



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®

Instituto Tecnológico de Ciudad Guzmán



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CD. GUZMÁN

TESIS

MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

TEMA:

**DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN
SISTEMA PROACTIVO DE ILUMINACIÓN**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN**

PRESENTA:

**LIC. ROSARIO DE LA LUZ CANTERO
RAMÍREZ**

DIRECTORES:

**DR. MARCO ANTONIO MEZA AGUILAR
DR. ANSEL Y. RODRÍGUEZ GONZÁLEZ**

CD. GUZMÁN JALISCO, MÉXICO, AGOSTO DE 2022

Ciudad Guzmán, Jalisco, **15/agosto/2022**
Asunto: Autorización de impresión de Tesis

ROSARIO DE LA LUZ CANTERO RAMÍREZ
CANDIDATA AL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN
PRESENTE

De acuerdo con los Lineamientos para la Operación de los Estudios de Posgrado en el Tecnológico Nacional de México y las disposiciones en este Instituto, habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora realizó con respecto a su Trabajo de Tesis titulado "**Desarrollo e implementación de un sistema proactivo de iluminación**", la División de Estudios de Posgrado e Investigación de este Instituto, concede la Autorización para que proceda a la impresión del mismo.

Sin otro particular, quedo de Usted.

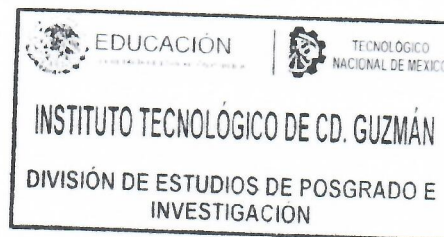
ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica

"2022, AÑO DEL CINCUENTA ANIVERSARIO DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CIUDAD GUZMÁN"



MARÍA GUADALUPE SÁNCHEZ CERVANTES
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN



ccp. Archivo
MGSC/megg



<https://cdguzman.tecnm.mx/sgcicg/>

Av. Tecnológico #100 C.P. 49100 Ciudad Guzmán, Jal. Tel. (341) 5752050
tecnm.mx | cdguzman.tecnm.mx



Resumen

El desperdicio de energía eléctrica utilizada en iluminación, provocado por el control manual deficiente de las luminarias, es un problema que no solo afecta en el aspecto económico, afecta además al consumidor, aunque es un problema estudiado al rededor del mundo, en México se ha tratado poco. El presente trabajo de tesis tiene como objetivo desarrollar e implementar un sistema de iluminación modular y escalable que aprenda de su entorno y proporcione iluminación adecuada de forma proactiva, sin disminuir el confort de los consumidores. Para ello se diseñó, implementó y probó un sistema de iluminación, con dos tipos de control: manual e inteligente. El control Manual permite que el usuario manipule las luminarias directamente. En el caso del control inteligente, se utilizó el aprendizaje por refuerzo, mediante las características del entorno: presencia, luminosidad, día, hora y flujo. Mediante el uso de agentes que aprendan por medio del algoritmo QLearning, se selecciona una acción (prender, mantener o apagar) de acuerdo al conocimiento adquirido del entorno. El aprendizaje es reforzado mediante recompensas proporcionadas por el usuario. El sistema fue probado en una vivienda durante una semana, con la participación de cinco usuarios con diferentes edades y pertenecientes a una familia. El consumo eléctrico total del sistema con control inteligente fue de 41Wh. La comodidad del usuario al implementar este tipo de sistema fue calificada como buena, logrando ofrecer un buen desempeño y una iluminación adecuada para el desarrollo de las diversas actividades en cada habitación. De acuerdo a los resultados encontrados, el desempeño del sistema puede mejorar aumentando las interacciones con el usuario.

Palabras clave: Sistema de iluminación inteligente, Aprendizaje por refuerzo, QLearning.

Índice

1. Capítulo 1. Introducción	11
1.1. Motivación	11
1.2. Antecedentes	13
1.3. Planteamiento del problema	13
1.4. Justificación	14
1.5. Objetivos de la investigación	15
1.5.1. Objetivo general	15
1.5.2. Objetivos específicos	15
1.6. Hipotesis	15
1.7. Metodología	15
1.8. Organización de la tesis	17
2. Capítulo 2. Fundamento teórico y trabajo relacionado	18
2.1. Marco teórico	18
2.1.1. Iluminación	18
2.1.2. Sistema de iluminación	19
2.1.3. Métodos de aprendizaje	24
2.1.4. Comunicación entre dispositivos conectados a internet	28
2.2. Trabajo relacionado	29
2.2.1. Revisión de literatura	29
2.2.2. Productos similares en el mercado	31
3. Capítulo 3. Arquitectura de hardware propuesta	34
3.1. Componentes electrónicos	35
3.1.1. Tarjetas electrónicas	35
3.1.2. Sensores	37
3.2. Diseño electrónico	39
3.2.1. Módulo de Iluminación/Sensado (MIS)	39
3.2.2. Módulo Sensado (MS)	41
3.2.3. Módulo Manual (MM)	42
3.2.4. Módulo de Recompensa (MR)	43
3.2.5. Módulo de Control (MC)	45
3.3. Diseño carcasas	46
3.3.1. Módulo de Iluminación/Sensado	47
3.3.2. Módulo Sensado	48

3.3.3. Módulo Manual	49
3.3.4. Módulo de Recompensa	50
3.3.5. Módulo de Control	51
3.4. Síntesis y conclusiones del capítulo	52
4. Capítulo 4. Arquitectura de software propuesta	53
4.1. Diseño del sistema	53
4.1.1. Sistema con control manual	53
4.1.2. Sistema con control Inteligente	55
4.2. Comunicación	56
4.2.1. Protocolo MQTT	56
4.2.2. Diseño arquitectura de comunicación	58
4.3. Almacenamiento de datos	60
4.3.1. Diseño de base de datos para la información recopilada por el sistema.	61
4.4. Arquitectura software	62
4.4.1. Módulo de Iluminación/Sensado	62
4.4.2. Módulo de Sensado	65
4.4.3. Módulo Manual	66
4.4.4. Módulo de Recompensa	68
4.4.5. Módulo de Control	70
4.5. Aprendizaje	72
4.5.1. Diseño del algoritmo	72
4.6. Síntesis y conclusiones del capítulo	77
5. Capítulo 5. Resultados generales	79
5.1. Discusión general	79
5.1.1. Costo componentes	79
5.1.2. Sistema de iluminación desarrollado	82
5.2. Resultados experimentales	85
5.2.1. Pruebas de laboratorio	85
5.2.2. Pruebas de campo	90
5.3. Consumo y desempeño del sistema	98
5.4. Síntesis y conclusiones del capítulo	102
6. Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones	105
6.1. Conclusiones	105
6.2. Limitaciones observadas	107
6.3. Contribuciones	107

6.4. Trabajo futuro y recomendaciones	108
7. Anexos	110
7.1. Anexo A: Cuestionario de consumo y desempeño del sistema realizado al usuario	110
7.2. Anexo B: Productos obtenidos	111
.	

Índice de figuras

1.	Tipos de lámparas.	19
2.	Interacción del Agente con el medio ambiente.	23
3.	Funcionamiento general del sistema.	34
4.	Intercambio de información entre habitación y módulo central.	34
5.	Raspberry pi 4B.	35
6.	NodemCU v3.	36
7.	Sensor de Presencia PIR.	37
8.	Sensor de Presencia Ultrasónico HC-SR04.	38
9.	Sensor de Luminosidad.	38
10.	Sensor de Corriente SCT013-030.	39
11.	Módulo de Iluminación/Sensado.	39
12.	Diseño esquemático del Módulo de Iluminación/Sensado.	40
13.	Módulo de Sensado.	41
14.	Diseño esquemático del Módulo de Sensado.	42
15.	Módulo Manual.	42
16.	Diseño esquemático del Módulo Manual.	43
17.	Módulo recompensa.	44
18.	Diseño esquemático del Módulo de Recompensa.	44
19.	Módulo de Control.	45
20.	Diseño esquemático del Módulo de Control.	46
21.	Diseño de carcasa para el Módulo de Iluminación/Sensado.	47
22.	Diseño de carcasa para el Módulo de Sensado.	48
23.	Diseño de carcasa para el Módulo Manual.	49
24.	Diseño de carcasa para el Módulo de Recompensa.	50
25.	Diseño de carcasa para el Módulo de Control.	51
26.	Módulos que integran el sistema de acuerdo al tipo de control.	53
27.	Ilustración de funcionalidad del sistema con control manual.	54
28.	Ilustración de funcionalidad del sistema con control inteligente.	55
29.	El modelo de publicación y suscripción de MQTT.	57
30.	Intercambio de paquetes entre el broker y los clientes conectados.	57
31.	Arquitectura de comunicación del sistema.	58
32.	Comunicación cliente-servidor.	59
33.	Ejemplo de tópicos en MQTT.	59
34.	Suscripción MQTT a tópico presencia.	60

35.	Diagrama de clases de la base de datos.	61
36.	Diagrama de clases del Módulo de Iluminación/Sensado.	63
37.	Diagrama de clases del Módulo de Sensado.	65
38.	Diagrama de clases del Módulo Manual.	67
39.	Diagrama de clases del Módulo de Recompensa.	69
40.	Ilustración de componentes internos del Módulo de Control.	70
41.	Estado habitación.	74
42.	Diagrama de flujo del algoritmo inteligente diseñado.	76
43.	Módulos finales ensamblados.	83
44.	Sistema de iluminación con control manual.	83
45.	Módulos que integran el sistema con control inteligente.	84
46.	Ilustración del proceso de limpieza del dato de presencia.	87
47.	Módulo de Sensado soldado.	87
48.	Tópicos de publicación por cada componente del sistema.	88
49.	Estructura básica del mensaje compartido en la red.	89
50.	Habitaciones utilizadas durante el periodo de prueba del sistema.	90
51.	Módulos instalados por habitación.	91
52.	Módulos instalados por habitación para el sistema con control inteligente.	92
53.	Evaluación de los niveles de iluminación proporcionados por el sistema en sus diferentes pruebas.	99
54.	Evaluación del nivel de desempeño dle sistemade acuerdo al usuario, en las diferentes pruebas.	100
55.	Evaluación del timplep de reacción del sistema en sus diferentes pruebas.	100
56.	Fallas del sistema detectadas por el usuario en sus diferentes pruebas.	101
57.	Nivel de comodidad del usuario al utilizar el sistema en sus diferentes pruebas.	102

Índice de tablas

1.	Nivel promedio mínimo de iluminancia en luxes.	12
2.	Clasificación de bluetooth por clases.	28
3.	Descripción de los estándares 802.11.	28
4.	Principales características de Raspberry Pi 4B (Rus, 2019).	36
5.	Principales características de NodemCU v3.	37
6.	Componentes principales del Módulo de Iluminación/Sensado.	40
7.	Componentes principales del Módulo de Sensado.	41
8.	Componentes principales del Módulo Manual.	43
9.	Componentes principales del Módulo de Recompensa.	45
10.	Componentes principales del Módulo de Control.	46
11.	Dimensiones de algunos componentes del Módulo de Iluminación/Sensado.	47
12.	Dimensiones de algunos componentes del Módulo de Sensado.	48
13.	Dimensiones de algunos componentes del Módulo Manual.	49
14.	Dimensiones de algunos componentes del Módulo de Recompensa.	50
15.	Dimensiones de algunos componentes del Módulo de Control.	51
16.	Ejemplo de datos almacenados en tabla Datos.	71
17.	Ejemplo del reporte de consumo de corriente generado por el sistema.	71
18.	Rangos de horas utilizado en el estado.	73
19.	Costo de los componentes del Módulo de Iluminación/Sensado.	80
20.	Costo de los componentes del Módulo de Sensado.	80
21.	Costo de los componentes del Módulo Manual.	81
22.	Costo de los componentes del Módulo de Recompensa.	82
23.	Costo de los componentes del Módulo de Control.	82
24.	Características de los usuarios participantes en las pruebas del sistema.	90
25.	Consumo eléctrico por cada módulo del sistema con control manual.	91
26.	Consumo eléctrico por cada módulo del sistema con control inteligente (aprendizaje).	93
27.	Valores Q obtenidos de la habitación 1 durante la etapa de aprendizaje del sistema.	94
28.	Consumo eléctrico por cada módulo del sistema con control inteligente (funcional).	96
29.	Valores Q obtenidos de la habitación 2 durante la etapa de aprendizaje del sistema.	97
30.	Promedio de consumo eléctrico al día por prueba y módulo.	98

1. Capítulo 1. Introducción

El desperdicio de energía eléctrica en iluminación es un problema creciente en México, de acuerdo a la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONNUE) (Lorentzen and McNeil, 2019), se estima que en 2017 el consumo de energía eléctrica en el sector de edificios comerciales y públicos es del 9% de la demanda de electricidad de México. La iluminación proporcionada por el sistema eléctrico, ayuda a mantener el confort del usuario permitiéndole realizar un mejor desarrollo de sus actividades. En conjuntos de oficinas, donde de acuerdo de acuerdo a la ley federal del trabajo, una persona pasa un promedio de 48 horas a la semana trabajando, el consumo eléctrico utilizado en iluminación artificial puede reducirse mejorando el control de las luminarias.

El consumo de energía eléctrica depende de varios factores, entre ellos el tipo de edificio y el clima. De acuerdo con (Morillón D. and Kerdan, 2015), se estima que el consumo de energía eléctrica empleada en iluminación en oficinas, dentro de una zona con clima cálido subhúmedo como el de Jalisco, es del 30% del total de energía consumida en el edificio. Con el desarrollo de nuevas tecnologías se han propuesto algunas soluciones para el desperdicio de energía en iluminación, siendo las redes inalámbricas y los sensores algunos de los principales componentes.

Los sistemas automatizados para el control de edificios han reportado buenos resultados en cuanto a la reducción del uso de energía eléctrica en iluminación. El uso de lámparas tipo LED, la programación de encendido o apagado de luminarias, el control domótico de las mismas o el uso de sensores para controlar el sistema de iluminación en el interior de edificios, son solo algunas de las soluciones propuestas para abordar este problema. Para implementar cualquiera de estas soluciones es necesario contar con una gran inversión inicial para acondicionar el sistema de iluminación, y con ello reducir el desperdicio de energía eléctrica utilizada en iluminación.

1.1. Motivación

De acuerdo con (Caminos, 2011) un alumbrado eficaz, debe acentuar las cualidades y carácter confortable de un ambiente, el cual pueda ofrecer comodidad evitando la fatiga, en especial en oficinas e industrias donde se estima que las personas pasan más del 70% de su vida activa, ya sea desarrollando trabajos creativos o productivos. Para ofrecer un buen confort a los trabajadores la Secretaría del Trabajo y Prevención Social creó la norma NOM-025-STPS-2008, la cual establece que: el nivel de iluminación en las áreas de los centros de trabajo con la finalidad de ofrecer un ambiente saludable y seguro al trabajador. Esta norma presenta el nivel promedio mínimo de iluminación en luxes (unidad de medida establecida por el Sistema Internacional de Unidades) como parámetro principal. A continuación, se muestran algunos de ellos en la Tabla 1.

A través de los años la demanda de electricidad ha ido en aumento, de acuerdo a los datos recopilados en (SENER, 2016) se estima que el consumo de electricidad aumentará 1.8% por año entre 2015

Tarea Visual del Puesto de Trabajo	Área de Trabajo	Niveles Mínimos de Iluminación (luxes)
En interiores: distinguir el área de tránsito, desplazarse caminando, vigilancia, movimiento de vehículos.	Interiores generales: almacenes de poco movimiento, pasillos, escaleras, estacionamientos cubiertos, labores en minas subterráneas, iluminación de emergencia.	50
En interiores.	Áreas de circulación y pasillos, salas de espera, salas de descanso, cuartos de almacén, plataformas, cuartos de calderas.	100
Requerimiento visual simple: inspección visual, recuento de piezas, trabajo en banco y máquina.	Servicios al personal: almacenaje rudo, recepción y despacho, casetas de vigilancia, cuartos de compresores y pailería.	200
Distinción moderada de detalles: ensamble simple, trabajo medio en banco y máquina, inspección simple, empaque y trabajos de oficina.	Talleres: áreas de empaque y ensamble, aulas y oficinas.	300
Distinción clara de detalles: maquinado y acabados delicados, ensamble de inspección moderadamente difícil, captura y procesamiento de información, manejo de instrumentos y equipo de laboratorio.	Talleres de precisión: salas de cómputo, áreas de dibujo, laboratorios.	500

Tabla 1: Nivel promedio mínimo de iluminancia en luxes.

y 2050. Con el desarrollo tecnológico en los últimos años se busca mejorar y reducir dicho consumo, de acuerdo con la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía en (SEGOB, 2020) la tecnología que se desarrolla en el sector “Cocinas, electrodomésticos e iluminación” tiene un grado de madurez alto, su costo es bajo, sin embargo, su nivel de uso es medio comparado con el alto grado a nivel global.

El uso de la tecnología para disminuir la energía eléctrica consumida en edificios nos ofrece un amplio abanico de posibilidades, desde sistemas programados de acuerdo al flujo y horarios de los usuarios, así como sistemas reactivos que permiten que el sistema reaccione a una estimulación externa para realizar acciones sobre las luminarias e incluso sistemas que permiten tener un control domótico de las mismas para una mejor experiencia. La presente tesis busca brindar una solución más independiente del usuario, esta solución será capaz de aprender de su entorno de acuerdo al conocimiento adquirido durante la interacción directa con el mismo.

Este sistema utilizará sensores para conocer lo que sucede a su alrededor y así poder tomar decisiones, las luminarias serán controladas por el propio sistema, el cual recibirá recompensas del usuario que le permitirán seguir mejorando. El aprendizaje continuo del sistema ofrecerá la posibilidad de tener un

mejor desempeño comparado con el sistema tradicional, aportando al ahorro de energía empleada en iluminación.

1.2. Antecedentes

Una buena iluminación es una parte esencial para poder tener un mejor desempeño laboral, tiene la potencialidad de modificar no solamente el estado de operación del sistema visual, sino también de afectar la manera en que el ser humano realiza una tarea o se desenvuelve en un medio ambiente luminoso (Talero Laiton, 2016). Sin embargo, existe un desperdicio de energía eléctrica derivado de los malos hábitos de uso y consumo del sistema de iluminación.

De acuerdo con (Lorentzen and McNeil, 2019), los edificios residenciales y no residenciales son considerados como el sector de mayor intensidad eléctrica, superando incluso el consumo de la industria. En (Serrano, 2016) se señala que el 40 % del total de las facturas de electricidad de una empresa se deben a la iluminación. Según datos de la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía se estima que mejorar las prácticas en el diseño de la envolvente y la iluminación pueden ahorrar, al menos, 40 % del uso total de energía de un edificio, en cambio se estima que las malas prácticas lo pueden aumentar 90 % (Buen, 2013).

Éste desperdicio ocurre incluso en casos donde el control se realiza automáticamente, es común que los sistemas estén pre programados para realizar acciones en horarios definidos o de forma reactiva ante la detección de movimiento o de niveles bajos de iluminación. Esto último puede provocar por un lado el desperdicio de energía eléctrica y por otro una experiencia no deseada en los usuarios.

Algunos de los factores que influyen en el consumo de energía de los sistemas de iluminación son: la eficiencia energética de los componentes, la instalación y el mantenimiento (de Fuerza y Luz, sf). Sin embargo, para mejorar el sistema de iluminación se requiere de una gran inversión inicial y su funcionamiento depende en gran medida de las reacciones de los usuarios ante el mismo (Assaf and Pereira, 2003).

1.3. Planteamiento del problema

Uno de los sistemas de iluminación más utilizados en México en la actualidad es el sistema tradicional, aunque alrededor del mundo el desarrollo e implementación de sistemas de iluminación con un control más avanzado es más utilizado, por ejemplo, los sistemas inteligentes. El avance en el desarrollo de sistemas más autónomos en el país ha crecido constantemente, ofreciendo la posibilidad de tener un mejor control de las luminarias con el uso de la tecnología. De acuerdo con las características del sistema que se desee implementar la inversión inicial cambiará, sin embargo, como se mencionaba anteriormente el consumo de energía eléctrica utilizada en iluminación depende de los componentes del sistema, el uso de la instalación y su mantenimiento. Con esto en mente, la inversión inicial para la instalación de un sistema de iluminación con un control más autónomo no sería tan grande, conside-

rando que una de las ventajas de tener un mejor control de las luminarias es la reducción en la tarifa de electricidad.

El sistema tradicional cuenta, con un control manual, es decir, el sistema depende de las decisiones humanas para su funcionamiento lo cual puede llevar al desperdicio de energía eléctrica. Esta situación puede darse en diversos lugares como escuelas, oficinas, o incluso en nuestros hogares. Este trabajo de investigación se centra en ofrecer una solución a la problemática del desperdicio de energía eléctrica en conjuntos de oficinas derivado del control manual deficiente del sistema de iluminación.

Soluciones como la preprogramación de los hábitos cotidianos del consumidor relacionados con la iluminación o la manipulación del sistema a través de una aplicación móvil han buscado disminuir el desperdicio, sin embargo, este tipo de sistemas siguen siendo deficientes pues al pre-programar un sistema su nula tolerancia a cambios provoca que ante cualquier alteración en dichos hábitos el sistema sea incapaz de reaccionar adecuadamente, lo cual deriva en el desperdicio de energía o en una mala experiencia del consumidor.

Es por ello que el diseño de un sistema de control que sea capaz de reaccionar adecuadamente a los cambios en su entorno ayudará a mejorar el funcionamiento del sistema de iluminación. El control del sistema debe ser autónomo y lo más apegado a la realidad posible, por lo cual, el uso de agentes inteligentes que sean capaces de aprender de lo que sucede en su ambiente proporcionará resultados más fiables y un menor desperdicio de energía sin afectar el confort de los consumidores.

Este problema ha sido estudiado alrededor del mundo, sin embargo, poco tratado en México, por lo cual este trabajo se enfoca en diseñar e implementar un sistema de iluminación proactivo capaz de aprender de su entorno con materiales de bajo costo y con una mayor independencia del usuario que permita ofrecer una solución a este problema.

1.4. Justificación

En los estudios desde las ciencias de la computación los sistemas de iluminación han sido un tema recurrente, se han buscado soluciones que permitan automatizarlos buscando una reducción de gastos y desperdicio de energía por parte del consumidor, así mismo tratan de brindar experiencias satisfactorias, fáciles de usar y que no representen mayores dificultades. En este sentido, la presente investigación sobre sistemas proactivos de iluminación busca brindar una solución al problema del desperdicio de energía eléctrica en conjuntos de oficinas ocasionado por un control manual deficiente, resultando relevante socialmente al apostar por un mayor ahorro del consumo de energía en comparación con el sistema de iluminación tradicional, implicando una trascendencia igualmente en el ámbito ecológico al evitar justamente el desperdicio y optimizar la iluminación impactando en cuestiones económicas al reducir el costo de los servicios eléctricos.

Así mismo, se apuesta por atender la necesidad de proponer nuevos sistemas proactivos de iluminación que sean modulares y escalables, con materiales económicos que ayuden a disminuir su costo inicial

y que puedan ser empleados en espacios comunes, siendo de interés particular en esta investigación las habitaciones dentro de una casa donde el consumidor no requiera de mayor capacitación para su uso. De esta forma el presente estudio contribuirá a fortalecer el diseño y programación de un sistema proactivo de iluminación, sobre el cual se puedan obtener datos empíricos de su funcionamiento y de la satisfacción del consumidor.

1.5. Objetivos de la investigación

1.5.1. Objetivo general

Desarrollar e implementar un sistema de iluminación modular y escalable que aprenda de su entorno y proporcione iluminación adecuada de forma proactiva sin disminuir el confort de los consumidores.

1.5.2. Objetivos específicos

- Diseñar una arquitectura modular y escalable de un sistema proactivo de iluminación.
- Diseñar e implementar un prototipo de un módulo básico de Iluminación/Sensado replicable.
- Diseñar e implementar un prototipo de módulo de control inteligente.
- Desarrollar un algoritmo de aprendizaje del comportamiento de las personas y predicción de movimiento.
- Integrar todos los componentes del sistema proactivo de iluminación.
- Evaluar el desempeño del sistema y el nivel de confort del usuario al emplearlo.

1.6. Hipotesis

Con el uso de un sistema proactivo de iluminación se disminuirá el desperdicio de energía eléctrica, manteniendo el confort de los consumidores.

