2.

Figura 19

Gráfica de iluminación en cada zona para el escenario 2 RD.

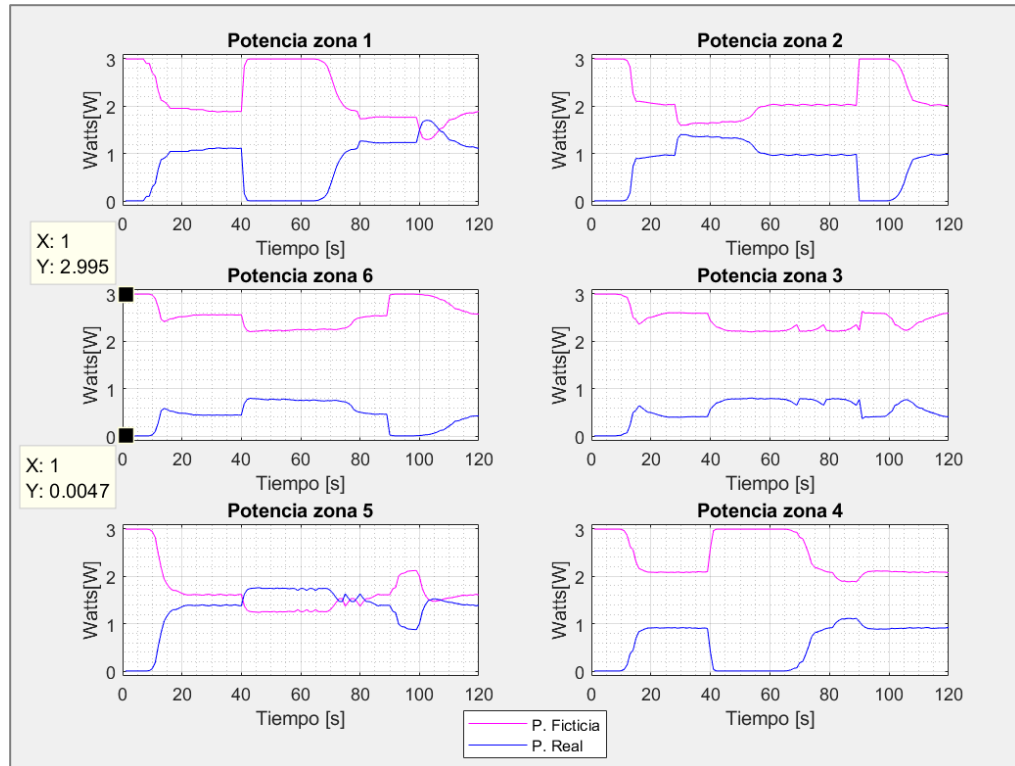


La Figura 20, permite observar el comportamiento de las potencias reales y ficticias del sistema en cada zona, teniendo una respuesta inversamente proporcional entre las mismas. Además, el comportamiento de la potencia real es similar al de la iluminación en la Figura 18. Ya que, al momento de detectar presencia en el sistema de iluminación, la potencia real aumenta en todas las zonas que tengan presencia, hasta el punto en que la lámpara obtenga la potencia necesaria para llegar a los sets points establecidos. De igual manera, se observa que el sistema cuando no detecta presencia, la potencia real se distribuye a sus agentes ficticios respectivamente, con el fin de apagar visualmente la lámpara, y que, cuando se detecta nuevamente presencia, esta potencia que se encuentra en el agente ficticio, se distribuya al agente real hasta llegar al set point de cada zona.

Además, en este escenario es muy importante, resaltar el comportamiento de las potencias reales a los 90s, momento en el cual, se perturba el sistema con iluminación externa. En la Figura 20, se evidencia con claridad que en ese instante la potencia real en las zonas 2 y 6 baja a su mínimo y se almacena en el agente ficticio, debido que la iluminación ya ha llegado o ha sobrepasado la referencia de 500 luxes, sin embargo, al momento en que se retiran las fuentes de iluminación externa, las potencias reales empiezan a aumentar para prender la lámpara y que esta llegue a la iluminación adecuada para este escenario.

Figura 20

Gráfica de potencias en cada zona para el escenario 2 RD.



Si desea consultar las gráficas de fitness para el escenario 2, puede evidenciarlas en el Anexo P.

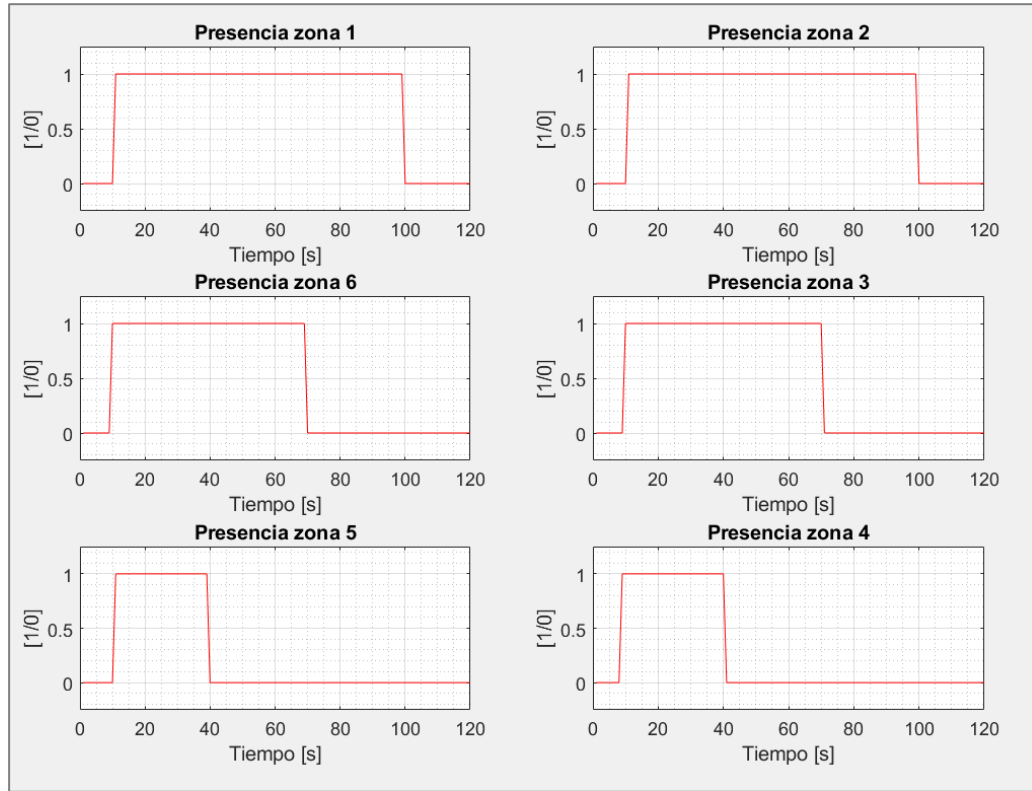
4.2.6.5 Escenario 3 con replicadores dinámicos sensible a presencia de individuos.

Ahora bien, teniendo en cuenta la descripción del escenario 3 (4.2.5.3), se muestran los resultados de los datos obtenidos por medio de Matlab, acorde al comportamiento del controlador en las siguientes gráficas.

En la Figura 21, se tiene el comportamiento de las presencias descritos en la Tabla 5, simulando el comportamiento de un sensor de presencia con respecto al tiempo.

Figura 21

Gráfica de presencia en cada zona para el escenario 3 RD.

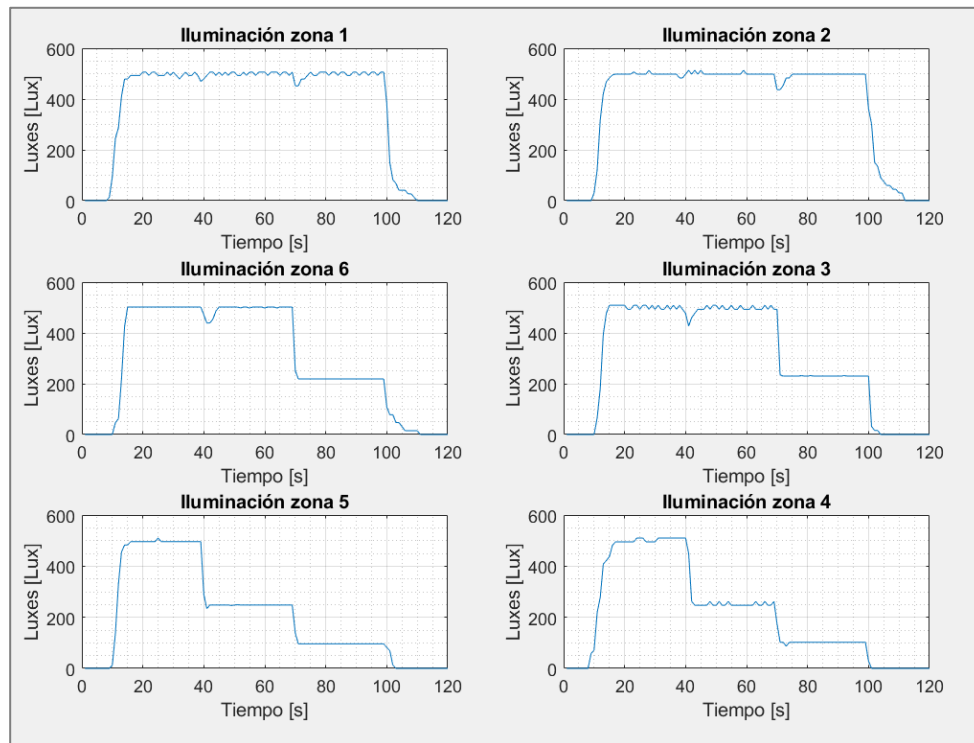


Así mismo, en la Figura 22 se observa el comportamiento de la iluminancia con respecto al tiempo como resultado de la implementación del controlador para el escenario 3 en un modelo escala real. En donde, se evidencia que el sistema de control de iluminación responde de manera adecuada, cuando se somete a los cambios que se realizan en dicho escenario. Es decir, al momento de dar presencia a todas las zonas, el sistema cumple con el valor de referencia de iluminación (500 luxes). De igual manera, satisface las condiciones de ausencia de individuos en las zonas 4 y 5, llegando al punto de que la lámpara se apague visualmente, pero internamente cuenta con el valor de potencia muy pequeño. Sin embargo, cada vez que se retiran las presencias en las diferentes zonas, se puede evidenciar que en las zonas que aún tienen presencias bajan la iluminación, pero al instante se compensan aumentando potencia en cada

agente real hasta llegar al punto de iluminación estipulado.

Figura 22

Gráfica de iluminación en cada zona para el escenario 3 RD.



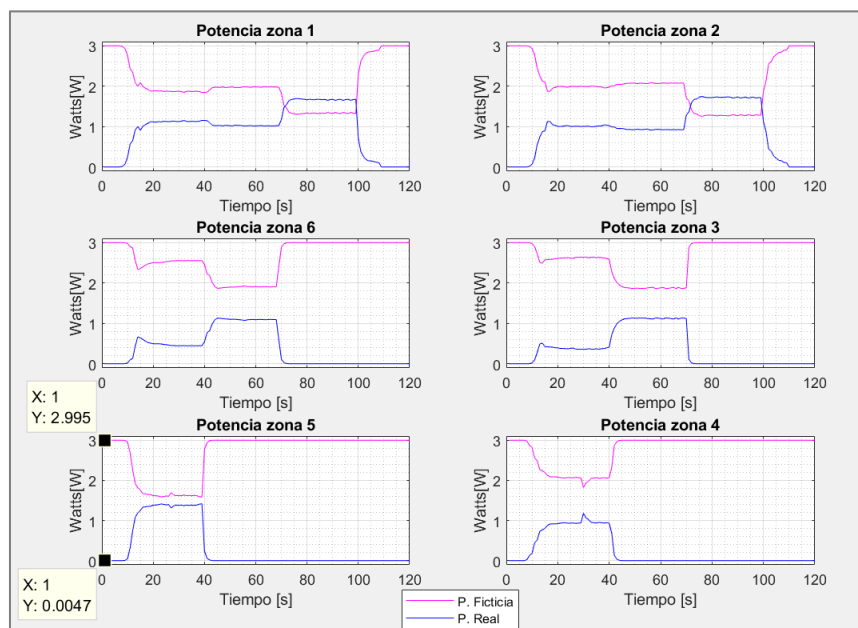
La Figura 23, permite observar el comportamiento de las potencias reales y ficticias del sistema en cada zona, obteniendo una respuesta inversamente proporcional entre las mismas. Al momento de detectar presencia en el sistema de iluminación, la potencia real aumenta en todas las zonas que tengan presencia, hasta el punto en que la lámpara obtenga la potencia necesaria para llegar a los sets points establecidos. De igual manera, se observa que el sistema cuando no detecta presencia, la potencia real se distribuye a sus agentes ficticios respectivamente, con el fin de apagar visualmente la lámpara. Esto se evidencia al instante de retirar presencia en las zonas 4 y 5 a los 40s, en el cual, la potencia real disminuye hasta el punto en que la lámpara se apague visualmente, cabe resaltar, que las potencias reales de las lámparas más cercanas (zonas 3 y 6) a

dichas zonas, aumentan hasta el punto de llegar a los 500 luxes, debido a que, las zonas 4 y 5 ya no realizan aporte de iluminación. Sin embargo, en ese mismo instante de 40s sucede lo contrario en las zonas 1 y 2, ya que, las zonas 3 y 6 aumentaron potencia e iluminación respectivamente, esto hace que en las zonas 1 y 2 se perciba un poco más de iluminación, y con el fin de compensar el punto de referencia, disminuyen proporcionalmente la potencia en los agentes reales para no sobrepasar los sets points establecidos para este escenario 3.

Además, es importante resaltar, el comportamiento de las zonas 1 y 2 a los 70s, momento en el cual, se apagan las zonas 6 y 3 quedando únicamente con presencia las zonas 1 y 2, y por ende, se puede observar que en la Figura 20, la iluminación cae un poco, pero al mismo instante en la Figura 23, se observa que la potencia del agente real aumenta para compensar esa caída de iluminación y llegar al punto de referencia, y así mantenerse hasta el instante de 100s, que no hay presencia de individuos, y el sistema procede a almacenar la potencia en los agentes ficticios hasta que exista presencia en la zona correspondiente.

Figura 23

Gráfica de potencias en cada zona para el escenario 3 RD.



Si desea consultar las gráficas de fitness para el escenario 3, puede evidenciarlas en el Anexo Q.

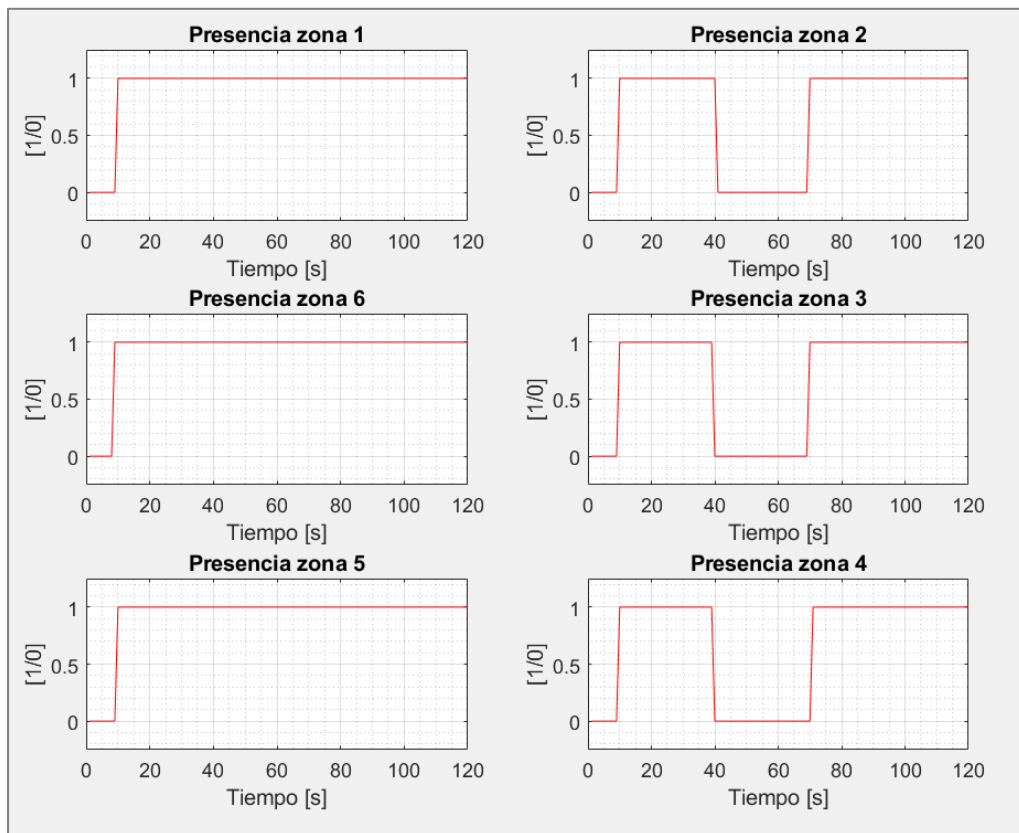
4.2.6.6 Escenario 4 con replicadores dinámicos sensible a presencia de individuos.

Ahora bien, entendido la descripción del escenario 4 (4.2.5.4), se muestran los resultados de los datos obtenidos por medio de Matlab, acorde al comportamiento del controlador en las siguientes gráficas.

En la Figura 24, se tiene el comportamiento de las presencias descritos en la Tabla 7, simulando el comportamiento de un sensor de presencia con respecto al tiempo.

Figura 24

Gráfica de presencia en cada zona para el escenario 4 RD.



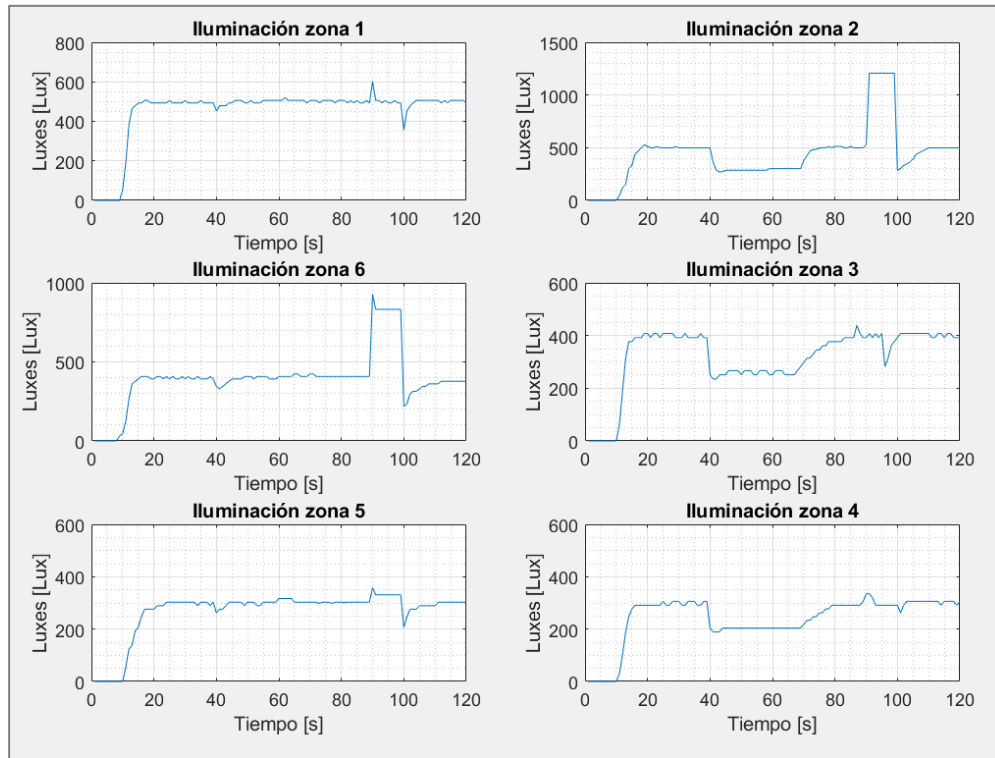
Ahora bien, en la Figura 25 se observa el comportamiento de la iluminancia con respecto al tiempo como resultado de la implementación del controlador para el escenario 4 en un modelo escala real. En donde, se evidencia que el sistema de control de iluminación responde de manera adecuada a los cambios de referencia de iluminación establecidos en la Tabla 6 al momento de dar presencia. Después, a los 40s las zonas 2, 3 y 4 bajan de su punto de referencia, ya que, no hay presencia en dichas zonas, y solo cuentan con la iluminación que les llega de las lámparas aledañas a estas. Sin embargo, cuando el sistema tiene presencia nuevamente en las zonas anteriores, este responde de manera adecuada, llegando a las referencias establecidas para cada zona.

De igual modo, es importante analizar el comportamiento del replicador frente a perturbaciones de luz externa, afectando todas las zonas del sistema, aunque las zonas que más iluminación reciben de la fuente externa son la zona 2 y la zona 6. De cualquier manera, se observa en la Figura 25 a los 90s, como influye la fuente de luz externa en cada una de las zonas, aumentando la iluminación del entorno, en unas más que otras.

Posteriormente, al quitar la luz externa, la iluminación en las zonas disminuye de su punto de referencia, pero retorna al mismo instante estabilizando el sistema en los sets points concretados para cada zona.

Figura 25

Gráfica de iluminación en cada zona para el escenario 4 RD.



La Figura 26, permite observar el comportamiento de las potencias reales y ficticias del sistema en cada zona, obteniendo una respuesta inversamente proporcional entre las mismas. Al momento de detectar presencia en el sistema de iluminación, la potencia real aumenta en todas las zonas que tengan presencia, hasta el punto en que la lámpara obtenga la potencia necesaria para llegar a los sets points establecidos. De igual manera, se observa que el sistema cuando no detecta presencia, la potencia real se distribuye a agentes ficticios respectivamente, con el fin de apagar visualmente la lámpara.

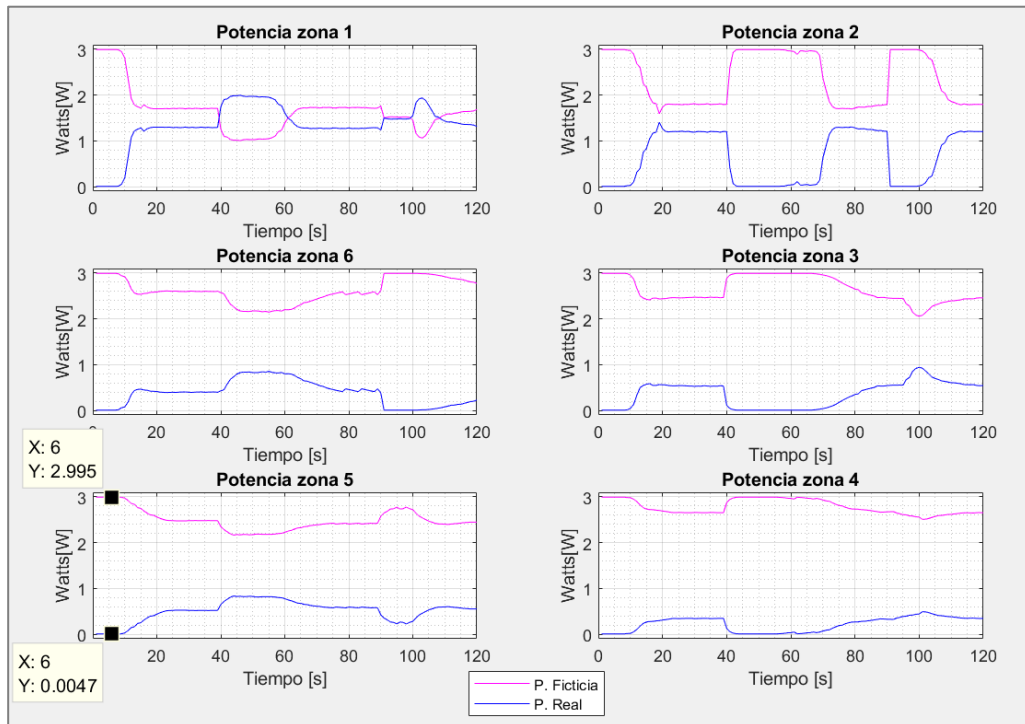
Entre tanto, en el rango de 10s a 40s que tienen presencia todas las zonas, se observa que cada agente real llega a su potencia necesaria para cumplir el parámetro de iluminación necesario en cada zona, como se puede evidenciar claramente que las zonas que deben llegar a un punto de

iluminación menor a las demás, utilizan menos potencia real y la demás se almacena en el agente ficticio, hasta el punto en que las zonas 2, 3 y 4 se apagan, momento en el cual, las potencias reales de las zonas que tienen presencia aumentan para llegar a la iluminación estipulada en el escenario 4.