1.7. Metodología

En este trabajo de tesis se propone como solución un sistema de control inteligente que actúe de forma proactiva aprendiendo de su entorno para la mejor toma de decisiones, lo cual permita que la iluminación se adapte al entorno y el sistema mejore conforme las interacciones aumenten. Para su desarrollo se inicia con la fase de diseño, donde se eligen los componentes que se utilizan para la creación de cada elemento que integra el sistema. Así mismo, se muestra el diseño del software utilizado en el sistema de iluminación, con el cual se obtienen los datos necesarios para que el sistema aprenda.

Este sistema se ha dotado con un algoritmo inteligente, el cual según los datos obtenidos permite tomar decisiones para el control de luminarias, el cual irá mejorando conforme vaya aprendiendo

del entorno que lo rodea. Las pruebas realizadas en el entorno permitirán que el sistema mejore sus decisiones, de acuerdo a la experiencia adquirida durante las pruebas lo cual se reflejara en sus decisiones proporcionando una iluminación adecuada para el consumidor sin disminuir el confort.

Para el cumplimiento del objetivo planteado y el desarrollo del proyecto, se realizará un análisis experimental siguiendo una metodología que ha sido dividida para una mejor comprensión.

La primera fase consiste en la consulta y el análisis de varios documentos con el fin de conocer más sobre el área y sus avances, además se consultará los productos que actualmente existen en el mercado, así como los productos desarrollados en esta área como parte de investigaciones. Para la selección de los documentos y productos que serán analizados, se hará énfasis en aquellas soluciones propuestas para conjuntos de oficinas. Una vez realizado el análisis de la información recopilada en el paso anterior, se iniciará la segunda etapa la cual consistirá en el diseño del sistema. El sistema propuesto en este proyecto está conformado por diferentes tipos de módulos:

- Módulo de Iluminación/Sensado.
- Módulo de Control.
- Módulo de Sensado.
- Módulo Manual.

Se creará el diseño esquemático para cada uno de estos módulos, podrán ser replicados de acuerdo a las necesidades del lugar de prueba. Se diseñará además una carcasa protectora de acuerdo a las características de los módulos para mantener seguros sus componentes.

En la tercera fase se trabaja con la programación de los módulos, por medio de la programación orientada a objetos se crearán diversos programas para cada tipo de módulo, de acuerdo a los componentes del módulo se seleccionarán las partes de código necesario para formar los módulos. Se montarán dichos módulos de acuerdo al esquema eléctrico diseñado anteriormente y se procederá a cargar el programa para realizar pruebas de laboratorio que ayuden a verificar el correcto funcionamiento de cada uno de ellos.

La cuarta fase consiste en la configuración de la comunicación. Con un diseño de red que permita que los módulos mantengan una comunicación constante y estable con el Módulo de Control. Mediante las pruebas de laboratorio se podrán detectar fallos o inconsistencias en los paquetes intercambiados en el sistema. La información intercambiada en el sistema se almacenará en una base de datos a la cual se podrá acceder posteriormente por el algoritmo inteligente.

El diseño y codificación del algoritmo inteligente es la quinta fase. Éste algoritmo le permitirá al módulo ser capaz de percibir el entorno y los cambios que suceden en éste, haciéndolo capaz de reaccionar y reajustar sus acciones sobre los cambios percibidos. Para ello se hará una revisión y análisis de los métodos de aprendizaje existentes para poder comenzar con el diseño del algoritmo que le permita aprender de su entorno.

La última fase consiste en la integración del sistema y su evaluación. Los módulos se integran al sistema y se realizan pruebas de laboratorio para detectar y corregir errores. Con la integración del algoritmo inteligente será necesario entrenar el sistema para mejorar los resultados, por medio de recompensas el sistema mejora su comportamiento, por lo cual es necesario contar con la interacción del entorno y el sistema para que éste aprenda. Es posible que el resultado final demuestre que el algoritmo diseñado no es correcto y sea necesario hacer cambios en el diseño. Al finalizar se realizan pruebas de campo y se analiza el comportamiento del sistema, lo permite detectar debilidades que no se pudieron detectar con las pruebas anteriores. Como parte de la evaluación del sistema se implementa una encuesta a los usuarios para conocer más sobre su experiencia e interacción con el mismo, además de conocer su nivel de confort con el sistema con control manual y el sistema con control inteligente diseñado.

1.8. Organización de la tesis

El documento se organiza de la siguiente manera:

El capítulo 2, presenta el fundamento teórico encontrado relacionado con el concepto de iluminación, sistema de iluminación y aprendizaje automático. Se muestra, además, algunos de los productos similares que se pueden encontrar en el mercado actual y una breve descripción de su funcionamiento. Se aborda el estado del arte con antecedentes relacionados a los sistemas de iluminación.

El capítulo 3, presenta la arquitectura del sistema propuesto con una breve descripción de su funcionamiento y componentes. Ofrece un panorama general del funcionamiento del sistema completo.

El capítulo 4, aborda el diseño del hardware propuesto para cada uno de los módulos que lo componen, se ofrece una breve descripción de cada uno de ellos.

En el capítulo 5, se describe el software propuesto para el sistema, se describe el protocolo de comunicación que se utilizará, así como la arquitectura a emplear. Se menciona, además, el funcionamiento de los módulos del sistema y se describe el proceso de almacenamiento de los datos recopilados por el sistema, así como su aprendizaje.

En el capítulo 6, muestra los resultados obtenidos a través de las pruebas de laboratorio y las pruebas de campo realizadas con el sistema, así como la discusión de los mismos.

Finalmente, el Capítulo 7, presenta las conclusiones de este trabajo de investigación, las limitaciones que se encontraron en el proceso, así como las contribuciones del mismo. Se ofrecen algunas recomendaciones para el trabajo a futuro y se muestran algunos trabajos que se realizaron durante el desarrollo de esta investigación.

2. Capítulo 2. Fundamento teorico y trabajo relacionado

2.1. Marco teórico

El sistema de iluminación proactivo se compone de varios elementos (lógicos y físicos), a continuación se hace una descripción de los conceptos que se utilizarán durante el desarrollo de esta tesis.

2.1.1. Iluminación

La iluminancia o nivel de iluminación es un término que describe la medición de la cantidad de luz cayendo (iluminando) y expandiéndose en una superficie determinada, también es relacionada en cómo las personas perciben el brillo de un área iluminada. Su unidad de medida es el Lux

$$E = \frac{\phi}{S} \quad (1)$$

donde E representa la iluminación en la superficie, ϕ es el flujo luminoso en que llega a la superficie, cuya unidad de medida es el lumen, y S es la superficie en metros cuadrados. El Lux se puede definir como la iluminación de una superficie de $1m^2$ cuando sobre ella incide, uniformemente repartido un flujo luminoso de 1 Lumen (Amador, sf).

La iluminación debe ofrecer facilidad, comodidad y evitar tanto el esfuerzo como la fatiga de los usuarios ofreciéndoles confort visual, para conseguir un buen nivel de confort visual se debe garantizar un equilibrio entre la cantidad, la calidad y la estabilidad de la luz, de tal forma que se evite la activación constante de los reflejos y el parpadeo (Plesent Solís et al., 2017).

Existen dos tipos de iluminación:

- Iluminación natural. Como su nombre lo indica, esta luz proviene de la naturaleza, el sol es la mayor fuente de luz natural lo cual la convierte en una fuente impredecible e imposible de controlar pues existen muchos factores que la hacen variar, como el clima, la hora del día, la posición del sol, entre otras.
- Iluminación artificial. Esta luz es producida por el ser humano por medio de bombillas o lámparas. En comparación con la iluminación natural, la iluminación artificial puede ser controlada, puede modificarse su intensidad, la cantidad e incluso su color adaptándose así a las necesidades del usuario.

Para tener un mejor conocimiento sobre la cantidad de luz en un determinado espacio se puede realizar mediciones de iluminación haciendo uso de un instrumento llamado luxómetro, el cual está compuesto por una fotocélula de color corregido, o sea aquella cuya curva de sensibilidad se encuentre próximo a la del ojo humano, y conectada al instrumento en donde se hallan distintas escalas, que

pueden ser 0-300 lux, 0-1000 lux, 0-3000 lux o más. De acuerdo a distintos estudios se puede decir que el sentido de la visión funciona en las mejores condiciones cuando se encuentra dentro de un rango que va desde los 100 a 200 lux hasta 10000 a 20000 lux, con factores medios de reflexión del 30 % al 60 % y sin fuentes de deslumbramiento dentro del campo visual (Caminos, 2011).

2.1.2. Sistema de iluminación

Un sistema de iluminación es un conjunto de elementos que proporcionan una visibilidad clara para el desarrollo de actividades.

- Sistema de iluminación tradicional.

Para este trabajo de investigación se tomo de ejemplo el sistema tradicional que usualmente se utiliza en la mayoría de los espacios cerrados, ya sea casas, oficinas, edificios públicos, entre otros. Este tipo de sistema está compuesto por: lamparas, luminarias y dispositivos de control, el control del sistema tradicional se realiza de forma manual siendo totalmente dependiente de las personas.

1. Lámparas: son dispositivos generadores de luz, transforman la energía eléctrica en luminosa. En el mercado existe una amplia variedad de lamparas con diferentes tamaños y formas, dentro de una oficina, éstas lamparas suelen estar encendidas de 8 a 10 horas que corresponden al periodo de actividad en dicha oficina. La selección de la lampara a utilizar dentro de un determinado espacio dependerá de la cantidad y calidad de la luz que se desee.

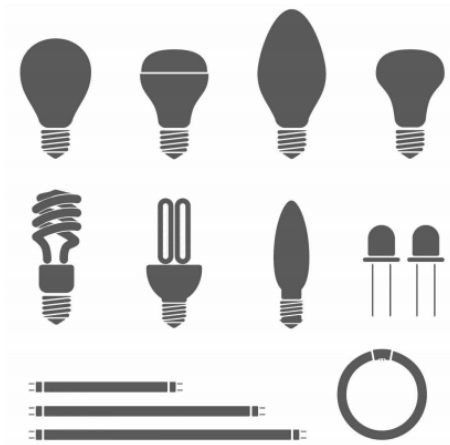


Figura 1: Tipos de lámparas.

2. Luminarias: una luminaria es un instrumento que alberga una o varias lámparas y que además contiene los componentes necesarios para su correcto funcionamiento. A continuación, se enlista una serie de requisitos que deben cumplir (Caminos, 2011):

- a) Soporte y conexión eléctrica para las lámparas.

- b) Controlar y distribuir la luz emitida por las lámparas.
- c) Mantener la temperatura de las lámparas dentro de los límites autorizados.
- d) Fácil instalación y mantenimiento.
- e) Aspecto agradable.
- f) Económica.

3. Dispositivos de control: los dispositivos de control aseguran que el flujo luminoso sea emitido permitiendo la adaptación de las lámparas a diferentes ambientes o momentos del día, éstos dispositivos pueden ser (Montserrat, sf):

- Interruptor, es accionado de forma manual.
- Pulsador temporizado, es accionado de forma manual y desactivado automáticamente después de un lapso de tiempo establecido.
- Detector de presencia, es activado al detectar movimiento y desactivado después de un lapso de tiempo establecido.
- Dimmer, permite regular la intensidad luminosa de la lámpara de forma manual.

Los sistemas de iluminación tradicional son actualmente muy utilizados en los distintos espacios cerrados que nos rodean, sin embargo, el depender de una persona para controlar de forma manual las luminarias puede terminar ocasionando el desperdicio de energía, aumentando las cifras en las facturas de electricidad.

■ Sistema de iluminación domótico.

Los cambios e innovación constante que nos rodea han hecho que las cosas a nuestro alrededor evolucionen. Los avances tecnológicos han mejorado nuestro entorno, uno de estos avances es la automatización, la cual, aunque es poco usada en entornos como viviendas, ha ido incrementando el interés en su uso.

Actualmente este tipo de sistemas es uno de los más trabajados, tanto en el ámbito de investigación, así como en el ambiente comercial. El uso de las redes inalámbricas para la conexión del sistema de iluminación permite mantener el control de las mismas en un dispositivo remoto, siendo en su mayoría una aplicación móvil la encargada de controlar las luminarias.

En este tipo de sistemas la aplicación móvil de control juega el papel central en su funcionamiento. Por medio de la aplicación es posible para el usuario tener el control de las lámparas, controlando así el encendido y apagado de las lámparas, ofreciendo la posibilidad de controlar las distintas propiedades de la iluminación, por ejemplo, la intensidad, el color, entre otras. Este tipo de sistemas mantienen su control centrado en un usuario, haciendo de la iluminación se adecue a las necesidades del mismo.

Con el uso de la domótica en el control del sistema de iluminación, el usuario puede controlar las luminarias desde lugares remotos, como la oficina de trabajo, por medio de interfaces amigables. Para poder tener un control de las luminarias instaladas es necesario contar con ciertos componentes dentro del sistema como lo son:

- Dispositivo central de control: es el centro del sistema, el dispositivo que permite la conexión de todos los componentes del sistema permitiendo así ser controlado de acuerdo a las necesidades del usuario. Puede realizar tareas programadas o reaccionar de acuerdo a las indicaciones del usuario.
- Sensores: son aquellos dispositivos cuya tarea es recolectar información de diferentes parámetros de interés para el sistema, dichos datos son compartidos con el dispositivo central para realizar una acción establecida que fue programada anteriormente.
- Actuadores: son dispositivos que están encargados de realizar acciones para controlar las luminarias y sus características, pueden modificar su estado y acoplarse a las condiciones del entorno o las necesidades señaladas por el usuario.
- Interfaz de control: para facilitar el control de las luminarias al usuario, una interfaz gráfica permite mostrar la información al usuario de forma sencilla por medio de gráficos. La interfaz de usuario para el control del sistema puede presentarse de diversas formas, por ejemplo: interfaz web, aplicaciones móviles e incluso interfaces que permiten tener un control por medio de la voz.

Los sistemas domóticos han ido adquiriendo cada vez más interés por parte de los usuarios, con la llegada del internet de las cosas es cada vez más común escuchar acerca de este tipo de sistemas. La domótica permite tener el control de los dispositivos de forma remota ofreciéndole al usuario una mayor comodidad para realizar tareas que antes debían realizarse de forma manual, como el control de las luminarias o la ventilación.

■ Sistema de iluminación reactivo.

Este tipo de sistemas reaccionan a estimulaciones del entorno, por lo cual su interacción con el entorno debe ser continua. El sistema recibe datos de entrada a los cuales reacciona de forma inmediata produciendo una salida de acuerdo a los datos, que le permita controlar el o los dispositivos especificados.

El funcionamiento de un sistema reactivo de iluminación se basa en los cambios detectados en el entorno, los cuales son procesados en tiempo real permitiéndole al sistema conocer su entorno y reaccionar a él. De esta forma, cuando el sistema de iluminación detecta cambios en su entorno (presencia, la iluminación, entre otros) realiza la acción o acciones pre-programadas ante esos nuevos valores detectados, controlando así las luminarias.

De acuerdo a (Rodríguez et al., 2019), el sistema debe cumplir con ciertas características para poder ser considerado reactivo:

- Responsive (Sensible): reacciona a los usuarios. El sistema debe satisfacer sus expectativas. Es importante que esté disponible en todo momento y su desempeño en tiempo real sea bueno, tener una baja latencia proporcionara una mejor experiencia al usuario mejorando su evaluación.
- Elastic (Scalable): reacciona a la carga. Es importante que el sistema sea capaz de reaccionar y adaptarse a la carga que representa el mismo sistema. El desempeño del sistema depende de esta característica, al tener una gran carga el sistema debe contar con varios nodos de computo que le permitan dividir la carga cuando sea necesario.
- Message Driven (Event-Driven): reacciona a un evento. Los sistemas reactivos están enfocados en eventos, mantienen una comunicación asíncrona intercambiando mensajes en espera que ocurra un evento.
- Resilient (Resistente): reacciona a las fallas. Cualquier tipo de sistema puede presentar fallas (ya sea de software o hardware), cuando el sistema se encuentra distribuido la probabilidad a fallos aumenta, por lo cual es esencial que el sistema sea resistente a dichas fallas para poder contar con una disponibilidad continua.

Los sistemas reactivos pueden crecer rápidamente y con ello la carga del sistema también lo hará, este tipo de sistemas procura mantenerse estable dividiendo la dicha carga para prevenir fallos lo cual hace que el sistema sea más estable. Así mismo, la interacción con el usuario en tiempo real y su respuesta instantánea hacen que este sistema sea una buena opción si se requiere un control basado en una acción - reacción.

■ Sistema de iluminación inteligente.

Un sistema de iluminación inteligente esta compuesto por agentes inteligentes, es decir, agentes que son capaces de percibir su medioambiente a traves de sensores y actuar en ese medio utilizando actuadores. El comportamiento del agente viene dado por la función del agente que proyecta una percepción dada en una acción (Russell and Norving, 2004). Como se muestra en la Figura 2, los agentes interactúan con el ambiente por medio de sensores y actuadores.

El agente trabaja por medio de objetivos, a medida que realiza sus tareas aprende de su entorno y utilizando este conocimiento para mejorar su desempeño. Poseen una serie de características que los distinguen de otras aplicaciones:

- Autonomía.- El agente es capaz de actuar de forma independiente.
- Reactividad.- El agente mantiene una interacción continua con su entorno y es capaz de responder a los cambios ocurridos en el ambiente.

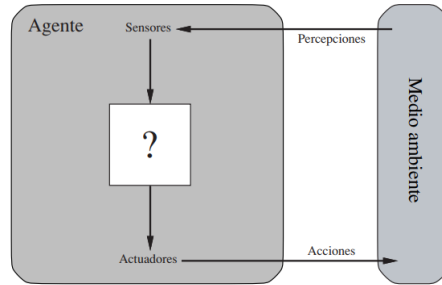


Figura 2: Interacción del Agente con el medio ambiente.

- Proactividad.- El agente es capaz de tomar la iniciativa para generar e intentar alcanzar objetivos.
- Habilidad social.- Un agente es capaz de interactuar con otros agentes a través de un lenguaje de comunicación entre agentes.
- Capacidad de cooperación.- El agente es capaz de cooperar con otros agentes para lograr el objetivo propuesto.
- Capacidad de razonamiento.- El agente posee la capacidad de inferir de acuerdo al conocimiento y experiencias.
- Comportamiento adaptativo.- El agente aprende o cambia su comportamiento según su experiencia previa.

Para dotar al sistema de inteligencia, se pueden implementar diversas técnicas de inteligencia artificial, algunas de ellas son:

- Aprendizaje automático. El aprendizaje automático se encuentra dentro del campo de la inteligencia artificial cuya finalidad es el desarrollo de técnicas que permitan a las computadoras adquirir conocimiento, el cual es muy útil para el tratamiento de datos a gran escala, ofreciendo la posibilidad de aprender y realizar predicciones de acuerdo a dichos datos. Con el uso del aprendizaje automático es posible automatizar tareas repetitivas, mecánicas y monótonas (Hinestroza Ramírez, 2018). Algunos de los campos donde se puede implementar son: educación, medicina, finanzas, robótica, entre otros.
- Redes bayesianas. Las redes bayesianas ofrecen la posibilidad de modelar un fenómeno a través de un conjunto de variables y las dependencias entre las mismas. Con ayuda de resultados obtenidos se puede realizar una estimación acerca de las variables desconocidas según las variables trabajadas anteriormente. El uso de redes bayesianas puede realizar trabajos de diagnóstico, clasificación o predicción, entre otros (Sucar and Tonantzintla, 2006). Entre sus aplicaciones se encuentran diversos campos como: finanzas, medicina, producción, entre otros.

- Redes neuronales artificiales. Al igual que el funcionamiento del cerebro, el sistema está formado por varias neuronas que poseen bajas capacidades de procesamiento, sin embargo, la verdadera capacidad de las redes neuronales artificiales se encuentra en la conectividad entre dichas neuronas. Las neuronas son agrupadas en diferentes niveles, poseen un alto grado de conectividad entre ellas, la cual es ponderada por un peso. Por medio de un algoritmo de aprendizaje ajustan su arquitectura y parámetros con la finalidad de minimizar alguna función de error que indique el grado de ajuste a los datos y la capacidad de generalización de la red neuronal artificial (Salas, 2004). Algunos de los campos donde se puede implementar son: educación, micro mecánica, agricultura, medicina, robótica, entre otros.
- Lógica difusa. La lógica difusa es una extensión de la lógica clásica, la cual es multi-valuada, es decir, mientras la lógica clásica tiene valores deterministas como verdadero o falso, la lógica difusa utiliza valores no tan deterministas procurando crear aproximaciones matemáticas en la resolución de algunos tipos de problemas. Las lógicas difusas pueden producir resultados exactos a partir de datos no precisos, lo cual las hace útiles en aplicaciones computacionales. En un sistema deductivo pueden tenerse enunciados de entrada, con los cuales la lógica difusa tendrá enunciados de salida, su objetivo es describir los grados de los enunciados de salida en términos de los enunciados de entrada (Morales, 2002). Entre sus aplicaciones se encuentran diversos campos como: industrial, economía, educación, entre otros.

En un sistema de iluminación inteligente, es posible tener un control que no esté directamente ligado al usuario, sino a la experiencia e interacción del mismo sistema con su entorno. Al permitir que el sistema adquiera conocimiento con base a esas interacciones, su desempeño mejorará constantemente ofreciéndole al usuario una mejor experiencia.

2.1.3. Métodos de aprendizaje

El aprendizaje automático es una disciplina del campo de la inteligencia artificial encargado de desarrollar técnicas que permitan que las computadoras aprendan, dotando a los ordenadores de la capacidad de identificar patrones en datos masivos para hacer predicciones. El aprendizaje automático utiliza una variedad de algoritmos que iterativamente aprenden de los datos para mejorar, describir datos y predecir resultados (Iberdrola, sf).

El aprendizaje automático no es auto programación, sino auto aprendizaje de datos y experiencia para generar patrones y resolver nuevas tareas. Este aprendizaje es la combinación de técnicas, datos, conceptualización de análisis de datos y algoritmos para generar nuevos patrones o modelos de predicción (Rojas, 2020).

A medida que los algoritmos reciben datos es posible que el modelo resultante sea más preciso. Los modelos son entrenados con datos antes de ser implementados, después del entrenamiento es posible

utilizarlo para que aprenda en tiempo real de acuerdo a los datos que ingiere.

Así pues, se tienen n número de factores que influyen en las preferencias del usuario, como se puede observar en la siguiente expresión:

$$X = \prod_{i=1}^n x_i = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot \dots \cdot x_n \quad (2)$$

la preferencia del usuario (X) es el resultado de una serie de factores llamados $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$. Donde cada uno de estos factores x pertenece al conjunto de preferencias del usuario.

$$x \in X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}. \quad (3)$$

Se denota las instancias y el par de predicciones de salida (x, y), donde la predicción de salida y pertenece al conjunto de posibles salidas $y_1, y_2, y_3, \dots, y_n$

$$y \in Y = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_n\}. \quad (4)$$

Se necesita encontrar el modelo de clasificación más adecuado (h) dentro del conjunto de modelos

$$h \in H : X \rightarrow Y. \quad (5)$$

El modelo de clasificación (h) perteneciente al conjunto de modelos (H) de las preferencias en el conjunto X a las predicciones de salidas del conjunto Y . La hipótesis (h) se utiliza para predecir la salida más adecuada Y para las características de entrada X (Gopalakrishna et al., 2012). Para realizar la evaluación del sistema se debe medir su rendimiento con base al éxito que tuvo su comportamiento. Como regla general, es mejor diseñar medidas de utilidad de acuerdo con lo que se quiere para el entorno, más que de acuerdo con cómo se cree que el agente debe comportarse (Russell and Norving, 2004).

Existe una amplia cantidad de algoritmos de aprendizaje automático. De acuerdo a la literatura consultada se pueden dividir en grupos: aprendizaje supervisado, aprendizaje no supervisado, aprendizaje por refuerzo y aprendizaje profundo

- Aprendizaje supervisado.

“Su intención es encontrar patrones en datos que se pueden aplicar a un proceso de analítica” (Hurwitz and Kirsch, 2018). Usualmente comienza con un conjunto establecido de datos y una cierta comprensión de cómo se clasifican estos datos, tienen características etiquetadas que definen su significado. De esta forma el sistema de etiquetado de datos permite al algoritmo tomar decisiones o hacer predicciones. Se pretende que el sistema sea capaz de lograr una determinada salida por lo cual el modelo es entrenado hasta lograrlo.

Éste proceso de aprendizaje consiste en la recopilación de datos históricos, incluyendo la respuesta correcta, se construye un modelo de aprendizaje automático con esos datos y se evalúa el modelo, para entender qué rendimiento podemos esperar de él (Heras, 2020). El objetivo principal del modelo es el de predecir la salida de la entrada de un objeto nunca antes visto, para esto tiene que aprender y generalizar los datos de entrenamiento para dar un resultado lo más acertado posible (Suárez, 2017).