Cabe resaltar, el comportamiento de todas las potencias después de los 90s, instante en el que se afecta el sistema con luz externa. En donde, las potencias reales disminuyen a su mínimo de potencia debido a que la zona cumple o sobrepasa el punto de referencia de iluminación, tal es el caso, de las zonas 2 y 6 que al evidenciar que existe una fuente externa que aporta la iluminación necesaria para satisfacer el set point de la zona, estas disminuyen su potencia y cuando la fuente de luz externa se retira, las potencias de los agentes reales retornan hasta cumplir los luxes obligatorios para cada zona.

Figura 26

Gráfica de potencias en cada zona para el escenario 4 RD.



Si desea consultar las gráficas de fitness para el escenario 4, puede verlas en el Anexo R.

4.2.7 Implementación de controlador PID.

Como contraparte en la comparación de eficiencia, se implementa un controlador PID, asumiendo unos parámetros iniciales para su correcto funcionamiento, para posteriormente recolección de datos en los diferentes escenarios.

Para la debida comparación, se realiza los mismos escenarios con las perturbaciones de luz y de presencia en los mismos tiempos que en el controlador de Replicadores dinámicos.

4.2.7.1 Función de transferencia de la planta y adaptación del controlador PID.

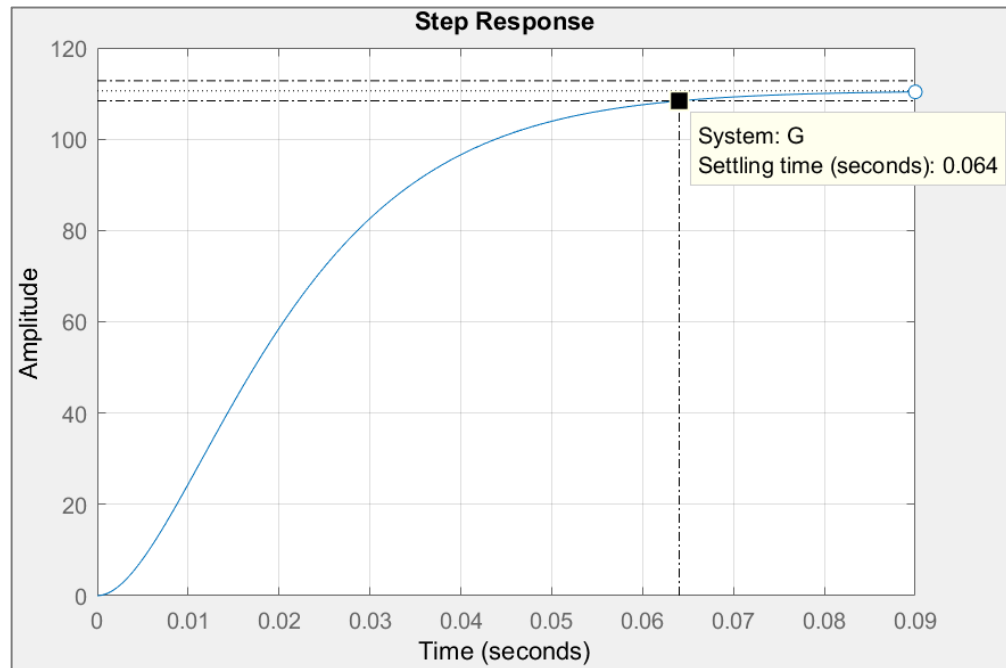
El comportamiento dinámico de la lámpara y el sensor es descrito por la función de transferencia, que corresponde a la relación entre potencia suministrada y el flujo luminoso censado de la misma, haciendo uso de la herramienta Matlab se obtiene como resultado un sistema de segundo orden. Como se muestra a continuación:

$$F_c(s) = \frac{851700}{s^2 + 172,2 s + 7701} = \frac{Lux(s)}{P(s)} \quad (32)$$

Esta función de transferencia representa un sistema de tipo sobre amortiguado, esto se puede observar mediante la siguiente Figura 27.

Figura 27

Step aplicado al modelo de la planta.



En seguida, con la función de transferencia se obtiene los polos y ceros de la planta, en este caso, la planta no tiene ceros. Y los polos son: $-86,1 \pm 16,96j$

Ahora bien, para el diseño del controlador PID usando el lugar geométrico de las raíces (LGR) se usa como pautas los siguientes criterios iniciales, usando un tiempo de asentamiento de $t_s = 1$ s y un sobrepaso porcentual de $SP = 5\%$. Haciendo uso de las ecuaciones (21) y (22), se obtiene los valores de ζ y ω_n respectivamente.

$$\zeta = 0,69$$

$$\omega_n = 90,58$$

Además, teniendo el valor de estas variables se procede a encontrar los polos deseados S_d , haciendo uso de la ecuación (20).

$$s_d = -62,5 \pm 65,56j$$

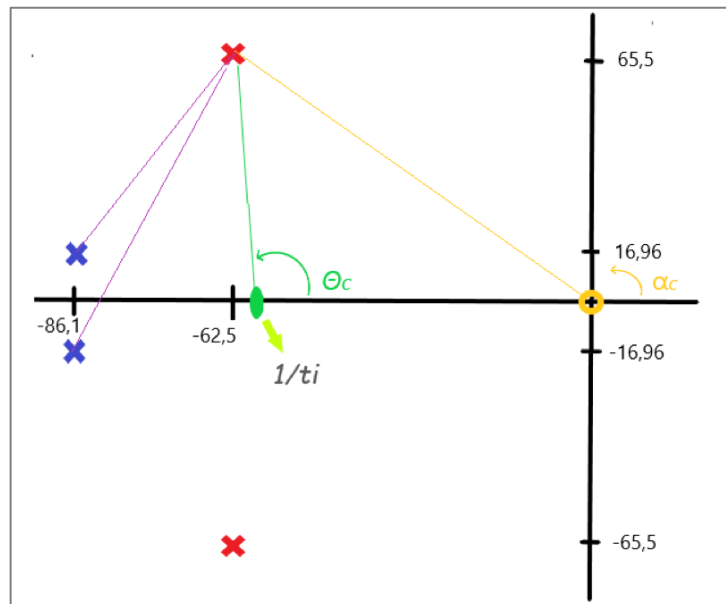
Aplicando el criterio de Ángulo (15), y trigonometría básica, se obtiene los valores de θ_c y α_c como se muestra en la Figura 28.

$$\theta_c = 92,57$$

$$\alpha_c = 133,63^\circ$$

Figura 28

Plano complejo y ubicación de polos LGR.



Por otro lado, conociendo el valor de $1/t_i$ se aplica el criterio de Magnitud (16), con lo cual se obtiene el valor de K_p .

$$F_c(s) = \frac{K_p \left(s + \frac{1}{t_i} \right)}{s}$$

$$k_p = \frac{1}{\left| \frac{K_p \left(s + \frac{1}{t_i} \right)}{s} \left(\frac{851700}{s^2 + 172,2 s + 7701} \right) \right|_{-62,5 \pm 65,56}}$$

Teniendo en cuenta que se evalúa con $Sd = -62,5 \pm 65,56j$. Se realiza un ajuste a los valores, con el fin de mejorar el comportamiento del controlador, y obtener resultados ideales.

$$k_p = 0,0182 \quad k_i = 1,13 \quad k_d = 0,0000708$$

Para la discretización del controlador, por el criterio de 1/10 del tiempo de estabilización (Arévalo, 2020), como el tiempo es de 1s, se toma un tiempo de muestreo de 0,1s; Este es el tiempo de muestreo para la implementación del controlador en las pruebas.

Si se desea obtener más información sobre el código implementado en Arduino de PID puede consultarse en el Anexo S.

4.2.7.2 Topología de comunicación y obtención de datos PID.

A pesar de tener un diseño distribuido, para el manejo de datos del controlador PID se realiza una comunicación vía Wifi, denominada ESP-NOW, en la cual se establece los 6 módulos ESP32 como esclavos, los cuales envían variables como potencia, iluminación, presencia y número de placa. Además, se tiene un séptimo modulo como maestro encargado de recibir los datos en tiempo real, a su vez, este maestro por medio de conexión USB se conecta a un equipo en Matlab para su almacenamiento y visualización como se muestra en la Figura 29.

Figura 29

Comunicación del controlador PID



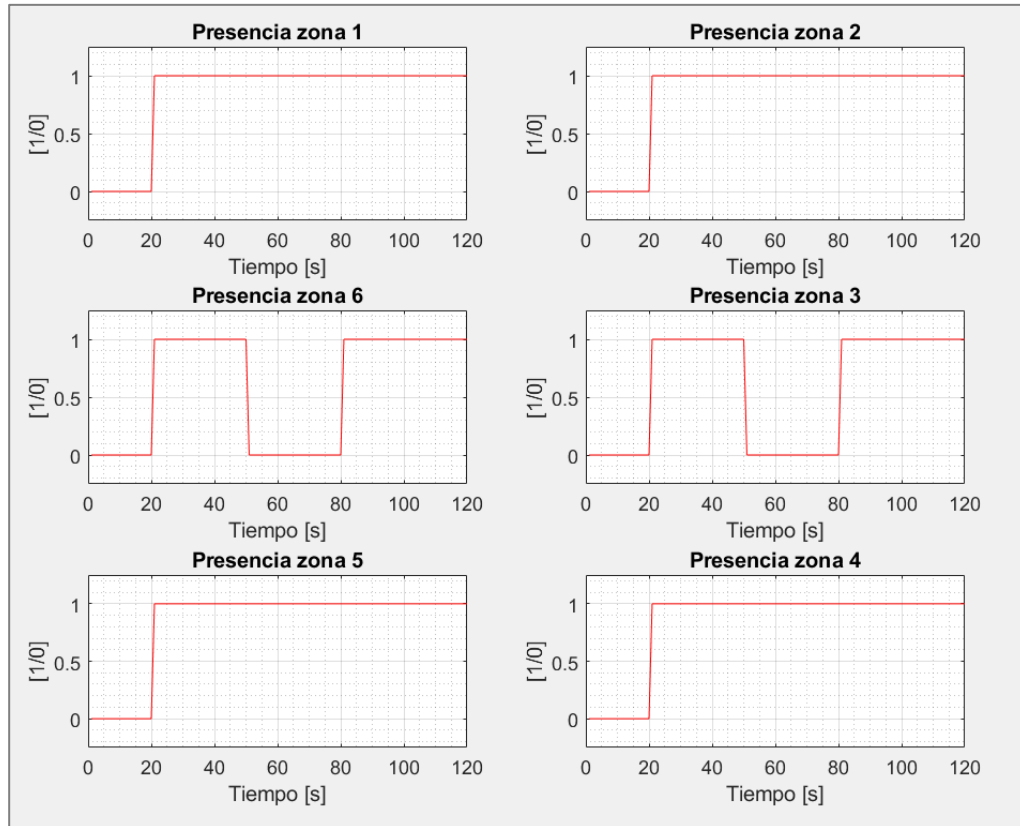
4.2.7.3 Escenario 1 con controlador PID sensible a presencia de individuos.

Como se describe el escenario 1 en (4.2.5.1), se observan los datos almacenados en Matlab, además, se aprecia el comportamiento del controlador en las siguientes gráficas.

En la Figura 30, se tiene las respuestas del controlador a las presencias descritos en la Tabla 3, simulando el comportamiento de un sensor de presencia con respecto al tiempo.

Figura 30

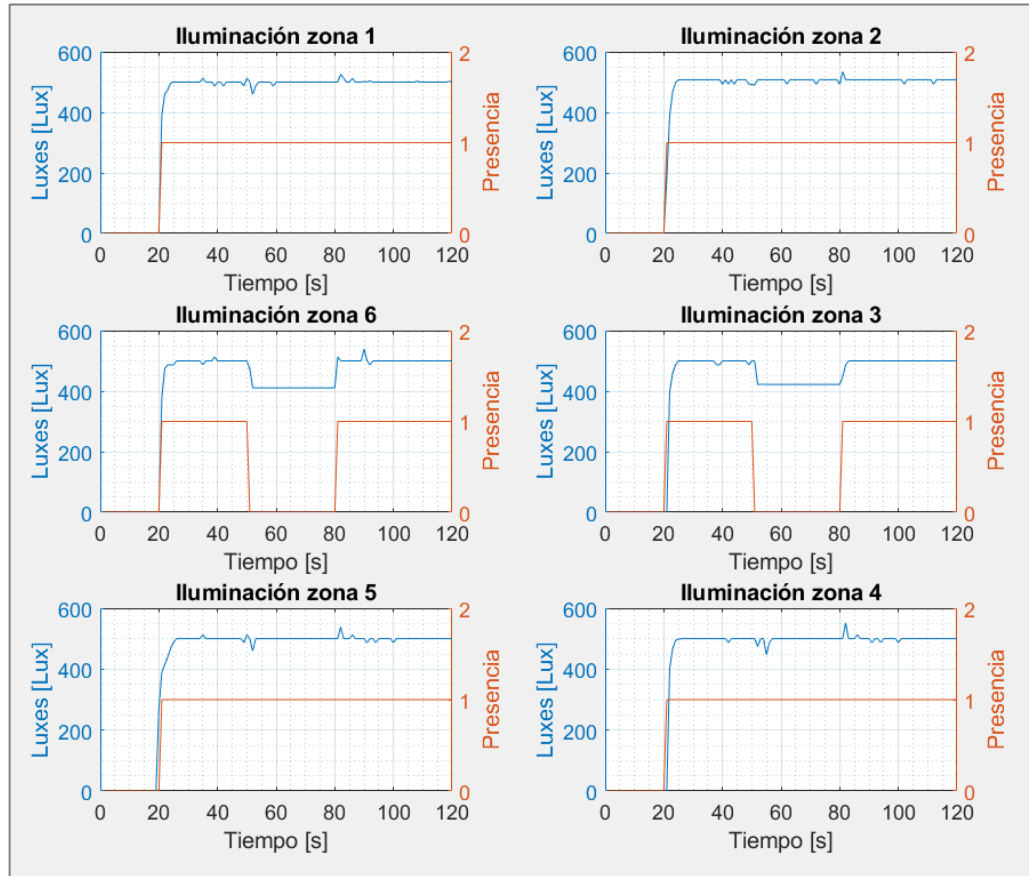
Gráfica de presencia en cada zona para el escenario 1 PID.



A continuación, en la Figura 31 se puede observar la iluminación correspondiente al escenario 1, aplicando el controlador PID. Se puede evidenciar que el sistema de control tiene un óptimo desempeño, puesto que, al momento de simular presencias a los 20s todas las zonas alcanzan el valor de referencia de 500 luxes. Por otra parte, a los 50s se retira la presencia de las zonas 3 y 6 hasta los 80s, por lo cual se registra una iluminación menor generada por las zonas adyacentes. Se debe resaltar, que después de simular presencia en los 80s las zonas 3 y 6 rápidamente vuelven a alcanzar el valor de referencia, estos cambios de presencia que generan cambios de iluminación se ven reflejados en las demás zonas como pequeños picos.

Figura 31

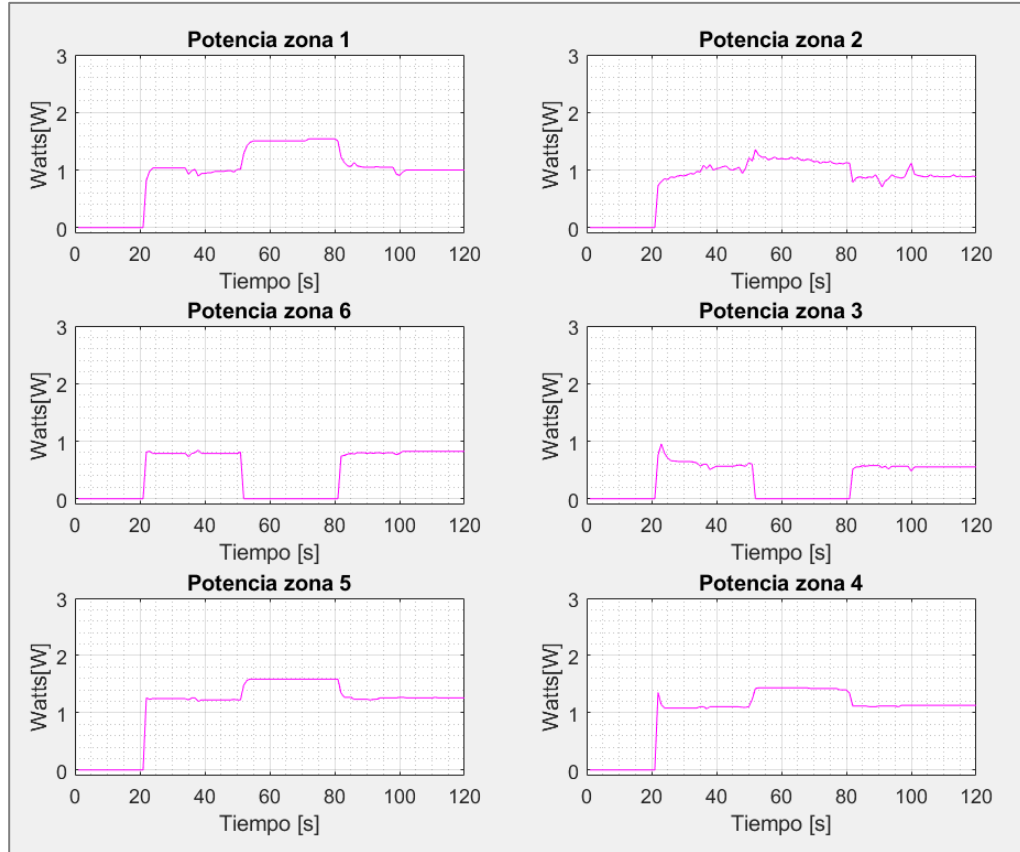
Gráfica de iluminación en cada zona para el escenario 1 PID.



Teniendo en cuenta las iluminaciones anteriores, se puede observar el comportamiento de las potencias del sistema en cada zona en la Figura 32, como se observa, el controlador a los 20s al momento de generar presencia en todas las zonas, aumentan las potencias hasta que se alcanza el valor de referencia. De igual forma, al momento de quitar la presencia en las zonas 3 y 6 a los 50s, la potencia cae hasta hacerse cero, ya que en este controlador no tiene ninguna restricción. Además, se evidencia que las zonas adyacentes incrementan su potencia con el fin de compensar la falta de iluminación provocadas por la ausencia en las zonas 3 y 6, para finalmente volver a decaer al regreso de la presencia en las mismas, terminando así el escenario 1.

Figura 32

Gráfica de potencia en cada zona para el escenario 1 PID.



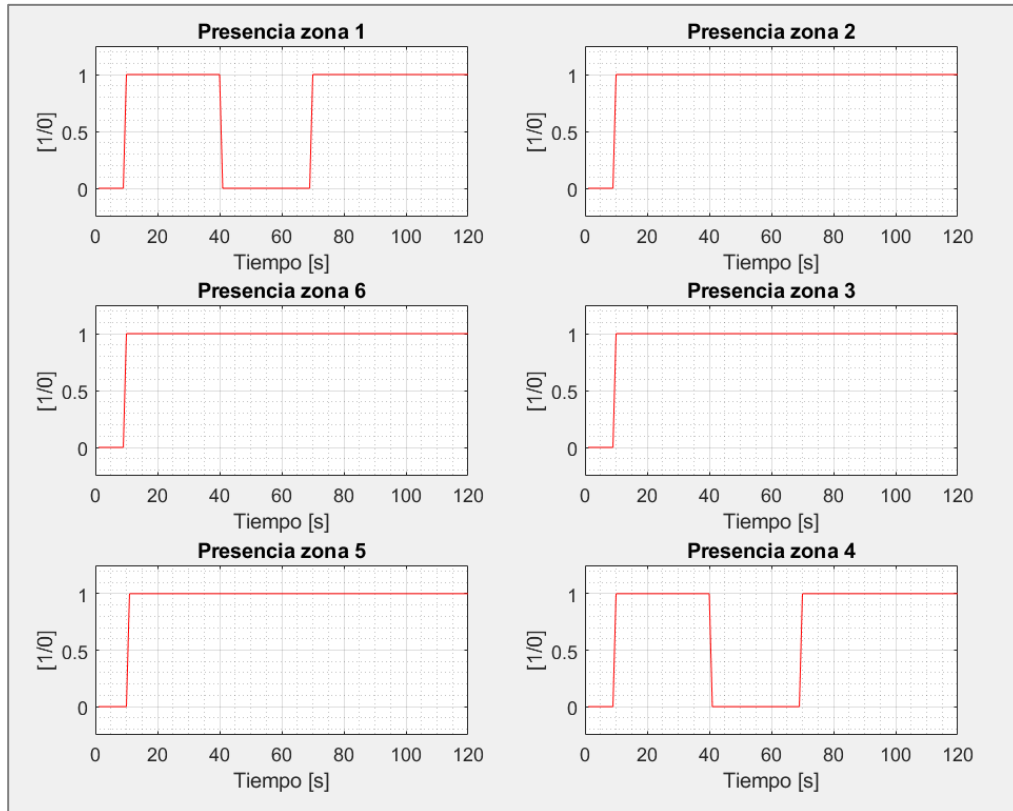
4.2.7.4 Escenario 2 con controlador PID sensible a presencia de individuos.

Como se describe el escenario 2 en (4.2.5.2), se observan los datos almacenados en Matlab, además, se aprecia el comportamiento del controlador en las siguientes gráficas.

En la Figura 33, se tiene las respuestas del controlador a las presencias descritos en la Tabla 4, simulando el comportamiento de un sensor de presencia con respecto al tiempo.

Figura 33

Gráfica de presencia en cada zona para el escenario 2 PID.



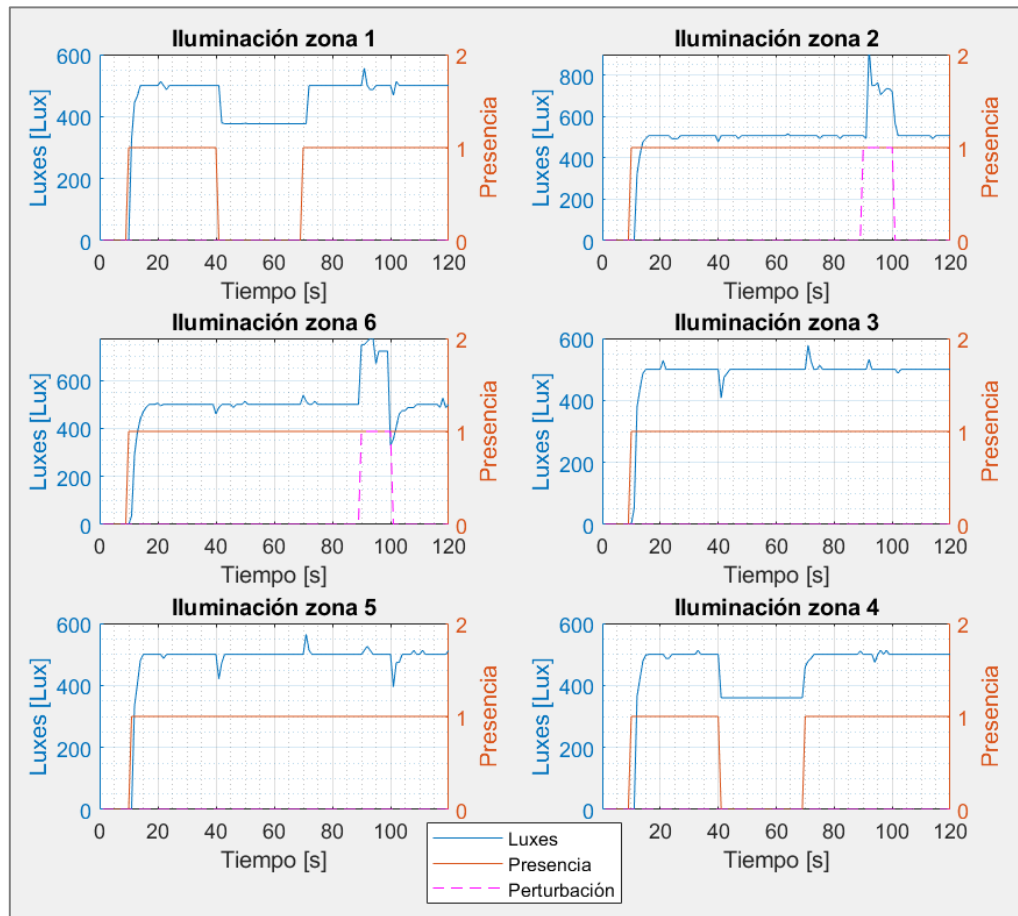
A continuación, en la Figura 34 se puede observar la iluminación correspondiente al escenario 2, aplicando el controlador PID. Se puede evidenciar que el sistema de control tiene un óptimo desempeño, puesto que, al momento de simular presencias a los 10s todas las zonas alcanzan el valor de referencia de 500 luxes. Por otra parte, a los 40s se retira la presencia de las zonas 1 y 4 hasta los 70s, por lo cual se registra una iluminación menor generada por las zonas adyacentes.