En (Hagras et al., 2003) se hace uso del aprendizaje supervisado. El sistema comienza su aprendizaje con un conjunto de reglas almacenadas además de comportamientos fijos de seguridad. El usuario selecciona su preferencia para cualquier ajuste programable dado, luego el sistema intenta adaptar sus reglas para lograr dicho ajuste, a través de una serie de iteraciones activas con el usuario y el medio ambiente el sistema mejora en aproximadamente 3 minutos.

■ Aprendizaje por refuerzo.

Es un modelo de aprendizaje conductual. El algoritmo recibe retroalimentación del análisis de datos, conduciendo al usuario hacia el mejor resultado (Hurwitz and Kirsch, 2018). El aprendizaje de este tipo de algoritmos se basa en iteraciones constantes, se podría decir que es un aprendizaje basado en “prueba y error”, con un objetivo fijo, el algoritmo recibe retroalimentación lo cual le permite ir hacia el mejor resultado con base al conocimiento adquirido. De esta forma se obtienen patrones, correlaciones y conclusiones basados en la experiencia adquirida por el algoritmo en la experimentación que le permiten encontrar el mejor camino hacia el objetivo.

Con un aprendizaje supervisado es posible minimizar la diferencia entre la acción del agente y la acción del usuario, sin embargo, cuando es demasiado difícil realizarlo se puede utilizar el aprendizaje por refuerzo. (Sandhu et al., 2004) utiliza éste método donde el agente basaría su aprendizaje en sus propias relaciones con sus acciones, el refuerzo se basaría en qué tan bien las acciones del agente emulan las acciones del usuario en función de la luminosidad sensada. El refuerzo otorgado al sistema puede ser positivo o negativo:

- Refuerzo positivo, se otorga cuando el agente se acerca al objetivo.
- Refuerzo negativo, se otorga cuando el agente se aleja del objetivo.

Por ejemplo: si un agente enciende una luz y el usuario la apaga, el agente recibirá un refuerzo negativo, si la persona no cambia nada, el agente recibirá un refuerzo positivo.

El refuerzo puede ser definido dentro del comportamiento del agente como una función, (Sandhu et al., 2004) define la recompensa con la función:

$$R = -E(s, a) - U_A(a) + U_M(a) + P(s, a) - T(a) \tag{6}$$

donde a es la acción del agente, s es el estado actual percibido por el agente, E es función del consumo de energía resultante de la acción del agente, U_A es una función del usuario que anula el sistema de iluminación automatizado, U_M es una función del usuario que ajusta la iluminación manual del escritorio, P es una función de la acción del agente que coincide con las preferencias del usuario, y T es una función de las transmisiones de radio utilizadas por el agente.

Así mismo, la retroalimentación puede ser dada al sistema por el mismo usuario. Por medio de una interfaz el usuario ingresa su nivel de satisfacción de la acción que se realizó en el sistema y la envía como retroalimentación, de esta forma el aprendizaje del sistema evoluciona y puede mejorar sus acciones para brindar una mayor satisfacción al usuario. La mayor parte del tiempo, los usuarios no tiene exigencias estrictas sobre cómo la iluminación debe ajustarse; ellos solo notan cuando la iluminación es claramente incorrecta (Vainio et al., 2008).

- Aprendizaje no supervisado.

En el aprendizaje no supervisado, el sistema recibe como entrada datos recopilados (ya sea datos de sensores, pixeles de imágenes, entre otros), este tipo de aprendizaje no recibe etiquetas ni recompensas, por lo cual el sistema debe aprender sin una retroalimentación de su entorno (Ghahramani, 2003). Este tipo de aprendizaje suele utilizarse para descubrir patrones entre los datos.

Esta formado por diversas técnicas, puede ayudar a visualizar datos o pre-procesarlos antes de aplicar alguna otra técnica de aprendizaje, también puede ser utilizado para agrupar descubriendo las características en los datos con las cuales se pueden crear subgrupos que antes no eran muy visibles entre los datos. El aprendizaje no supervisado usualmente es utilizado para realizar exploraciones en los datos (Gareth et al., 2013).

Los resultados obtenidos con el aprendizaje no supervisado suelen ser más difíciles de evaluar ya que no se conoce cuál es la respuesta correcta. Al tener una gran cantidad de datos a evaluar, el aprendizaje no supervisado realiza un análisis de los componentes principales de dichos datos los cuales ayudan a comprender el resto de los datos. Existe una amplia variedad de técnicas de aprendizaje no supervisado, la mejor de ellas dependerá de la cantidad de datos y de la finalidad de la investigación.

Con el uso del aprendizaje automático es posible crear y utilizar algoritmos de aprendizaje para procesar datos de diversas fuentes y predecir su comportamiento en el futuro. Su aplicación es diversa, puede ser empleado en diferentes áreas, desde empresas, para predecir su comportamiento e incluso el comportamiento de sus clientes, el área de la medicina para detectar enfermedades, hasta aplicaciones de la vida cotidiana como los buscadores en internet o las aplicaciones de entrenamiento, donde se utilizan este tipo de técnicas sin que el usuario común sea realmente consiente de estarlas utilizando.

2.1.4. Comunicación entre dispositivos conectados a internet

Con el desarrollo del Internet Of Things (IoT) se han desarrollado diversos protocolos para establecer la comunicación entre dispositivos del mismo sistema, los cuales son un conjunto de reglas que permiten el intercambio de información entre los dispositivos. Actualmente existe una amplia cantidad de protocolos de comunicación entre dispositivos IoT, a continuación, se describen algunos de ellos:

- Bluetooth. Esta tecnología es utilizada en redes inalámbricas de área personal. Bluetooth permite la transmisión de datos y voz entre diferentes dispositivos utilizando un enlace de radiofrecuencia. Con este protocolo los dispositivos pueden comunicarse entre ellos, siempre y cuando se encuentren dentro de su alcance, los dispositivos pueden no ser del mismo tipo, por ejemplo: computadoras personales, teléfonos inteligentes (Castellano, 2012). Con base a la potencia de transmisión del dispositivo se pueden clasificar de acuerdo a la Tabla 2.

Clase	Potencia Máxima Permitida	Rango (Aproximado)
Clase 1	100 mW, 20 dBm	100 metros
Clase 2	2.5 mW, 4 dBm	10 metros
Clase 3	2.5 mW, 0 dBm	1 metro

Tabla 2: Clasificación de bluetooth por clases.

- IEEE 802.11 (WiFi). Al hablar sobre el WiFi, se hace referencia a la WiFi Alliance, la cual es una organización sin ánimos de lucro la cual fomenta la compatibilidad entre tecnologías ethernet inalámbricas bajo la norma 802.11 del Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Los estándares 802.11 son un conjunto de especificaciones de acceso inalámbrico a redes de área local (Castro, 2005), en la Tabla 3 se muestra una descripción de algunos de los estándares:

Estándar	Descripción
802.11a	Modo de acceso que alcanza hasta 54 Mbps en el rango de frecuencia de los 5 GHz y con la posibilidad de utilizar 8 canales no solapados
802.11b	Modo de acceso de hasta 11 Mbps, hace uso simultáneo de ambas bandas, 2,4 Ghz y 5 Ghz
802.11n	Modo de acceso de hasta 650 Mbps en el rango de frecuencia de los 2,5 GHz y con la posibilidad de utilizar 3 canales no solapados

Tabla 3: Descripción de los estándares 802.11.

- Message Queuing Telemetry Transport (MQTT). Es un protocolo de comunicación, el cual es un protocolo publicar/suscribir diseñado para redes remotas. MQTT es un protocolo ligero, establece

la comunicación entre dispositivos que no requieren mucho procesamiento de los datos o una gran cantidad de ancho de banda. La comunicación con este protocolo se realiza de máquina a máquina mediante la publicación y suscripción a tópicos, por medio de broker el cual es el elemento central. Para configurar la comunicación solo es necesario conocer la información del broker y el tópico al que se desea suscribir, no es necesario conocer el resto de los elementos del sistema (Moreno Cerdà, 2018).

- Clientes. Pueden ser dispositivos que recolectan información del entorno, pueden publicar o suscribirse a diferentes tópicos, estos siempre se conectan a un broker.
- broker. Es el encargado de implementar el protocolo para establecer la comunicación entre los clientes actuando de intermediado entre ellos. Recibe los mensajes, los filtra y los envía a aquellos clientes suscritos al tópico.

2.2. Trabajo relacionado

2.2.1. Revisión de literatura

En México los sistemas tradicionales de iluminación cuentan con un control manual y no son monitoreados, la satisfacción del usuario podría bastar para definir el correcto funcionamiento del mismo, y aunque aparentemente puede parecer un servicio de calidad, éste sistema se volvió obsoleto. Con el avance de la tecnología se han realizado muchas mejoras en el control de los sistemas, éstas mejoras ofrecen un mayor confort al usuario y ayudan a disminuir los gastos en iluminación.

La automatización de los procesos que se realizan en la vida cotidiana ha ido adquiriendo relevancia conforme pasan los años, así tareas que antes se hacían manualmente ahora pueden hacerse de forma automática ya sea de forma supervisada o no. La automatización de los sistemas de iluminación no es la excepción, con ayuda de la tecnología se logra mejorar el control de las luminarias ofreciendo la oportunidad de que el entorno se adapte al usuario generando mayor comodidad, así como un ahorro en la energía utilizada en iluminación.

Alrededor del mundo se han realizado diversas investigaciones respecto al control de los sistemas de iluminación, como parte de esta tesis se hablará de aquellos trabajos relacionados al control de iluminación en espacios cerrados.

En el mercado existe una amplia variedad de componentes que permiten adaptar el ambiente de acuerdo a las necesidades del usuario, así el sistema de iluminación que se controla de forma manual pulsando un interruptor para apagar o encender una bombilla ahora puede controlarse remotamente por medio de otro dispositivo, aplicación o incluso asistentes virtuales.

Éste sistema consiste en bombillas inteligentes que se conectan a través de una red inalámbrica hacia una aplicación que las controla. La instalación de las bombillas inteligentes es fácil y después de su configuración es posible empezar a usarlas. Esta clase de sistemas permite que el usuario controle

el encendido/apagado, la intensidad proporcionada, así como el color de la luz de las bombillas. Éste tipo de sistemas ofrece la posibilidad de tener el control en un solo dispositivo, lo cual es una gran ventaja, sin embargo también representa una gran desventaja ya que el control se hará de acuerdo a las preferencias de la persona que maneje la aplicación.

Existen, además, investigaciones que buscan ofrecer el mismo servicio a un menor costo, para lograr éste objetivo (Mendoza and Palacios, 2017) hace uso de software libre, el controlador central establece la comunicación con el usuario por medio de HTTP (Hypertext Transfer Protocol) y SSH (Secure Shell), las ordenes son procesadas por el actuador central y transmitidas a los actuadores. Éste metodo permite tener el control de las luminarias a un bajo costo.

Los sistemas domóticos pueden ser una solución al desperdicio de energía provocado por el control manual deficiente de las luminarias, sin embargo, éste tipo de sistemas depende del usuario, las malas decisiones que se tomen generan la pérdida de energía y con ello el aumento en las tarifas.

Para aumentar la independencia del sistema se han diseñado los sistemas reactivos. Éste tipo de sistemas están dirigidos por eventos y son deterministas, (Montaguano, 2018) presenta en su tesis de maestría un control reactivo de las luminarias en áreas de un edificio, en éste trabajo el control de la iluminación se basa en los datos sensados, así cuando se detecta movimiento las luces se encenderán por un determinado lapso de tiempo. Aunque este sistema puede mejorar el control, aún es deficiente, pues al ser un sistema determinista tiene nula tolerancia a cambios, por ejemplo el lapso de tiempo que le lleva al usuario trasladarse puede ser mayor al programado y con esto causar malas experiencias.

Es aquí cuando entran en acción los sistemas inteligente. Este tipo de sistemas son capaces de aprender de su entorno y adaptarse al ambiente, trabajan con un conjunto de entradas y un conjunto de salidas, con el aprendizaje por refuerzo se le otorga al final una recompensa positiva o negativa, para evaluar su desempeño, el sistema, además, cuenta con una serie de reglas definidas para mapear cada una de las entradas hacia la salida más adecuada a las preferencias del usuario. En (Gopalakrishna et al., 2012) se presentó un nuevo método que permite construir modelos de predicción, las entradas del sistema son conjuntos predefinidos de características que pueden influir en las preferencias de iluminación de los usuarios. Mediante el uso de sensores se recolecta información de entrada y se hace un mapeo hacia la mejor salida, mediante una simulación se demostró que las características del ambiente que más influyen en la toma de decisiones del sistema son la luminosidad exterior, el área de actividad y el tipo de actividad realizada por el usuario. En (Jin et al., 2020), además de usar sensores propone descubrir los patrones secuenciales temporales del estado de ocupación para complementar los datos sensados y así disminuir la cantidad de salidas falsas del sistema. Con esta investigación se encontró que la predicción de ocupación se correlaciona con el índice de ocupación histórico y la característica secuencial de tiempo, logrando un 97.4% de precisión con el método propuesto y un 79.5% de menos salidas falsas.

Uno de los problemas más frecuentes en el control de la iluminación en áreas compartidas es la

preferencia de los usuarios. La iluminación puede ser adecuada para algunos de ellos e inadecuada para otros, como propuesta de solución a éste problema se hace uso de la lógica difusa. En (Hagras et al., 2003) el trabajo de investigación propone el uso de un agente genético difuso, de ésta forma la base de reglas difusas relacionadas a la comodidad de los residentes de la habitación se aprenden, actualizan y adaptan mediante un diálogo iterativo máquina-usuario. Si bien el sistema es capaz de adaptarse a los cambios en las condiciones ambientales o a los residentes de la habitación, es necesario que las personas ingresen un conjunto de valores deseados para que el sistema pueda adaptar sus reglas para lograr este ajuste.

2.2.2. Productos similares en el mercado

El área de la automatización se ha ido desarrollando rápidamente, con el avance en las tecnologías inalámbricas han hecho que el desarrollo de nuevos sistemas automatizados sin cableados sea cada vez mayor. La implementación de tecnologías inalámbricas como el WiFi han hecho que conectar diferentes dispositivos a la red para tener el control remoto de los mismos sea cada vez más sonado.

Con la investigación que se ha realizado a lo largo de los años se ha logrado mejorar los sistemas añadiéndoles más funciones, aunque eso podría sonar complicado, junto a los avances en el desarrollo de la tecnología también se han mejorado las interfaces de los usuarios, convirtiéndolas en herramientas de control más sencillas y amigables.

En el mercado existe una amplia cantidad de componentes y sistemas inteligentes relacionados a la iluminación tanto interior como exterior. A continuación, se muestra una descripción de algunos de ellos, donde el control de las luminarias ha dejado de ser manual, y se han implementado nuevas tecnologías para controlarlas.

- LIFX

LIFX es una línea de bombillas LED digitales direccionables, multicolores, energéticamente eficientes y con eficiencia energética que se pueden controlar a través de un dispositivo equipado con WiFi, como un teléfono inteligente o un reloj inteligente. Esta línea ofrece bombillas LED de bajo consumo, pueden conectarse al WiFi y ser controladas con un smartphone o tableta, se pueden controlar por medio de asistentes como: Amazon Alexa / Amazon Simple Set-up, Google home, Apple HomeKit / Watch.

Con la aplicación se puede encender y apagar las bombillas, regularlas su intensidad, ajustar su brillo o incluso configurar el color de las mismas. Además, con el uso de las bombillas LIFX se pueden programar distintos ambientes y programar temporizadores de activación o reposo. Se puede tener un control individual de las bombillas, un control por estancias o, si se desea, tener un control todas las bombillas del hogar. Además del control inteligente, también es posible utilizar las bombillas como una bombilla normal apagándola y encendiéndola con un interruptor convencional.

Para la instalación de una nueva bombilla LIFX se debe descargar la aplicación LIFX desde la página oficial, una vez descargada e instalada se debe abrir la aplicación con una cuenta de correo electrónico asociada. Para añadir una nueva bombilla se cuenta con un asistente que lo guiará durante todo el proceso, una vez agregada y conectada al WiFi la bombilla aparecerá dentro de la aplicación y se podrá controlar desde la misma.

Ofrece un control domótico centrado en el usuario y sus preferencias, donde el control de las luminarias estaría a cargo del usuario poseedor de la aplicación, lo cual podría causar conflictos entre el resto de las personas en la habitación. Al ser más independiente, el sistema propuesto no se enfoca en un solo usuario, sino que aprende de las preferencias de los usuarios mientras interactúan con él permitiéndole mejorar a través de dichas interacciones.

■ Philips Hue

Philips Hue, es una empresa que se dedica a ofrecer productos de iluminación brillante e inteligente para el hogar. Los productos diseñados por Philips Hue ofrecen la posibilidad de ser configurados ya sea mediante bluetooth o Hue Bridge para tener un mejor control de las luminarias del hogar. La automatización de las luminarias permite crear la mejor atmosfera para el usuario, el control de las luminarias puede incluso realizarse por comandos de voz simples como: “Hey, Google, enciende la lámpara de mesa”.

Configurar un sistema controlado por bluetooth: con las luces compatibles con bluetooth y la Hue bluetooth app se puede controlar las luces en una habitación. Para instalarlo lo primero que se debe hacer es instalar las luces Hue compatibles con bluetooth y posteriormente descargar la Hue bluetooth app.

Configurar un sistema controlado por Hue Bridge: con cualquiera de las luces Hue, incluidas las compatibles con bluetooth, y la Hue App se puede controlar las luces en del hogar completo. Para instalarse es necesario colocar las luces Hue, conectar un Hue Bridge y finalmente descargar la Hue bluetooth app para el control del sistema.

El sistema de iluminación inteligente de Philips Hue ofrece un control domótico de las luminarias, el cual ofrece la posibilidad de controlar las distintas propiedades de las luminarias a través de una aplicación para smartphone o tabletas. El sistema propuesto optaría por ofrecer un control inteligente, donde el sistema, a través de los datos sensados, pueda decidir y controlar las luminarias para proporcionar una buena iluminación, de esta forma el sistema propuesto opta por una mayor independencia del usuario.

■ OSRAM

OSRAM es una empresa enfocada en ofrecer soluciones ópticas, trabajan para explorar y diseñar nuevas tecnologías. El desarrollo de su tecnología ofrece soluciones ópticas, se esfuerzan por tener

un desarrollo continuo de tecnologías de detección, iluminación y visualización. Además, ofrecen tecnología como la detección 3D desde teléfonos móviles a la robótica automotriz e industrial.

Las soluciones de iluminación OSRAM incluyen módulos LED basados en sus sistemas de control inteligente para aumentar la productividad al tiempo que se obtienen ahorros económicos y energéticos. Entre los productos que ofrece se encuentra el sistema de iluminación inteligente HubSense, el cual puede instalarse de forma fácil, es escalable y ofrece una iluminación inteligente para oficinas.

El sistema está compuesto por:

- Interfaces de usuario: son interruptores conectados al sistema por medio de bluetooth.
- Sensores: el sistema cuenta con sensores de presencia, así como sensores de iluminación para detectar los cambios en el nivel de iluminación del lugar.
- Actuadores: son dispositivos fáciles de instalar en las luminarias, los cuales envían la señal a las mismas indicándoles la acción a realizar.

HubSense es un sistema de control de iluminación conectado a través de bluetooth, el cual busca reducir el desperdicio de energía mediante el uso de sensores e interruptores, lo cual, si bien ofrece una mayor independencia del usuario al contar con sensores, también puede ocasionar malas experiencias con los datos sensados. El sistema propuesto tendrá la capacidad de seguir aprendiendo conforme los usuarios interactúan con él, de esta forma cada vez que el usuario este insatisfecho con las decisiones que el sistema toma, podrá otorgar una retroalimentación que lo ayude a mejorar.

En el mercado existe una amplia variedad de productos relacionados a la iluminación inteligente, tienen distintas formas y tamaños, aunque su funcionamiento es similar. Los productos anteriormente analizados mantienen una conexión inalámbrica con el resto del sistema, su instalación es sencilla y buscan mejorar el control de la iluminación en interiores.

Hacen uso de la automatización, con diferentes técnicas. El control domótico con el uso de aplicaciones ya sea móviles o web, el uso de sensores para sistemas reactivos y la programación de tareas específicas al detectar ciertos valores, son algunas de las técnicas que se emplean para crear el sistema “inteligente”. El desarrollo tecnológico ha hecho posible que los dispositivos realmente sean inteligentes y puedan adquirir conocimiento por medio de técnicas de aprendizaje computacional.

El sistema desarrollado en este trabajo de investigación hace uso del aprendizaje por refuerzo, con el cual se podrá obtener y procesar diversos datos de un entorno y por medio de retroalimentación aprende a tomar la mejor decisión.

3. Capítulo 3. Arquitectura de hardware propuesta

Como parte de la propuesta para solucionar la problemática planteada en este trabajo de tesis, se definen diseños del sistema en los cuales se basará la creación del mismo. El sistema es modular, el cual puede crecer de acuerdo a las necesidades del lugar en donde se utilizará.

El sistema diseñado en este trabajo de tesis propone crear un mejor control de las luminarias, donde por medio de diferentes módulos se pueda recopilar información que sea útil para el control de las luminarias, ya sea un control manual o un control inteligente. Para ello, se definen una serie de módulos que recolectan información de las habitaciones (HB01, HB02, HB03, HB04, HB05, HB06), después se envía al Módulo de Control y éste a su vez toma la decisión de realizar cierta acción correspondiente a cada luminaria, esto se puede observar en la Figura 3.

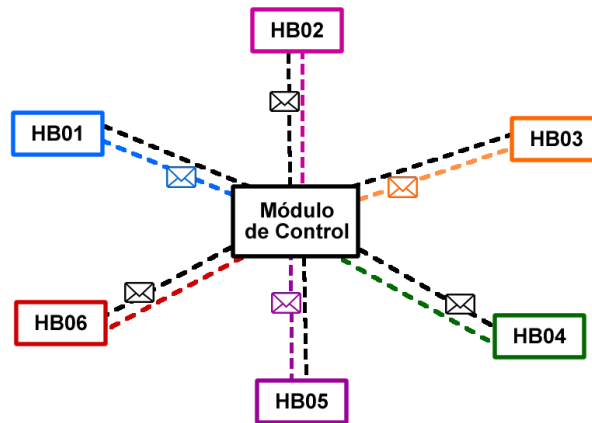


Figura 3: Funcionamiento general del sistema.

Este sistema está diseñado para controlar la iluminación interior de un conjunto de habitaciones u oficinas, donde cada una de ellas contendrá módulos que permitan supervisar lo que sucede en su interior, codificar estos datos y compartirlos con el Módulo de Control. En la Figura 4, se muestra la información que cada habitación comparte con el sistema, y una descripción a grandes rasgos del proceso interno que el Módulo de Control realiza para finalmente enviar la acción a la habitación indicada.

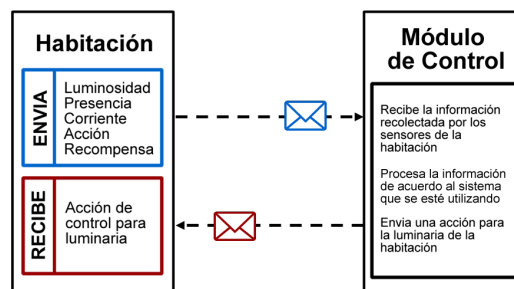


Figura 4: Intercambio de información entre habitación y módulo central.

El intercambio de mensajes entre las habitaciones, donde se recolecta la información de los sensores, y el Módulo de Control, el cual recibe, procesa y envía de regreso la instrucción para la luminaria, se realiza de forma inalámbrica. Cada uno de los módulos que forman parte del sistema se conecta al Módulo de Control por medio de WiFi, haciendo más sencilla su instalación. Para poder visualizar mejor el sistema se muestran a continuación la descripción de los principales componentes de cada módulo que lo integra, así como los diseños electrónicos y el diseño de las carcasas protectoras.

3.1. Componentes electrónicos

Actualmente existe una amplia variedad de componentes electrónicos en el mercado, cada uno de ellos tiene una función específica y sus precios pueden variar de acuerdo a sus características. Para el montaje del sistema diseñado se realizaron diseños electrónicos especificando los componentes y las conexiones que se emplearan en cada uno de los módulos que integran el sistema.

A continuación, se describe con mayor detalle los componentes electrónicos utilizados para la creación del sistema propuesto.

3.1.1. Tarjetas electrónicas

- Raspberry pi 4b. Como se ha mencionado anteriormente, el sistema diseñado se compone por varios módulos, cada uno de ellos comparte información con el componente central, en este caso el Módulo de Control. Dicho módulo se encarga del procesamiento de los datos recopilados por todo el sistema, por lo cual es necesario contar con un buen procesador para lograr esta tarea.

Con la llegada del internet de las cosas (IoT), la creación de tarjetas electrónicas capaces de realizar determinadas tareas ha ido aumentando. Raspberry pi es una placa de microordenador a la cual se le pueden dar diferentes usos, es una de las tarjetas más utilizadas en el mundo de la informática, su atractivo costo la ha convertido en una de las más vendidas. Esta tarjeta utiliza el sistema operativo Raspbian, el cual está basado en Linux, cuenta con una amplia variedad de accesorios periféricos ofreciendo la posibilidad de utilizarla como un ordenador portable. En la Figura 5, se muestra el modelo 4B.

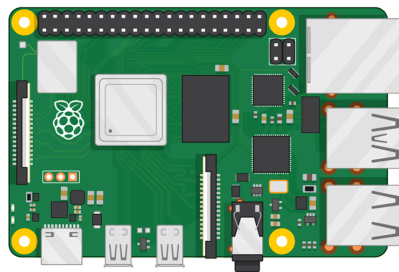


Figura 5: Raspberry pi 4B.

Con el paso de los años se ha ido mejorando y agregando funcionalidades a la tarjeta. Para este proyecto de tesis la tarjeta a utilizar es una Raspberry Pi 4B, la cual fue lanzada al mercado en 2019, en la Tabla 4, se muestran sus principales características.

Procesador	ARM Cortex-A72
GPU	VideoCore VI (con soporte para OpenGL ES 3.x)
Memoria	1 GB / 2 GB / 4 GB LPDDR4 SDRAM
Conectividad	Bluetooth 5.0, Wi-Fi 802.11ac, Gigabit Ethernet
Puertos	GPIO 40 pines 2 x micro HDMI 2 x USB 2.0 2 x USB 3.0 CSI (cámara Raspberry Pi) DSI (pantalla tácil) Micro SD Conector de audio jack USB-C (alimentación)
Precio	Desde 35 dólares

Tabla 4: Principales características de Raspberry Pi 4B (Rus, 2019).

- NodemCU.

NodeMCU es una placa de desarrollo basada en el procesador ESP12E. Su versión original es la NodemCU v0.9, la cual dispone de menos pines GPIO al estar basada en el ESP12. Actualmente la versión v0.9 se encuentra obsoleta. La segunda generación v1.0/v2.0 está basada en un ESP12, por lo cual dispone de una mayor cantidad de pines GPIO.

Buscando mejorar el funcionamiento de la placa se diseñó la tercera generación v1.0/v3.0, su funcionamiento es prácticamente igual a la v2.0, su principal cambio es que en esta versión se monta un conversor serial CH340G. Actualmente es el modelo más vendido. En la Figura 6, se muestra la tarjeta NodemCU v3, la cual fue utilizada para desarrollar este proyecto.



Figura 6: NodemCU v3.

La tarjeta NodemCU puede ser utilizada en cualquier proyecto IoT donde se establecen conexiones entre diferentes dispositivos, es una placa cuya programación puede realizarse desde diferentes lenguajes, desde C a través del IDE de Arduino o incluso realizarla por medio de LUA, el cual es lenguaje de programación multiparadigma, imperativo, estructurado y bastante ligero. NodemCU ofrece una conexión WiFi con lo cual es posible establecer comunicación con el exterior, en la Tabla 5, se muestran sus principales características.

Procesador	ESP8266
Memoria	4MB de memoria FLASH
Conectividad	WiFi 802.11 b/g/n
Pines	9 pines GPIO con I2C y SPI y 1 entrada analógica
Precio	Desde 6 dólares

Tabla 5: Principales características de NodemCU v3.

3.1.2. Sensores

- PIR.

El sensor pirólico, o mejor conocido como sensor PIR, es utilizado para la detección de movimiento. Este sensor trabaja en el rango de la luz infrarroja, por lo cual los objetos detectados son aquellos cuya temperatura es mayor, como los seres humanos o los animales. Dentro del mercado existen diferentes módulos, para este proyecto se utilizó el módulo HC-SR501, el cual se muestra en la Figura 7. Su funcionamiento se basa en el retardo medido entre la detección del sensor, con el cual es posible calcular la distancia a la que se encuentra el objeto.

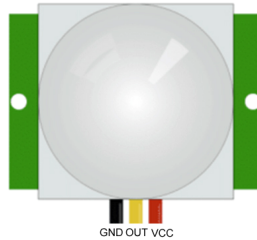


Figura 7: Sensor de Presencia PIR.

De acuerdo a la hoja de datos del sensor HC-SR501, el sensor PIR tiene la capacidad de detectar presencia en un rango de cuatro metros de distancia, es alimentado con cinco voltios de corriente continua y 65mA, posee un tamaño compacto de 24.5 x 32.6 x 24 mm. El módulo HC-SR501 posee dos controles que pueden establecer la distancia de detección del sensor y el tiempo de detección entre cada pulso.

- Ultrasonico.

El sensor ultrasónico, es un sensor que utiliza el sonido para determinar la distancia entre un objeto. El tamaño del sensor es pequeño al igual que su consumo energético. En este trabajo se utilizó el sensor ultrasónico HC-SR04, el cual es el más utilizado en proyectos de robótica y de automatización. En la Figura 8, se muestra una ilustración del sensor utilizado.

Su voltaje de operación es de cinco voltios con una corriente de reposo de 2mA y una corriente de trabajo de 15mA. El rango de medición va desde los 2 a 450 centímetros de distancia, su dimensión es de 45 x 20 x 15mm.

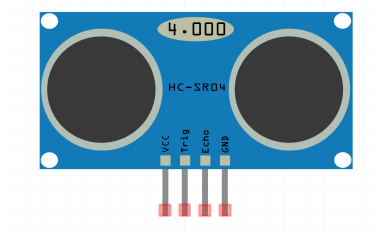


Figura 8: Sensor de Presencia Ultrasónico HC-SR04.

El sensor HC-SR04 cuenta con un emisor y un receptor piezoeléctricos, su funcionamiento consiste en enviar un pulso ultrasónico y luego recibe la orden en el pin TRIG, el pulso viaja por el espacio y rebota al encontrar un objeto, el rebote produce un sonido el cual es detectado por el receptor. El pin ECHO cambia su estado a alto en un tiempo proporcional al que duro en ser detectada la onda, el pulso ECHO se mide por el controlador y posteriormente calcula la distancia al objeto.

- Fotorresistencia (LDR).

Una resistencia dependiente de la luz (LDR) o también llamada fotorresistencia, es un resistor cuyo valor de resistencia eléctrica depende de la cantidad de luz que se aplica sobre su superficie, su nivel de resistencia es bajo cuando hay luz sobre ella, por el contrario, cuando el nivel de luminosidad sobre ella sea bajo entonces la resistividad será alta. En la Figura 9 se muestra una imagen ilustradora de la pieza utilizada en el proyecto.



Figura 9: Sensor de Luminosidad.

- Sensor de voltage SCT-013.

El sensor de corriente utilizado en este proyecto es el sensor SCT-013, el cual pertenece a una serie de sensores que trabajan como transformadores, es decir, a corriente que fluye por medio del cable actúa como el devanado primario (1 espira) e internamente tiene un devanado secundario que dependiendo del modelo pueden tener hasta más de 2000 espiras. El modelo que se empleará en los módulos será el SCT-013-030, el cual se muestra en la Figura 10.

Este sensor es considerado un sensor no invasivo, cuenta con un núcleo ferromagnético, el cual se encuentra dividido actuando como una pinza, lo cual permite introducir el cable por donde fluye la corriente sin tener que trozarlo. Existen una gran variedad de tutoriales en línea que



Figura 10: Sensor de Corriente SCT013-030.

permiten conocer más sobre el uso y manejo de este tipo de sensores, de acuerdo a (LLamas, 2017) se debe prestar atención al momento de cerrar el núcleo, ya que éste debe estar cerrado adecuadamente pues al no hacerlo podría haber desviaciones de hasta el 10 % en las mediciones.

3.2. Diseño electrónico

A continuación, se muestra el diseño físico que se desarrolló para cada uno de los módulos que integran el sistema. Cada uno de ellos cuenta con un diseño esquemático donde se muestran las conexiones eléctricas que contiene, los módulos están formados por sensores y actuadores para interactuar con el ambiente, recopilar información y actuar de acuerdo al tipo de control que se desee emplear.

3.2.1. Módulo de Iluminación/Sensado (MIS)

Éste módulo permite recopilar datos de presencia de la habitación, así pues, cuando alguien entre o salga de dicha habitación el sistema será capaz de reconocer esta acción y utilizarla para tomar decisiones. Cuenta además con una bombilla led que proporciona la iluminación a la habitación. En la Figura 11, se muestra una imagen ilustradora sobre el aspecto de este módulo.

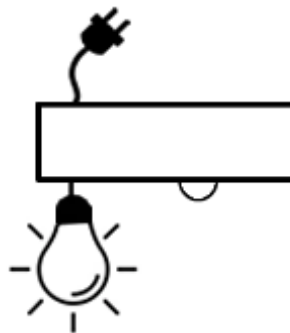


Figura 11: Módulo de Iluminación/Sensado.

Se realizó un diseño eléctrico señalando las conexiones internas del Módulo de Iluminación/Sensado, el cual se muestra en la Figura 12. Éste módulo cuenta con un sensor PIR, un sensor de corriente SCT-

013, así mismo cuenta con una bombilla led, la cual es controlada por medio de un relevador. El Módulo de Iluminación/Sensado puede ser empleado tanto en el sistema manual, como en el sistema inteligente, realizando algunas modificaciones en la programación de dicho módulo.

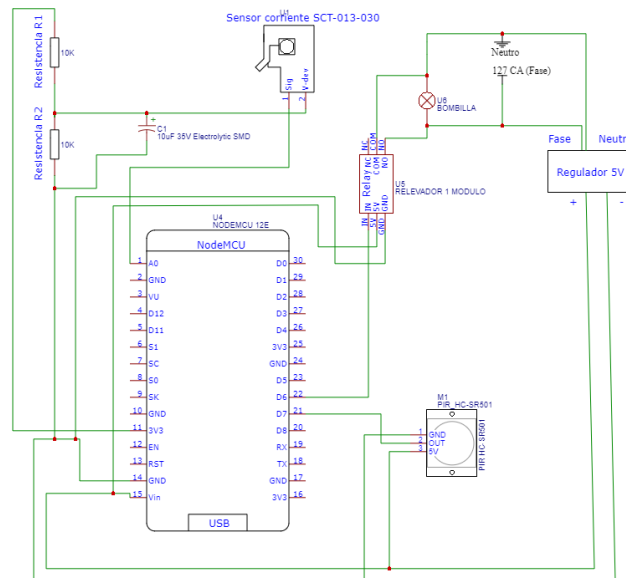


Figura 12: Diseño esquemático del Módulo de Iluminación/Sensado.

El componente central de éste módulo es la tarjeta electrónica NodemCU, cuyo microprocesador realiza la lectura de los datos leídos por los sensores y posteriormente publicados al resto del sistema. Esta tarjeta cuenta con un pin analógico, el cual permite realizar la lectura de datos continuos como lo es la corriente, y con pines digitales para la lectura de sensores cuyo valor leído solo es alto o bajo, un ejemplo de ello es el sensor PIR. En la Tabla 6, se muestran más detalles técnicos sobre los principales componentes del módulo.

Nombre	Características
NodeMCU	Contiene módulo ESP8266-12F, protocolos soportados 802.11 b/g/n y procesador 32 bits
HC-SR501	Detector de movimiento, con un ángulo de detección 110°
HC-SCT-013-030	Sensor de corriente, voltaje de alimentación de 1V, corriente de entrada de 0 a 30 A
Bombilla	Foco Led 9 watts, flujo luminoso de 800 lúmenes

Tabla 6: Componentes principales del Módulo de Iluminación/Sensado.

Sus componentes se soldarán a una baquelita perforada para mantenerlos fijos y evitar fallas en las conexiones, para finalmente colocarla dentro de una carcasa protectora que se describe más adelante.

3.2.2. Módulo Sensado (MS)

Para complementar la información sobre la presencia que recopila el Módulo de Iluminación/Sensado, éste módulo recopila información de presencia e iluminación dentro de la habitación. En la Figura 13, se muestra una imagen ilustradora sobre el aspecto de este módulo, este contará solo con sensores para comprobar las condiciones de su entorno y comunicárselo al sistema.

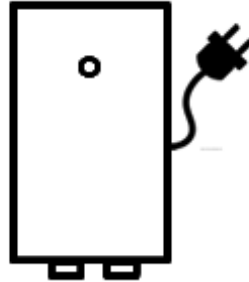


Figura 13: Módulo de Sensado.

El Módulo de Sensado tiene la finalidad de sensar datos de iluminación y presencia dentro de la habitación. Si bien el Módulo de Iluminación/Sensado del cual se habló anteriormente, también cuenta con un sensor de presencia, el Módulo de Sensado es un complemento a dicho dato pues al realizar algunas pruebas se pudo notar que existen puntos ciegos que se encuentran fuera del alcance del sensor PIR. En la Tabla 7, se muestra una descripción más detallada de los principales componentes electrónicos de éste módulo.

Nombre	Características
NodeMCU	Contiene módulo ESP8266-12F, protocolos soportados 802.11 b/g/n y procesador 32 bits
HC-SR04	Sensor ultrasónico. Rango de distancia de 2 a 500 cm, ángulo: 15° a 20°
HC-SCT-013-030	Sensor de corriente, voltaje de alimentación de 1V, corriente de entrada de 0 a 30 A
LDR	Valores típicos varían entre 1 Mega ohms o más en la oscuridad y 100 ohms con luz brillante, tiempo de respuesta de una décima de segundo

Tabla 7: Componentes principales del Módulo de Sensado.

Se propone un diseño electrónico (Figura 14), donde éstas conexiones se montan y soldan en una baquelita, de esta manera se evitarán falsos contactos. Para cubrir la habitación completa se utiliza este módulo en el acceso a la habitación, donde el marco de la puerta suele dificultar la detección de presencia por el sensor PIR. Para solventar este problema, se utiliza el sensor ultrasónico para complementar el dato de presencia en la habitación. Por último, el sensor de luminosidad puede monitorear el nivel de luminosidad del entorno y publicar los cambios cuando sea necesario.

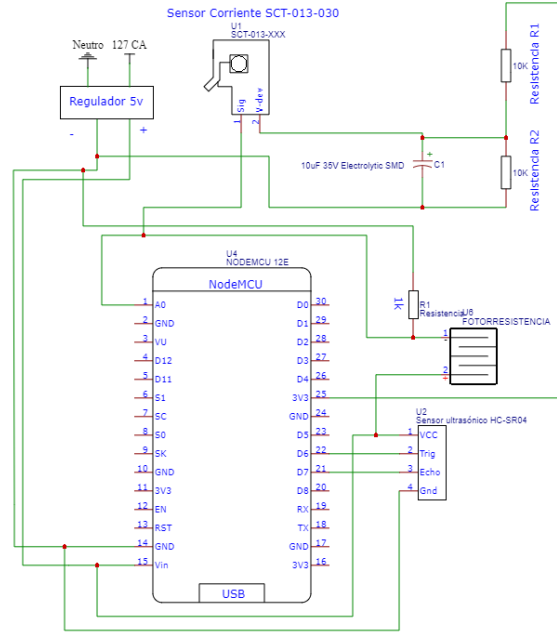


Figura 14: Diseño esquemático del Módulo de Sensado.

3.2.3. Módulo Manual (MM)

Éste módulo ofrece al usuario la posibilidad de comunicarse con el sistema directamente, él puede controlar el estado de la luminaria de acuerdo a sus necesidades. Este módulo contendrá solo un botón, el cual podrá manipular la luminaria de forma manual, donde el usuario será el encargado de controlar el encendido y apagado de forma sencilla. En la Figura 15, se muestra una imagen ilustradora.

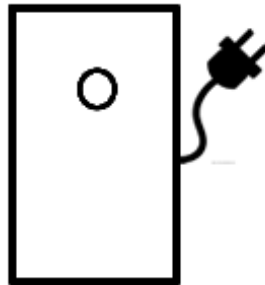


Figura 15: Módulo Manual.

Este módulo será colocado sobre la pared, de forma que sea de fácil acceso para el usuario. En la Figura 16, se muestra el diseño esquemático del módulo con las conexiones entre sus componentes. Estos componentes serán colocados dentro de una carcasa para proteger dichos componentes y evitar fallos en las conexiones.

Como se puede ver en el esquema eléctrico, el Módulo Manual cuenta con un botón, cuya finalidad es actuar como un interruptor para el sistema manual. A continuación, en la Tabla 8, se muestran los

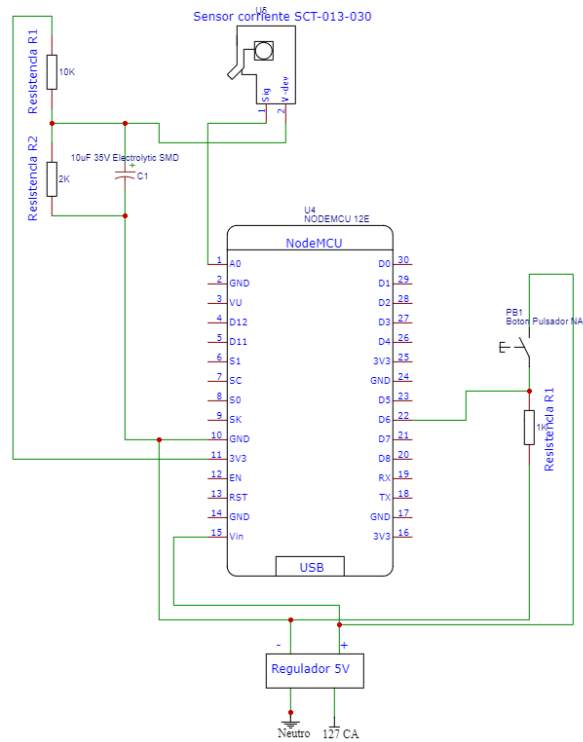


Figura 16: Diseño esquemático del Módulo Manual.

principales componentes de este módulo, así como una breve descripción de cada uno de ellos.

Nombre	Características
NodeMCU	Contiene módulo ESP8266-12F, protocolos soportados 802.11 b/g/n y procesador 32 bits
HC-SCT-013-030	Sensor de corriente, voltaje de alimentación de 1V, corriente de entrada de 0 a 30 A

Tabla 8: Componentes principales del Módulo Manual.

El diseño del sistema propuesto en este trabajo de tesis permitirá que sea sencillo cambiar la forma de utilizarlo, este módulo será utilizado cuando se desee utilizar el sistema de forma manual y se omitirá cuando se opte por utilizar el sistema en modo inteligente dado que no será necesario que el usuario ejerza un control directo sobre las luminarias.

3.2.4. Módulo de Recompensa (MR)

El Módulo de Recompensa es uno de los componentes del sistema inteligente, con el uso de este módulo el aprendizaje del sistema podrá ser continuo, basándose en la opinión del usuario, el sistema podrá modificar sus propias acciones para mejorar constantemente y lograr que el usuario se sienta conforme con las decisiones que éste tome. En la Figura 15, se muestra una imagen del Módulo de

Recompensa. Este módulo contendrá dos botones, cada uno de ellos proporcionará una recompensa ya sea positiva o negativa.

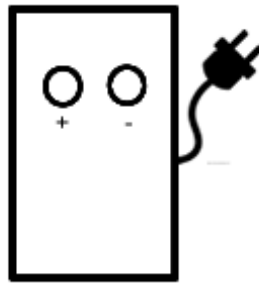


Figura 17: Módulo recompensa.

Durante la etapa de diseño se propone un esquemático que se muestra en la Figura 18, donde se pueden ver las conexiones entre los componentes que conforman el módulo. Éste módulo se basa en el uso de dos botones para generar el valor de recompensa, además incluye un sensor de corriente para conocer cuánto es el consumo eléctrico del módulo.

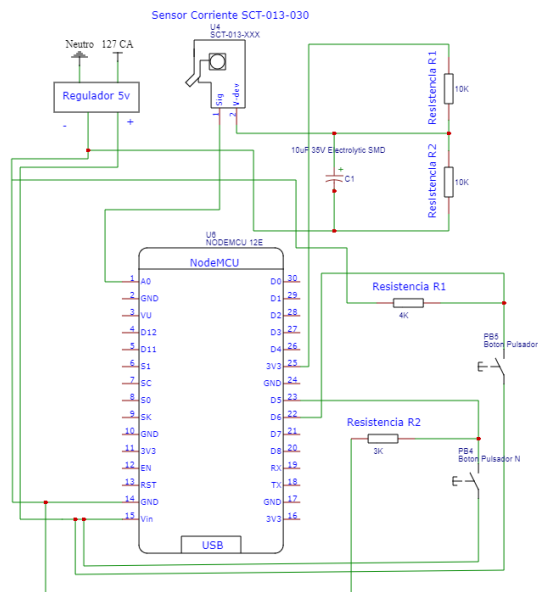


Figura 18: Diseño esquemático del Módulo de Recompensa.

Con el uso de éste módulo se proporciona retroalimentación al sistema, el usuario puede evaluar el desempeño del sistema por medio de este módulo e indicarle cuando acierta o no en la toma de decisiones por medio de una recompensa positiva o negativa, según sea el caso. A continuación, en la Tabla 9, se muestran los principales componentes de este módulo, así como una breve descripción de cada uno de ellos.

Nombre	Características
NodeMCU	Contiene módulo ESP8266-12F, protocolos soportados 802.11 b/g/n y procesador 32 bits
HC-SCT-013-030	Sensor de corriente, voltaje de alimentación de 1V, corriente de entrada de 0 a 30 A

Tabla 9: Componentes principales del Módulo de Recompensa.

Dada la funcionalidad del sistema manual diseñado, el Módulo de Recompensa no es utilizado en conjunto con este tipo de sistema, dado que no es necesario otorgar retroalimentación al sistema cuando es utilizado en forma manual ya que el usuario posee el control sobre el mismo.

3.2.5. Módulo de Control (MC)

Es el componente central del sistema propuesto. Los datos recopilados por los módulos serán enviados al Módulo de Control donde serán almacenados y posteriormente procesados de acuerdo al tipo de funcionamiento seleccionado. Contendrá, además, un algoritmo de aprendizaje por refuerzo, lo que le permitirá al sistema inteligente poder tomar sus propias decisiones y tener un aprendizaje constante. Tanto los módulos como el usuario podrán comunicarse con el sistema mediante este módulo. En la Figura 19, se muestra una imagen descriptiva.

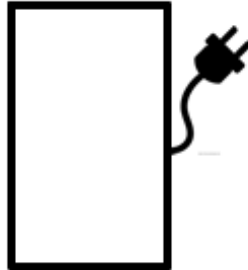


Figura 19: Módulo de Control.

A continuación, en la Tabla 10, se muestran los principales componentes de este módulo, así como una breve descripción de cada uno de ellos. Dado que este módulo tendrá la mayor carga de trabajo en el sistema, en esta ocasión se optó por utilizar una tarjeta raspberry pi 4B como componente central del módulo. Al ser un microcomputador con varios núcleos es posible realizar tareas de forma simultánea, tales como mantener la comunicación del sistema con el servidor, recibir, procesar y almacenar la información que llegue al módulo, así como la ejecución del algoritmo inteligente.

La corriente eléctrica es un valor analógico, sin embargo, la tarjeta raspberry pi 4B utilizada en esta tesis solo posee entradas digitales, por lo cual no se cuenta con una entrada que sea capaz de leer este dato. Para poder obtener la corriente consumida por el Módulo de Control se optó por utilizar un convertidor analógico digital llamado ADS1115, el cual por medio de los pines SDA y SCL establece una

Nombre	Características
RASPBERRY PI	Voltaje de alimentación 5 V, protocolos soportados: 802.11 ac. Soporte de red: 2.4GHz y 5GHz, SDRAM: 2GB, procesador: 64-bits
ACS 712	Sensor de corriente, voltaje de operación de 4.5V 5.5V, sensibilidad de salida: 66 a 185 mV/A

Tabla 10: Componentes principales del Módulo de Control.

comunicación serial I2C donde se crean cuatro canales de comunicación para leer los datos analógicos. En la Figura 20, se muestra el diseño esquemático del módulo con las conexiones entre sus componentes.