Se debe resaltar, que después de simular presencia en los 80s las zonas 3 y 6 rápidamente vuelven a alcanzar el valor de referencia, estos cambios de presencia que generan cambios de iluminación se ven reflejados en las demás zonas como pequeños

picos. Luego, a los 90s se encienden las luces externas que simulan la luz ambiente, hasta los 100s que se apagan nuevamente.

Figura 34

Gráfica de iluminación en cada zona para el escenario 2 PID.



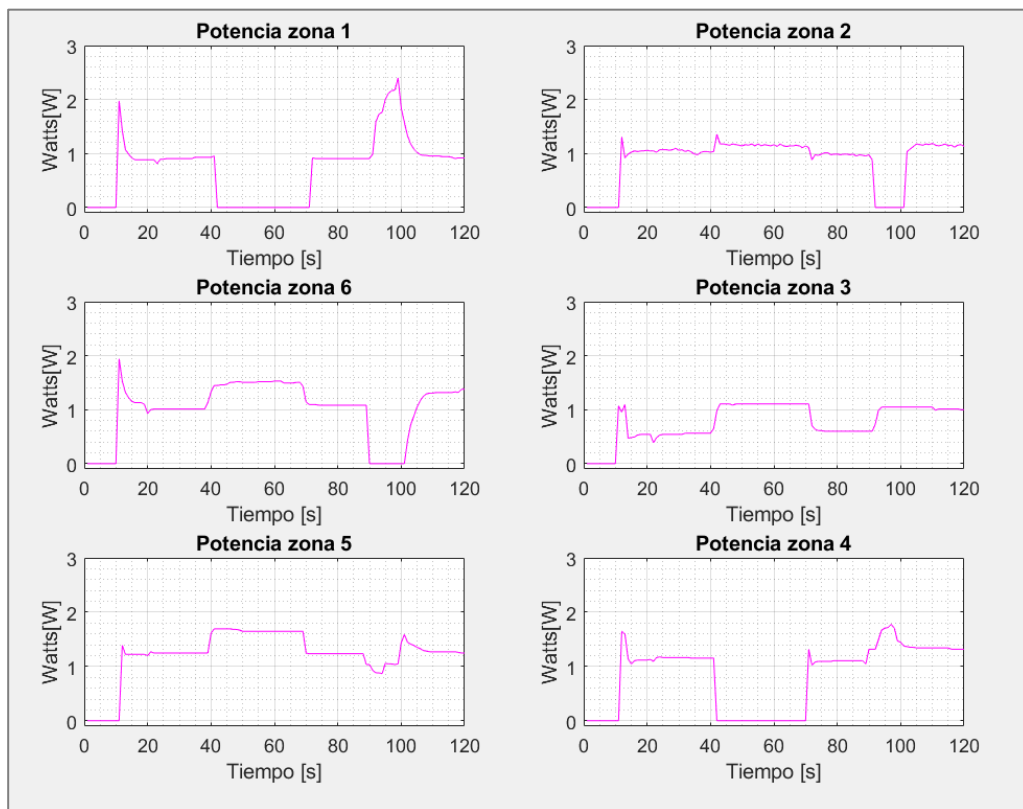
Teniendo en cuenta las iluminaciones anteriores, se puede observar el comportamiento de las potencias del sistema en cada zona en la Figura 35, como se observa, el controlador a los 10s al momento de generar presencia en todas las zonas, aumentan las potencias hasta que se alcanza el valor de referencia. De igual forma, al momento de quitar la presencia en las zonas 1 y 4 a los 40s, la potencia cae hasta hacerse cero, ya que en este controlador no tiene ninguna restricción.

Además, se evidencia que las zonas adyacentes incrementan su potencia con el fin de compensar la falta de iluminación provocadas por la ausencia en las zonas 1 y 4, para finalmente volver a decaer al regreso de la presencia en las mismas.

Así también, en los 90s la potencia se hace cero en las zonas 2 y 6, debido a que las luces externas superan el valor de referencia, sin embargo, las zonas adyacentes aumentan su potencia para compensar la falta de iluminación, ya que, las luces externas solo afectan a las zonas 2 y 6, terminando así el escenario 2.

Figura 35

Gráfica de potencia en cada zona para el escenario 2 PID.



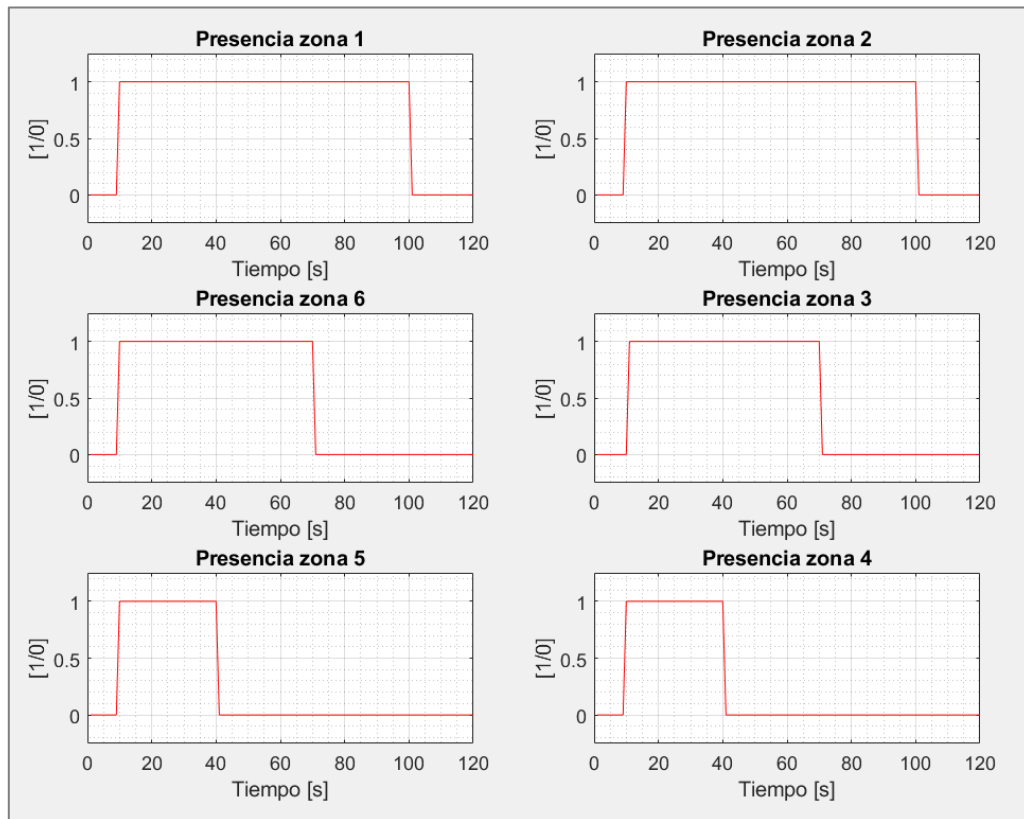
4.2.7.5 Escenario 3 con controlador PID sensible a presencia de individuos.

Como se describe el escenario 3 en (4.2.5.3), se observan los datos almacenados en Matlab, además, se aprecia el comportamiento del controlador en las siguientes gráficas.

En la Figura 36, se tiene las respuestas del controlador a las presencias descritos en la Tabla 6, simulando el comportamiento de un sensor de presencia con respecto al tiempo.

Figura 36

Gráfica de presencia en cada zona para el escenario 3 PID.



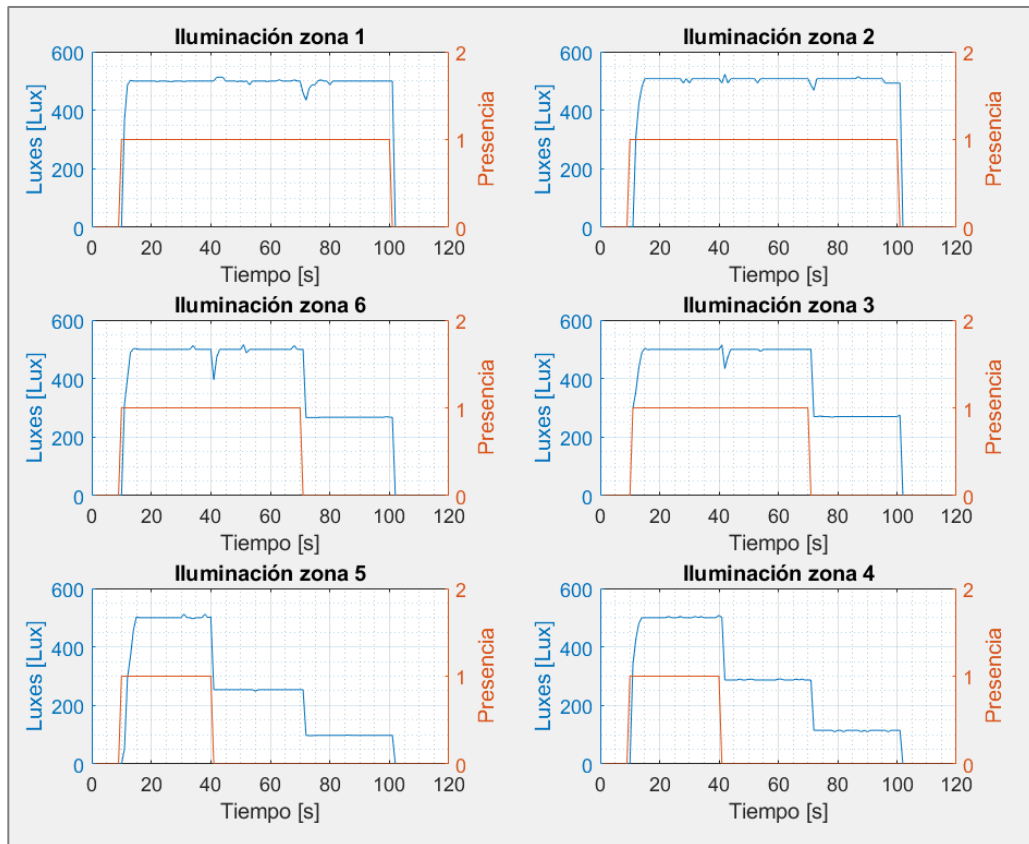
A continuación, en la Figura 37 se puede observar la iluminación correspondiente al escenario 3, aplicando el controlador PID. Se puede evidenciar que el sistema de control tiene un óptimo desempeño, puesto que, al momento de simular presencias a los 10s todas las zonas

alcanzan el valor de referencia de 500 luxes. Por otra parte, a los 40s se retira la presencia de las zonas 4 y 5, por lo cual se registra una iluminación menor generada por las zonas adyacentes, después se retira la presencia a los 70s de las zonas 3 y 6, registrando una iluminación aún menor generada por las zonas restantes, por último, a los 100s se retira las presencias en las últimas dos zonas.

Se debe resaltar, que estos cambios de presencia que generan cambios de iluminación se ven reflejados en las demás zonas como pequeños picos.

Figura 37

Gráfica de iluminación en cada zona para el escenario 3 PID.

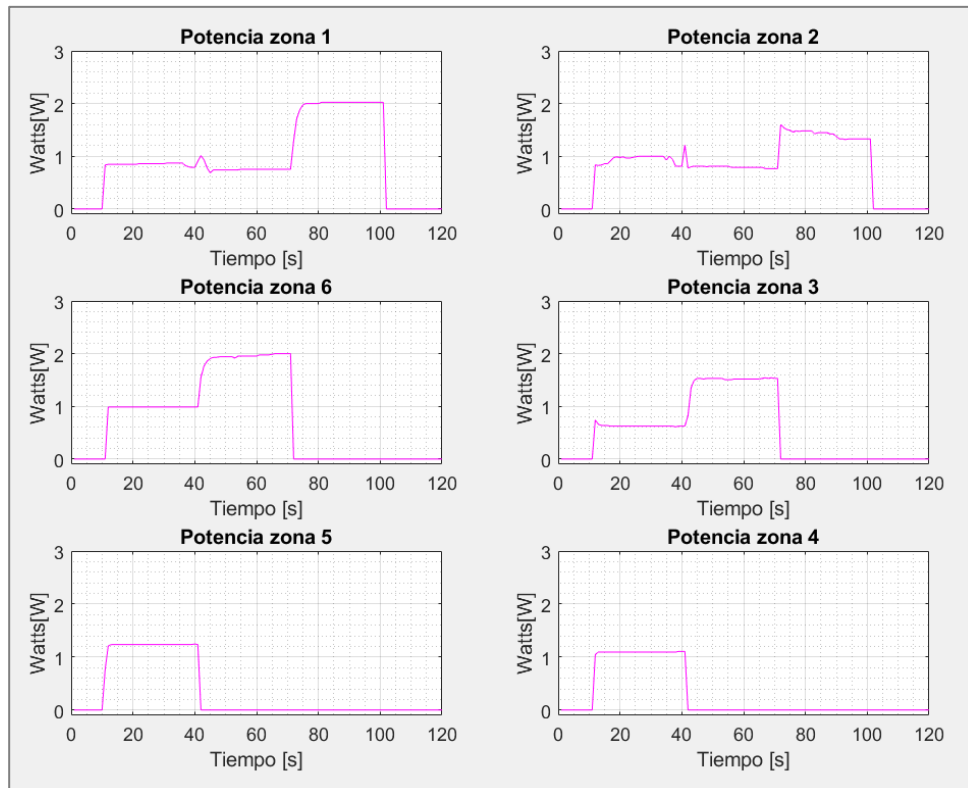


Teniendo en cuenta las iluminaciones anteriores, se puede observar el comportamiento de las potencias del sistema en cada zona en la Figura 38, como se observa, el controlador a los 10s al momento de generar presencia en todas las zonas, aumentan las potencias hasta que se alcanza el valor de referencia. Luego, al momento de quitar la presencia en las zonas 4 y 5 a los 40s, la potencia cae hasta hacerse cero, ya que en este controlador no tiene ninguna restricción. Además, se evidencia que las zonas adyacentes incrementan su potencia con el fin de compensar la falta de iluminación provocadas por la ausencia en estas zonas.

De forma similar, a los 70s se quita la presencia en las zonas 3 y 6, la potencia cae hasta cero, además, genera que en las zonas restantes haya un aumento de potencia, con el fin de volver a alcanzar el valor de referencia. Finalmente, a los 100s se quita la presencia en las zonas 1 y 2, haciendo que todas las potencias se vuelvan cero y terminando así el escenario 3.

Figura 38

Gráfica de potencia en cada zona para el escenario 3 PID



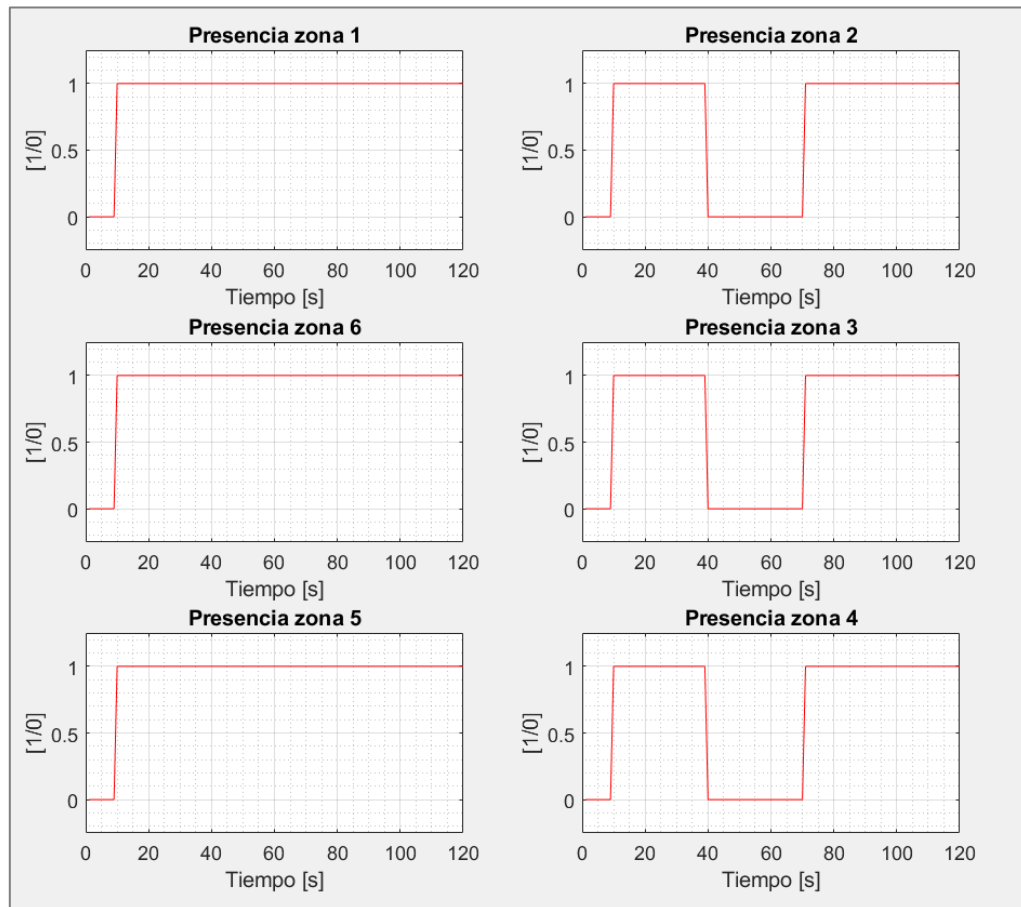
4.2.7.6 Escenario 4 con controlador PID sensible a presencia de individuos.

Como se describe el escenario 4 en (4.2.5.4), se observan los datos almacenados en Matlab, además, se aprecia el comportamiento del controlador en las siguientes gráficas.

En la Figura 39, se tiene las respuestas del controlador a las presencias descritos en la Tabla 7, simulando el comportamiento de un sensor de presencia con respecto al tiempo.

Figura 39

Gráfica de presencia en cada zona para el escenario 4 PID.



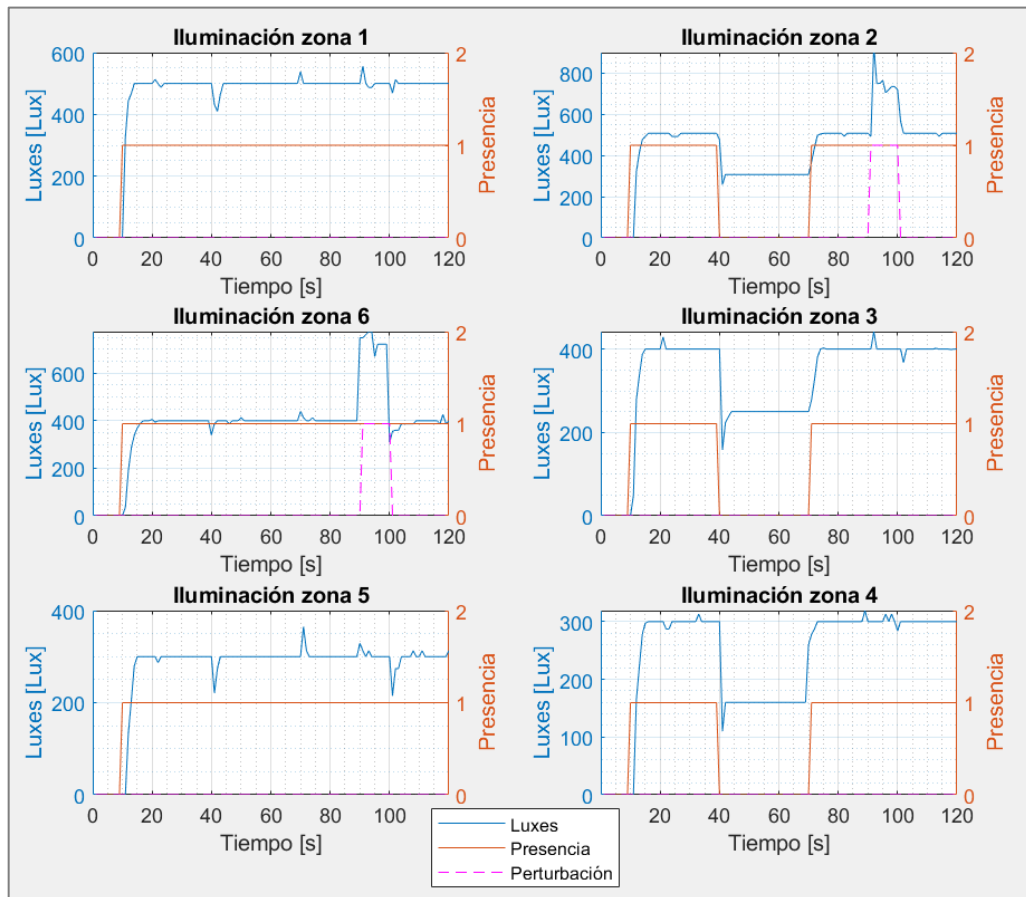
En este escenario, se implementa el controlador a diferentes valores de referencia para cada zona, como lo muestra la Tabla 6, además de ser afectado con luz externa.

En la Figura 40, se observa el resultado del escenario 4, que a los 10s se da presencia y todas las zonas alcanzan su respectivo valor de referencia, para las zonas 4 y 5, se estabilizan en 300 luxes, las zonas 3 y 6 se estabilizan en 400 luxes y por ultimo las zonas 1 y 2 se estabilizan en 500 luxes.

Además, a los 40s se retira la presencia de las zonas 2, 3 y 4, por lo cual se registra una iluminación menor generada por las zonas adyacentes, así también, se resalta que a los 70s el controlador vuela a estabilizar la iluminación en los respectivos valores de referencia. Por último, a los 90s se afecta con luz externa en las zonas 2 y 6, hasta los 100s para luego apagarlas nuevamente.

Figura 40

Gráfica de iluminación en cada zona para el escenario 4 PID.



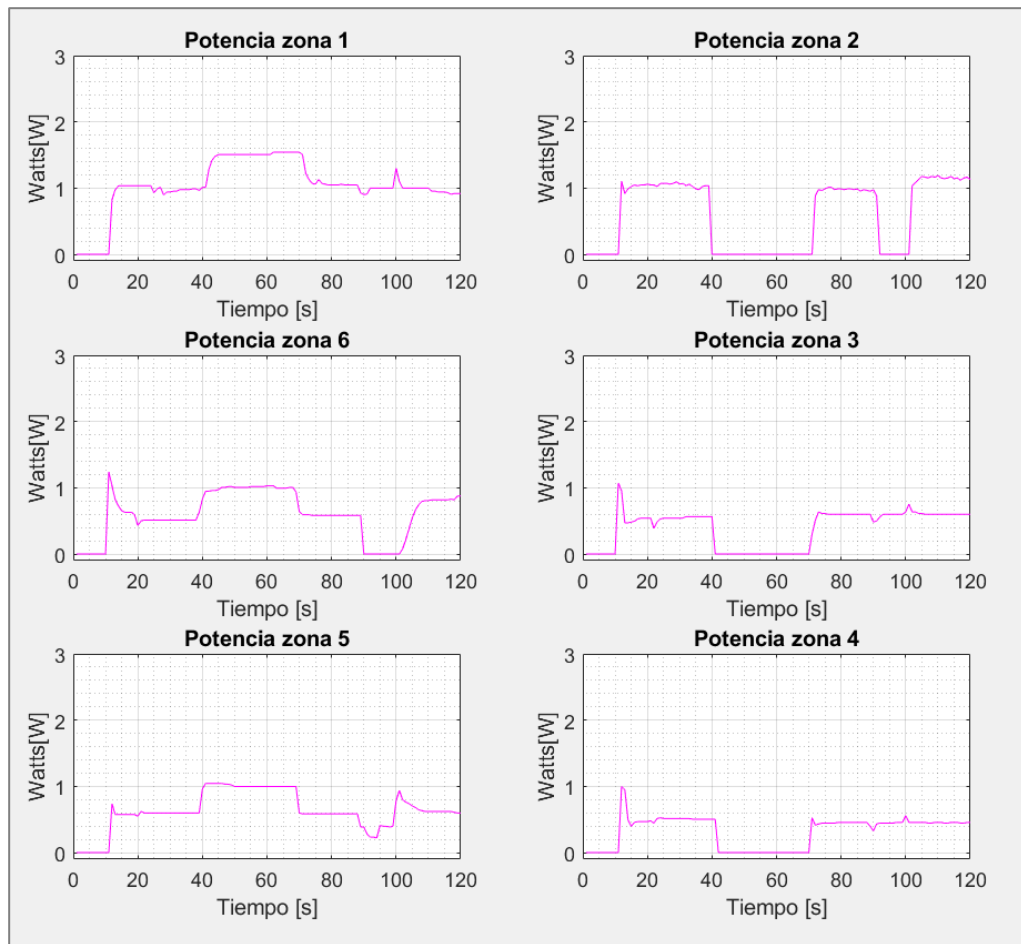
Teniendo en cuenta las iluminaciones anteriores, se puede observar el comportamiento de las potencias del sistema en cada zona en la Figura 41, como se observa, el controlador a los 10s al momento de generar presencia en todas las zonas, aumentan las potencias hasta que se alcanza el respectivo valor de referencia. Luego, al momento de quitar la presencia en las zonas 2, 3 y 4 a los 40s, la potencia cae hasta hacerse cero, ya que en este controlador no tiene ninguna restricción.