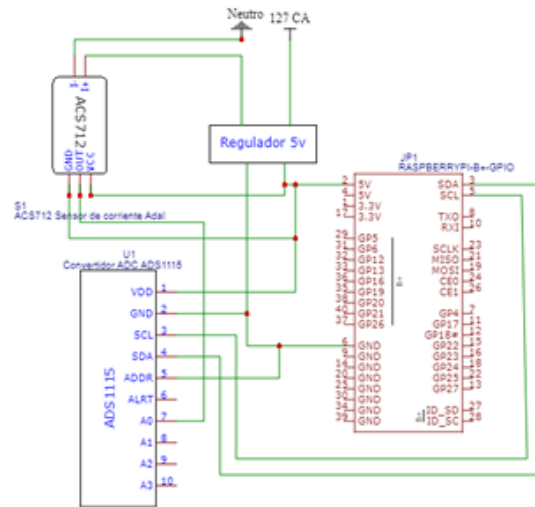


Figura 20: Diseño esquemático del Módulo de Control.

3.3. Diseño carcacas

Como parte del diseño de hardware del sistema diseñado, se incluye un bosquejo de carcacas para proteger los módulos propuestos, cada uno de ellos tiene medidas diferentes de acuerdo a los componentes que los integran. Estos diseños pueden ser impresos en impresoras 3D. Una vez que los diseños electrónicos hayan sido implementados y las conexiones hayan sido revisadas, se puede proceder a montarlos dentro de las carcacas para finalmente utilizarlos en el sistema. A continuación, se muestran estos diseños de forma más detallada en las siguientes secciones.

3.3.1. Módulo de Iluminación/Sensado

Como se mostró en la sección de diseño electrónico, el Módulo de Iluminación/Sensado está integrado por componentes con diferentes dimensiones, por lo cual al momento de diseñar la carcasa protectora se deben tomar en cuenta para poder colocarlos todos dentro. En la Tabla 11, se muestran las dimensiones específicas de los componentes con mayor volumen para dar una idea general del espacio que abarcará el diseño una vez haya sido implementado.

Componente	Dimensiones
HC-SR501	3.2 x 2.4 x 1.8 cm
Relevador	4.3 x 1.8 x 2 cm
SCT-013-030	3.5 x 6 x 2 cm
Regulador	5.3 x 2.8 x 2 cm
NodeMCU	3.5 x 6 x 2 cm

Tabla 11: Dimensiones de algunos componentes del Módulo de Iluminación/Sensado.

Al momento de realizar el diseño electrónico existen algunas conexiones que deben realizarse sobre una baquelita al momento de ser soldados, por lo cual es importante considerar este espacio extra al momento de contemplar las dimensiones finales de la carcasa. Así mismo, se deben tomar en cuenta las características del sensor HC-SR501, pues es necesario contar con un orificio por medio del cual el sensor pueda sentir la habitación sin barreras de por medio que puedan alterar las lecturas. En la Figura 21, se muestra el diseño final de la carcasa.

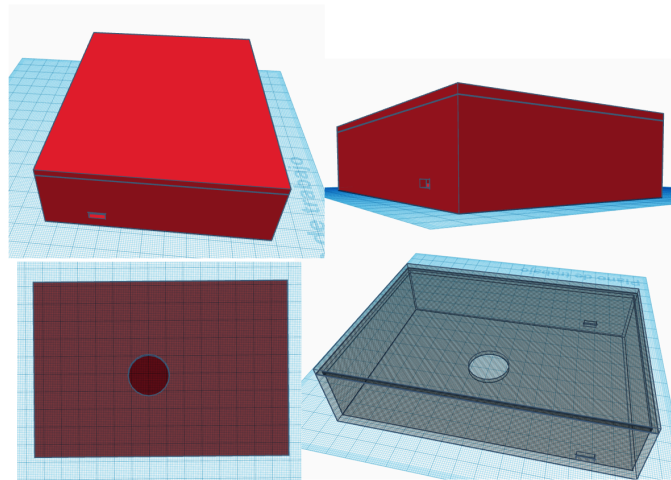


Figura 21: Diseño de carcasa para el Módulo de Iluminación/Sensado.

Como se puede notar en la figura anterior, la carcasa está compuesta por un contenedor rectangular y una tapa, cuenta con un orificio para el sensor de presencia, así como dos orificios más pequeños por donde se introducirá el cable de corriente para la alimentación del módulo, siendo el otro orificio

la salida para el cable que se conectará con la bombilla. Las dimensiones finales de la carcasa para el Módulo de Iluminación/Sensado son: 9.9 x 14.4 x 3.6 cm.

3.3.2. Módulo Sensado

Los sensores empleados en el Módulo de Sensado son más especiales en cuanto a sus dimensiones, tanto el LDR como el sensor HC-SR04 necesitan mantener contacto directo con el exterior, por lo cual es necesario contar con orificios para que las lecturas de los sensores puedan realizarse adecuadamente. En la Tabla 12, se muestran las dimensiones de algunos de los componentes del Módulo de Sensado.

Componente	Dimensiones
HC-SR04	4.5 x 2 x 1.5 cm
SCT-013-030	3.5 x 6 x 2 cm
Regulador	5.3 x 2.8 x 2 cm
NodeMCU	3.5 x 6 x 2 cm

Tabla 12: Dimensiones de algunos componentes del Módulo de Sensado.

Este diseño se realizó según las dimensiones de los componentes que forman el Módulo de Sensado, teniendo en cuenta su funcionalidad, esta carcasa cuenta con un orificio para el cable de alimentación del módulo, así como un par de orificios en la parte inferior de la carcasa para el sensor HC-SR04 y uno más en la parte frontal para el LDR. En la Figura 22, se muestra una imagen más clara del diseño de la carcasa para este módulo.

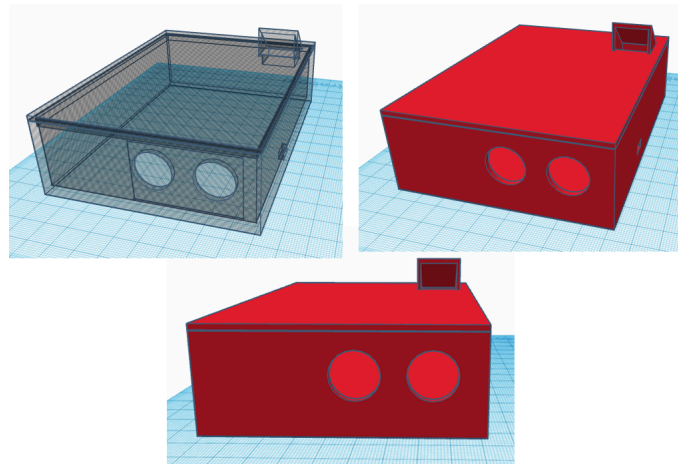


Figura 22: Diseño de carcasa para el Módulo de Sensado.

El diseño final consta de un contenedor rectangular con su respectiva tapa, este módulo contiene más sensores, por lo cual fue necesario realizar más orificios sobre la superficie diseñada. Las dimensiones finales de la carcasa para el Módulo de Sensado son: 9.4 x 13.4 x 5.2 cm.

3.3.3. Módulo Manual

El Módulo Manual es uno de los módulos más sencillos del sistema, como se mostró anteriormente en el diseño electrónico de este módulo, solo contiene un sensor que no necesita estar fuera de la carcasa, sin embargo, contiene un botón que, si necesita hacerlo. En la Tabla 13, se muestran las dimensiones de sus componentes con mayor volumen.

Componente	Dimensiones
SCT-013-030	3.5 x 6 x 2 cm
Regulador	5.3 x 2.8 x 2 cm
Botón	1.4 x 1.4 x 4 cm
NodeMCU	3.5 x 6 x 2 cm

Tabla 13: Dimensiones de algunos componentes del Módulo Manual.

El montaje electrónico del Módulo Manual se realiza sobre una baquelita, al tomar en cuenta las dimensiones de los componentes que lo integran y sumándole la dimensión de la baquelita, el diseño de la carcasa que se propone para este módulo se puede observar en la Figura 23.

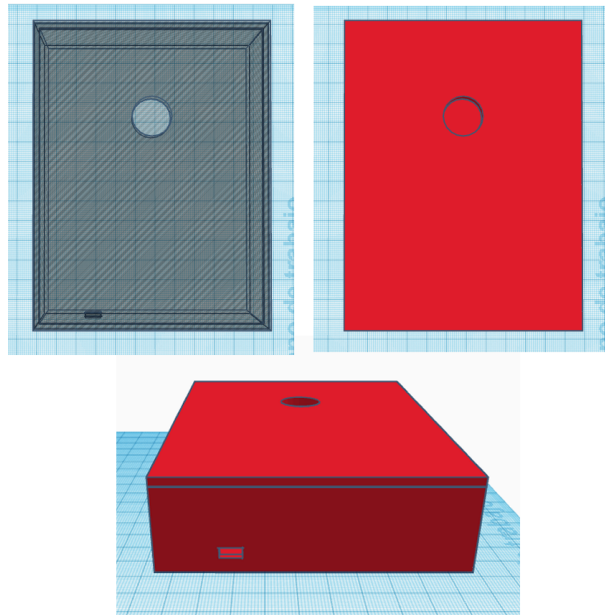


Figura 23: Diseño de carcasa para el Módulo Manual.

Como se puede observar el diseño consiste en un contenedor rectangular, al igual que los módulos anteriores, este módulo incluye una clavija para conectarlo a la toma de corriente por lo cual se añadió un orificio para la salida del cable de alimentación y un orificio más en la parte frontal de la carcasa para el botón, haciéndolo más accesible para el usuario. Las dimensiones finales de la carcasa para el Módulo Manual son: 9.4 x 12.5 x 3.5 cm.

3.3.4. Módulo de Recompensa

Como se mostró en la sección anterior de diseño electrónico, el Módulo Manual es similar al Módulo de Recompensa, en el caso de éste último se tiene un botón extra para lograr el usuario pueda transmitir su opinión respecto al desempeño del sistema. En la Tabla 14, se muestran las dimensiones de los principales componentes del módulo.

Componente	Dimensiones
SCT-013-030	3.5 x 6 x 2 cm
Regulador	5.3 x 2.8 x 2 cm
Botón	1.4 x 1.4 x 4 cm
NodeMCU	3.5 x 6 x 2 cm

Tabla 14: Dimensiones de algunos componentes del Módulo de Recompensa.

El diseño que se realizó para el Módulo de Recompensa se compone de un contenedor rectangular y una tapa, en dicha tapa se crearon dos orificios uno para el botón de retroalimentación positiva y otro para el botón de retroalimentación negativa. El Módulo será alimentado por medio de una clavija, el cable de alimentación entrará por la parte inferior de la carcasa para suministrar electricidad al módulo. En la Figura 24, se muestra el diseño final de la carcasa.

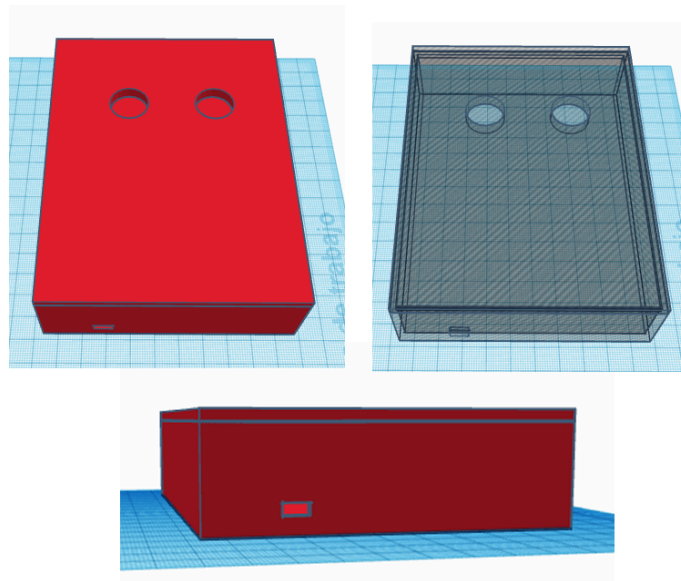


Figura 24: Diseño de carcasa para el Módulo de Recompensa.

Este módulo forma parte del sistema inteligente, está configurado para conectarse al sistema, el usuario puede compartir la opinión presionando uno de los dos botones y posteriormente el módulo se encargará de codificar dicha información y compartirla con el Módulo de Control donde será utilizada por el algoritmo inteligente para mejorar su aprendizaje. Las dimensiones finales de la carcasa para el Módulo de Recompensa son: 9.4 x 12.5 x 3.5 cm.

3.3.5. Módulo de Control

El Módulo de Control es el encargado de recopilar la información de todos los módulos del sistema, procesarlos y enviar de regreso al Módulo de Iluminación/Sensado la acción que la bombilla debe realizar, por ello es necesario contar con microprocesador capaz de realizar múltiples tareas. En la Tabla 15, se puede observar las dimensiones de sus principales componentes.

Componente	Dimensiones
Raspberry pi 4B	5.5 x 9 x 1.8 cm
ACS712	1.4 x 3.2 x 1.2 cm
ADS1115	1.7 x 2.8 x 1.1 cm

Tabla 15: Dimensiones de algunos componentes del Módulo de Control.

En esta ocasión la carcasa diseñada solo cuenta con un orificio para el cable de alimentación del módulo, como se puede observar en la Figura 25, el resto de los componentes se mantienen dentro de la carcasa. Aunque las dimensiones de la tarjeta electrónica empleada son mayores, las conexiones entre sus componentes pueden realizarse sobre la misma tarjeta haciendo que el uso de una baquelita sea innecesario y de esta forma se pueda ahorrar espacio.

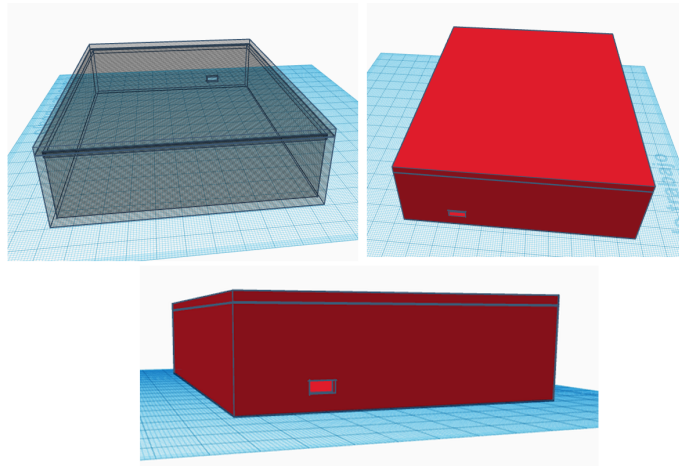


Figura 25: Diseño de carcasa para el Módulo de Control.

El Módulo de Control forma parte tanto del sistema inteligente, así como el sistema manual. Al ser el componente central de ambos, será el módulo con mayor actividad, por lo cual, el diseño de una carcasa que ayude a proteger sus componentes es importante para mantener su buen funcionamiento y evitar daños en sus componentes o conexiones. Las dimensiones finales de la carcasa para el Módulo de Control son: 10.4 x 12.6 x 3.3 cm.

3.4. Síntesis y conclusiones del capítulo

En este capítulo se presentó el hardware diseñado para el sistema. Los principales componentes electrónicos que conforman los distintos módulos del sistema diseñado abarcan desde sensores que permitirán monitorear las habitaciones en tiempo real, así como tarjetas electrónicas que se encargarán de trabajar las señales de los sensores y codificarlas para poder ser transmitidas y trabajadas posteriormente.

Las tarjetas electrónicas son la base de los módulos, como se puede observar en los diseños electrónicos expuestos en este capítulo. El circuito diseñado se centra en la tarjeta electrónica del módulo, donde se conectan todos los componentes para que ésta pueda tratar la información. En el caso del Módulo de Control, las tareas a realizar son más complejas, por lo cual las funciones y capacidad de la tarjeta (Raspberry pi 4b) también son mejores que las capacidades de la tarjeta utilizada en el resto de los módulos (NodemCU).

Finalmente se compartieron los diseños y medidas de las carcasas protectoras para cada uno de los módulos. Estos diseños 3D pueden ser trabajados e impresos con ayuda de una impresora 3D, los diseños pueden ser mejorados para reducir el tiempo de impresión y evitar fallos como los presentados en este trabajo.

4. Capítulo 4. Arquitectura de software propuesta

4.1. Diseño del sistema

El sistema diseñado en esta tesis está compuesto por diferentes tipos de módulos. Cada módulo proporciona información al sistema que le permita actuar según el tipo de control que se haya seleccionado. Para el sistema de iluminación se diseñaron dos arquitecturas, el sistema con control manual, donde el usuario puede tener un dominio total de las luminarias, en cambio la arquitectura del sistema con control inteligente permite que explore y aprenda del entorno, manipulando las luminarias sin la intervención directa del usuario.

Ambas arquitecturas funcionan de forma similar, compartiendo información y cumpliendo órdenes, ya sea por parte del usuario o del propio sistema. La elección del tipo de control que se desea tener sobre el sistema, determinará el tipo de módulos que se utilizarán. En la Figura 26, se muestran los módulos que se emplean en el sistema de acuerdo al tipo de control elegido.

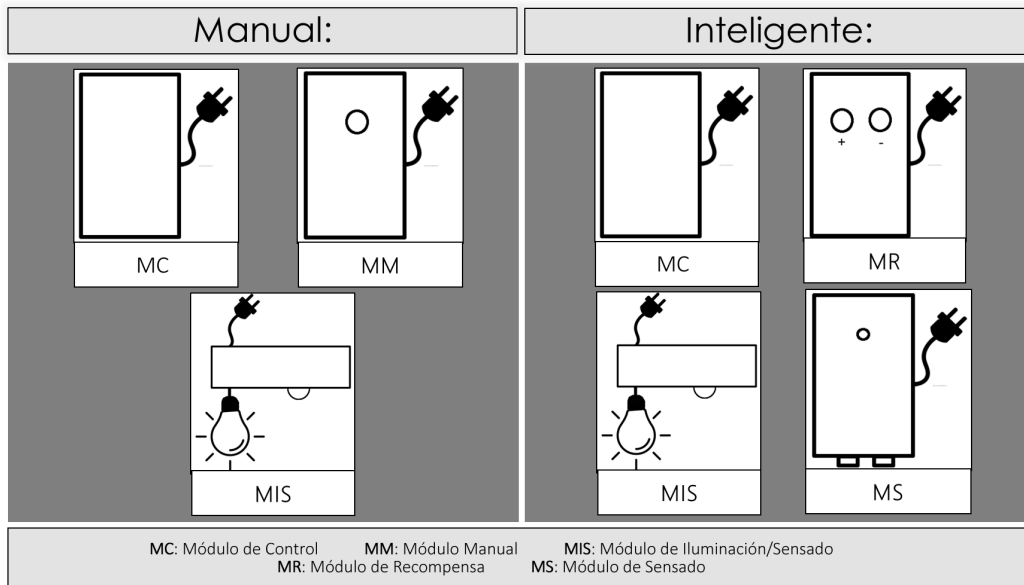


Figura 26: Módulos que integran el sistema de acuerdo al tipo de control.

4.1.1. Sistema con control manual

Actualmente el control manual de las luminarias es la técnica de control más empleada en iluminación de interiores, por lo cual el sistema diseñado tiene una arquitectura de control manual por medio de la domótica, donde el usuario pueda tener un control total de la o las luminarias del lugar por medio del Módulo Manual. En la Figura 27, se muestra un esquema general del funcionamiento de esta arquitectura.

El usuario podrá transmitir una acción a la luminaria al presionar el botón del Módulo Manual,

dicho botón actuará como un interruptor para la luminaria. Mediante la red creada para el sistema, el Módulo Manual comparte la información hacia el Módulo de Control, donde es procesada y trabajada para finalmente ser reenviada hacia el Módulo de Iluminación/Sensado correspondiente.

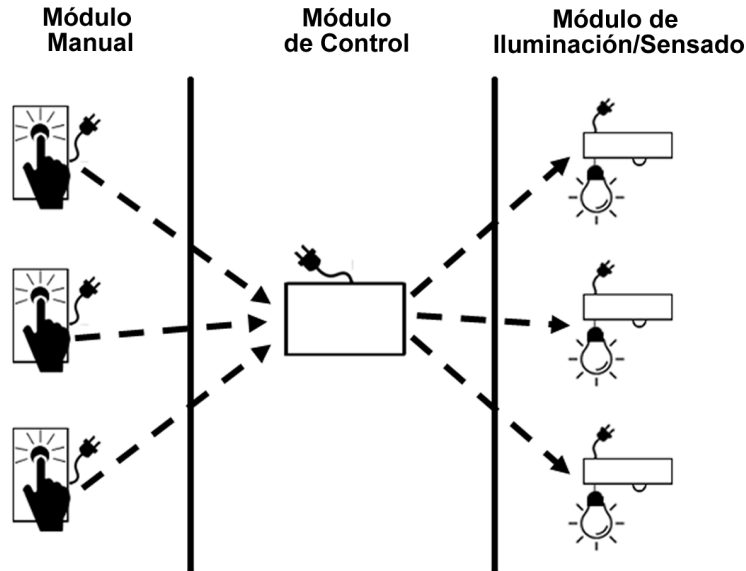


Figura 27: Ilustración de funcionalidad del sistema con control manual.

Como se observó en la figura anterior, el sistema manual está integrado por tres módulos:

- **Módulo de Control.** Éste módulo es el componente central del sistema, el cual se encarga de establecer la comunicación entre los módulos que lo integran, procesando y enrutando los mensajes que se reciban hacia su destino.
- **Módulo de Iluminación/Sensado.** El módulo posee una bombilla, la cual es la encargada de administrar iluminación a la habitación, cuando así sea indicado por el usuario.
- **Módulo Manual:** este módulo permite al usuario controlar las luminarias de la habitación, indicando cuando desee que la luminaria sea encendida o apagada.

Su funcionamiento es similar al sistema de iluminación tradicional, ofreciéndole al usuario el poder de tener el control total de las luminarias. Para hacer uso de esta arquitectura basta con seleccionar los módulos necesarios y seleccionar el tipo de control que se desea implementar, para finalmente ejecutar el software.

El sistema con control manual fue creado con el fin de ser utilizado como referencia para evaluar el sistema con control inteligente. De esta forma durante la experimentación se pueden obtener datos valiosos al comparar el desempeño de ambos, para posteriormente complementarlos con los resultados finales de consumo y experiencia del usuario.

4.1.2. Sistema con control Inteligente

Se diseñó además una arquitectura inteligente, donde el sistema posee un control independiente del usuario, capaz de tomar sus propias decisiones de acuerdo a la información que recibe. Como se muestra en la Figura 28, el sistema con control inteligente está integrado por cuatro diferentes tipos de módulos: Módulo de Sensado, Módulo de Iluminación/Sensado, Módulo de Control y el Módulo de Recompensa. Los módulos antes mencionados están ubicados dentro de las diferentes habitaciones (HB01, HB02, HB03), con los cuales el sistema puede monitorearlas y proveer la iluminación adecuada a cada una de las habitaciones.

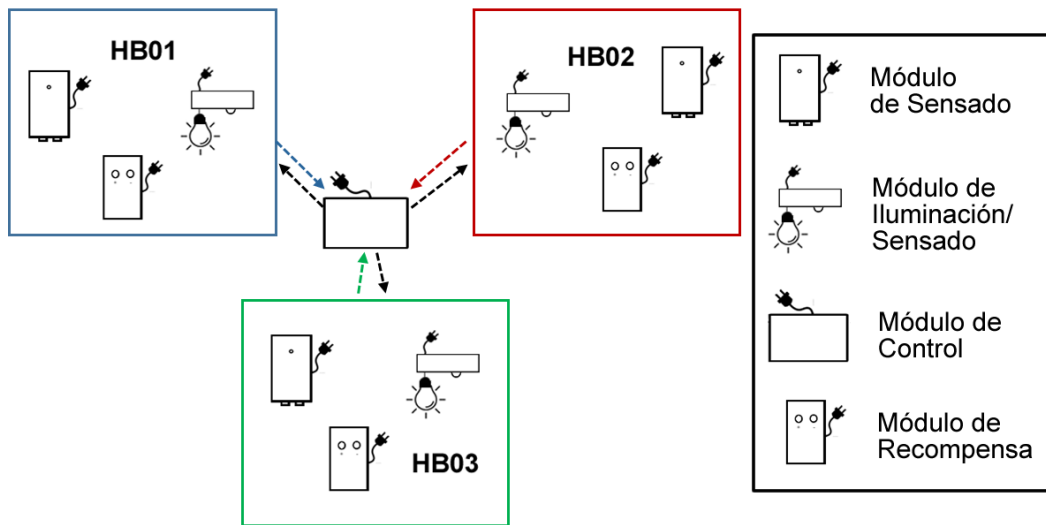


Figura 28: Ilustración de funcionalidad del sistema con control inteligente.

Los dispositivos pueden colocarse en diferentes habitaciones. Para poder conocer las condiciones del entorno en el que se emplea se hace uso de sensores. Al igual que el sistema manual, el Módulo de Control será el centro del sistema, se incluye también el Módulo de Iluminación/Sensado, el cual proporciona la iluminación a la habitación y recopila información del entorno. Aunado a los dos módulos anteriores, se incluyen los siguientes módulos:

- Módulo de Sensado. Éste módulo incluye sensores que recopilan información del entorno y lo comparten con el sistema para la toma de decisiones. Los datos recopilados serán: presencia y luminosidad.
- Módulo de Recompensa. El usuario puede hacer uso de este módulo para indicarle al sistema si se encuentra o no satisfecho con la decisión tomada. Este dato será considerado como una recompensa para la acción elegida por el sistema, la cual puede ser positiva o negativa.

Este sistema ofrece un control de las luminarias sin la interacción directa del usuario. Las decisiones serán tomadas por el propio sistema para el control de la iluminación. De acuerdo al conocimiento

adquirido durante las pruebas que se deben realizar de forma previa, el sistema aprende con ayuda de las recompensas otorgadas por el usuario, lo cual le permite ser cada vez mejor.

Esta retroalimentación permite el continuo aprendizaje del sistema. Para tomar las decisiones los módulos comparten con el sistema la información recopilada por los sensores, por medio de la red inalámbrica WiFi. El Módulo de Control se encarga de procesarla internamente y posteriormente tomar una decisión para compartirla con el módulo correspondiente para manipular las luminarias.

4.2. Comunicación

El sistema está diseñado para que su instalación sea sencilla y el usuario no deba hacer mucho trabajo para poder utilizarlo, por lo cual se optó por utilizar una comunicación inalámbrica entre los componentes del sistema mediante una red WiFi. Actualmente las redes WiFi es una de las redes más usadas para conectar diferentes dispositivos de forma inalámbrica, dado que no dependen de un cable para intercambiar mensajes y es compatible con varios dispositivos electrónicos.

El sistema diseñado puede ser instalado sobre la red eléctrica actual sin necesidad de realizar modificaciones a la misma, así mismo se puede hacer uso de la red WiFi del hogar o la oficina. Para instalar el sistema diseñado solo es necesario contar con una red eléctrica y WiFi en el lugar donde se utilizará.

Por medio de la tecnología WiFi los dispositivos electrónicos se conectan a la red inalámbrica, los datos recopilados por cada módulo deberán establecer una ruta de destino dentro del sistema para poder ser enrutados de acuerdo al protocolo de red configurado. A continuación, se describe con más detalle el diseño de la arquitectura de comunicación que se empleó en el sistema.

4.2.1. Protocolo MQTT

Uno de los protocolos de comunicación más usados en internet de las cosas es MQTT (“Message Queue Telemetry Transport”). Este protocolo de mensajería soporta la comunicación asíncrona, donde el emisor y el receptor están desasociados tanto en espacio y tiempo. Es utilizado para la comunicación “machine-to-machine”(M2M), su consumo de ancho de banda es poco y puede ser utilizado en dispositivos con pocos recursos.

La arquitectura de MQTT sigue una topología estrella (véase la Figura 29), con un nodo central o “broker” con una capacidad de hasta 10000 clientes. El broker es el encargado de gestionar la red y de transmitir los mensajes, para mantener activo el canal, los clientes mandan periódicamente un paquete (PINGREQ) y esperan la respuesta del broker (PINGRESP) (Esteso, 2015).

MQTT trabaja con diferentes entidades en una red:

- Broker: el servidor recibe todos los mensajes de los clientes y luego los redirige a clientes de destinos relevantes.

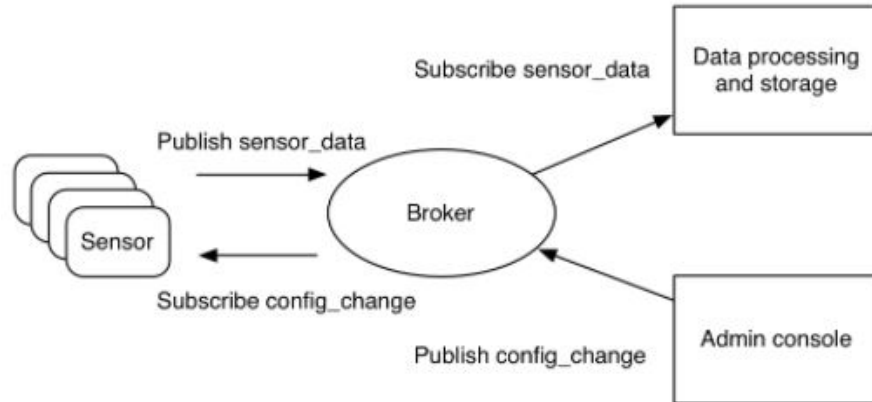


Figura 29: El modelo de publicación y suscripción de MQTT.

- Cliente: un cliente es aquel que puede interactuar con un intermediario para enviar y recibir mensajes, puede suscribirse a cualquier tema y publicar mensajes. Puede ser un sensor del Internet de las cosas (IoT por su siglas en inglés) o una aplicación de procesamiento de datos IoT.

En la Figura 30, se muestra el proceso interno realizado por el servidor MQTT y los clientes para establecer la comunicación en red y el intercambio de mensajes. Al iniciar el sistema se establecen las conexiones. El cliente (sensor) se conecta con el intermediario, enviando un mensaje CONNECT con la información necesaria (nombre de usuario, contraseña, client-id, etc), el broker responde con un mensaje CONNACK el cual contiene el resultado de la conexión. Para enviar mensajes, el cliente emplea mensajes PUBLISH, estos mensajes contienen el topic y el payload. El broker redirige el mensaje a todos los clientes que están suscritos a ese topic. Para dar de baja una suscripción se emplean mensajes UNSUBSCRIBE, mientras el servidor responde con un mensaje UNSUBACK (Llamas, 2019).

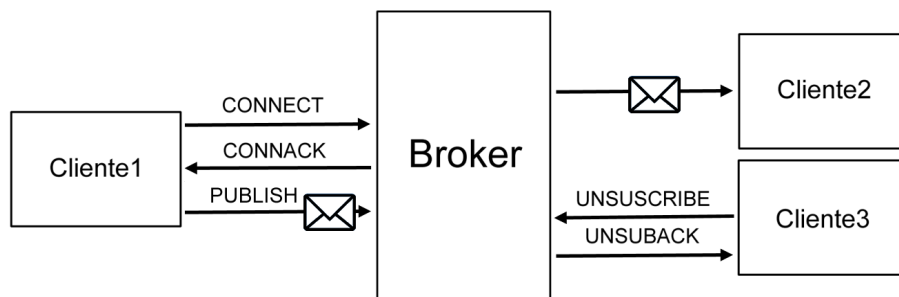


Figura 30: Intercambio de paquetes entre el broker y los clientes conectados.

Su sencillez y ligereza son grandes ventajas en este tipo de sistemas, requiere un ancho de banda mínimo, las aplicaciones IoT frecuentemente utilizan dispositivos de escasa potencia. A menor cantidad de recursos empleados se necesitará un menor consumo de energía, lo cual convierte a MQTT en uno de los mejores protocolos de comunicación M2M.

4.2.2. Diseño arquitectura de comunicación

De acuerdo al modelo “publicación y suscripción”, trabajado en MQTT, cada uno de los módulos representará un cliente capaz de enviar y recibir mensajes del broker, poseerán un tópico propio bajo el cual publicará sus mensajes. Como se puede observar en la Figura 31, el Módulo de Control se encuentra en el centro de la red siendo el broker, donde se recibirán todos los mensajes proporcionados por el resto de los módulos conectados.

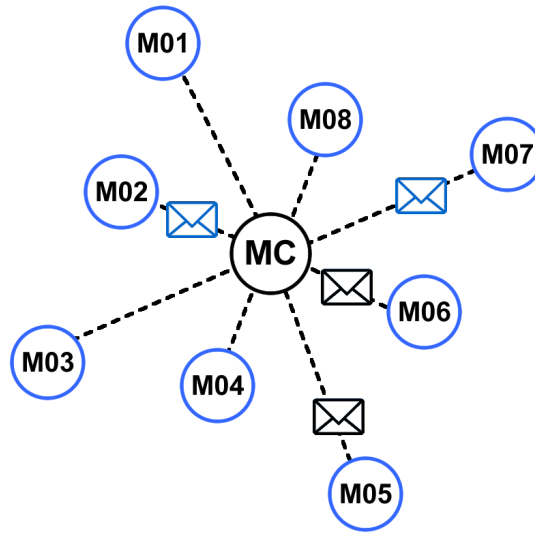


Figura 31: Arquitectura de comunicación del sistema.

De acuerdo a la información proporcionada por la fundación Eclipse (asociación internacional sin fines de lucro, que busca proporcionar a la comunidad global de personas y organizaciones un entorno maduro, escalable y favorable a las empresas para la colaboración y la innovación en software de código abierto), mosquitto es un intermediario de mensajes de código abierto que implementa el protocolo MQTT para transmitir mensajes. Es ampliamente utilizado en IoT ya que proporciona una forma de intercambiar información en el sistema, es liviano y está disponible para una amplia variedad de plataformas, puede ser utilizado por sensores de baja potencia, computadoras de bajos recursos o incluso por servidores completos.

Como se explicó anteriormente, MQTT está basado en un protocolo de mensajería de publicación/suscripción, donde todos los clientes se conectan a un punto central llamado servidor o broker. Los mensajes que llegan al broker son distribuidos hacia aquellos clientes que se han suscrito a un tema específico, a dicho tema se le llama tópico. Puede haber uno o varios clientes suscritos al mismo tema. En la Figura 32, se muestra una ilustración con la interacción que puede existir entre cliente-servidor. Los diferentes clientes conectados al broker (Cliente 1, 2, 3 y 4) pueden emplear los diferentes servicios que ofrece. En el caso del Cliente 1 y 4, solo emplea el servicio de suscripción. El cliente 2 emplea el servicio de publicación. Los tres clientes emplean solo un servicio, sin embargo, el Cliente 3 emplea el

servicio de publicación y el servicio de suscripción de forma simultánea.

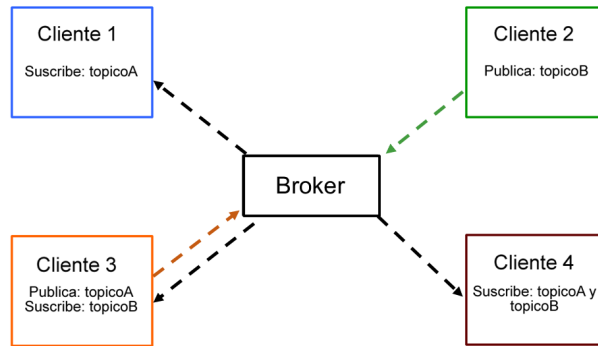


Figura 32: Comunicación cliente-servidor.

El tema o tópico en la comunicación MQTT, es una categoría que a su vez puede contener subcategorías. Los clientes pueden crear mensajes con un tópico específico o suscribirse a ellos, en la Figura 33, se muestra un diagrama con la idea general del funcionamiento de los tópicos en el sistema diseñado con un control inteligente. La etiqueta HB se utiliza para indicar la habitación, mientras la etiqueta M enumera los módulos del sistema, finalmente la etiqueta CP indica el componente.

La Figura 33 muestra un ejemplo de la configuración de los tópicos del sistema, sin embargo esta puede ser modificada en el archivo de configuración del sistema, de acuerdo a la instalación física que se realice de cada uno de los módulos. El archivo de configuración permite indicar el nombre de cada componente, así como el nombre de cada módulo y habitación. La ubicación de cada módulo dentro de las habitaciones dependerá de la instalación física que se realice y deberá especificarse en el archivo de configuración del sistema.

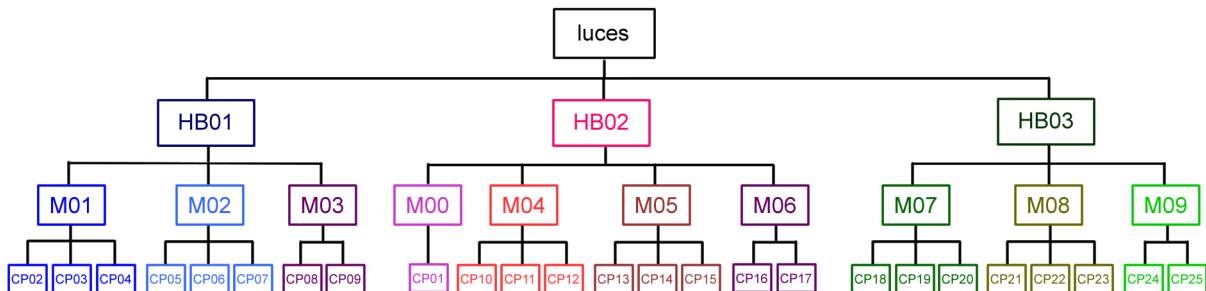


Figura 33: Ejemplo de tópicos en MQTT.

De acuerdo a la Figura 33, cuando un cliente se suscribe a un tópico, se estará suscribiendo a las sub-categorías que éste contenga. Así pues, si un cliente se suscribe al tópico M02 podrá escuchar los mensajes de todos los componentes que lo integran: CP05, CP06 y CP07.

Cuando un cliente desea suscribirse a un tópico se debe especificar el nivel al que se desea suscribir mediante el uso del símbolo /. Por ejemplo, si el cliente se desea suscribir al tópico M01, la sintaxis para indicarlo sería: luces/HB01/M01, partiendo del primer nivel (luces), pasando por la habitación

que contienen el módulo (HB01) y finalmente indicando el módulo al que se desea suscribir.

Existen ocasiones especiales donde el cliente desea suscribirse a varios niveles por debajo de una categoría, por ejemplo, si el cliente desea escuchar los mensajes de todos los módulos en todas las habitaciones se utilizará el símbolo # para indicarlo. La sintaxis para lograrlo sería: luces/#, de esta forma se recibirán todos los mensajes de los diferentes niveles del tópico “luces”.

Se cuenta además con el símbolo +, el cual se puede utilizar para indicar que un cliente se desea suscribir a todos los tópicos de un nivel. Por ejemplo, en el caso que se muestra en la Figura 34, se tienen tres habitaciones, si el cliente (habitacion1) se desea suscribir a todos los tópicos de presencia en el sistema se puede utilizar la siguiente sintaxis: casa/+/presencia. El símbolo + se utiliza para sustituir el nivel que se encuentre entre casa y presencia.

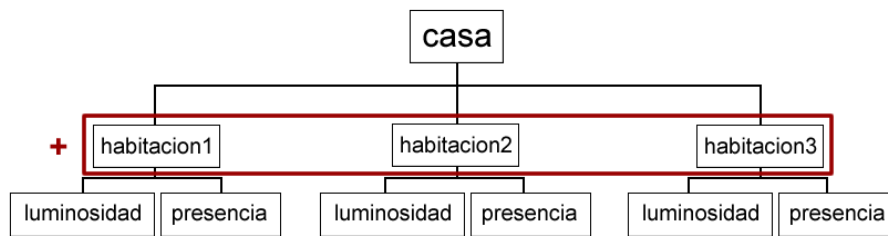


Figura 34: Suscripción MQTT a tópico presencia.

Los mensajes que se intercambian por medio de MQTT llegan al broker, el cual está encargado de distribuirlos hacia su destino. El cliente ignora al resto de los clientes y se enfoca en el broker, el cual conoce a que tópico se ha suscrito cada uno de los clientes para poder enviar los mensajes que recibe de cada uno de los tópicos al cliente o clientes correspondientes.

De acuerdo a (del Valle, 2022), los mensajes intercambiados con el protocolo MQTT constan de tres partes:

- Encabezado fijo. Ocupa sólo 2 bytes y es obligatorio enviar esta parte en todos los mensajes.
- Encabezado variable. Ocupa 4 bits y no es obligatorio que esté en todos los mensajes.
- Mensaje o carga útil (payload). Puede tener un máximo de 256 Mb aunque en implementaciones reales el máximo es de 2 a 4 kB.

4.3. Almacenamiento de datos

El sistema recopilará varios datos del entorno por medio de los módulos, para poder almacenar los datos que se recopilen en tiempo real y posteriormente procesarlos, se diseñó una base de datos donde se guardará los datos de presencia, luminosidad y corriente, así como la recompensa del usuario. A continuación, se muestra con mayor detalle el diseño de la base de datos que se realizó.

4.3.1. Diseño de base de datos para la información recopilada por el sistema.

El sistema mantiene una comunicación continua donde se intercambia la información recopilada por los diferentes componentes del mismo en tiempo real. Para poder clasificarla y acceder de forma más sencilla a los datos se realizó el diseño de una base de datos relacional que consta de cuatro tablas: habitaciones, módulos, componentes y datos. En la Figura 35, se muestra el diagrama de clases de la base de datos diseñada.

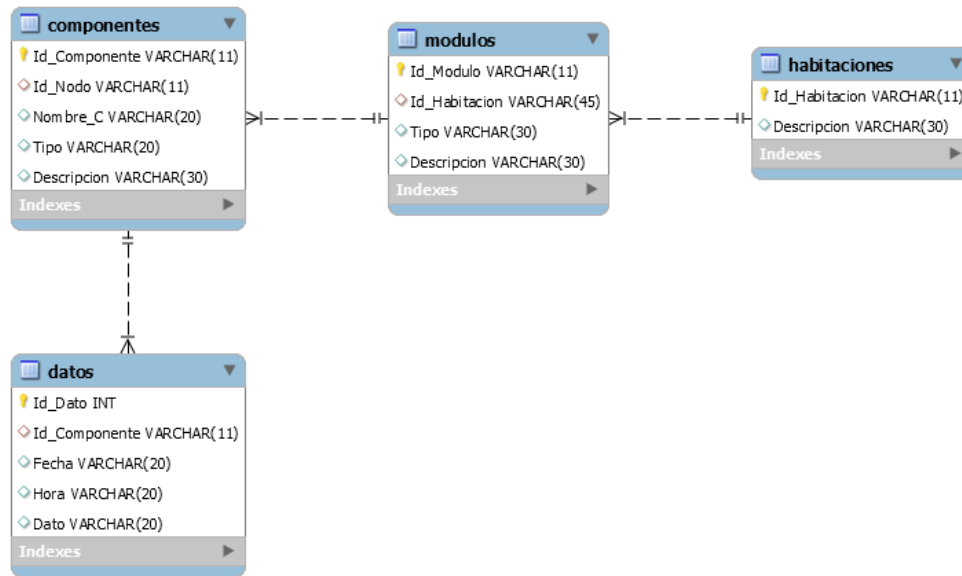


Figura 35: Diagrama de clases de la base de datos.

- **Habitaciones:** en esta tabla se almacenan los datos referentes a cada una de las habitaciones dentro del conjunto de habitaciones. Se busca almacenar un identificador de la habitación para poder referenciar la información, así como una descripción señalando las principales características de la misma.
- **Módulos:** almacena la información relacionada a los módulos que forman el sistema. Se guarda un identificador por cada módulo, el identificador de la habitación a la cual pertenece, así como el tipo de módulo, además se almacena una descripción para señalar las principales características del módulo.
- **Componentes:** cada módulo contiene diferentes componentes, de acuerdo a su funcionalidad, la información referente a ellos se guarda en esta tabla. Se almacena un identificador del componente para hacer más sencillas las búsquedas, contiene además un identificador de módulo para indicar a que módulo pertenece, se almacena el nombre del componente, el tipo, así como una descripción.
- **Datos:** el sistema genera datos que son de ayuda para tomar decisiones de control en el sistema, los datos generados por los diferentes componentes del sistema son almacenados en esta tabla

para posteriormente ser recuperados y procesados. La tabla “datos” almacena un identificador del dato, un identificador del componente por el cual fue obtenido, así como la fecha y hora en la que fue almacenado. Finalmente, se almacena el dato que fue recopilado por el componente, ya sea tipo entero o decimal.

La creación y gestión de la base de datos se maneja mediante el gestor SQLite, el cual es multi-plataforma y cuyo código fuente es de dominio público. Puede soportar desde consultas básicas, hasta consultas más elaboradas como en SQL, la base de datos creada se encuentra en un solo archivo sin dependencias externas, lo cual la vuelve ideal para ser utilizada en plataformas móviles sin procesos complejos de exportación o importación de datos.

De acuerdo a la página oficial de SQLite, el motor de base de datos SQLite es una biblioteca en lenguaje C que implementa un motor de base de datos SQL pequeño, rápido, autónomo, de alta confiabilidad y con todas las funciones. Puede ser utilizada y programada en diferentes lenguajes y plataformas de programación, ya sea desde los lenguajes más utilizados como java, Python, PHP, hasta lenguajes como Pascal, Clipper o Suneido.

4.4. Arquitectura software

La programación de los módulos del sistema diseñado se realizó en con el lenguaje C++ por medio de arduino, y Python3. Para mejorar el sistema y facilitar la reutilización del código se implementó la programación orientada a objetos, creando clases para cada componente y haciendo uso de ellas en el programa principal para hacer funcionar el módulo. A continuación, se describe la arquitectura de software de cada uno de los módulos utilizados en el sistema.

4.4.1. Módulo de Iluminación/Sensado

El Módulo de Iluminación/Sensado (ModllumSen) contiene dos sensores y una bombilla, como se explicó anteriormente. Para cada uno de los sensores se creó una clase propia, así como una clase más para la bombilla, en estas clases se toman lecturas, se procesan y posteriormente se publican bajo ciertas condiciones. En la Figura 36, se muestra el diagrama completo de las clases empleadas en el módulo.

Tanto la comunicación como la conexión a la red inalámbrica se configuraron en su respectiva clase, las cuales pueden ser reutilizadas en el resto de los módulos. Además, se incluye una clase de control para manipular la luminaria de acuerdo al tipo de sistema que se esté utilizando (manual o inteligente). A continuación se describe de forma general el funcionamiento de cada clase.