Además, se evidencia que las zonas adyacentes incrementan su potencia con el fin de compensar la falta de iluminación provocadas por la ausencia en estas zonas, se resalta que algunas zonas adyacentes incrementan más su potencia que otras, debido a que tienen un valor de referencia menor. A los 70s se devuelve la presencia en todas las zonas y estas aumentan su potencia para estabilizar la iluminación a su respectivo valor.

Así también, en los 90s la potencia se hace cero en las zonas 2 y 6, debido a que las luces externas superan el valor de referencia, sin embargo, las zonas adyacentes presentan pequeños picos debido a que aumentan su potencia para compensar la falta de iluminación, ya que, las luces externas solo afectan a las zonas 2 y 6, terminando así el escenario 4.

Figura 41

Gráfica de potencia en cada zona para el escenario 4 PID.



5. Análisis de Resultados

En este capítulo luego de realizar los 4 diferentes escenarios propuestos en esta investigación, se procede a hacer el análisis de los datos obtenidos en las pruebas al aplicar el controlador con Replicadores dinámicos y posteriormente el análisis de los datos obtenidos en las pruebas al aplicar el controlador PID.

Es así como, se implementa los indicadores de desempeño en cada uno de los sistemas de control de iluminación, ya que, por medio de estos indicadores se obtiene una medida cuantitativa del “rendimiento” de cada controlador.

Además, se debe tener en cuenta que, de igual forma se realiza una comparación de manera gráfica de las iluminaciones de los dos sistemas de control, esto con el propósito de ejecutar un análisis numérico y visual de los indicadores de desempeño ISE e ITSE.

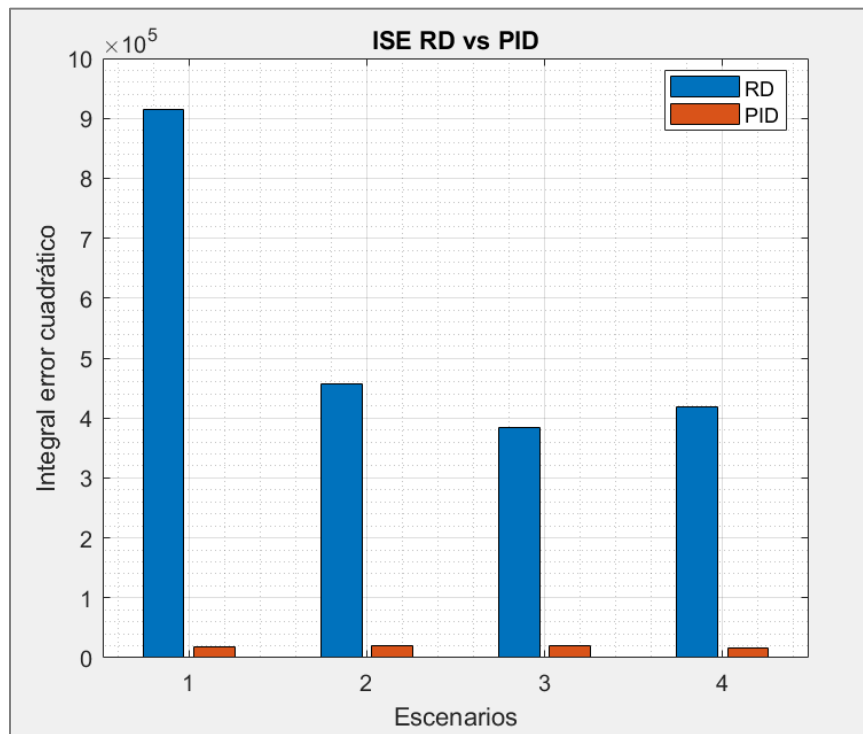
Así mismo, se realiza una comparación de manera gráfica de las potencias de los dos sistemas de control, con el fin de ejecutar un análisis numérico y visual de los indicadores de desempeño IU e ISU.

5.1 Indicador integral del error cuadrático (ISE)

Por medio de este indicador, se hace una verificación de como ambos controladores hacen el seguimiento del valor de referencia en un determinado tiempo, además, se evidencia el comportamiento de estos frente a las afectaciones con luz externa, así como también el cambio de presencia en los diferentes escenarios. En este caso se evalúa la estabilización de cada sistema con respecto al Set Point establecido, mediante la siguiente figura se observa el cálculo integral del error cuadrático ISE (28) de ambos controladores en cada uno de los escenarios.

Figura 42

Valores de ISE de Replicadores y PID.



Como se puede observar en la Figura 42, el controlador PID en cada uno de los escenarios presenta un mejor desempeño en cuanto al seguimiento del valor de referencia, puesto que es evidente que el controlador de Replicadores dinámicos presenta valores de ISE mucho más grandes.

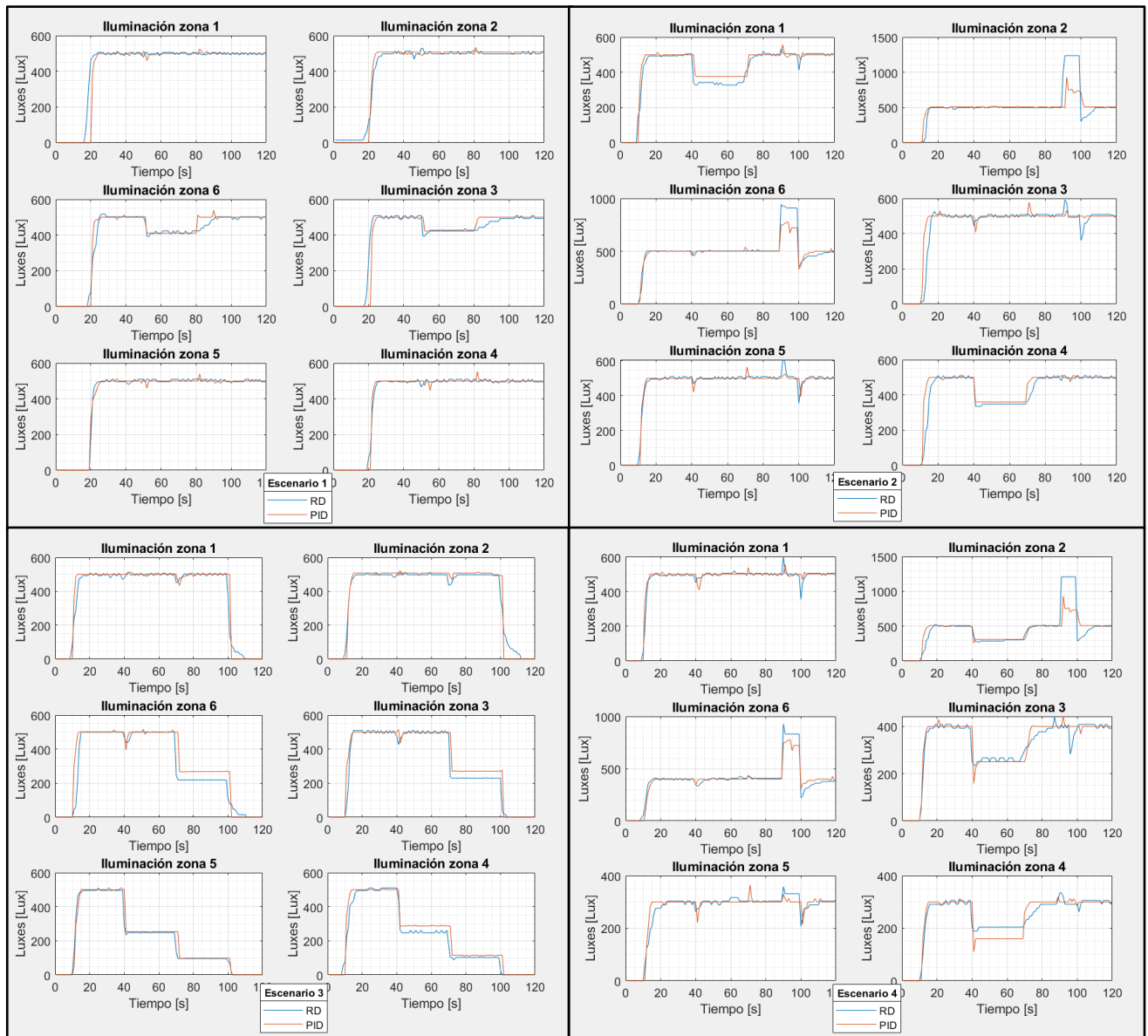
- Para el escenario 1 se tiene RD= 9.1392e+05, PID= 1.8887e+04.
- Para el escenario 2 se tiene RD= 4.5614e+05, PID= 1.9887e+04.
- Para el escenario 3 se tiene RD= 3.8443e+05, PID= 2.0136e+04.
- Para el escenario 4 se tiene RD= 4.1820e+05, PID= 1.6141e+04.

Es decir, se evidencia que el controlador de replicadores tiene mayor error al momento de alcanzar el Set Point, debido a la acción oscilatoria que tiene, además como se observa en las gráficas de iluminación en la Figura 43, se tarda más en responder a perturbaciones.

El controlador basado en replicadores tiene un desempeño menor con respecto a un controlador PID en cuanto al seguimiento de referencia de iluminación. Dado que el indicador de desempeño ISE del replicador es mayor en comparación al ISE del PID. En cuanto a error en estado estable el PID es más eficiente un 96,5%.

Figura 43

Comparación de iluminaciones de los 4 escenarios.



Por otra parte, se puede apreciar en la Figura 43, en los diferentes escenarios como el controlador PID responde mucho mejor a la variación de presencia, cuando se retorna la presencia la acción de control de replicadores tarda en recuperar el Set Point.

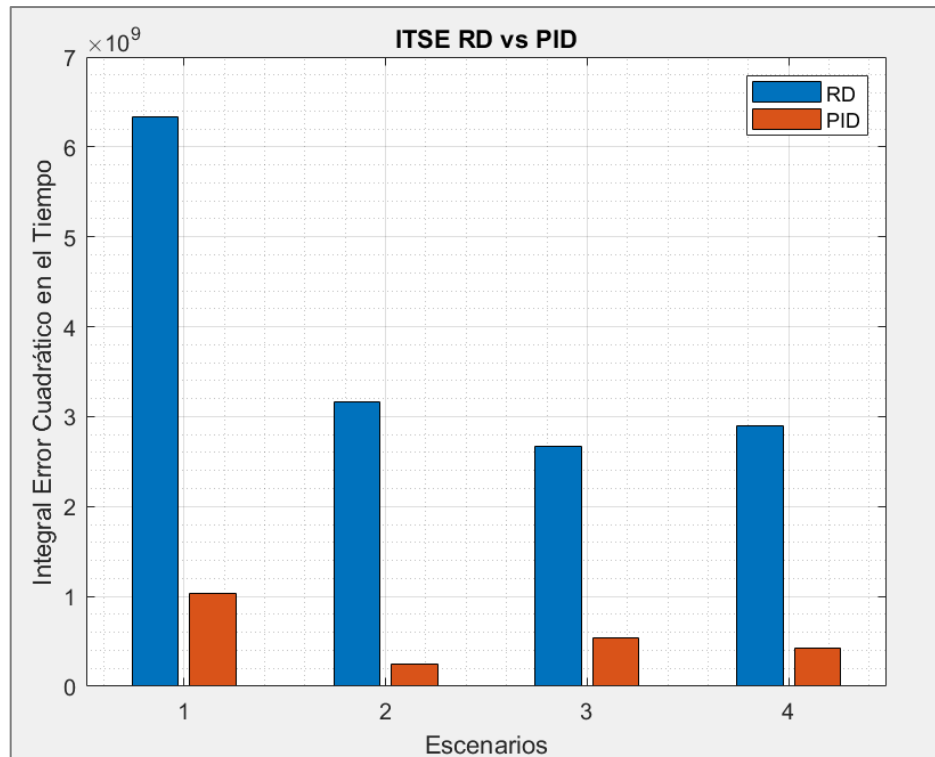
5.2 Indicador integral del error cuadrático ponderado en el tiempo (ITSE)

En este indicador, se evalúa el error de seguimiento de referencia multiplicado por el tiempo, penaliza la persistencia de errores grandes de seguimiento, es decir, también se tiene en cuenta la velocidad de respuesta que tiene cada controlador para estabilizarse.

En este caso se evalúa la velocidad de estabilización de cada sistema con respecto al Set Point establecido, mediante la siguiente figura se observa el cálculo integral del error cuadrático ponderado en el tiempo ITSE (29) de ambos controladores en cada uno de los escenarios como se muestra en la Figura 44.

Figura 44

Valores de ITSE de Replicadores y PID.



De manera similar, se puede observar que los indicadores de desempeño del PID son mejores en cada uno de los escenarios, ya que, de igual forma los valores de ITSE del Replicador dinámico son mucho mayores en comparación al PID.

- Para el escenario 1 se tiene $RD= 6.3335e+09$, $PID= 1.0303e+09$.
- Para el escenario 2 se tiene $RD= 3.1611e+09$, $PID= 2.4544e+08$.
- Para el escenario 3 se tiene $RD= 2.6641e+09$, $PID= 5.4130e+08$.
- Para el escenario 4 se tiene $RD= 2.8981e+09$, $PID= 4.2875e+08$.

Además, como se aprecia en la Figura 43, la velocidad de respuesta ante perturbaciones de presencia del PID es mucho mejor, puesto que, cabe resaltar, que el diseño del controlador PID se diseña con sobrepasos menores al 2% lo cual se refleja en una menor penalización a los errores persistentes al momento de seguir el valor de referencia.

La velocidad de respuesta del controlador PID es superior a la respuesta del controlador de replicadores, esto se evidencia con el indicador de desempeño ITSE que es menor en el caso del PID. En cuanto a tiempo de respuesta el PID es más eficiente un 85% según el ITSE.

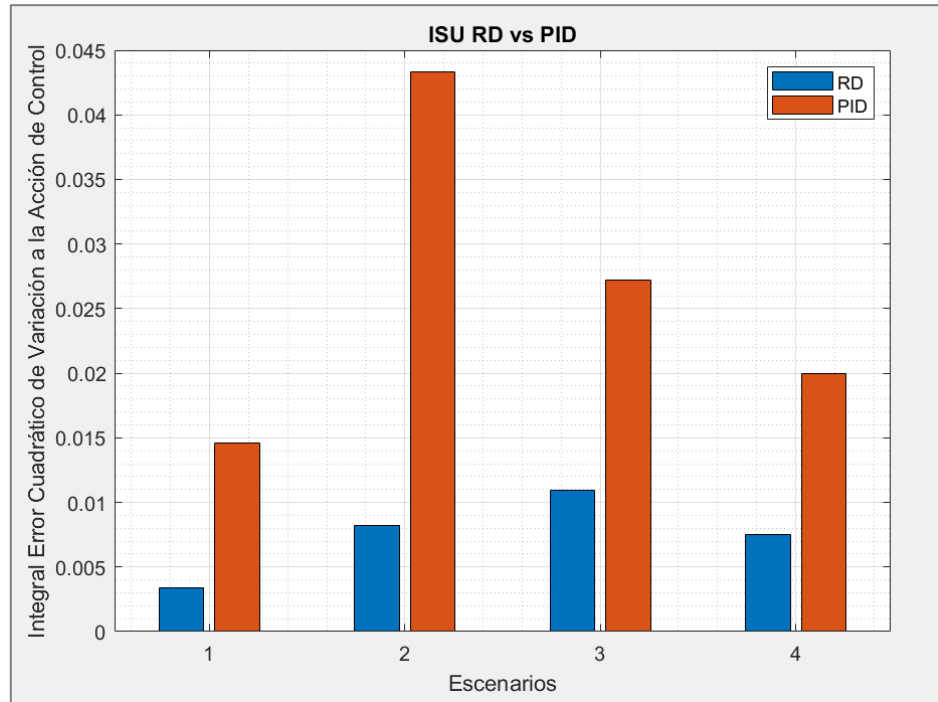
5.3 Indicador integral del cuadrado de la variación total de la acción de control (ISU)

Este indicador de desempeño se enfoca en penalizar las variaciones del esfuerzo de control en el tiempo. Por un lado, castiga los cambios de esfuerzo de control muy repentinos o drásticos en intervalos de tiempo pequeños. Por otra parte, también castiga los cambios de esfuerzo de control muy lentos o demasiado pasivos en intervalos de tiempo extensos.

Es por eso que, mediante la siguiente figura se observa el cálculo integral del cuadrado de la variación total de la acción de control en el tiempo ISU (30) de ambos controladores en cada uno de los escenarios como se muestra en la Figura 45.

Figura 45

Valores de ISU de Replicadores y PID.



Como se puede observar, en cada escenario se presenta una magnitud mayor del ISU para el controlador PID, pues como se menciona antes, el controlador PID tiene una velocidad de respuesta más rápida, por tanto, presenta cambios drásticos, esto se ve reflejado en este indicador que penaliza la variación agresiva en pequeños intervalos de tiempo. Los valores de ISU son:

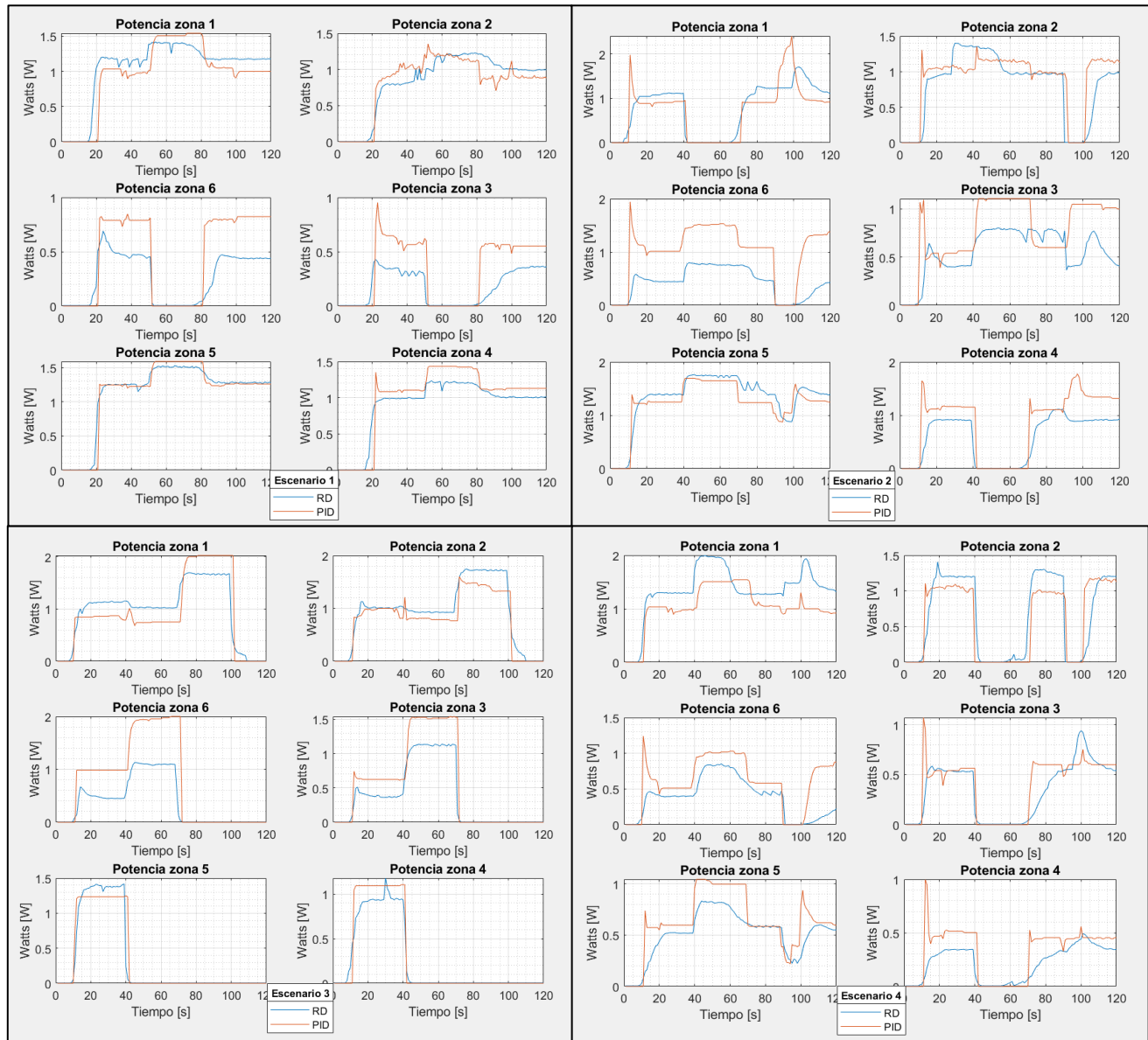
- Para el escenario 1 se tiene RD= 0.0034, PID= 0.0146.
- Para el escenario 2 se tiene RD= 0.0082, PID= 0.0433.
- Para el escenario 3 se tiene RD= 0.0109, PID= 0.0272.
- Para el escenario 4 se tiene RD= 0.0075, PID= 0.02.

En otras palabras, que el indicador ISU del PID sea mayor nos evidencia que este controlador tiene una respuesta más rápida. Sin embargo, como se puede observar en la Figura 46, se evidencia que el controlador de Replicadores dinámicos hace una elevación de la potencia

de forma progresiva hasta que el controlador alcanza el valor de seguimiento o Set point, a diferencia del controlador PID que al tener cambios violentos incrementa la potencia rápidamente, lo que puede significar mayor consumo de potencia. Sin embargo, según el ISU evaluando el tiempo de respuesta el PID es 71,5% más eficiente.

Figura 46

Comparación de potencias de los 4 escenarios.

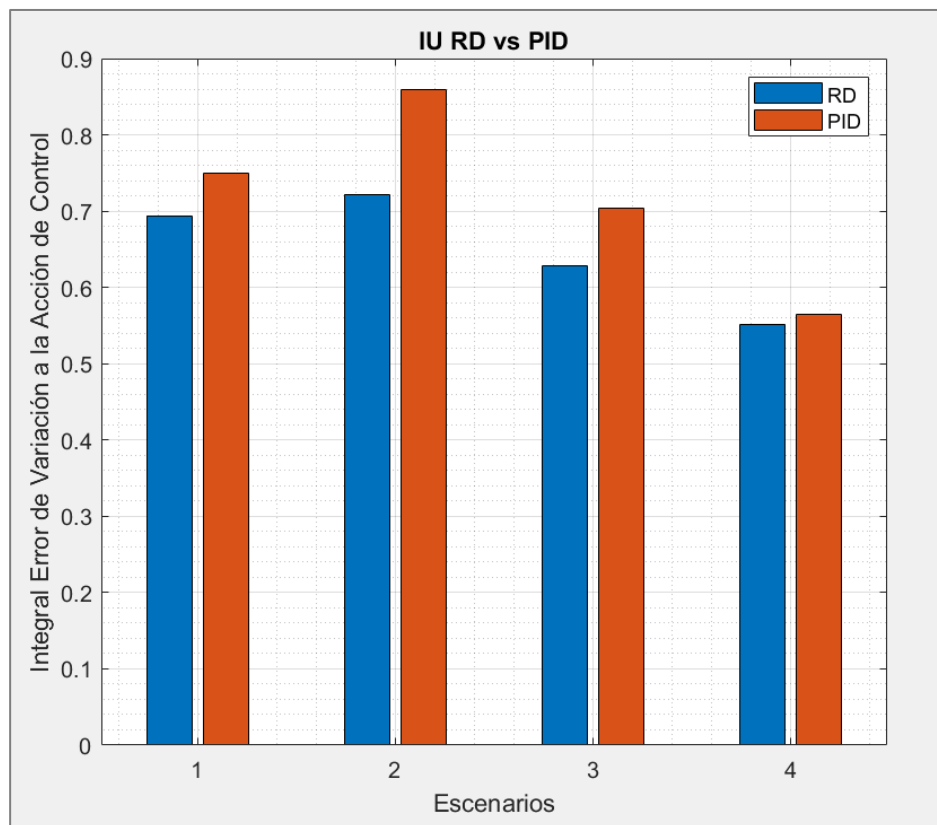


5.4 Indicador integral de la acción de control (IU)

Este último indicador de desempeño evalúa el consumo de ambos controladores en cada una de las zonas, esto para los 4 escenarios. Por tal motivo se realiza un cálculo Integral de la acción de control IU (31) general de cada escenario como se muestra en la Figura 47.

Figura 47

Valores de IU de Replicadores y PID.



A partir de la figura anterior, se muestra que ambos controladores tienen un consumo similar, pero siendo puntuales se puede decir que el consumo del controlador de Replicadores dinámicos es menor en comparación al controlador PID, corroborando lo planteado en el anterior indicador.

- Para el escenario 1 se tiene RD= 0.6941, PID=0.7495.

- Para el escenario 2 se tiene $RD= 0.7223$, $PID= 0.8598$.
- Para el escenario 3 se tiene $RD= 0.6280$, $PID= 0.7035$.
- Para el escenario 4 se tiene $RD= 0.5521$, $PID= 0.5642$.

Igualmente, como se puede observar en la Figura 46, en los diferentes escenarios el controlador PID tiene un incremento de potencia acorde al tiempo de respuesta, lo que significa que utiliza más potencia para alcanzar más apresuradamente el valor de referencia.

También, se debe tener en cuenta que el consumo de estos dos controladores tiene gran similitud en un tiempo de muestreo pequeño, sin embargo, en una implementación real, la cual involucra periodos de tiempo mayores el consumo se incrementa proporcionalmente. Entonces, se determina que el controlador de replicadores es un 10,8% más eficiente.

Finalmente, tomando en cuenta los indicadores de desempeño se puede asegurar que en cuanto a la eficiencia en:

- Error de seguimiento el PID es 96,5% más eficiente.
- Tiempo de respuesta el PID es 78,25% más eficiente.
- Consumo de energía el Replicador es 10,85% más eficiente.

Conclusiones

A partir de la implementación de los controladores, y posteriormente el procesamiento de datos, es pertinente afirmar que los resultados obtenidos en esta investigación son los óptimos y esperados, además con dichos resultados se puede concluir que:

La implementación de un controlador de replicadores dinámicos discretos en un ambiente real a escala, al cual se le incorpora el parámetro de sensibilidad a presencia de individuos presenta excelentes resultados, lo cual da pie y buenos fundamentos a una implementación a futuros trabajos en un espacio real.

Los datos conseguidos mediante esta investigación son coherentes, y complementan la investigación realizada por Arévalo (2020), ya que, los cuatro indicadores de desempeño presentan el mismo comportamiento descrito en dicha investigación.

El controlador basado en replicadores tiene un desempeño menor con respecto a un controlador PID, en cuanto al seguimiento de referencia, en este caso en particular la referencia de iluminación. Dado que el indicador de desempeño ISE del replicador es un 96,5% mayor en comparación al ISE del PID. En cuanto a error en estado estable el PID es más eficiente.

La velocidad de respuesta del controlador PID es superior a la respuesta del controlador de replicadores, esto se evidencia con el indicador de desempeño ITSE que es menor en el caso del PID. Además, esto lo complementa el indicador de desempeño ISU que es menor en el caso del replicador. En cuanto a tiempo de respuesta el PID es más eficiente un 85% según el ISTE.

Además, esto lo complementa el indicador de desempeño ISU que es menor en el caso del replicador, es por eso que el PID es 71,5% más eficiente. Teniendo en cuenta estos dos indicadores se puede afirmar que el tiempo de respuesta del PID es 78,25% más eficiente.

Entre tanto, evaluando el consumo de ambos controladores, se demuestra que el controlador de replicadores y el controlador PID presentan un consumo muy similar en todos los escenarios, mostrando el controlador PID un consumo de potencia ligeramente mayor, como lo demuestra el indicador de desempeño IU. Por esta razón se determina que el controlador de replicadores es 10,8% más eficiente.

El controlador PID es más eficiente en cuanto a tiempo de respuesta y error de seguimiento, y es razonable implementar un sistema de control de iluminación apoyado en este diseño, sin embargo, si se tiene como prioridad el consumo energético, sería más conveniente la implementación de un sistema de control de iluminación basado en replicadores dinámicos.

Finalmente, como resultado del análisis comparativo entre el controlador de replicadores dinámicos y el controlador PID, se puede concluir que el controlador PID es un 54,65% más eficiente. De modo que, se cumple con la hipótesis de investigación (Hi) en la cual se afirma que el PID es más eficiente al menos un 50%.

Recomendaciones

Con el propósito de mejorar o ampliar los resultados alcanzados a lo largo del desarrollo de esta investigación, se presentan algunas recomendaciones para próximas investigaciones, que, si bien traten del mismo tema, o sirvan como antecedente para nuevos trabajos de investigación. Es así que se da las siguientes recomendaciones.

Por medio de anteriores investigaciones y en complemento con el desarrollo de esta investigación, se tiene buenas bases y fundamentos para implementar una comparación de eficiencias entre dos sistemas de control de iluminación basados en replicadores dinámicos y PID, con sensibilidad de presencia de individuos en un entorno real.

Implementar un sensor analógico de iluminación, el cual permita manejar los datos con decimales, puesto que, al momento de hacer la caracterización del sensor, la iluminación captada en el techo por el sensor digital es multiplicada por una constante para ajustar la iluminación en el puesto de trabajo, por tal motivo, al tener una medición con números enteros la variación no es tan precisa. Por tal motivo se recomienda utilizar un sensor analógico de con buena resolución, lo cual ayudaría a mejorar el rendimiento de los controladores.

Estudiar la mejor solución al tema de detección de individuos, integrando algún tipo de sensor para la inspección de esta variable. Teniendo en cuenta que, en esta investigación para los diferentes escenarios, el control de presencia se realiza por medio interruptores que llevan una señal booleana al microcontrolador.

Considerando que los ESP32 cuentan con comunicación Wifi, y el manejo de datos se hace a través de este medio, incorporar el desarrollo de una página web, en la cual se pueda verificar en tiempo real los datos e incluso graficar los indicadores de desempeño.

Anexos

Anexo A. Determinación de la reflectancia de cada una de las cavidades zonales

En la siguiente tabla podemos visualizar diferentes valores de reflectancia para cada una de las cavidades zonales.

Tabla 8

Reflectancias porcentuales

TONO	COLOR		SUPERFICIES	ACABADOS DE CONSTRUCCIÓN
Muy claro	Blanco nuevo	88		Cantera clara 18
	Blanco viejo	76		Cemento 27
	Azul verde	76	Maple 43	Concreto 40
	Crema	81	Nogal 16	Mármol blanco 45
	Azul	65	Caoba 12	Vegetación 25
	Miel	76	Pino 48	Asfalto limpio 7
	Gris	83	Madera clara 30-50	Adoquín de roca 17
Claro	Azul verde	72	Madera oscura 10-25	Grava 13
	Crema	79	ACABADOS METÁLICOS	Ladrillo claro 30-50
	Azul	55		Ladrillo oscuro 15-25
	Miel	70		
	Gris	73		
Mediano	Azul verde	54	Blanco polarizado 70-85	
	Amarillo	65	Aluminio pulido 75	
	Miel	63	Aluminio mate 75	
	Gris	61	Aluminio claro 59-79	
Oscuro	Azul	8		
	Amarillo	50		
	Café	10		
	Gris	25		
	Verde	7		
	Negro	3		

Nota. Tomado de Valores de Reflectancia (aproximada) en %, para colores y texturas. (RETILAP, 2017).

Anexo B. Especificaciones técnicas de OJL1019

En la Figura 48, se muestra a detalle las especificaciones de la lampara OJL1019.

Figura 48

Especificaciones técnicas



Nota. (Cigla, n.d.).

Anexo C. Imágenes de la construcción de la maqueta

Figura 49

Maqueta



Anexo D. Especificaciones ESP32

En la Tabla 9, se puede observar todas las características del módulo que se utilizó en el proyecto.

Tabla 9

Especificaciones Generales ESP32

CARACTERÍSTICAS	ESP32
MICROPROCESADOR	Xtensa Dual-Core 32-bit LX6 con 600 DMIPS
WI-FI (802.11 B / G / N)	HT40
BLUETOOTH	Bluetooth 4.2 y BLE
FRECUENCIA DE OPERACIÓN (VALOR TÍPICO)	160 MHz
SRAM	448 KB
FLASH	520 KB
GPIO	34
PWM (HARDWARE)	No posee
PWM (SOFTWARE)	16 canales
SPI	4
I2C	2
I2S	2
UART	2
ADC	12-bits de resolución
CAN	Sí
INTERFAZ MAC ETHERNET	Sí

SENSOR DE TACTO	Sí
SENSOR DE TEMPERATURA	Sí (solo las versiones antiguas)
SENSOR DE EFECTO HALL	Sí
TEMPERATURA DE TRABAJO	-40°C to 125°C

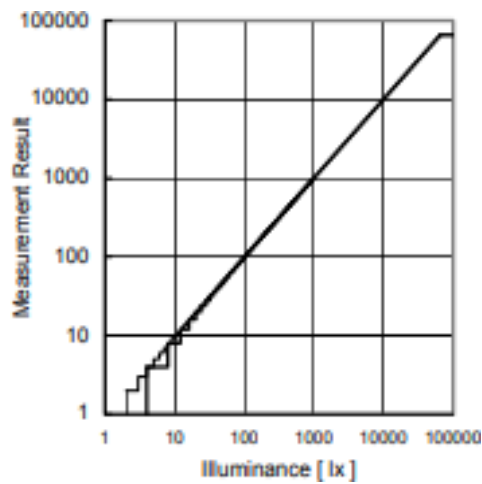
Nota. Tomado de (Guerra,2020)

Anexo E. Especificaciones sensor BH1750

Para la implementación del sistema de iluminación, se utiliza dicho sensor que brinda confiabilidad y un comportamiento lineal acorde a los requerimientos fundamentales del proyecto, como se puede observar en la siguiente figura.

Figura 50

Gráfica de iluminancia



Nota. En el gráfico se puede observar el comportamiento lineal del sensor, entre el valor real y el valor medido. Tomado de Illuminance – Measurement result 2. (Rohm, 2011).

Tabla 10

Especificaciones generales BH1750.

Características	BH1750
Voltaje DC	2.4 – 4.5
Consumo Promedio	140uA - 199uA
Interfaz Digital	I2C
Rango y Resolución	1 - 65535 Lux
Respuesta espectral	Ojo humano
Temperatura de operación	Desde -40° C hasta 85° C
Frecuencia máxima de transmisión	400KHz

Nota. Adaptada de (Rohm, 2011).

Anexo F. Calibración del sensor BH1750 en la zona 1

En la Tabla 11 se puede evidenciar la obtención de datos acorde a la variación de potencia en la zona 1.

Tabla 11

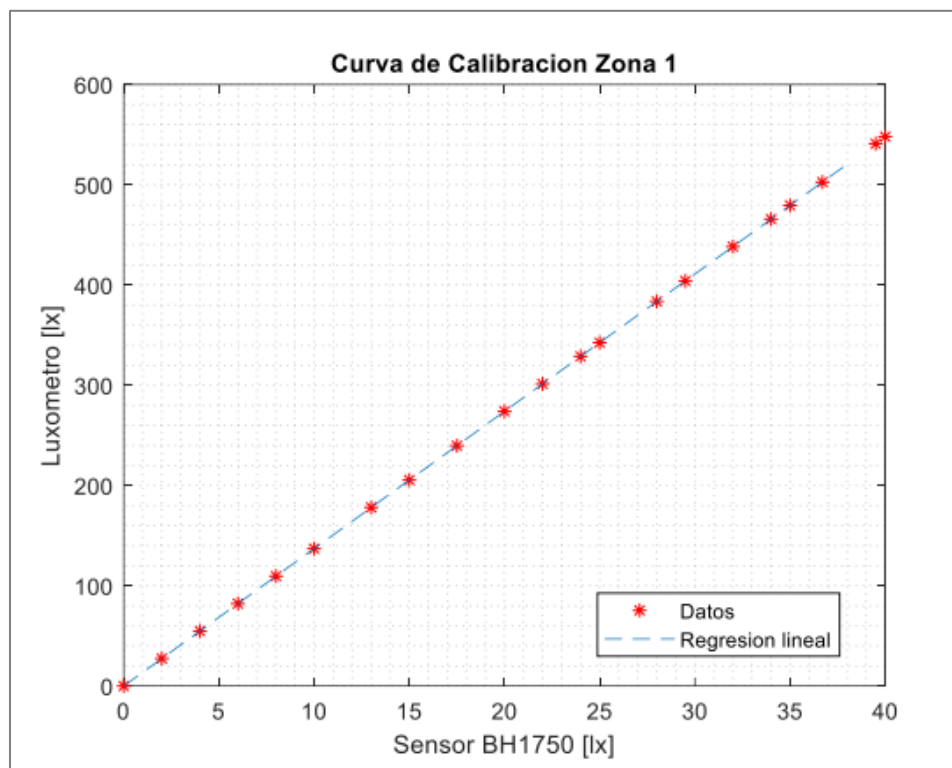
Datos calibración sensor en Zona 1

Potencia Lampara	Duty Cycle ESP32	Duty Cycle [%]	Sensor BH1750 [Lx]	Luxómetro [Lx]
0	0	0	0	0
0,15	12,75	5	1	27,4
0,3	25,5	10	4	54,8
0,45	38,25	15	6	82,2
0,6	51	20	8	109,6
0,75	63,75	25	10	137
0,9	76,5	30	13	165
1,05	89,25	35	15	192,2
1,2	102	40	17,5	219,6
1,35	114,75	45	20	247
1,5	127,5	50	22	273,8
1,65	140,25	55	24	301,3
1,8	153	60	25	329,5
1,95	165,75	65	28	356
2,1	178,5	70	29,5	383,2
2,25	191,25	75	32	410,9
2,4	204	80	34	438
2,55	216,75	85	35	465,9
2,7	229,5	90	36,7	493
2,85	242,25	95	39,5	520
3	255	100	40	548

De esta manera, se utilizan los datos de iluminación arrojados por el sensor y el luxómetro, para poder hacer su respectiva calibración. Para ello, se realiza la tabulación de los datos obtenidos de Sensor (x) vs Luxómetro (y) por medio de MATLAB (ver Figura 51), y así, obtener la curva de calibración empleando regresión lineal, que permitirá calcular la ecuación de la pendiente por medio del comando $Polyfit(x,y,1)$.

Figura 51

Curva de calibración zona 1.



En esta gráfica se puede observar el comportamiento del sensor y luxómetro con respecto a la iluminación arrojada por la lámpara. Obteniendo de esta manera la constante de la zona 1.

Figura 52

Constante de Zona 1.

$$p = 13.6987 \quad 0.0120$$

En este grafico se obtiene la ecuación de grado 1, mediante el comando *polyfit* y al observar que el termino independiente es un valor muy pequeño se toma solo la pendiente, y portanto la constante para el sensor en la zona 1 es 13.6987.

Anexo G. Calibración del sensor BH1750 en la zona 2

En la Tabla 12 se puede evidenciar la obtención de datos acorde a la variación de potencia en la zona 2.

Tabla 12

Datos calibración sensor en Zona 2

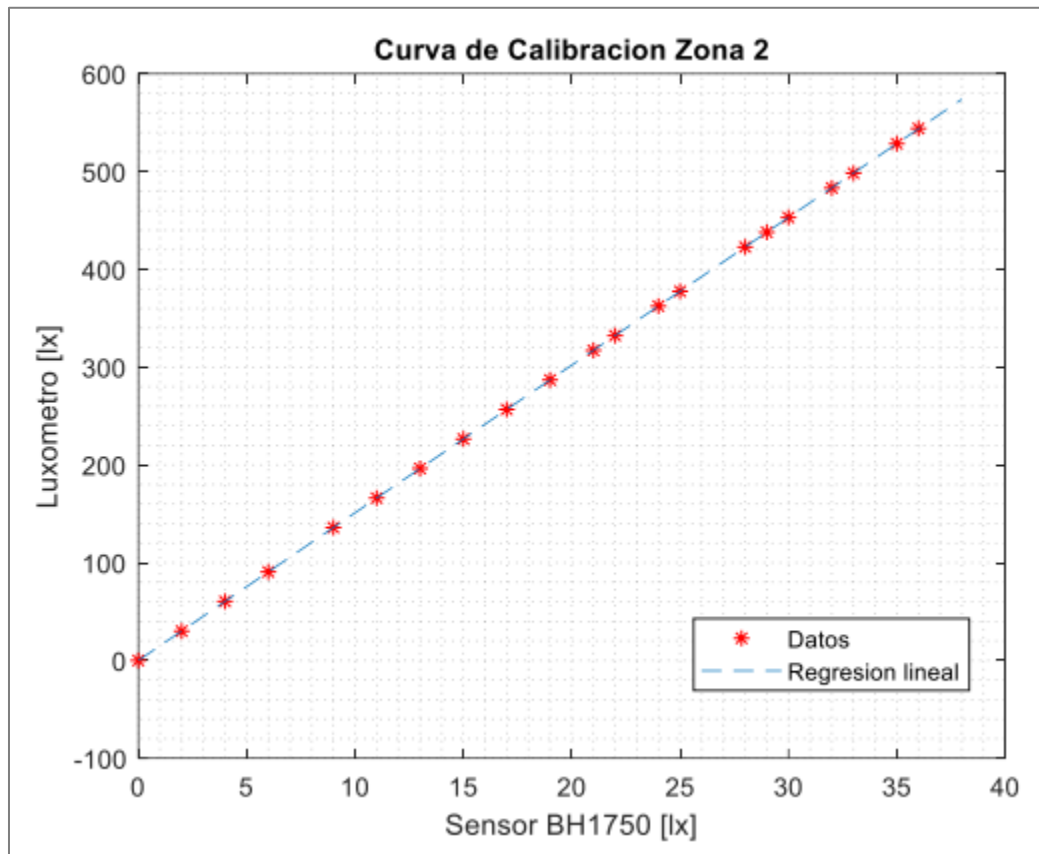
Potencia Lampara	Duty Cycle ESP32	Duty Cycle [%]	Sensor BH1750 [Lx]	Luxómetro [Lx]
0	0	0	0	0
0,15	12,75	5	2	28
0,3	25,5	10	4	55,4
0,45	38,25	15	6	82,6
0,6	51	20	9	109
0,75	63,75	25	11	136,1
0,9	76,5	30	13	163
1,05	89,25	35	15	192,1
1,2	102	40	17	218

1,35	114,75	45	19	245,8
1,5	127,5	50	21	272,1
1,65	140,25	55	22	299,2
1,8	153	60	24	326,4
1,95	165,75	65	25	353,8
2,1	178,5	70	28	381
2,25	191,25	75	29	408
2,4	204	80	30	435,2
2,55	216,75	85	32	462
2,7	229,5	90	33	489,2
2,85	242,25	95	35	517
3	255	100	36	544

De esta manera, se utilizan los datos de iluminación arrojados por el sensor y el luxómetro, para poder hacer su respectiva calibración. Para ello, se realiza la tabulación de los datos obtenidos de Sensor (x) vs Luxómetro (y) por medio de MATLAB (ver Figura 53), y así, obtener la curva de calibración empleando regresión lineal, que permitirá calcular la ecuación de la pendiente por medio del comando $Polyfit(x,y,I)$.

Figura 53

Curva de calibración zona 2.



En esta grafica se puede observar el comportamiento del sensor y luxómetro con respecto a la iluminación arrojada por la lámpara. Obteniendo de esta manera la constante de la zona 2.

Figura 54

Constante de zona 2.

$$P = \begin{matrix} 15.1040 & -0.0681 \end{matrix}$$

En este grafico se obtiene la ecuación de grado 1, mediante el comando *polyfit* y al observar que el termino independiente es un valor muy pequeño se toma solo la pendiente, y por tanto la constante para el sensor en la zona 2 es 15.1040.

Anexo H. Calibración del sensor BH1750 en la zona 3

En la Tabla 13 se puede evidenciar la obtención de datos acorde a la variación de potencia en la zona 3.

Tabla 13

Datos calibración sensor en Zona 3

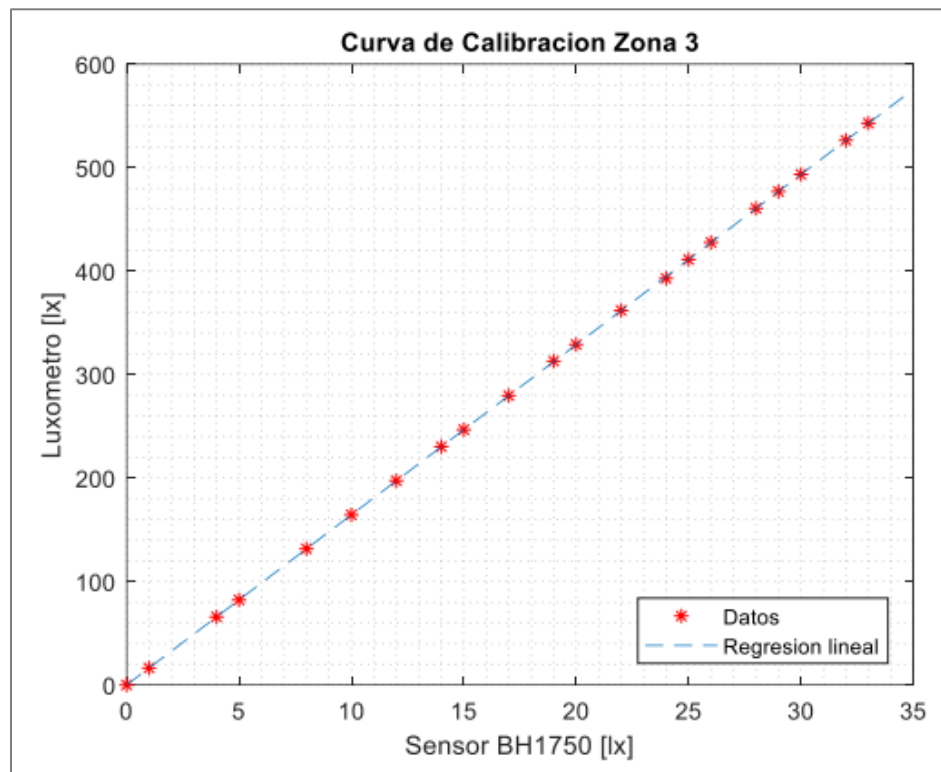
Potencia Lampara	Duty Cycle ESP32	Duty Cycle [%]	Sensor BH1750 [Lx]	Luxómetro [Lx]
0	0	0	0	0
0,15	12,75	5	1	28
0,3	25,5	10	4	56,8
0,45	38,25	15	5	84
0,6	51	20	8	112
0,75	63,75	25	10	141,4
0,9	76,5	30	12	168,4
1,05	89,25	35	14	196
1,2	102	40	15	225,2
1,35	114,75	45	17	252,2
1,5	127,5	50	19	280
1,65	140,25	55	20	308,5
1,8	153	60	22	337
1,95	165,75	65	24	364
2,1	178,5	70	25	392

2,25	191,25	75	26	420
2,4	204	80	28	448,2
2,55	216,75	85	29	476
2,7	229,5	90	30	503,5
2,85	242,25	95	32	531,4
3	255	100	33	559

De esta manera, se utilizan los datos de iluminación arrojados por el sensor y el luxómetro, para poder hacer su respectiva calibración. Para ello, se realiza la tabulación de los datos obtenidos de Sensor (x) vs Luxómetro (y) por medio de MATLAB (ver Figura 55), y así, obtener la curva de calibración empleando regresión lineal, que permitirá calcular la ecuación de la pendiente por medio del comando $Polyfit(x,y,I)$.

Figura 55

Curva de calibración zona 3.



En esta grafica se puede observar el comportamiento del sensor y luxómetro con respecto a la iluminación arrojada por la lámpara. Obteniendo de esta manera la constante de la zona 3.

Figura 56

Constante de zona 3.

$$p = 16.4459 \quad 0.0157$$

En este gráfico se obtiene la ecuación de grado 1, mediante el comando *polyfit* y al observar que el termino independiente es un valor muy pequeño se toma solo la pendiente, y portanto la constante para el sensor en la zona 3 es 16.4459.

Anexo I. Calibración del sensor BH1750 en la zona 4

En la Tabla 14 se puede evidenciar la obtención de datos acorde a la variación de potencia en la zona 4.