- Mosquitto. Esta clase es la encargada de establecer la comunicación con el servidor MQTT. En ella se realiza la configuración para la conexión con el broker, asignándole al módulo un nombre único que será esencial para recibir y transmitir mensajes, se asigna además el tipo de control que

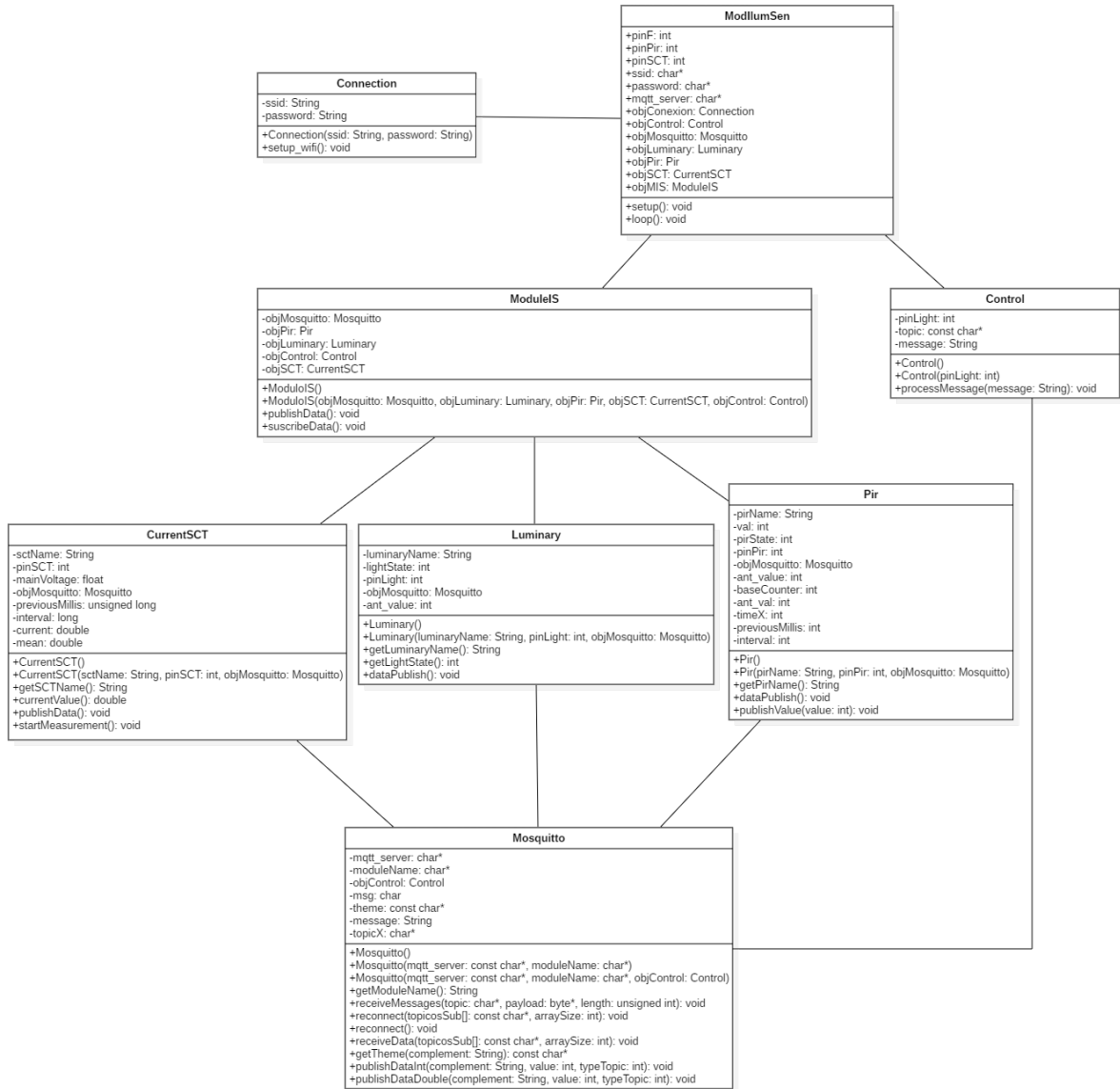


Figura 36: Diagrama de clases del Módulo de Iluminación/Sensado.

tendrá la luminaria. Para construir el tópico de publicación se utiliza un método que combina el nombre asignado al módulo con el tema principal más el componente que realizara la publicación, obteniendo como resultado una cadena, por ejemplo:

```
theme = 'luces/' + mName + '/' + complement;
```

donde “luces” es el tópico principal, “mName” representa el nombre del módulo y “complement” es el resto del tópico que especifica el componente que obtiene el dato. Además, cuenta con un método para publicar datos tipo entero y flotante, así como un método encargado de recibir los mensajes del tópico al cual el módulo fue suscrito.

- **CurrentSCT.** La clase CurrentSCT se encarga de medir el consumo del módulo. En esta clase se configura el sensor de corriente SCT013 asignándole un nombre, así mismo se realizan mediciones continuas de la potencia consumido por el módulo. Estas lecturas se realizan cada minuto, de forma interna se realiza una sumatoria de estos valores para finalmente obtener un promedio de la potencia consumida por hora y publicarla.
- **Luminary.** Esta clase se encarga de indicar el estado de la bombilla en tiempo real. En esta clase se configura la luminaria, asignándole un nombre, se lee el estado de la misma por medio del pin conectado a la bombilla y finalmente se envía el mensaje al broker.
- **Pir.** La clase Pir se encarga de dar a conocer si existe o no presencia en la habitación. Mediante esta clase se realiza la configuración del componente asignándole un nombre, se toman lecturas constantes del sensor, si las lecturas no varían durante un lapso de tiempo asignado se define que no existe presencia. Este dato se publica cada vez que exista un cambio, de esta forma será posible saber si existe presencia en la habitación y cuando deja de hacerlo.
- **Control.** La clase Control se encarga de manipular la luminaria. Esta clase tiene un funcionamiento sencillo, donde se recibe el mensaje del tópico de control ya sea manual o inteligente, y se indica a la luminaria así debe encenderse o apagarse.
- **Connection.** Esta clase se encarga de establecer la conexión inalámbrica del módulo. Con los datos de la red inalámbrica a la cual se va a conectar el sistema, se configura la conexión del módulo y la red mediante el identificador de red SSID y la contraseña.
- **ModuleIS.** Con esta clase se crea el módulo asignándole los componentes que lo conforman. Cada uno de los módulos diseñados para el sistema tiene diferentes funcionalidades, por lo cual los componentes que lo integran también son distintos, mediante la clase ModuleIS se crean los objetos de las clases correspondientes a los componentes que integran el módulo. En este caso el objeto mosquito, luminary, pir, sct y el objeto control, cuenta además con un método donde se

publican los datos del sensor PIR, SCT y la luminaria, así mismo cuenta con un método para suscribirse al tópico que indicara la acción para la luminaria.

4.4.2. Módulo de Sensado

El Módulo de Sensado (ModSensado) contiene sensores que obtendrán y publicaran información del entorno, como se explicó anteriormente. Las clases que conforman este módulo se encargan de realizar lecturas constantes, procesarlas y publicarlas para que el Módulo de Control pueda trabajar con estos datos. Como se muestra en la Figura 37, el Módulo de Sensado hace uso de algunas clases cuyo funcionamiento fueron explicados en la sección anterior, tales como la clase Mosquitto, CurrentSCT, así como Connection.

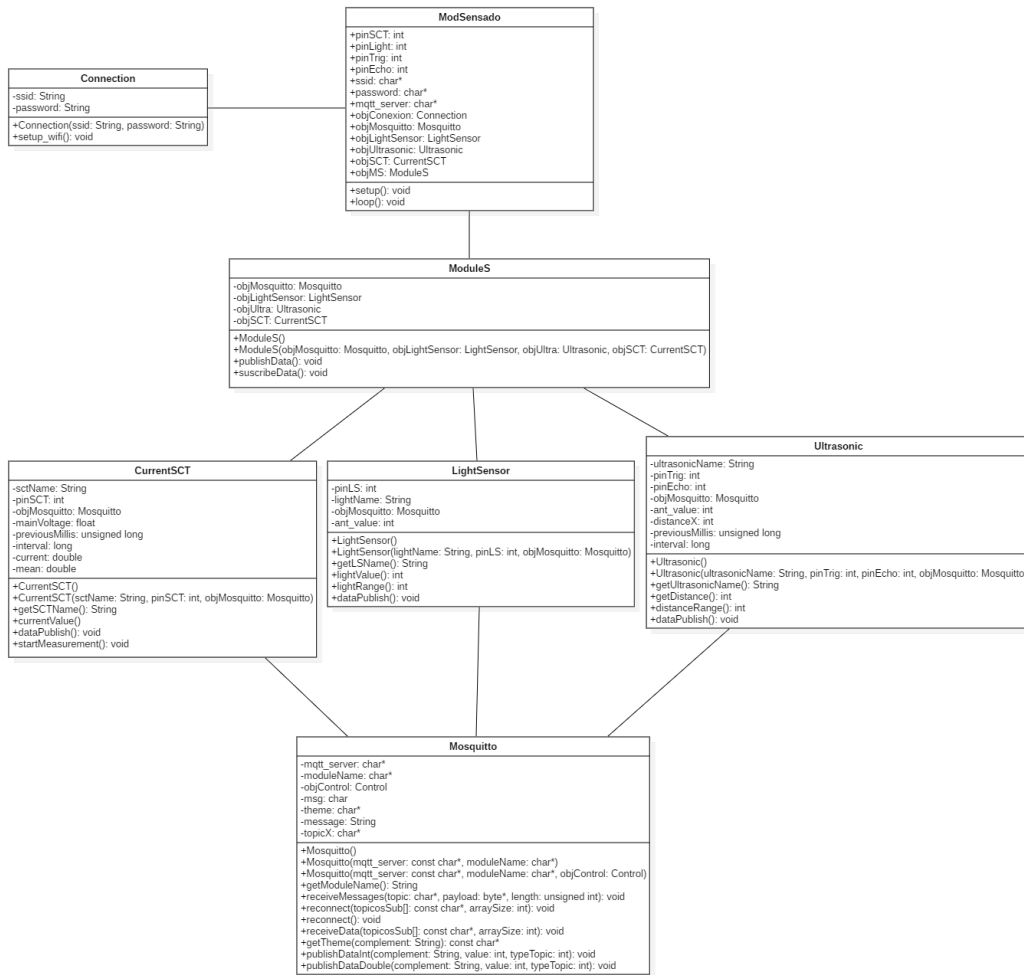


Figura 37: Diagrama de clases del Módulo de Sensado.

La comunicación inalámbrica del módulo se configura por medio de las clases Connection y Mosquitto. Por otra parte la clase CurrentSCT publica la potencia consumida por el módulo cada hora. A continuación, se describe de forma general el funcionamiento del resto de las clases que lo conforman.

- **LightSensor.** La clase `LightSensor` se encarga de medir la luminosidad en la habitación. Uno de los aspectos a tomar en cuenta para el funcionamiento del sistema es la luminosidad, por lo cual se hace uso de un LDR, el cual se configura con un nombre. En esta clase se realizan mediciones constantes sobre el nivel de luminosidad en la habitación, para posteriormente asignarlo a un rango y finalmente publicar ese nivel de luminosidad cuando se registre algún cambio.
- **Ultrasonic.** En esta clase se verifica si existe presencia o no en la habitación para complementar el dato de presencia del sensor PIR en el Módulo de Iluminación/Sensado. En la clase `Ultrasonic` se le asigna un nombre al componente, el cual realiza medidas constantes de la existencia de presencia en un determinado punto, dicha información es publicada y utilizada como apoyo al dato sensado por el PIR. Durante la etapa de pruebas de laboratorio se detectó que el sensor PIR muestra dificultades para detectar presencia en la puerta de acceso hacia la habitación. Con los resultados observados en estas pruebas se optó por hacer uso de un sensor ultrasónico en estos puntos para cubrir toda el área de la habitación y prevenir errores de lectura de presencia que pudiesen generarse.
- **ModuleS.** Con la clase `ModuleS` se crea el módulo asignándole los componentes que lo conforman. En esta clase se crean los objetos de las clases correspondientes a los componentes que lo integran, es decir, el objeto `mosquitto`, `lightSensor`, `Ultrasonic` y el objeto `CurrentSCT`. Cada una de estas clases cuenta con un método donde se publican los datos de recopilados por los sensores: corriente, presencia y luminosidad. El módulo cuenta con un método para suscribirse a un tópico en caso de que sea necesario.

4.4.3. Módulo Manual

El Módulo Manual contiene un sensor y un botón, como se explicó anteriormente. Estos componentes estarán compartiendo información con el broker de forma constante, para ello se crearon clases que pueden reutilizarse para cada uno de ellos. En la Figura 38 se muestra el diagrama completo de las clases empleadas en el módulo, como se puede observar, este módulo hace uso de algunas clases cuyo funcionamiento fueron explicados anteriormente, tales como la clase `Mosquitto`, `CurrentSCT`, así como `Connection`.

La clase `Mosquitto` y `Connection` se encargan de establecer la comunicación inalámbrica para el Módulo Manual. La clase llamada `CurrentSCT` mide la potencia consumida por hora y se encarga de realizar la publicación del dato obtenido. A continuación, se realiza una descripción a grandes rasgos de las clases restantes.

- **Button.** La clase `Button` se encarga de transmitir una orden a la luminaria. El botón integrado en el Módulo Manual funciona como un interruptor para encender o apagar la luminaria. En

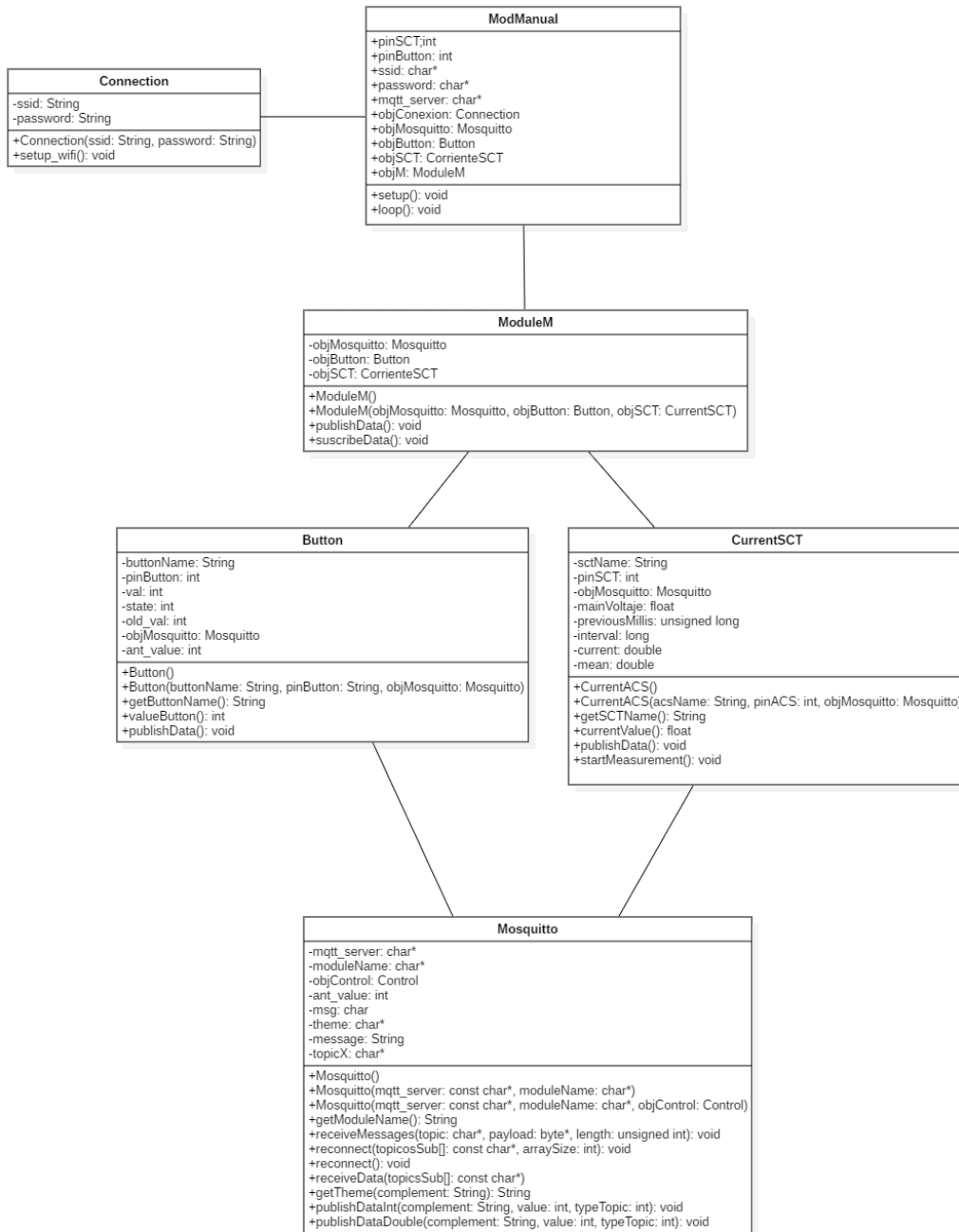


Figura 38: Diagrama de clases del Módulo Manual.

esta clase se toma la lectura del estado del botón y se realiza la publicación cuando el estado a cambiado.

- **ModuleM.** Con la clase `ModuleM` se asignan los componentes que conforman el módulo. En esta clase se crean los objetos correspondientes a las clases de los componentes que lo integran, en este caso los objetos `mosquitto`, `button` y `CurrentSCT`. Cuenta con un método donde se publican los datos recopilados por el sensor de corriente `SCT` y el estado del botón, así como un método para suscribirse a un tópicos en caso de que sea necesario.

4.4.4. Módulo de Recompensa

El Módulo de Recompensa, como se explicó anteriormente, es similar al Módulo Manual, contiene un sensor de corriente y dos botones. Estos componentes estarán compartiendo información constantemente con el sistema. Por medio de la programación orientada a objetos se crearon clases para cada uno de sus componentes, las cuales pueden ser reutilizadas. En la Figura 39 se muestra el diagrama completo de las clases empleadas en el Módulo de Recompensa. Como se puede observar, se hace uso de las clases `Mosquitto`, `CurrentSCT`, así como `Connection`, cuyo funcionamiento fueron explicados anteriormente.

La clase `CurrentSCT` mide la potencia consumida por el módulo mediante la medición constante, obteniendo un promedio y publicándolo cada hora. Las clases `Mosquitto` y `Connection` se encargan de establecer la comunicación inalámbrica entre el módulo y la red utilizada por el sistema. Estas clases pueden ser reutilizadas por los diferentes módulos ya que su funcionamiento es igual para todos.

El Módulo de Recompensa hace uso además de un par de clases cuyo funcionamiento se explica a grandes rasgos continuación.

- **RewardButton.** La clase `RewardButton` se encarga de transmitir una recompensa con respecto a la decisión de control del sistema inteligente. La arquitectura del sistema permite emplear un control inteligente, mediante el cual el sistema aprende y toma decisiones respecto al control de la luminaria en la habitación. Este aprendizaje se realiza de forma constante a través de la interacción con el usuario. Por medio del Módulo de Recompensa el usuario podrá transmitir al sistema su opinión respecto al comportamiento de las luminarias.

En este caso la clase `RewardButton` se encarga de codificar la opinión del usuario, transformándola en un dato entero que el sistema sea capaz de comprender y transmitirlo al sistema. La recompensa puede ser positiva o negativa, de acuerdo al botón que el usuario presione, en caso de que el ningún botón sea presionado la recompensa se mantendrá neutra.

- **ModuleR.** La clase `ModuleR` se encarga de asignar los componentes que conforman el módulo. En esta clase se crean los objetos correspondientes a los componentes que integran el módulo, en este caso el objeto `mosquitto`, `buttonR` y el objeto `CurrentSCT`. Las clases de cada sensor cuentan

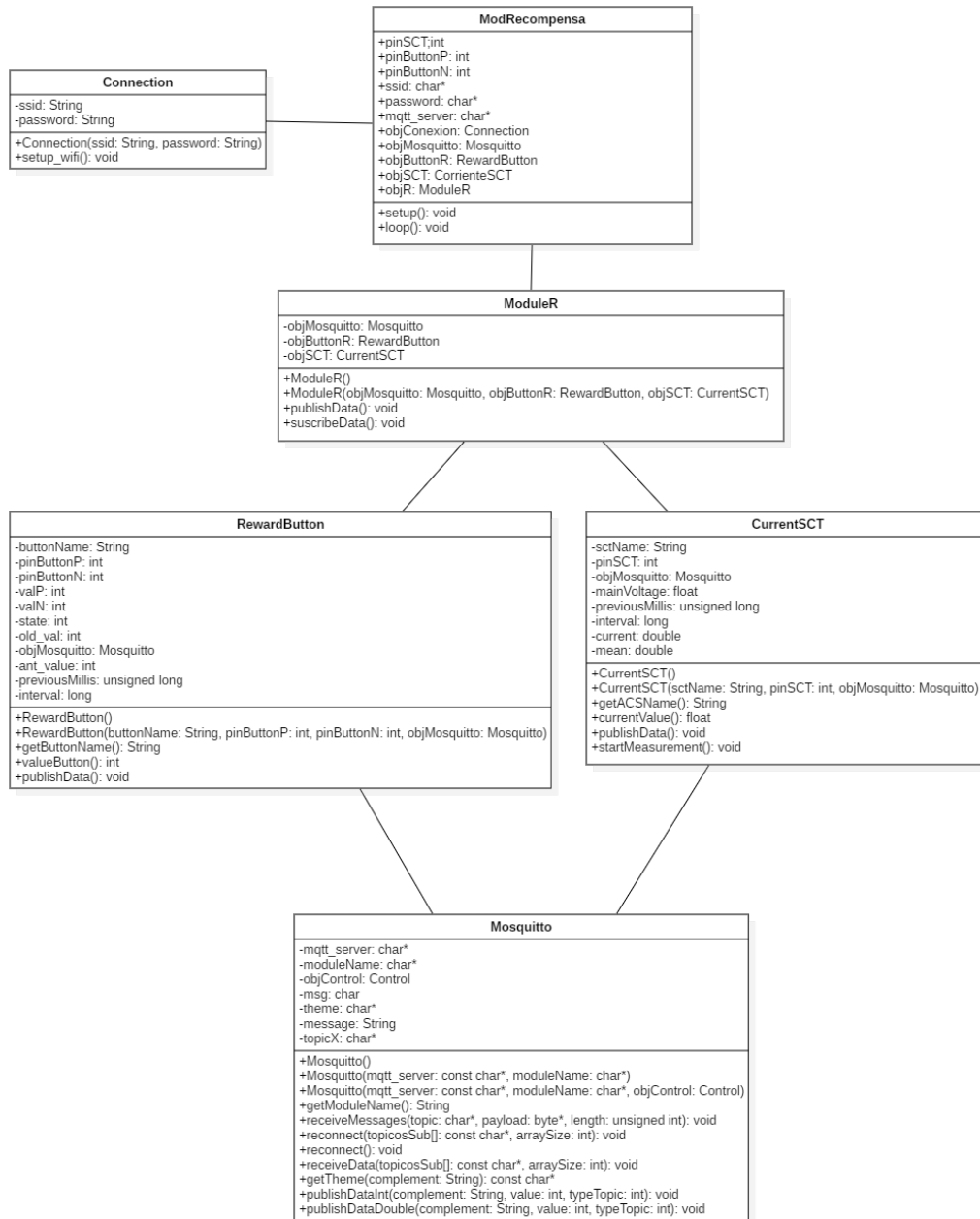


Figura 39: Diagrama de clases del Módulo de Recompensa.

con un método donde se publican los datos recopilados por los mismos. La clase RewardButton permite publicar el dato de recompensa obtenido por los botones, tanto positiva como negativa. Además, se incluye un método para que el módulo pueda suscribirse a un tópico en caso de ser necesario.

4.4.5. Módulo de Control

El Módulo de Control es el componente central del sistema, por lo cual sus funciones son más complejas. Este módulo se encarga de publicar los datos del sensor de corriente, además el dato de control para la luminaria. Contiene la base de datos donde se almacenan los datos generados por el sistema. Además, es el broker en el sistema de comunicación, almacenando el servidor MQTT para mantener la comunicación entre los módulos que lo integran. En la Figura 40 se muestra una imagen de los servicios que proporciona el Módulo de Control.

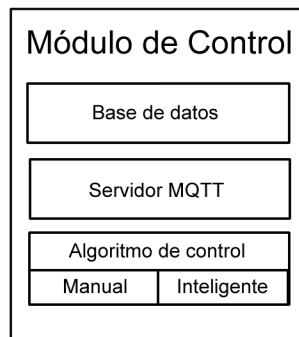


Figura 40: Ilustración de componentes internos del Módulo de Control.

Como se puede observar en la Figura 40, el Módulo de Control posee dos funciones de control diferentes. Al ser el componente central del sistema, el tipo de control con el cual será utilizado puede configurarse como “Manual” o “Inteligente”. Al elegir el tipo de control que se desea implementar en las luminarias, los datos que llegan al módulo serán procesados de forma diferente.

Cuando el control de las luminarias se establece como “Manual”, el dato más relevante a tener en cuenta es el estado del botón del Módulo Manual. Este dato puede ser 0 para apagar la luminaria o 1 para encenderla, al igual que un interruptor el dato generado por el botón será procesado como una orden directa. El usuario tendrá el control total de la luminaria y podrá decidir cuándo debe cambiar el estado de la luminaria de acuerdo a su percepción.

En cambio, al optar por un control “Inteligente” los datos tendrán un procesamiento más complejo. Cada habitación representa un agente encargado de monitorear y controlar la luminaria, para ello es necesario obtener información de su entorno. Los datos recopilados por los sensores serán los encargados de indicar el estado de la habitación, estos datos se comparten con el Módulo de Control, donde después de ser limpiados se procede a utilizar el aprendizaje por refuerzo para modelar cada uno de estos

agentes. El proceso de aprendizaje se describe con mayor detalle en la siguiente sección.

Los servicios integrados en el Módulo de Control son ejecutados al arrancar el sistema. Cuando el módulo se enciende el servidor MQTT puede comenzar a enviar y recibir mensajes, al ser el broker es importante que sea el primer módulo en encenderse y estar disponible para que la comunicación en el sistema se pueda establecer. Cada uno de los mensajes compartidos con el broker es procesado de forma interna para posteriormente ser almacenado y poder ser utilizado en procesos posteriores. Como se muestra a continuación, el mensaje recibido tiene un aspecto similar a:

luces/HB01/M03/CP08 2.69

este mensaje es dividido para almacenar el dato enviado en la tabla correspondiente en la base de datos. El tópic proporciona la información suficiente respecto a la habitación, módulo y componente al cual corresponde el dato recibido.