Tabla 14

Datos calibración sensor en Zona 4

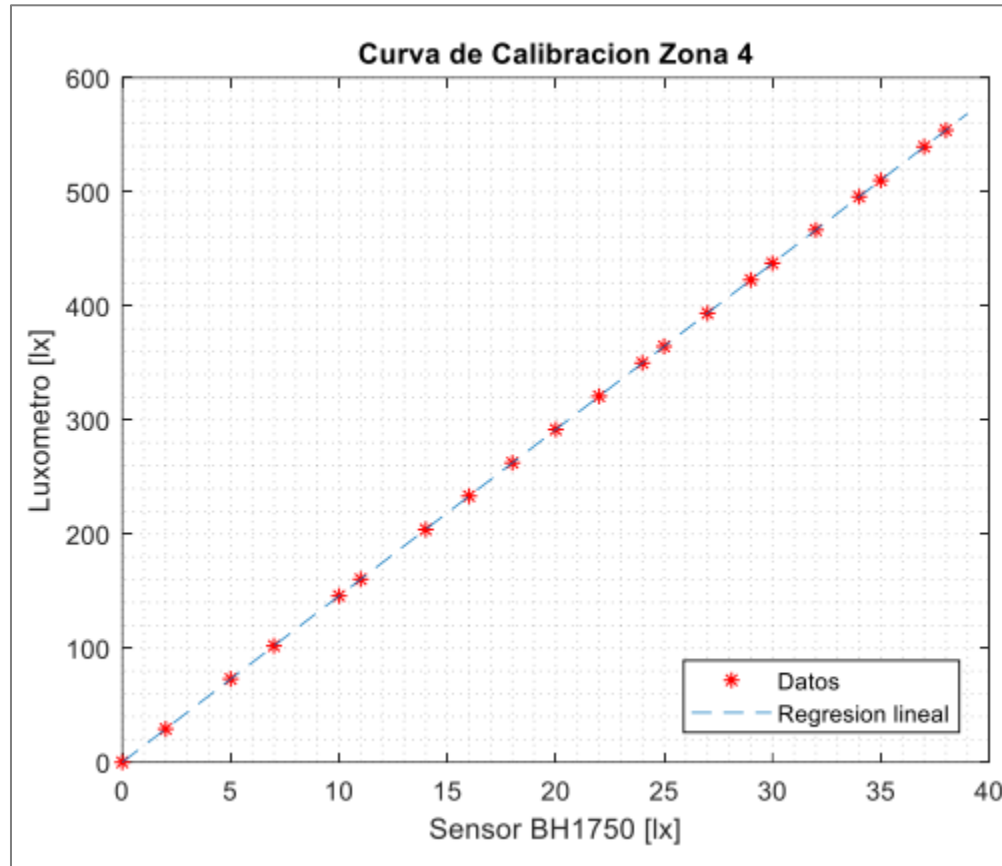
Potencia Lampara	Duty Cycle ESP32	Duty Cycle [%]	Sensor BH1750 [Lx]	Luxómetro [Lx]
0	0	0	0	0
0,15	12,75	5	2	28,16
0,3	25,5	10	5	56
0,45	38,25	15	7	83,2
0,6	51	20	10	110,8
0,75	63,75	25	11	138,4
0,9	76,5	30	14	166

1,05	89,25	35	16	193,8
1,2	102	40	18	221,4
1,35	114,75	45	20	249,6
1,5	127,5	50	22	276,8
1,65	140,25	55	24	305
1,8	153	60	25	332,5
1,95	165,75	65	27	359,6
2,1	178,5	70	29	387,8
2,25	191,25	75	30	415,4
2,4	204	80	32	442,6
2,55	216,75	85	34	470,7
2,7	229,5	90	35	498
2,85	242,25	95	37	526
3	255	100	38	554

De esta manera, se utilizan los datos de iluminación arrojados por el sensor y el luxómetro, para poder hacer su respectiva calibración. Para ello, se realiza la tabulación de los datos obtenidos de Sensor (x) vs Luxómetro (y) por medio de MATLAB (ver Figura 57), y así, obtener la curva de calibración empleando regresión lineal, que permitirá calcular la ecuación de la pendiente por medio del comando $Polyfit(x,y,l)$.

Figura 57

Curva de calibración zona 4.



En esta gráfica se puede observar el comportamiento del sensor y luxómetro con respecto a la iluminación arrojada por la lámpara. Obteniendo de esta manera la constante de la zona 4.

Figura 58

Constante de zona 4.

$$p = \begin{matrix} 14.5784 & 0.0207 \end{matrix}$$

En este gráfico se obtiene la ecuación de grado 1, mediante el comando *polyfit* y al observar que el termino independiente es un valor muy pequeño se toma solo la pendiente, y portanto la constante para el sensor en la zona 4 es 14.5784.

Anexo J. Calibración del sensor BH1750 en la zona 5

En la Tabla 15 se puede evidenciar la obtención de datos acorde a la variación de potencia en la zona 5.

Tabla 15

Datos calibración sensor en Zona 5

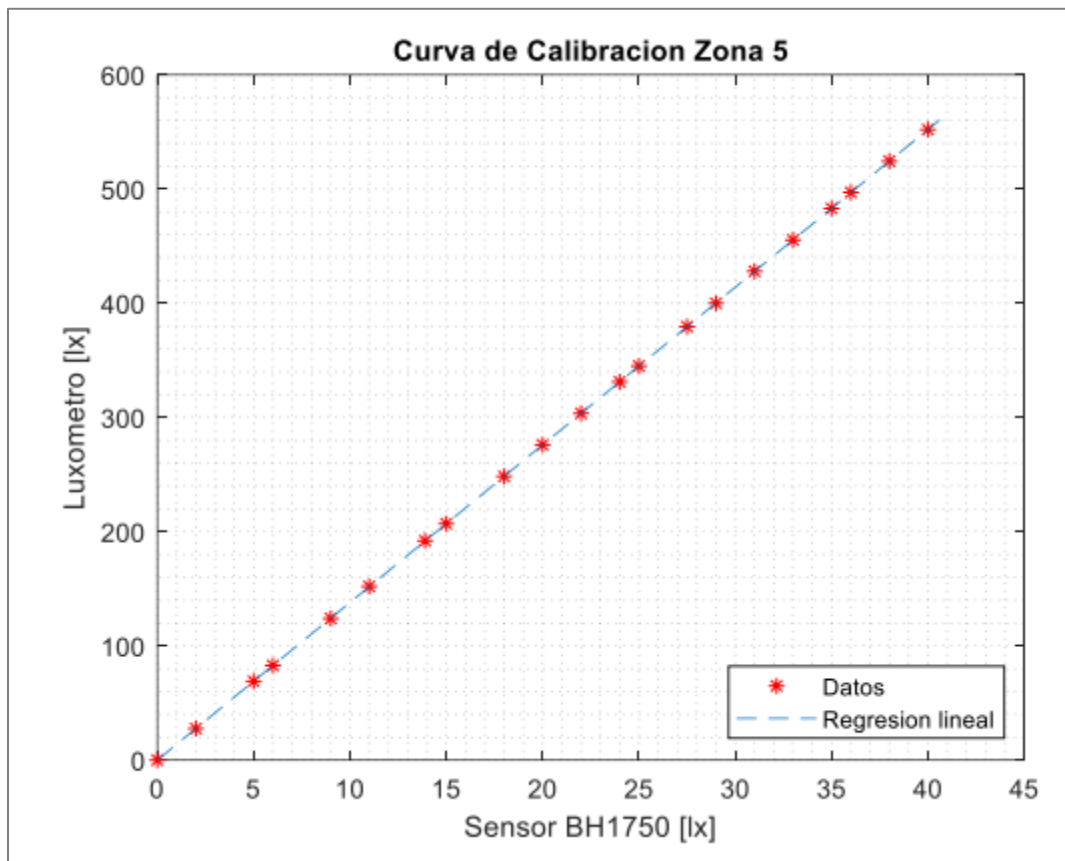
Potencia Lampara	Duty Cycle ESP32	Duty Cycle [%]	Sensor BH1750 [Lx]	Luxómetro [Lx]
0	0	0	0	0
0,15	12,75	5	2	27,6
0,3	25,5	10	5	56
0,45	38,25	15	6	83
0,6	51	20	9	110,8
0,75	63,75	25	11	138,6
0,9	76,5	30	13.9	165,9
1,05	89,25	35	15	194
1,2	102	40	18	221,4
1,35	114,75	45	20	249
1,5	127,5	50	22	276,5
1,65	140,25	55	24	303,9
1,8	153	60	25	331,7
1,95	165,75	65	27.5	359
2,1	178,5	70	29	386,7
2,25	191,25	75	31	414,4

2,4	204	80	33	442
2,55	216,75	85	35	469,6
2,7	229,5	90	36	497
2,85	242,25	95	38	524,4
3	255	100	40	552

De esta manera, se utilizan los datos de iluminación arrojados por el sensor y el luxómetro, para poder hacer su respectiva calibración. Para ello, se realiza la tabulación de los datos obtenidos de Sensor (x) vs Luxómetro (y) por medio de MATLAB (ver Figura 59), y así, obtener la curva de calibración empleando regresión lineal, que permitirá calcular la ecuación de la pendiente por medio del comando $Polyfit(x,y,I)$.

Figura 59

Curva de calibración zona 5.



En esta gráfica se puede observar el comportamiento del sensor y luxómetro con respecto a la iluminación arrojada por la lámpara. Obteniendo de esta manera la constante de la zona 5.

Figura 60

Constante de zona 5.

$$p = 13.8008 \quad 0.0008$$

En este gráfico se obtiene la ecuación de grado 1, mediante el comando *polyfit* y al observar que el término independiente es un valor muy pequeño se toma solo la pendiente, y por tanto la constante para el sensor en la zona 5 es 13.8008.

Anexo K. Calibración del sensor BH1750 en la zona 6.

En la Tabla 16 se puede evidenciar la obtención de datos acorde a la variación de potencia en la zona 6.

Tabla 16

Datos calibración sensor en Zona 6

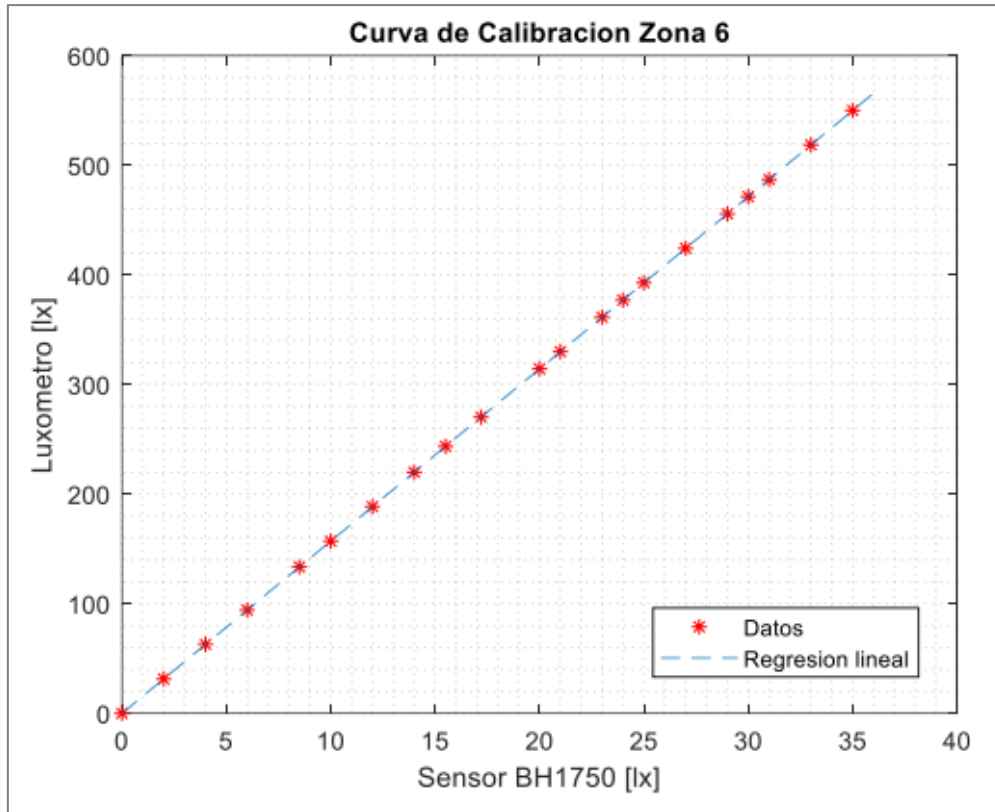
Potencia Lámpara	Duty Cycle ESP32	Duty Cycle [%]	Sensor BH1750 [Lx]	Luxómetro [Lx]
0	0	0	0	0
0,15	12,75	5	2	28,4
0,3	25,5	10	4	55,9
0,45	38,25	15	6	84,3
0,6	51	20	8,5	113,6
0,75	63,75	25	10	138,1

0,9	76,5	30	12	165,6
1,05	89,25	35	14	193
1,2	102	40	15,5	220,6
1,35	114,75	45	17,2	248,3
1,5	127,5	50	20	275,3
1,65	140,25	55	21	302,2
1,8	153	60	23	331,4
1,95	165,75	65	24	357
2,1	178,5	70	25	392,9
2,25	191,25	75	27	424,3
2,4	204	80	29	455,7
2,55	216,75	85	30	471,4
2,7	229,5	90	31	487
2,85	242,25	95	33	518,6
3	255	100	35	550

De esta manera, se utilizan los datos de iluminación arrojados por el sensor y el luxómetro, para poder hacer su respectiva calibración. Para ello, se realiza la tabulación de los datos obtenidos de Sensor (x) vs Luxómetro (y) por medio de MATLAB (ver Figura 61), y así, obtener la curva de calibración empleando regresión lineal, que permitirá calcular la ecuación de la pendiente por medio del comando $Polyfit(x,y,l)$.

Figura 61

Curva de calibración zona 6.



En esta gráfica se puede observar el comportamiento del sensor y luxómetro con respecto a la iluminación arrojada por la lámpara. Obteniendo de esta manera la constante de la zona 6.

Figura 62

Constante de zona 6.

$$p =$$
$$15.7130 \quad 0.0152$$

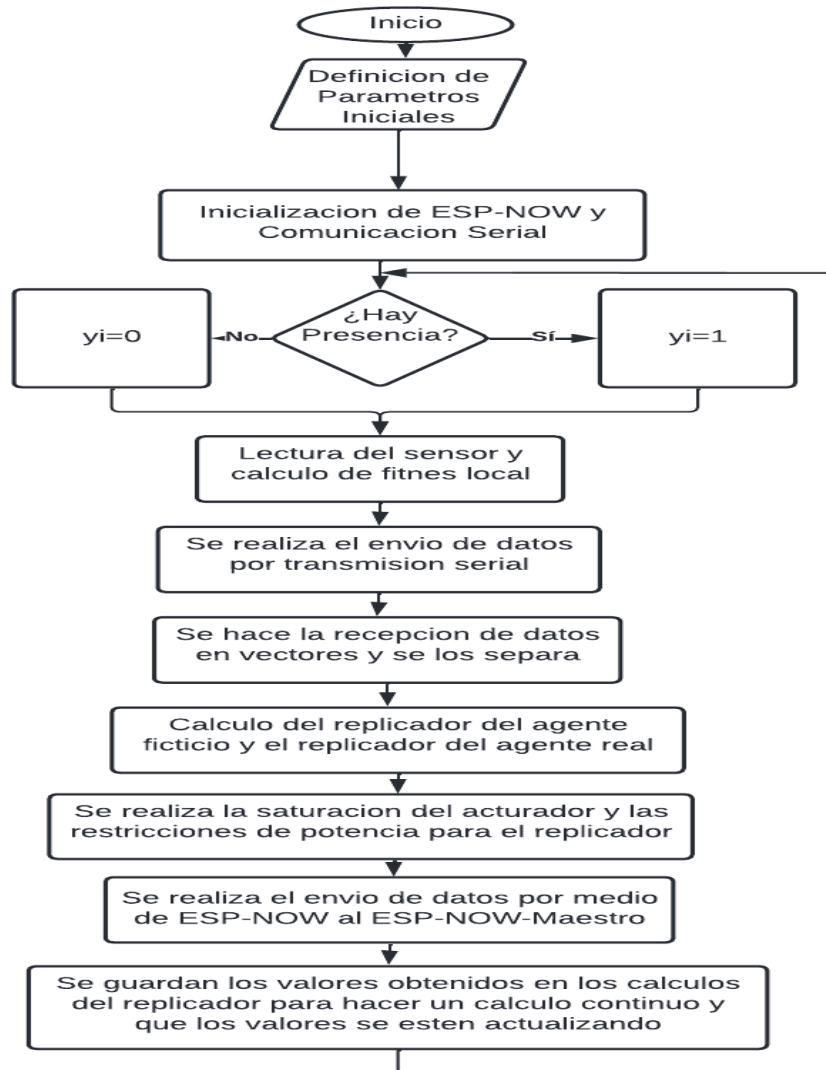
En este gráfico se obtiene la ecuación de grado 1, mediante el comando *polyfit* y al observar que el término independiente es un valor muy pequeño se toma solo la pendiente, y por tanto la constante para el sensor en la zona 6 es 15.7130.

Anexo L. Código Implementado en el módulo ESP32-Esclavo para replicadores dinámicos

Para dar un indicio de la programación realizada, se elabora un diagrama de flujo a grandes rasgos, con el fin de facilitar la comprensión del código implementado en la siguiente figura:

Figura 63

Diagrama de flujo comunicación de RD.



Anexo M. Cogido Replicadores dinámicos sensible a presencia de individuos

```
//          PROYECTO DE GRADO
//          REPLICADOR DINAMICO LOCAL
// esp32_lampara_1 sda=p21 scl=p22
// SDA NEGRO P21 - SCL ROJO P22
// GND VERDE - AMARILLO 5V

// comunicacion 18, 19); //A (TX,RX)
// 25, 26); // B (TX,RX)
// librerias
#include <esp_now.h>
#include <WiFi.h>
#include <Wire.h>
#include <BH1750.h> //lib sensor
#include <math.h> //lib matematica
BH1750 lightMeter;

//PAQUETE DE DATOS A ENVIAR protocolo espnow

uint8_t broadcastAddress[]{0x2C, 0xF4, 0x32, 0x2E, 0xBC, 0x02};

//uint8_t broadcastAddress[]{0x80, 0x7D, 0x3A, 0x7F, 0x3A, 0xAE};
//Estructura para recibir los mensajes
typedef struct struct_message{
```

```

int Ewf;    //iluminacion resivida
int Fwf;    //fitnettss resivida
float Pwf;  //potencia resivida
int id;
int pr;     //presencia
float pfit; //pot fitnets
} struct_message;

//creamos una variable para almacenar los mensajes recibidos
struct_message myData;

//funcion de devolucion de llamada onDataSent()
void onDataRecv(const uint8_t* mac_addr,esp_now_send_status_t status){
    Serial.println("\r\nEstado del ultimo paquete enviado\t");
    Serial.println(status==ESP_NOW_SEND_SUCCESS ? "envio exitoso":"envio fallido");
}

//pwm
const int lampGPIO=13;    //pin PWM control
const int comunicacion=14;    //pin PWM control
const int presencia=27;    //pin PWM control
const int canalPWM=0;    //canal timer pwm
const int frecuencia=1000; // en HZ
const int resolucion=8;    //0-255
//PARAMETROS REPLICADOR LOCAL DISCRETO
// int Fa=0,Fb=0; //variables para fitnets de los vecinos

```

```

float pa=0.0047,pb=0.0047; //variables para potencia de los vecinos
int S=500;
int B=4000000; //referencia, beta hace que la fitness sea positiva
int Fa=B,Fb=B; //variables para fitness de los vecinos
int Pmax=3 ; //Potencia de lampara de 3W
int ptot=18; //potencia total del sistema 18W
float beta=0.1,alpha=0.05;;//parametros de velocidad RDL
float p0l=0.0047;
float p0f=(ptot-p0l*6)/6; // potencia inicial para agente ficticio //EN EL AGENTE
FICTICIO SE ENCUENTRA LA POTENCIA INICIALMENTE
float pk=p0l,pk_1=0.0;
float Tm=0.05;
int pr=0;
float pfit=0;
unsigned long Tiempo_Tx; // para el envio de datos
char datos1[20];// variable array para capturar los datos de llegada
char datos2[20];//para los dos puertos serial
int posicion1=0,posicion2=0;//variable de posicion para datos de llegada en los dos puertos
seriales
char *resultado1= NULL;
char *resultado2= NULL;// en esta variable se segmenta los datos de llegada
char separador1[]="FP";//variable separadora de datos
char separador2[]="FP";
float valores1[]={0,0};
float valores2[]={0,0};
float L=16.45;
//L1=13.7 L2=15.1 L3=16.45 L4=14.58 L5=13.8 L6=15.71 Constantes de cada lampara
// comunicacion ESP32 puertos uart 1y2

```

```

HardwareSerial Serial_1(1);
HardwareSerial Serial_2(2);

void setup(){
  Serial.begin(115200);//inicio comunicacion serial // muestreo serial
//configuracion como estacion WIFI
  WiFi.mode(WIFI_STA);
  //inicializamos protocolo ESP-now
  if(esp_now_init() != ESP_OK){
    Serial.println("XXX_Error de inicializacion del protocolo ESP_NOW");
    return;
  }
  //Regitramos a funcion de devolucion de llamada
  esp_now_register_send_cb(OnDataRecv);
  // agregar dispositivo del mismo nivel
  //para eviar datos a otra placa(el receptor), debe emparejarlo como un par.
  esp_now_peer_info_t peerInfo;
  memcpy(peerInfo.peer_addr,broadcastAddress,6);
  peerInfo.channel=0;
  peerInfo.encrypt=false;
  //agregamos un par
  if(esp_now_add_peer(&peerInfo) != ESP_OK){
    Serial.println("No se pudo agregar el par");
    return;
  }
  //leemos el tiempo de inicio de programa
  Tiempo_Tx=millis();

```

```

//configura la señal pwm
ledcSetup(canalPWM,frecuencia,resolucion);

// asigna la señal crada al GPIO de eleccion
ledcAttachPin(lampGPIO,canalPWM);

//puerto de comunicacion serial ENVIO DE DATOS ENTRE ESP32//Serial.begin(Baud Rate,
Data Protocol, Txd pin, Rxd pin);

Serial_1.begin(115200, SERIAL_8N1, 17, 16); //A (TX,RX) 18,19
Serial_2.begin(115200, SERIAL_8N1, 26, 25); // B (TX,RX) 25,16

//delay(1000);//retardo

//inicializa el bus 12c pines_gpio sda=p21 scl=p22
Wire.begin();
lightMeter.begin();
pinMode(presencia, INPUT_PULLDOWN);// Pin de Presencia
pinMode(comunicacion, INPUT_PULLDOWN);// Pin de Acciona Comunicacion
}

void loop() {
while(digitalRead(comunicacion)==HIGH){
if(digitalRead(presencia)==HIGH){
S=500;
pr=1;
Serial.println("Hay presencia Lampara 3");
}
if(digitalRead(presencia)==LOW){
S=0;
pr=0;
Serial.println("Sin presencia Lampara 3");
}
}
}

```

```

    }
    boolean segmentacion1;
    boolean segmentacion2;
    //lectura del sensor// E ILUMINANCIA =LUX
    int E=lightMeter.readLightLevel();
    // CALCULO del fitnets local fl= referencia - E(iluminacia)
    E=L*E;
    int F=(int)(B+S-E); //

    // transmision de datos FITNETS LOCAL Y POTENCIA LOCAL
    if((millis()-Tiempo_Tx)>150){ //Transmision de datos cada medio segundo
        //muestreo en el serial datos locales
        Serial.println(E);
        Serial.println(F);
        Serial.println(pk);
        //envio de datos a los vecinos
        Serial_1.print(F); //envia datos agente 2 // envio fitnetss local
        Serial_1.print("F");
        Serial_1.print(pk); //envia datos agente 2 // envia la potencia local a los vecinos
        Serial_1.print("P");
        Serial_2.print(F); //envia datos agente 3
        Serial_2.print("F");
        Serial_2.print(pk); //envia datos agente 3
        Serial_2.print("P");
        Tiempo_Tx=millis();
    }
    //recepcion de datos

```



```

while(Serial_1.available()>0){ //mientras alla datos en el puerto
    delay(5);//retardo para mejorar la recepcion
    datos1[posicion1]=Serial_1.read();
    posicion1++;//aumenta la variable para la lectura de los datos
    segmentacion1=true;// despues de la recepcion de datos se lo activa true
}
    posicion1=0; //
//segmentacion de datos
if (segmentacion1==true){
    int index1 =0;
    resultado1=strtok(datos1,separador1);//separador los datos en PL y FL
    while((resultado1 != NULL)&& (index1<2)){//separamos los datos correspondientes
        valores1[index1++]=atof(resultado1);//almacenamos los datos segmentados
        resultado1= strtok(NULL,separador1);
    }
    segmentacion1=false;
}
Fa=valores1[0];//lectura de datos correspondientes
pa=valores1[1];

while(Serial_2.available()>0){ //mientras alla datos en el puerto
    delay(5);
    datos2[posicion2]=Serial_2.read();
    posicion2++;
    segmentacion2=true;
}
    posicion2=0;

```

```

//segmentacion de datos
if (segmentacion2==true){
    int index2 =0;
    resultado2=strtok(datos2,separador2);//separador los datos en PL y FL
    while((resultado2 != NULL)&& (index2<2)){//separamos los datos correspondientes
        valores2[index2++]=atof(resultado2);//almacenamos los datos segmentados
        resultado2= strtok(NULL,separador2);
    }
    segmentacion2=false;
}
Fb=valores2[0];//lectura de datos correspondientes
pb=valores2[1];

// CALCULO del replicador fitnets
float p0f_1=(float)(p0f*((Tm*beta)/ptot) * ((B*(pk))-((F*pk))))+1)); //ecuacion de RDL
agente ficticio
p0f=p0f_1;
// CALCULO del replicador
float pk_1=(float)(pk*((Tm*beta)/ptot)*((F*(pa+pb+p0f))-((Fa*pa)+(Fb*pb)+(B*p0f)))+1));
//ecuacion de RDL
pk=pk_1;
// Saturacion del Actuador
if(pk<0.0047){
    pk=0.0047;
}
if(pk>2.9953){
    pk=2.9953;
}

```

```

signed int u=(255*pk)/3;
u=min(u,255);
u=max(u,0);
ledcWrite(canalPWM,u);

// COMUNIACION ESP NOW
E=lightMeter.readLightLevel();
// CALCULO del fitnets local fl= referencia - E(iluminacia)
E=L*E;
F=(int)(B+S-E); //

myData.Ewf= E;
myData.Fwf= F;
myData.Pwf= pk;
myData.id= 3; //numero de placa
myData.pr= pr;
myData.pfit=3-pk;

//enviamos el mensaje a traves el protocolo esp_now
esp_err_t result = esp_now_send(broadcastAddress, (uint8_t *) &myData, sizeof(myData));
if(result == ESP_OK){
    Serial.println("envio de mensaje exitoso");
}
else{
    Serial.println("envio de mensaje fallido");
}

delay(200);

```

```

}
if(digitalRead(comunicacion)==LOW){
    ledcWrite(canalPWM,0);
}
}

```

**Anexo N. Código de obtención de datos ESP-NOW Maestro y Código Matlab App designer
Codigo ESP-NOW- Maestro:**

```

//24:CF:12:6b:F6:20
//30:AE:A4:21:BC:A8
//24:6F:28:9D:A8:24
//receptores
//2C:F4:32:2E:BC:02
#include "ESP8266WiFi.h"
#include <espnow.h>

//Estructura para recibir los mensajes de los ESP32 esclavos
typedef struct struct_message{
    int Ewf;    //iluminacion resivida
    int Fwf;    //fitnettss resivida
    float Pwf;  //potencia resivida
    int id;
    int pr;     //presencia
    float pfit; //pot fitnets

```

```

} struct_message;

//creamos una variable para almacenar los mensajes recibidos
struct_message myData;

//creamos una estructura para cada placa
struct_message board1; // boards ESP32(1-2-3-4-5-6)
struct_message board2;
struct_message board3;
struct_message board4;
struct_message board5;
struct_message board6;

//creamos una matriz que contenga todas las estructuras de las placas
struct_message boardsStruct[6]={ board1,board2,board3,board4,board5,board6};

//funcion de devolucion de llamada OnDataSent()
void OnRecv(uint8_t * mac, uint8_t *incomingData, uint8_t len){

    //obtenemos la direccion MAC de la placa transmisora
    char macStr[18];

    //Serial.print("paquete recibido de : ");

    //snprintf(macStr,
sizeof(macStr),"%02x:%02x:%02x:%02x:%02x:%02x",mac_addr[0],mac_addr[1],mac_addr[2],
mac_addr[3],mac_addr[4],mac_addr[5]);

    // Serial.println(macStr);

    memcpy(&myData,incomingData,sizeof(myData));

    // Actualice las estructuras con los nuevos datos entrante
boardsStruct[myData.id-1].Ewf = myData.Ewf;
boardsStruct[myData.id-1].Fwf = myData.Fwf;
boardsStruct[myData.id-1].Pwf = myData.Pwf;
boardsStruct[myData.id-1].pr = myData.pr;

```

```

boardsStruct[myData.id-1].pfit = myData.pfit;
int i=boardsStruct[myData.id-1].id;
int E=boardsStruct[myData.id-1].Ewf;
int F=boardsStruct[myData.id-1].Fwf;
float pk=boardsStruct[myData.id-1].Pwf;
int pr=boardsStruct[myData.id-1].pr;
float p0f=boardsStruct[myData.id-1].pfit;
// Serial.printf("Numero de placa : %u:%u: bytes\n",myData.id,len);
// Serial.println(i);
// Serial.println();
}
void setup(){
  //inicializamos el monitor serie
  Serial.begin(115200);
  //configuracion como estacion WIFI
  WiFi.mode(WIFI_STA);
  //inicializamos protocolo ESP-now
  if(esp_now_init() !=0){
    Serial.println("XXX_Error de inicialzcion del protocolo ESP_NOW");
    return;
  }
  //Regitramos a funcion de devolucion de llamada
  esp_now_register_recv_cb(OnRecv);
}
void loop()
{
  int E=boardsStruct[myData.id-1].Ewf;

```

```

int F=boardsStruct[myData.id-1].Fwf;
float pk=boardsStruct[myData.id-1].Pwf;
int lamp = myData.id;
int pr=boardsStruct[myData.id-1].pr;
float p0f=boardsStruct[myData.id-1].pfit;

    if (lamp!=0){
Serial.println(E);
Serial.println(F);
Serial.println(pk,8);
Serial.println(lamp);
Serial.println(pr);
Serial.println(p0f,8);
delay(300);
myData.id=0;
    }//fin id lamp

    //Serial.println(WiFi.macAddress());
}

```

Código Matlab

```

classdef muestreo_replicadores < matlab.apps.AppBase
    % Properties that correspond to app components
    properties (Access = public)
        UIFigure          matlab.ui.Figure
        E1                 matlab.ui.control.UIAxes
        inicio            matlab.ui.control.Button
        parada            matlab.ui.control.Button
        tabla              matlab.ui.control.Table
        exportar          matlab.ui.control.Button
        E2                 matlab.ui.control.UIAxes
        tabla_2            matlab.ui.control.Table
        E3                 matlab.ui.control.UIAxes
        tabla_3            matlab.ui.control.Table
    end
end

```

```

P1                matlab.ui.control.UIAxes
P2                matlab.ui.control.UIAxes
P3                matlab.ui.control.UIAxes
LAMP_1LampLabel  matlab.ui.control.Label
Lamp              matlab.ui.control.Lamp
LAMP_2Label      matlab.ui.control.Label
Lamp2            matlab.ui.control.Lamp
LAMP_3Label      matlab.ui.control.Label
Lamp3            matlab.ui.control.Lamp
MUESTRASKnobLabel matlab.ui.control.Label
muestrasinput    matlab.ui.control.Knob
Label            matlab.ui.control.Label
mues             matlab.ui.control.NumericEditField
end
properties (Access = private)
    com % Description
end
%% propiedad para inicio
%% codigo e inicio
methods (Access = private)
    % Code that executes after component creation
    function startupFcn(app)

%           app.E1.XLim=[0 muestras+50]; %configuramos el eje x
%           app.E2.XLim=[0 muestras+50]; %configuramos el eje x
%           app.E3.XLim=[0 muestras+50]; %configuramos el eje x
%           app.P1.XLim=[0 muestras+50]; %configuramos el eje x
%           app.P2.XLim=[0 muestras+50]; %configuramos el eje x
%           app.P3.XLim=[0 muestras+50]; %configuramos el eje x
%
%           app.E1.YLim=[-2 900]; %configuramos el eje x
%           app.E2.YLim=[-2 900]; %configuramos el eje x
%           app.E3.YLim=[-2 900]; %configuramos el eje x
%           app.P1.YLim=[-0.5 3.5]; %configuramos el eje x
%           app.P2.YLim=[-0.5 3.5]; %configuramos el eje x
%           app.P3.YLim=[-0.5 3.5]; %configuramos el eje x

end
% Button pushed function: inicio
function inicioButtonPushed(app, event)
    % close all;

    % clc;
    global parar datos muestras
    parar=0;

```



```

co=1; co1=1; co2=1; co3=1;
e=0;
f=0;
pk=0;
pr=0;
p0f=0;
lamp=0;
delete(instrfind({'Port'},{'COM4'}));
app.com=serial('COM4');
app.com.BaudRate=115200;
warning('off','MATLAB:serial:fscanf:unsuccessfulRead');
fopen(app.com); %abrimos el puerto serial

% mat=zeros(1,muestras); % matriz para almacenar los valores

while co<=muestras
    if parar==1
        break;
    else

        %e=str2double(fscanf(app.com));
        % e=str2double(readline(app.com));
        e=fscanf(app.com,'%d'); % LECTURA del puerto serial

        f=fscanf(app.com,'%d'); % LECTURA del puerto serial

        pk=fscanf(app.com,'%f'); % LECTURA del puerto serial

        lamp=fscanf(app.com,'%d'); % LECTURA del puerto serial

        pr=fscanf(app.com,'%d'); % LECTURA del puerto serial

        p0f=fscanf(app.com,'%f'); % LECTURA del puerto serial

        if lamp==1
            mat(co1)=e(1);
            tiempo(co1)=co1;
            matf(co1)=f(1);

```

```

matpk(co1)=pk(1);
matpr(co1)=pr(1);
matp0f(co1)=p0f(1);

plot(app.E1,tiempo,mat); %mostramos la iluminancia
plot(app.P1,tiempo,matpk,tiempo,matp0f); %mostramos la potencia
drawnow;
grid on;
datos=[matpr;mat;matp0f;matpk;matf]'
assignin('base','lamp1',datos);
app.tabla.Data = datos;
co1=co1+1;
    if pr==1
        app.Lamp.Color=[0 1 0];
    else
        app.Lamp.Color=[0 0 0];
    end

end

if lamp==2
mat2(co2)=e(1);
tiempo2(co2)=co2;
mat2f(co2)=f(1);
mat2pk(co2)=pk(1);
mat2pr(co2)=pr(1);
mat2p0f(co2)=p0f(1);

plot(app.E2,tiempo2,mat2); %mostramos la iluminancia
plot(app.P2,tiempo2,mat2pk,tiempo2,mat2p0f); %mostramos la
potencia

drawnow;
grid on;
datos=[mat2pr;mat2;mat2p0f;mat2pk;mat2f]'
assignin('base','lamp2',datos);
app.tabla_2.Data = datos;
co2=co2+1;

    if pr==1
        app.Lamp2.Color=[0 1 0];
    else
        app.Lamp2.Color=[0 0 0];
    end

end

```

```

end

if lamp==3
    mat3(co3)=e(1);
    tiempo3(co3)=co3;
    mat3f(co3)=f(1);
    mat3pk(co3)=pk(1);
    mat3pr(co3)=pr(1);
    mat3p0f(co3)=p0f(1);

    plot(app.E3,tiempo3,mat3); %mostramos la iluminancia
    plot(app.P3,tiempo3,mat3pk,tiempo3,mat3p0f); %mostramos la
potencia

    drawnow;
    grid on;
    datos=[mat3pr;mat3;mat3p0f;mat3pk;mat3f]'
    assignin('base','lamp3',datos);
app.tabla_3.Data = datos;
    co3=co3+1;

    if pr==1
        app.Lamp3.Color=[0 1 0];
    else
        app.Lamp3.Color=[0 0 0];
    end

end

co=co+1;

end%fin else
end%fin for

%delete(com);

end
% Button pushed function: parada
function paradaButtonPushed(app, event)

```

```

        fclose(app.com);
        delete(app.com);
        global parar
        parar =1;

    end
    % Button pushed function: exportar
    function exportarButtonPushed(app, event)
        global datos

        writematrix(datos,'datos.Xlsx');

    end
    % Close request function: UIFigure
    function UIFigureCloseRequest(app, event)

        delete(app.com);
        delete(app);

    end
    % Value changing function: muestrasininput
    function muestrasininputValueChanging(app, event)
        global muestras
        changingValue = event.Value;
        app.mues.Value=changingValue ;
        muestras= app.mues.Value;
    end
end
% App initialization and construction
methods (Access = private)
    % Create UIFigure and components
    function createComponents(app)
        % Create UIFigure
        app.UIFigure = uifigure;
        app.UIFigure.Color = [0 0 0];
        app.UIFigure.Position = [100 100 1214 704];
        app.UIFigure.Name = 'UI Figure';
        app.UIFigure.CloseRequestFcn = createCallbackFcn(app,
@UIFigureCloseRequest, true);
        % Create E1
        app.E1 = uiaxes(app.UIFigure);

```

```

title(app.E1, 'ILUMINANCIA_1')
xlabel(app.E1, '# Muestras ')
ylabel(app.E1, 'E (iluminancia)')
app.E1.FontName = 'Arial Black';
app.E1.FontSize = 11;
app.E1.FontAngle = 'italic';
app.E1.FontWeight = 'bold';
app.E1.Box = 'on';
app.E1.Color = [1 1 0];
app.E1.XGrid = 'on';
app.E1.YGrid = 'on';
app.E1.Position = [11 489 329 207];
% Create inicio
app.inicio = uibutton(app.UIFigure, 'push');
app.inicio.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app,
@inicioButtonPushed, true);
app.inicio.BackgroundColor = [0 1 0];
app.inicio.FontSize = 16;
app.inicio.FontWeight = 'bold';
app.inicio.Position = [387 15 100 27];
app.inicio.Text = 'INICIO';
% Create parada
app.parada = uibutton(app.UIFigure, 'push');
app.parada.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app,
@paradaButtonPushed, true);
app.parada.BackgroundColor = [1 0 0];
app.parada.FontSize = 16;
app.parada.FontWeight = 'bold';
app.parada.Position = [558 14 100 27];
app.parada.Text = 'PARADA';
% Create tabla
app.tabla = uitable(app.UIFigure);
app.tabla.ColumnName = {'Column 1'; 'Column 2'; 'Column 3'; 'Column
4'};

app.tabla.RowName = {};
app.tabla.FontAngle = 'italic';
app.tabla.FontWeight = 'bold';
app.tabla.Position = [653 481 422 214];
% Create exportar
app.exportar = uibutton(app.UIFigure, 'push');
app.exportar.ButtonPushedFcn = createCallbackFcn(app,
@exportarButtonPushed, true);
app.exportar.BackgroundColor = [0.9294 0.6902 0.1294];
app.exportar.FontSize = 16;
app.exportar.FontWeight = 'bold';

```

```

app.exportar.Position = [240 10 100 40];
app.exportar.Text = 'EXCEL';
% Create E2
app.E2 = uiaxes(app.UIFigure);
title(app.E2, 'ILUMINANCIA_2')
xlabel(app.E2, '# Muestras ')
ylabel(app.E2, 'E (iluminancia)')
app.E2.PlotBoxAspectRatio = [1 0.516728624535316 0.516728624535316];
app.E2.FontName = 'Arial Black';
app.E2.FontSize = 11;
app.E2.FontAngle = 'italic';
app.E2.FontWeight = 'bold';
app.E2.Box = 'on';
app.E2.Color = [1 1 0];
app.E2.XGrid = 'on';
app.E2.YGrid = 'on';
app.E2.Position = [11 276 329 207];
% Create tabla_2
app.tabla_2 = uitable(app.UIFigure);
app.tabla_2.ColumnName = {'Column 1'; 'Column 2'; 'Column 3'; 'Column
4'};

app.tabla_2.RowName = {};
app.tabla_2.FontAngle = 'italic';
app.tabla_2.FontWeight = 'bold';
app.tabla_2.Position = [653 267 422 215];
% Create E3
app.E3 = uiaxes(app.UIFigure);
title(app.E3, 'ILUMINANCIA_3')
xlabel(app.E3, 'E (iluminancia)')
ylabel(app.E3, '# Muestras')
app.E3.PlotBoxAspectRatio = [1 0.552346570397112 0.552346570397112];
app.E3.FontName = 'Arial Black';
app.E3.FontSize = 11;
app.E3.FontAngle = 'italic';
app.E3.FontWeight = 'bold';
app.E3.Box = 'on';
app.E3.Color = [1 1 0];
app.E3.XGrid = 'on';
app.E3.YGrid = 'on';
app.E3.Position = [11 61 329 207];
% Create tabla_3
app.tabla_3 = uitable(app.UIFigure);
app.tabla_3.ColumnName = {'Column 1'; 'Column 2'; 'Column 3'; 'Column
4'};

app.tabla_3.RowName = {};

```

```

app.tabla_3.FontAngle = 'italic';
app.tabla_3.FontWeight = 'bold';
app.tabla_3.Position = [653 61 422 206];
% Create P1
app.P1 = uiaxes(app.UIFigure);
title(app.P1, 'POTENCIA_1')
xlabel(app.P1, '# Muestra')
ylabel(app.P1, ' P (potencia)')
app.P1.PlotBoxAspectRatio = [1 0.552346570397112 0.552346570397112];
app.P1.FontName = 'Arial Black';
app.P1.FontSize = 11;
app.P1.FontAngle = 'italic';
app.P1.FontWeight = 'bold';
app.P1.Box = 'on';
app.P1.Color = [0 1 0];
app.P1.XGrid = 'on';
app.P1.YGrid = 'on';
app.P1.Position = [339 489 329 207];
% Create P2
app.P2 = uiaxes(app.UIFigure);
title(app.P2, 'POTENCIA_2')
xlabel(app.P2, '# Muestra')
ylabel(app.P2, ' P (potencia)')
app.P2.PlotBoxAspectRatio = [1 0.552346570397112 0.552346570397112];
app.P2.FontName = 'Arial Black';
app.P2.FontSize = 11;
app.P2.FontAngle = 'italic';
app.P2.FontWeight = 'bold';
app.P2.Box = 'on';
app.P2.Color = [0 1 0];
app.P2.XGrid = 'on';
app.P2.YGrid = 'on';
app.P2.Position = [339 276 329 207];
% Create P3
app.P3 = uiaxes(app.UIFigure);
title(app.P3, 'POTENCIA_3')
xlabel(app.P3, '# Muestra')
ylabel(app.P3, ' P (potencia)')
app.P3.PlotBoxAspectRatio = [1 0.552346570397112 0.552346570397112];
app.P3.FontName = 'Arial Black';
app.P3.FontSize = 11;
app.P3.FontAngle = 'italic';
app.P3.FontWeight = 'bold';
app.P3.Box = 'on';
app.P3.Color = [0 1 0];

```

```

app.P3.XGrid = 'on';
app.P3.YGrid = 'on';
app.P3.Position = [339 61 329 207];
% Create LAMP_1LampLabel
app.LAMP_1LampLabel = uilabel(app.UIFigure);
app.LAMP_1LampLabel.HorizontalAlignment = 'right';
app.LAMP_1LampLabel.FontName = 'Bodoni MT';
app.LAMP_1LampLabel.FontSize = 14;
app.LAMP_1LampLabel.FontWeight = 'bold';
app.LAMP_1LampLabel.FontColor = [1 1 1];
app.LAMP_1LampLabel.Position = [1085 649 57 22];
app.LAMP_1LampLabel.Text = 'LAMP_1';
% Create Lamp
app.Lamp = uilamp(app.UIFigure);
app.Lamp.Position = [1157 625 70 70];
app.Lamp.Color = [1 0 0];
% Create LAMP_2Label
app.LAMP_2Label = uilabel(app.UIFigure);
app.LAMP_2Label.HorizontalAlignment = 'right';
app.LAMP_2Label.FontName = 'Bodoni MT';
app.LAMP_2Label.FontSize = 14;
app.LAMP_2Label.FontWeight = 'bold';
app.LAMP_2Label.FontColor = [1 1 1];
app.LAMP_2Label.Position = [1085 436 57 22];
app.LAMP_2Label.Text = 'LAMP_2';
% Create Lamp2
app.Lamp2 = uilamp(app.UIFigure);
app.Lamp2.Position = [1157 412 70 70];
app.Lamp2.Color = [1 0 0];
% Create LAMP_3Label
app.LAMP_3Label = uilabel(app.UIFigure);
app.LAMP_3Label.HorizontalAlignment = 'right';
app.LAMP_3Label.FontName = 'Bodoni MT';
app.LAMP_3Label.FontSize = 14;
app.LAMP_3Label.FontWeight = 'bold';
app.LAMP_3Label.FontColor = [1 1 1];
app.LAMP_3Label.Position = [1086 233 57 22];
app.LAMP_3Label.Text = 'LAMP_3';
% Create Lamp3
app.Lamp3 = uilamp(app.UIFigure);
app.Lamp3.Position = [1158 209 70 70];
app.Lamp3.Color = [1 0 0];
% Create MUESTRASKnobLabel
app.MUESTRASKnobLabel = uilabel(app.UIFigure);
app.MUESTRASKnobLabel.HorizontalAlignment = 'center';

```



```

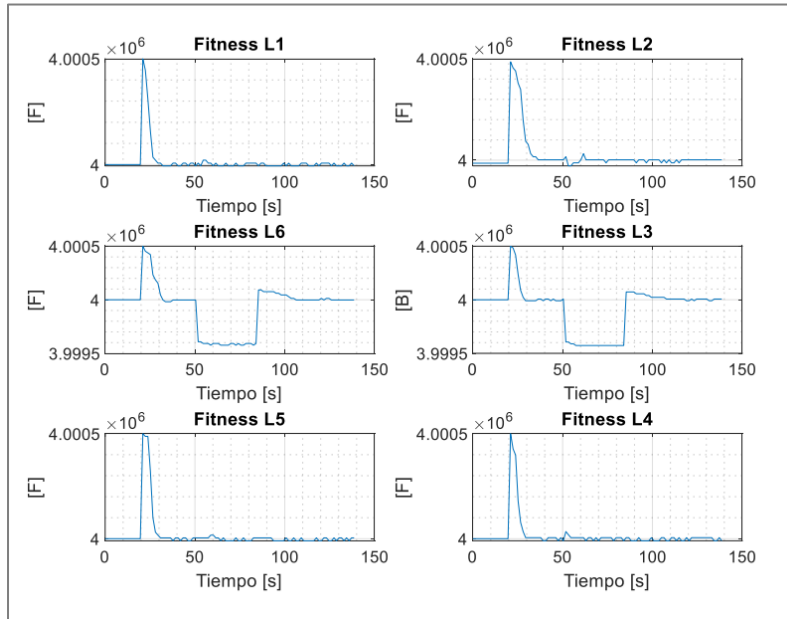
app.MUESTRASKnobLabel.FontSize = 20;
app.MUESTRASKnobLabel.FontWeight = 'bold';
app.MUESTRASKnobLabel.FontColor = [1 1 1];
app.MUESTRASKnobLabel.Position = [1107 20 118 24];
app.MUESTRASKnobLabel.Text = 'MUESTRAS';
% Create muestrasinput
app.muestrasinput = uiknob(app.UIFigure, 'continuous');
app.muestrasinput.Limits = [0 360];
app.muestrasinput.ValueChangingFcn = createCallbackFcn(app,
@muestrasinputValueChanging, true);
app.muestrasinput.FontColor = [0 1 1];
app.muestrasinput.Position = [1136 113 60 60];
% Create Label
app.Label = uilabel(app.UIFigure);
app.Label.HorizontalAlignment = 'right';
app.Label.Position = [944 28 25 22];
app.Label.Text = '';
% Create mues
app.mues = uieditfield(app.UIFigure, 'numeric');
app.mues.HorizontalAlignment = 'center';
app.mues.FontSize = 18;
app.mues.FontWeight = 'bold';
app.mues.Position = [996 15 90 23];
end
end
methods (Access = public)
% Construct app
function app = muestrero_replicadores
% Create and configure components
createComponents(app)
% Register the app with App Designer
registerApp(app, app.UIFigure)
% Execute the startup function
runStartupFcn(app, @startupFcn)
if nargin == 0
clear app
end
end
% Code that executes before app deletion
function delete(app)
% Delete UIFigure when app is deleted
delete(app.UIFigure)
end
end
end
end
end

```

Anexo O. Gráficas de fitness del escenario 1

Figura 64

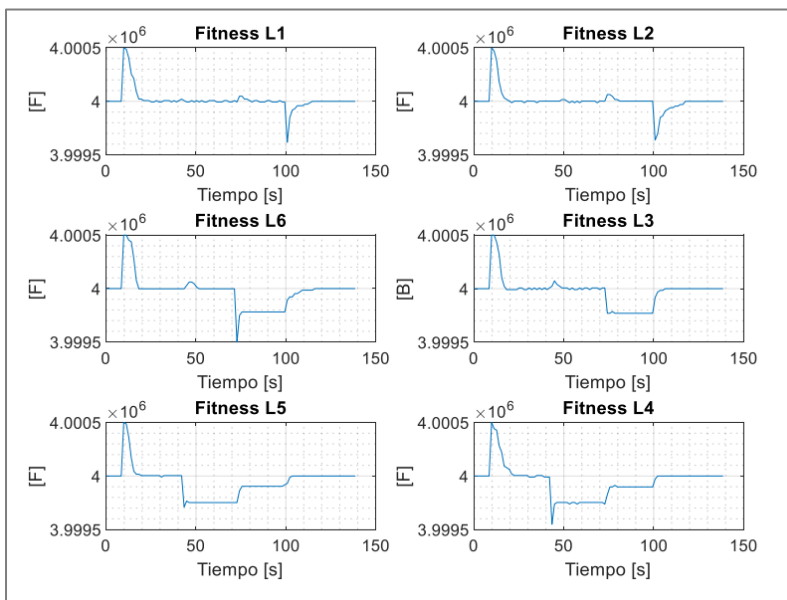
Fitness del escenario 1.



Anexo P. Gráficas de fitness del escenario 2

Figura 65

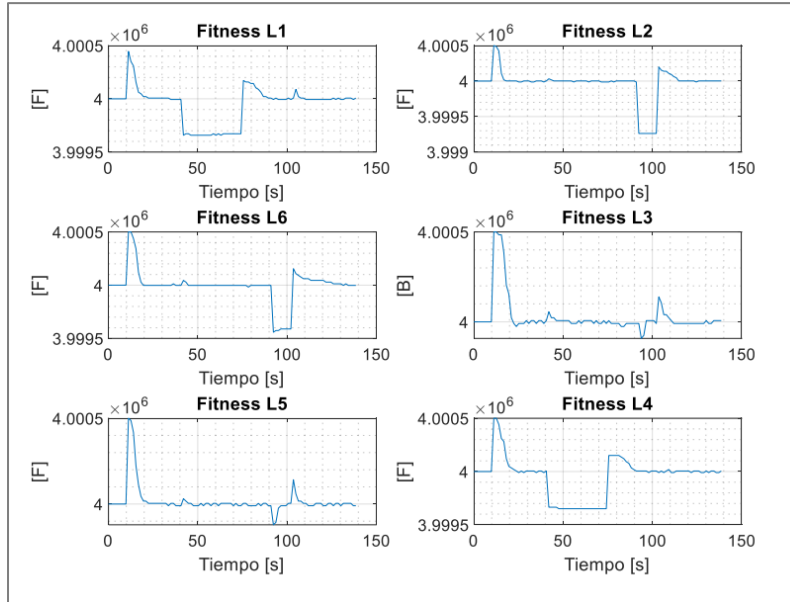
Fitness del escenario 2.



Anexo Q. Gráficas de fitness del escenario 3

Figura 66

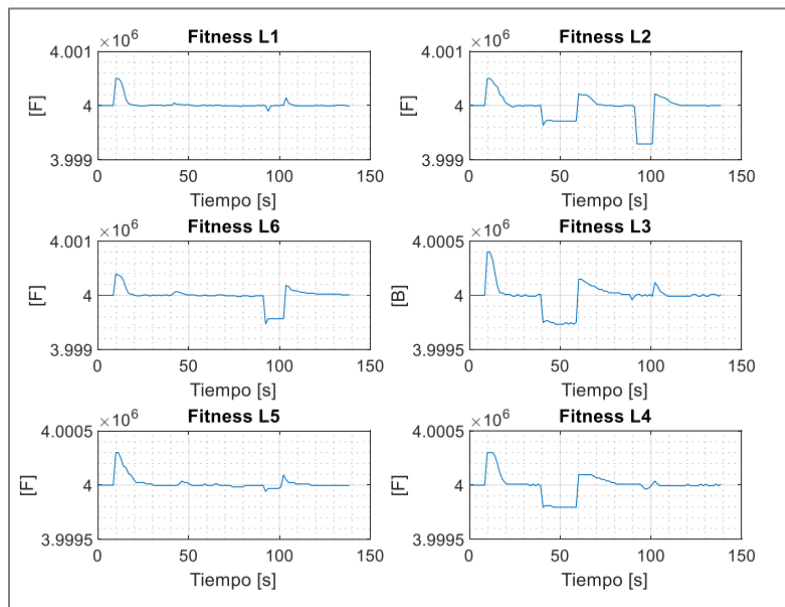
Fitness del escenario 3.



Anexo R. Gráficas de fitness del escenario 4

Figura 67

Fitness del escenario 4.



Anexo S. Código Arduino del controlador PID

```
//          PROYECTO DE GRADO
//          PID
//          JUAN SALAS - JOHAN DIAZ
// lamp 1 (1) = 24:6F:28:9D:05:44 = {0x24, 0x6F, 0x28, 0x9D, 0x05, 0x44}
// lamp 2 (2) = 24:6F:28:9D:A8:24 = {0x24, 0x6F, 0x28, 0x9D, 0xA8, 0x24}
// lamp 3 (3) = 84:0D:8E:E1:E2:7C = {0x84, 0x0D, 0x8E, 0xE1, 0xE2, 0x7C}
// lamp 4 (1) = 24:6F:28:9E:59:9C = {0x24, 0x6F, 0x28, 0x9E, 0x59, 0x9C}
// lamp 5 (2) = 84:CC:A8:5F:83:00 = {0x84, 0xCC, 0xA8, 0x5F, 0x83, 0x00}
// lamp 6 (3) = 24:6F:28:9E:43:B4 = {0x24, 0x6F, 0x28, 0x9E, 0x43, 0xB4}

// librerias
#include <esp_now.h>
#include <WiFi.h>
#include <Wire.h>
#include <BH1750.h>      //lib sensor
#include <math.h>       //lib matematica
BH1750 lightMeter;

//PAQUETE DE DATOS A ENVIAR protocolo espnow
uint8_t broadcastAddress[]={0x2C, 0xF4, 0x32, 0x2E, 0xBC, 0x02};

//-----
int send_val_1; //E
int send_val_2; //ID
int send_val_3; //PR

/////////
float receive_val_1; //POTENCIA
int receive_val_2;  //PLACA
```

```

float pk_1=0;
float kp=0.018253; //kp=0.01253;
float ki=1.1282; //ki=0.11856;
float kd=0.0000708; //kd=0.00061025
float ie=0;
float dt=0.05;

unsigned char dato, s1; // comunicación

float e,ea,de;// e=error, r=referencia, y=salida, kp=constante proporcional, ki=constante integral,
ie=integral del error, dt=timepo de muestreo

int u;//donde se coloca la formula del control PI

//-----

String success;

typedef struct struct_message{ //Estructura para recibir los mensajes
float Ewf; //iluminacion recibida
int id;
int pr; //presencia
} struct_message;

struct_message send_Data; //estructura envio datos
struct_message receive_Data; //estructura recibe datos

//-----

//funcion de devolucion de llamada OnDataSent()

void OnDataSent(const uint8_t* mac_addr,esp_now_send_status_t status){
Serial.println("\r\nEstado del ultimo paquete enviado\t");
Serial.println(status==ESP_NOW_SEND_SUCCESS ? "envio exitoso":"envio fallido");
if(status==0){
success = "exito de entrega";
}else{

```

```

    success = "fallo de entrega";
  }
}
//-----

void OnDataRecv(const uint8_t * mac, const uint8_t *incomingData, int len){
  memcpy(&receive_Data, incomingData, sizeof(receive_Data));
  receive_val_1=receive_Data.Ewf; // potencia pwm
  receive_val_2=receive_Data.id; // id placa correspondiente
  Serial.println(receive_val_1);
  Serial.println(receive_val_2);
}
//-----

const int lampGPIO=13; //pin PWM control
const int comunicacion=14; // inicio comunicaci3n
const int presencia=27; //pin PWM control
const int canalPWM=0; //canal timer pwm
const int frecuencia=1000; // en HZ
const int resolucio=8; //0-255

float Tm=0.05;

int pr=0;

int S=500; // Set point

float L=13.8; // Constante

//L1=13.7 L2=15.1 L3=16.45 L4=14.58 L5=13.8 L6=15.71

void setup(){
//-----

  Serial.begin(115200);//inicio comunicacion serial // muestreo serial

  WiFi.mode(WIFI_STA);//configuracion como estacion WIFI

```

```

    if(esp_now_init() != ESP_OK){ //inicializamos protocolo ESP-now
    Serial.println("XXX_Error de inicializacion del protocolo ESP_NOW");
    return;
    }

//Regitramos a funcion de devolucion de llamada-----
    esp_now_register_send_cb(OnDataSent);// agregar dispositivo del mismo nivel
    esp_now_peer_info_t peerInfo;//para eviar datos a otra placa(el receptor), debe emparejarlo
como un par.
    memcpy(peerInfo.peer_addr,broadcastAddress,6);
    peerInfo.channel=0;
    peerInfo.encrypt=false;
    //agregamos un par
    if(esp_now_add_peer(&peerInfo) != ESP_OK){
        Serial.println("No se pudo agregar el par");
        return;
    }
    esp_now_register_recv_cb(OnDataRecv);

//-----
    ledcSetup(canalPWM,frecuencia,resolucion);//configura la señal pwm
    ledcAttachPin(lampGPIO,canalPWM); // asigna la señal crada al GPIO de eleccion
//inicializa el bus 12c pines_gpio sda=p21 scl=p22-----
    Wire.begin();
    lightMeter.begin();
    pinMode(presencia, INPUT_PULLDOWN);// Pin de Presencia
    pinMode(comunicacion, INPUT_PULLDOWN);// Pin de Acciona Comunicacion
//-----
}

```

```

void loop() {
  while(digitalRead(comunicacion)==HIGH){
//-----
    if(digitalRead(presencia)==HIGH){
      S=500;
      pr=1;
      Serial.println("Hay presencia Lampara ");
    }
    if(digitalRead(presencia)==LOW){
      S=0;
      pr=0;
      Serial.println("Sin presencia Lampara ");
    }
//-----

//lectura del sensor// E ILUMINANCIA =LUX
  int E=lightMeter.readLightLevel();
  E=L*E;
  e = S - E;
  ie = ie + e*dt; //calculo de la integral
  de = (e - ea)/Tm; //calculo de la derivada
  //dt: tiempo de muestreo
  u = kp*e + ki*ie + kd*de;
  ea = e; //guarda el error anterior
  //Considerar la saturacion del actuador
  u = min(u,255); //ciclo util maximo 100% = 255
  u = max(u,0); //ciclo util minimo 0
  ledcWrite(canalPWM,u);

```



```

//-----//
send_val_1=E;
send_val_2=5; // numero de placa
send_val_3=pr;
//send_val_4=u;
send_Data.Ewf=send_val_1;
send_Data.id=send_val_2;// numero de la placa
send_Data.pr=send_val_3;
//-----

Serial.println(u);
Serial.print("ILUMINANCIA Enviada : ");
Serial.println(E);
//-----

esp_err_t result = esp_now_send(broadcastAddress, (uint8_t *) &send_Data,
sizeof(send_Data));
if(result== ESP_OK){
  Serial.println("----envio exitoso----");
  }else{
  Serial.println("----error envio----");
  }
delay(100);
//-----
}
if(digitalRead(comunicacion)==LOW){
  ledcWrite(canalPWM,0);
  }

```

Bibliografía

- Abarca, P. (2019). Sistemas de control automático. *El abc de la automatización sistemas de control automático*. Course Hero. <https://www.coursehero.com/file/40993678/sistemas-de-control-automaticopdf/>
- Arévalo, W. (2020). *Adaptación de un algoritmo de optimización basado en replicadores dinámicos aplicado al control de iluminación de recintos con presencia de individuos* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional De Colombia]. Repositorio institucional, Biblioteca virtual. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/78861/10852543722020.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Beltrán, J., & Merchán, C. (2013). Niveles de iluminación y su relación con los posibles efectos visuales en los empleados de una IPS de Bogotá. *Movimiento Científico*, 7(1), 31–37.
- Chavarría, R. (2018). NTP 242: Ergonomía: análisis ergonómico de los espacios de trabajo en oficinas. https://www.cso.go.cr/legislacion/notas_tecnicas_preventivas_insht/NTP%20242%20-%20Ergonomia%20 analisis%20ergonomico%20de%20los%20espacios%20de%20trabajo%20en%20oficinas.pdf
- Grupo Cigla [Cigla Extreme] (s.f.). *Ojo de Buey OJL1019*. <https://grupocigla.com/producto/ojl1019-ojo-de-buey-3000k-3w-3/>
- Erco. (2018). *Simulación y cálculo - Factor de mantenimiento*. ERCO. <https://www.erco.com/es/guia/simulacion-y-calculo/factor-de-mantenimiento-2713/>

- España, N. (2014). *Diseño e implementación de un controlador distribuido utilizando dinámicas de replicadores*. [Tesis de pregrado, Universidad de Nariño]. Archivo digital.
<http://sired.udenar.edu.co/1836/>
- España, N., & Pantoja, A. (2015). Control de iluminancia multizona basado en la dinámica del replicador. *IEEE 2nd Colombian Conference on Automatic Control, CCAC 2015 - Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/CCAC.2015.7345177>
- Expressif Systems. (2021, December 29). *ESP-NOW: Protocolo de comunicación inalámbrica de Expressif*. <https://www.espressif.com/en/news/ESP-NOW>
- García, J. (2020). *Cálculos en iluminación de interiores*.
<https://recursos.citcea.upc.edu/llum/interior/iluint2.html>
- Guerra, J. (2020). *ESP32 Wifi + Bluetooth*. <https://programarfacil.com/esp8266/esp32/>
- Hernández, S., Fernández, C., Baptista, M. (2014). *Metodología de la investigación*. McGraw-HILL / Interamericana. <https://www.uca.ac.cr/wp-content/uploads/2017/10/Investigacion.pdf>
- Lighthouse Lamp (2013). *Lamp Worktitude for lighth*. <https://www.lamp.es/es>
- Mejía, J. (2014). *Plataforma para el control distribuido de iluminación en edificios inteligentes*. [Tesis de Pregrado, Pontificia Universidad Javeriana]. Archivo digital.
<https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/16443/MejiaRomeroJuanAlberto2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ministerio de Minas y Energía. (2014). Informe de gestión 2014.
http://www.upme.gov.co/Upme12/2014/Informe_UPME_2014.pdf

Ministerio de Minas y Energía. (2017). Reglamento técnico de iluminación y alumbrado público.

Retilap 2017. <https://www.minenergia.gov.co/es/misional/energia-electrica-2/reglamentos-tecnicos/reglamento-t%C3%A9cnico-de-iluminaci%C3%B3n-y-alumbrado-p%C3%BAblico-retilap/>

Ogata, K. (n.d.-b). *Ingeniería de control moderna*. Pearson educación.

https://www.academia.edu/9814191/Ingenieria_de_Control_Moderna_Ogata_5ed

Pantoja, A., & Quijano, N. (2012). Optimización distribuida utilizando dinámica de población con una ecuación de replicador local. *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*.

<https://doi.org/10.1109/CDC.2012.6426277>

Peruffo, A., Pandharipande, A., Caicedo, D., & Schenato, L. (2015). Lighting control with distributed wireless sensing and actuation for daylight and occupancy adaptation. *Energy & Buildings*, 97,

13–20. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.03.049>

Thi, M., Copot, C. & Ionescu, C. (2018). Optimización de enjambre de partículas basadas en PID en el control de iluminación de oficinas. *IFAC-PapersOnLine*, 51(4), 382–387.

<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.06.096>

Rohm. (2011). *Digital 16bit Serial Output Type Ambient Light Sensor IC BH1750FVI*.

www.rohm.com

Universidad Cesmag. (2009). *Áreas y líneas de investigación ingeniería electrónica* (p. 1–9).

 <p>UNIVERSIDAD CESMAG NIT: 800.109.387-7 VIGILADA MINEDUCACIÓN</p>	CARTA DE ENTREGA TRABAJO DE GRADO O TRABAJO DE APLICACIÓN – ASESOR(A)	CÓDIGO: AAC-BL-FR-032
		VERSIÓN: 1
		FECHA: 09/JUN/2022

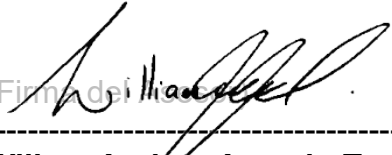
San Juan de Pasto, 24/11/2022

Biblioteca
REMIGIO FIORE FORTEZZA OFM. CAP.
Universidad CESMAG
Pasto


Saludo de paz y bien.

Por medio de la presente se hace entrega del Trabajo de Grado / Trabajo de Aplicación denominado: **ANÁLISIS COMPARATIVO DE EFICIENCIA ENTRE UN SISTEMA DE CONTROL DE ILUMINACIÓN BASADO EN REPLICADORES DINÁMICOS Y CONTROLADOR PID, SENSIBLES A DETECCIÓN DE PRESENCIA APLICADOS A UN MODELO A ESCALA**, presentado por el (los) autor(es): **Juan Camilo Salas Botina**, y **Johan Sebastián Díaz Delgado**, del Programa Académico: **Ingeniería Electrónica** al correo electrónico biblioteca.trabajosdegrado@unicesmag.edu.co. Manifiesto como asesor(a), que su contenido, resumen, anexos y formato PDF cumple con las especificaciones de calidad, guía de presentación de Trabajos de Grado o de Aplicación, establecidos por la Universidad CESMAG, por lo tanto, se solicita el paz y salvo respectivo.

Atentamente,

(Firma del 

William Andrés Arevalo Teran
c.c.1085254372
Ingeniería electrónica
3173008497
waarevalo@unicesmag.edu.co

 UNIVERSIDAD CESMAG NIT: 800.109.387-7 <small>VIGILADA Mineducación</small>	AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE GRADO O TRABAJOS DE APLICACIÓN EN REPOSITORIO INSTITUCIONAL	CÓDIGO: AAC-BL-FR-031
		VERSIÓN: 1
		FECHA: 09/JUN/2022

INFORMACIÓN DEL (LOS) AUTOR(ES)	
Nombres y apellidos del autor: Juan Camilo Salas Botina	Documento de identidad: 1085302694
Correo electrónico: juankamilosalas@hotmail.com	Número de contacto: 3162263539
Nombres y apellidos del autor: Johan Sebastian Diaz Delgado	Documento de identidad: 1085340458
Correo electrónico: jhoandiaz24@gmail.com	Número de contacto: 3042019588
Nombres y apellidos del autor:	Documento de identidad:
Correo electrónico:	Número de contacto:
Nombres y apellidos del autor:	Documento de identidad:
Correo electrónico:	Número de contacto:
Nombres y apellidos del asesor: William Andrés Arévalo Terán	Documento de identidad: 1085254372
Correo electrónico: waarevalo@unicesmag.edu.co	Número de contacto: 3173008497
Título del trabajo de grado: ANÁLISIS COMPARATIVO DE EFICIENCIA ENTRE UN SISTEMA DE CONTROL DE ILUMINACIÓN BASADO EN REPLICADORES DINÁMICOS Y CONTROLADOR PID, SENSIBLES A DETECCIÓN DE PRESENCIA APLICADOS A UN MODELO A ESCALA	
Facultad y Programa Académico: Facultad de Ingeniería – Ingeniería Electrónica	

En mi (nuestra) calidad de autor(es) y/o titular (es) del derecho de autor del Trabajo de Grado o de Aplicación señalado en el encabezado, confiero (conferimos) a la Universidad CESMAG una licencia no exclusiva, limitada y gratuita, para la inclusión del trabajo de grado en el repositorio institucional. Por consiguiente, el alcance de la licencia que se otorga a través del presente documento, abarca las siguientes características:

- a) La autorización se otorga desde la fecha de suscripción del presente documento y durante todo el término en el que el (los) firmante(s) del presente documento conserve (mos) la titularidad de los derechos patrimoniales de autor. En el evento en el que deje (mos) de tener la titularidad de los derechos patrimoniales sobre el Trabajo de Grado o de Aplicación, me (nos) comprometo (comprometemos) a informar de manera inmediata sobre dicha situación a la Universidad CESMAG. Por consiguiente, hasta que no exista comunicación escrita de mi(nuestra) parte informando sobre dicha situación, la Universidad CESMAG se encontrará debidamente habilitada para continuar con la publicación del Trabajo de Grado o de Aplicación dentro del repositorio institucional. Conozco(conocemos) que esta autorización podrá revocarse en cualquier momento, siempre y cuando se eleve la solicitud por escrito para dicho fin ante la Universidad CESMAG. En estos eventos, la Universidad CESMAG cuenta con el plazo de un mes después de recibida la



petición, para desmarcar la visualización del Trabajo de Grado o de Aplicación del repositorio institucional.

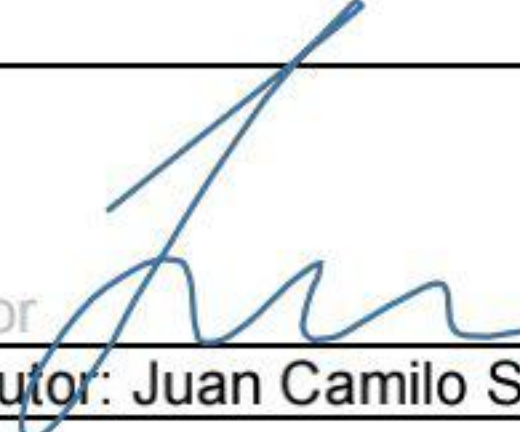
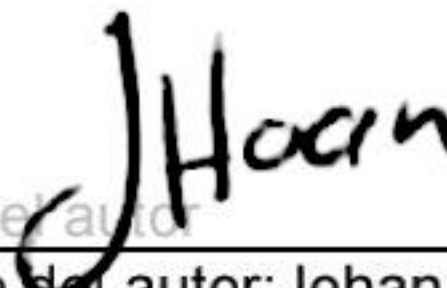
- b) Se autoriza a la Universidad CESMAG para publicar el Trabajo de Grado o de Aplicación en formato digital y teniendo en cuenta que uno de los medios de publicación del repositorio institucional es el internet, acepto(amos) que el Trabajo de Grado o de Aplicación circulará con un alcance mundial.
- c) Acepto (aceptamos) que la autorización que se otorga a través del presente documento se realiza a título gratuito, por lo tanto, renuncio(amos) a recibir emolumento alguno por la publicación, distribución, comunicación pública y/o cualquier otro uso que se haga en los términos de la presente autorización y de la licencia o programa a través del cual sea publicado el Trabajo de grado o de Aplicación.
- d) Manifiesto (manifestamos) que el Trabajo de Grado o de Aplicación es original realizado sin violar o usurpar derechos de autor de terceros y que ostento(amos) los derechos patrimoniales de autor sobre la misma. Por consiguiente, asumo(asumimos) toda la responsabilidad sobre su contenido ante la Universidad CESMAG y frente a terceros, manteniéndose indemne de cualquier reclamación que surja en virtud de la misma. En todo caso, la Universidad CESMAG se compromete a indicar siempre la autoría del escrito incluyendo nombre de(los) autor(es) y la fecha de publicación.
- e) Autorizo(autorizamos) a la Universidad CESMAG para incluir el Trabajo de Grado o de Aplicación en los índices y buscadores que se estimen necesarios para promover su difusión. Así mismo autorizo (autorizamos) a la Universidad CESMAG para que pueda convertir el documento a cualquier medio o formato para propósitos de preservación digital.

NOTA: En los eventos en los que el trabajo de grado o de aplicación haya sido trabajado con el apoyo o patrocinio de una agencia, organización o cualquier otra entidad diferente a la Universidad CESMAG. Como autor(es) garantizo(amos) que he(hemos) cumplido con los derechos y obligaciones asumidos con dicha entidad y como consecuencia de ello dejo(dejamos) constancia que la autorización que se concede a través del presente escrito no interfiere ni transgrede derechos de terceros.

Como consecuencia de lo anterior, autorizo(autorizamos) la publicación, difusión, consulta y uso del Trabajo de Grado o de Aplicación por parte de la Universidad CESMAG y sus usuarios así:

- Permiso(permitimos) que mi(nuestro) Trabajo de Grado o de Aplicación haga parte del catálogo de colección del repositorio digital de la Universidad CESMAG, por lo tanto, su contenido será de acceso abierto donde podrá ser consultado, descargado y compartido con otras personas, siempre que se reconozca su autoría o reconocimiento con fines no comerciales.

En señal de conformidad, se suscribe este documento en San Juan de Pasto a los_24_días del mes de noviembre del año 2022

	
Firma del autor	Firma del autor
Nombre del autor: Juan Camilo Salas	Nombre del autor: Johan Sebastian Diaz Delgado
Firma del autor	Firma del autor
Nombre del autor:	Nombre del autor:



UNIVERSIDAD
CESMAG

NIT: 800.109.387-7
VIGILADA MINEDUCACIÓN

**AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE
GRADO O TRABAJOS DE APLICACIÓN EN
REPOSITORIO INSTITUCIONAL**

CÓDIGO: AAC-BL-FR-031

VERSIÓN: 1

FECHA: 09/JUN/2022

Firma del asesor

Nombre del asesor: William Andrés Arévalo Terán