En la Tabla 16 se muestra como se realiza el almacenamiento de la información en la tabla Datos:

Id.Dato	Id.Componente	Fecha	Hora	Dato
1	CP08	21/06/2022	15:16:29	2.69

Tabla 16: Ejemplo de datos almacenados en tabla Datos.

Además, se añadió al sistema una función para generar un reporte sobre el consumo de cada módulo por hora. Este reporte se presenta en una hoja de cálculo que puede ser manipulada de acuerdo al interés del usuario. Al contar con una base de datos relacional, la consulta a los datos generados por cada uno de los módulos permite conocer los datos del mismo para crear un reporte más completo. En la Tabla 17 se muestra el formato que tiene este reporte.

Habitación	Módulo	Tipo	Componente	Fecha	Hora	Consumo
HB01	M01	MIS	CP02	26/06/2022	17:16:29	1.42
HB01	M03	MM	CP08	26/06/2022	18:36:29	0.12
HB02	M04	MIS	CP10	26/06/2022	19:57:32	1.59

Tabla 17: Ejemplo del reporte de consumo de corriente generado por el sistema.

Al igual que el resto de los módulos, el Módulo de Control medirá el consumo de energía que tiene por hora. Esta información se publica hacia el broker, quien la almacena en la base de datos para poder consultarla cuando sea necesario. En esta ocasión la programación de la medición de consumo se realizó por medio de Python, donde se lee el dato obtenido por medio del convertidor analógico, se procesa y finalmente se publica. El esquema eléctrico se puede consultar en el Capítulo 3.

4.5. Aprendizaje

Actualmente existe una amplia variedad de métodos y técnicas de aprendizaje que pueden generar conocimiento al sistema. Para agregar la parte inteligente al sistema diseñado se optó por hacer uso de una de las técnicas de aprendizaje computacional: aprendizaje por refuerzo. Esta técnica se basa en el aprendizaje por medio de recompensas, el cual le hace aprender de los errores al sistema, haciendo que su comportamiento mejore continuamente.

Para aplicar esta técnica se hizo uso de la librería OpenAI Gym disponible en Python. Esta librería cuenta con una amplia cantidad de ejemplos, donde el aprendizaje es aplicado por medio de entorno a juegos básicos y se otorga diferentes recompensas, ya sean positiva o negativas, de acuerdo a los movimientos realizados por el propio agente. Para este sistema se creó un entorno diferente, donde el agente debe descubrir cuál es la mejor opción para los datos registrados del entorno y así tomar una decisión respecto a la luminaria, si el sistema considera que es adecuado o no encender la luminaria. Una vez realizada la acción elegida el usuario puede otorgar una recompensa basada en su opinión con respecto a la acción del sistema.

A continuación, se explica con mayor detalle el funcionamiento interno del sistema de iluminación con un control inteligente.

4.5.1. Diseño del algoritmo

El aprendizaje automático ha ido adquiriendo importancia conforme pasan los años, una de sus técnicas es el Aprendizaje por refuerzo, el cual como se mencionó anteriormente, aprende con ayuda de recompensas. Este tipo de aprendizaje no incluye las respuestas correctas, por lo cual el agente debe decidir respecto a las acciones que realizara según el estado en el que se encuentre obteniendo recompensas y asignándole valores a los pares estado-acción. De esta forma logra obtener un aprendizaje a partir de la experiencia.

Uno de los algoritmos de Aprendizaje por refuerzo es QLearning. Este algoritmo se centra en obtener el valor Q para cada par estado-acción. El valor Q representa que tan positivo, a largo plazo, es realizar una acción desde un estado. La ecuación 7 es utilizada para obtener el valor Q de cada par estado-acción. Este valor obtenido se almacena en una tabla Q, la cual se encuentra vacía al iniciar el aprendizaje. La tabla Q se encuentra almacenada en la base de datos ValoresQ en la tabla VAcciones, la cual almacenará el valor Q obtenido con la función de valor, así como el estado y la acción asociadas a él.

$$Q(s_t, a_t) = Q(s_t, a_t) + \alpha[R_{t+1} + \gamma * \max Q(s_{t+1}, a) - Q(s_t, a_t)] \quad (7)$$

donde $Q(s_t, a_t)$ representa el valor Q actual del par estado-acción, α es la tasa de aprendizaje, R representa la recompensa obtenida, γ es el factor de descuento, y finalmente $\max Q(s_{t+1}, a)$ es el valor

Q óptimo esperado.

A partir de la revisión de la literatura que se realizó en el Capítulo 2, se pudo identificar cuáles son los aspectos que tienen una mayor influencia en la iluminación artificial dentro de una habitación. Estas características son las que el sistema estará monitoreando constantemente para compartirlas con el Módulo de Control, y que este pueda basar sus decisiones en los mismos. Estos aspectos serán considerados como variables, las cuales formaran parte de los posibles estados que se pueden llegar a encontrar en el entorno. A continuación, se enlistan estas variables:

- Presencia. Este dato está formado por la medición de dos sensores, tanto el sensor PIR ubicado en el Módulo de Iluminación/Sensado, como el sensor ultrasónico ubicado en el Módulo de Sensado. Al contar con dos datos de presencia para la misma habitación, es necesario realizar una transformación del dato para convertirlo en uno solo y pueda ser utilizado posteriormente.
- Luminosidad. La medición del nivel de iluminación dentro de la habitación se realiza constantemente, este dato se clasifica en dos categorías, las cuales son definidas por rangos, si el valor registrado es inferior a 500, esto significa que no existe suficiente iluminación en la habitación, en caso contrario cuando el valor es superior se indica que la luminosidad es suficiente.
- Día. Este dato es tomado del sistema, mediante la librería Time en Python se realiza una consulta para obtener el día en el que se crea el estado, para posteriormente clasificarlo. Al igual que el dato de iluminación, el día se clasifico en dos rangos, siendo catalogados por 0 y 1, donde 0 se refiere a los días entre semana, mientras el 1 abarca el sábado y domingo donde usualmente los horarios y actividades suelen ser diferentes al resto de la semana.
- Hora. Al igual que el día, la hora es tomada por el sistema cuando se desea conocer el estado del entorno. Este dato se obtiene por medio de la librería Time, el dato obtenido indica la hora, el minuto y el segundo en que se realizó la consulta. Para disminuir la cantidad de estados resultantes se optó por establecer rangos de tiempo. Para la creación de los rangos se optó por agrupar las horas donde las condiciones del día suelen ser similares. En la Tabla 18 se muestran los rangos finales que se establecieron.

Valor	Horas
0	23 - 06 hrs.
1	07 - 09 hrs.
2	10 - 19 hrs.
3	20 - 22 hrs.

Tabla 18: Rangos de horas utilizado en el estado.

- Flujo. Esta variable es calculada mediante los datos de presencia del resto de las habitaciones. El sistema cuenta con un archivo de configuración donde se encuentran los datos relacionados a

las habitaciones, los módulos que contienen y las distancias de unas a otras. Por medio de este archivo de configuración es posible determinar cuáles son las habitaciones más cercanas a un punto en específico, para posteriormente obtener los datos de presencia y poder evaluar si existe un flujo hacia esa habitación en específico o no.

Para calcular el flujo hacia la habitación X, se utilizaron los datos de presencia de las habitaciones. Una vez identificadas las habitaciones con presencia, se toma en cuenta la distancia de la habitación más cercana a X que haya identificado un valor positivo de presencia. Este dato se obtiene en tres diferentes momentos para finalmente compararlas y definir si existe o no un decremento en esas distancias donde se detectó la presencia. Finalmente se le asigna un valor a la variable de flujo, ya sea positivo o negativo.

Cada habitación en el conjunto representa un entorno diferente, donde las actividades de los usuarios pueden diferir. Para poder tener un mejor control de cada habitación se creó y modeló un agente para cada una de ellas, donde pese a presentar el mismo estado, las acciones realizadas sobre la luminaria podrían obtener valores diferentes.

Con ayuda de los módulos de Iluminación/Sensado y Sensado el agente es capaz de monitorear su entorno. Los sensores integrados en estos módulos permiten mantener actualizados los datos de presencia y luminosidad, los cuales forman parte del estado junto a el día, hora y flujo.

Los posibles estados que pueden presentarse en la habitación son manejados por estas variables, donde la combinación de ellas arroja un resultado de 64 posibles combinaciones. En la Figura 41, se muestra un ejemplo de la cadena resultante para uno de los posibles estados. Para cada uno de ellos se han manejado tres posibles acciones que el sistema podría realizar: encender, apagar o mantener la acción actual. Al inicializar el aprendizaje del sistema cada una de estas acciones tendría la misma probabilidad de ser elegida, conforme el sistema vaya mejorando su aprendizaje el valor asignado a cada una de ellas irá modificándose de acuerdo a las interacciones que se tengan.

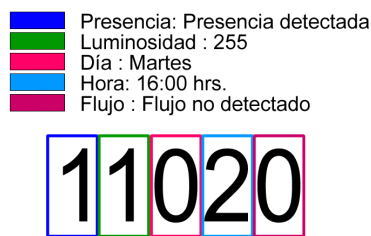


Figura 41: Estado habitación.

Al contar con tres diferentes acciones es posible seleccionar cualquiera de ellas, así pues, el estado que se presenta puede elegir apagar, encender o mantener la luminaria de la misma forma. El algoritmo QLearning calcula el valor del estado en el que se encuentra la habitación y la acción que realiza el sistema, de forma interna y el resultado es colocado en la base de datos. En caso de no existir un valor

previo se inserta en la tabla Q , en el caso de que ya exista un valor en la base de datos para el estado detectado y la acción realizada simplemente se actualiza. La acción a realizar puede tener la misma probabilidad de ser elegida que las otras dos, sin embargo, una vez que se haya reforzado el aprendizaje por medio de recompensas, ese valor irá cambiando.

Los entornos para este proyecto fueron trabajados a través de la librería OpenAI-Gym. Esta librería contiene una serie de entornos donde algunos ejemplos de ellos están basados en videojuegos sencillos, los cuales buscan maximizar su recompensa final logrando un objetivo en específico, el cual es en este caso ganar la partida. Dado que el entorno con el que se trabaja para este proyecto es un entorno real, donde cada una de las habitaciones en el conjunto de habitaciones puede comportarse de forma diferente, se utilizan varios agentes. Cada habitación modela un agente de acuerdo a los sucesos que suceden en su entorno, para ello se cuenta con un espacio multidiscreto de estados y tres posibles acciones a ejecutar sobre el mismo. De acuerdo al par estado-acción y la recompensa obtenida, el algoritmo será capaz de calcular el valor Q para ese par, añadiendo o modificando dicho valor en la tabla Q .

En la Figura 42, se muestra el diagrama de flujo resumido del proceso que se realiza para modelar cada agente, señalando los principales pasos que éste realiza. Donde al inicio se deben establecer los parámetros de aprendizaje para el sistema, se crea el entorno con el cual se va a trabajar y se señala el lugar de la base de datos donde se almacenarán los valores obtenidos para el par estado-acción realizado.

Para permitir que el agente explore y descubra nuevos caminos para ampliar su conocimiento, se utilizó la política *epsilon-greedy*. En el aprendizaje por refuerzo el agente busca elegir la acción con un mayor valor estimado, dado que evalúa cada acción puede identificar aquella con un valor más alto. Este conocimiento puede explotarse, cada vez que se detecte un estado el agente puede elegir la mejor acción, aquella con un valor Q más alto. Sin embargo, para descubrir acciones que pueden dar un mejor valor es necesario explorar el resto de las posibilidades renunciando a elegir la acción con mayor valor.

Por lo tanto, se debe equilibrar la explotación con la exploración, para aprovechar el conocimiento adquirido y a su vez pueda adquirir más conocimiento del entorno que lo rodea. Para solucionar este dilema se utilizó la política *epsilon-greedy*, donde se utiliza un valor de ϵ entre 0 y 1 con el cual se pueda decidir explorar o explotar el conocimiento ya obtenido. En este caso se utilizó un valor para ϵ de 0.5, para realizar la elección de cual opción seguir, se creó un número aleatorio que se compara con ϵ , para finalmente elegir la ruta a seguir.

En caso de que el valor aleatorio sea menor al valor de ϵ se elegirá una acción aleatoria, la cual se busca en la base de datos con su respectivo estado. En caso de no estar registrada se devuelve un valor de 0, y en caso de contar con un registro previo de ese par estado-acción se obtiene el valor Q correspondiente. En el caso contrario, cuando el valor aleatorio es mayor al valor ϵ , se elige la acción con el mejor valor Q . Una vez elegida esta acción se procede a aplicarla obteniendo un nuevo

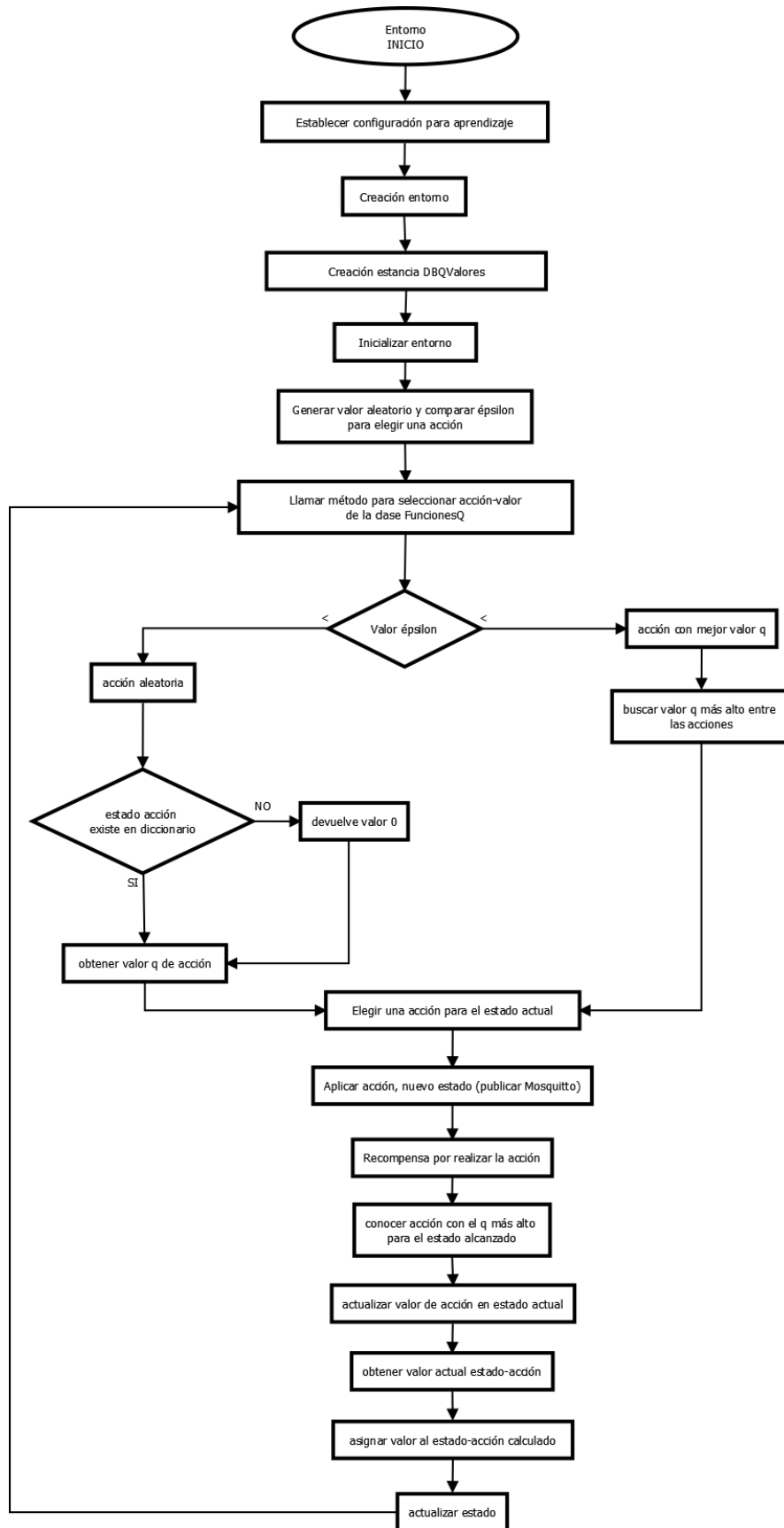


Figura 42: Diagrama de flujo del algoritmo inteligente diseñado.

estado.

Esta acción es evaluada por el usuario por medio de una recompensa, la cual es enviada al Módulo de Control y es utilizada recalcular el valor Q de esa acción con ese estado. El valor obtenido con la función utilizada por el algoritmo es actualizado en la base de datos y finalmente se actualiza el estado del entorno. Este proceso se realiza de forma recursiva, ya sea añadiendo los nuevos valores para el par estado-acción o actualizando los valores existentes en la tabla Q .

El estado en cada habitación puede variar de forma repentina, no es posible predecir cuándo sucederán los cambios dado que los factores externos son tan variables que es imposible controlarlos. Cada agente es capaz de trabajar su entorno y adaptarse a él para seleccionar la acción que considere oportuna en el momento. Los cambios en el estado son detectados por el agente, cuando el entorno cambia se consulta la base de datos y se decide que acción realizar en la luminaria.

Al ejecutarse la acción seleccionada, el usuario puede evaluarla ofreciendo una recompensa al sistema, con el cual se calcula el valor Q siguiendo la ecuación 7 y se almacena en la base de datos. Este proceso se repite cuando el agente detecta un cambio en alguna de las variables del entorno. Los agentes del sistema actúan de forma independiente tomando decisiones sobre la habitación que le corresponde, por lo cual los agentes corren de forma paralela. Al trabajar con entornos inestables propensos a cambios continuos, la disponibilidad de los agentes es fundamental, por lo cual al trabajar de forma paralela se puede contar con la disponibilidad de los agentes en todo momento para detectar los cambios en cualquiera de las habitaciones.

4.6. Síntesis y conclusiones del capítulo

En este capítulo se habla sobre el diseño del sistema, mostrando como se trabajó la parte interna de los módulos que lo conforman. El sistema diseñado en este trabajo de tesis cuenta con dos arquitecturas diferentes, cuyo control puede ser manual o inteligente. Con el control manual el sistema está formado por el Módulo de Control, así como 2 módulos por habitación (Módulo de Iluminación/Sensado y el Módulo Manual). El sistema con control manual está conformado por el Módulo de Control y 3 Módulos por habitación (Módulo de Iluminación/Sensado, Módulo de Sensado y el Módulo de Recompensa). Para seleccionar cuál de los dos se desea utilizar, basta con instalar sus módulos y configurar el sistema con el tipo de control deseado.

Se mostró el diagrama de clases de cada uno de los módulos diseñados, donde se explicó la funcionalidad de cada uno de ellos y su forma de obtener y compartir los datos. La comunicación entre los componentes del sistema se realizó por medio del protocolo MQTT, el cual funciona bajo el patrón “publicador/suscriptor”. Por medio del servicio MQTT, los módulos del sistema pueden publicar la información recolectada de su entorno, así como suscribirse a los tópicos de su interés. Esta información es concentrada en el Módulo de Control, el cual puede procesarla de acuerdo a la configuración del sistema, ya sea otorgándole el poder absoluto al usuario, o trabajándolo por medio del aprendiza-

je automático. Además se mostró el diseño de la base de datos donde se almacenará la información generada por el sistema, la cual será trabajada posteriormente.

El control inteligente se trabajó bajo el aprendizaje por refuerzo, modelando los agentes de acuerdo a las condiciones de la habitación asignada, a las acciones posibles que se pueden ejecutar en ella y a la recompensa obtenida del usuario. El proceso de aprendizaje se describe en el diagrama de flujo mostrado en la Figura 42, donde cada agente trabaja sobre una habitación diferente, lo cual le permite tratar cada entorno de acuerdo a las necesidades y tareas desarrolladas por el usuario en ese espacio.

5. Capítulo 5. Resultados generales

El sistema fue creado a partir de los diseños previos, realizando algunos cambios de acuerdo a los resultados arrojados durante las pruebas de laboratorio. Cada uno de los módulos fue creado bajo el esquema electrónico presentado en el Capítulo 3 y programado con el software presentado en el Capítulo 4, el cual fue diseñado bajo la programación orientada a objetos. A continuación, se describen los resultados obtenidos en el trabajo de investigación.

5.1. Discusión general

Los diseños anteriormente expuestos en los capítulos 3 y 4 se implementaron y probaron durante un periodo de pruebas de laboratorio para asegurar el funcionamiento de cada módulo tanto de forma individual, como de forma grupal al ser integrados al sistema. El resultado obtenido fue un sistema de iluminación capaz de ser controlado tanto de forma manual, como de forma inteligente.

En las siguientes secciones se muestra el sistema resultante, así como el costo aproximado de cada uno de los módulos utilizados.

5.1.1. Costo componentes

Como se mencionó anteriormente en el Capítulo 3, los módulos están formados por diferentes componentes, de acuerdo a la funcionalidad de cada uno de ellos. Las tarjetas electrónicas que forman la base de éstos módulos son: NodemCU y Raspberry Pi 4B, sumado a los sensores y el resto de los componentes para realizar las conexiones entre los componentes, el costo de cada uno de ellos puede variar. A continuación, se describe el costo final de creación para cada uno de los módulos (el costo de los materiales puede variar de acuerdo al proveedor).

- Módulo de Iluminación/Sensado.

Los componentes principales del Módulo de Iluminación/Sensado se describieron con anterioridad, sin embargo, en este apartado se mencionarán todos los componentes de éste módulo para poder ofrecer una cifra aproximada respecto al costo total del material electrónico empleado. El costo de cada uno de los componentes se muestra en la Tabla 19.

Algunos de los componentes utilizados pueden disminuir su precio si son comprados en conjunto, como las resistencias o los cables jumper, incluso puede hacerse uso de material reciclado como cable de cobre y clavijas de aparatos viejos. El costo calculado en este apartado se realizó bajo el supuesto de la utilización de materiales nuevos comprados en electrónicas.

Cantidad	Componente	Costo (Peso mexicano)
1	NodemCU	200
1	SCT013	185
1	PIR	60
1	Bombilla 9W	65
1	Regulador 5v	280
1	Módulo Relevador	55
1	Baquelita perforada 5x5 cm	5
2	Resistencias 10k Ω	4
1	Condensador 10uF 25v	20
25	Cable jumper	35
50 cm.	Cable de cobre	10
1	Clavija	10
Costo final		929

Tabla 19: Costo de los componentes del Módulo de Iluminación/Sensado.

- Módulo de Sensado.

El Módulo de Sensado está compuesto por más sensores, lo cual aumenta las conexiones electrónicas, así como su costo. En la Tabla 20 se muestran los costos de todos los componentes electrónicos que forman este módulo, el cual puede variar de acuerdo al proveedor con el que se lleve a cabo la compra.

Cantidad	Componente	Costo (Peso mexicano)
1	NodemCU	200
1	SCT013	185
1	Sensor ultrasónico	65
1	Regulador 5v	280
1	Baquelita perforada 5x5 cm	5
3	Reistencias 10k Ω	6
1	Condensador 10uF 25v	20
1	LDR	3
25	Cable jumper	35
50 cm.	Cable de cobre	10
1	Clavija	10
Costo final		819

Tabla 20: Costo de los componentes del Módulo de Sensado.

Con ayuda de los sensores que integran este módulo, el sistema podrá monitorear en tiempo real los niveles de iluminación de la habitación, y a su vez el sensor ultrasónico permite detectar presencia, ambos datos son necesarios para poder ejecutar el algoritmo inteligente para establecer un control autónomo en las luminarias, donde cualquier cambio presentado en el entorno podrá ser procesado por el algoritmo inteligente, el cual proporcionara como salida una determinada

acción sobre la luminaria.

- Módulo Manual.

El Módulo Manual, es un módulo más sencillo, cuya funcionalidad se basa en compartir el consumo eléctrico del módulo, así como encender o apagar la bombilla según sea el caso, por lo cual los componentes que lo integran son menos que la cantidad de componentes de los módulos anteriormente mencionados. Este módulo actúa como un intermediario entre el usuario y el sistema, transmitiendo la acción que el usuario desea que la luminaria realice, en la Tabla 21 se muestra el costo de todos los componentes que integran el módulo para poder ofrecer un costo aproximado de este módulo.

Cantidad	Componente	Costo (Peso mexicano)
1	NodemCU	200
1	SCT013	185
1	Regulador 5v	280
1	Baquelita perforada 5x5 cm	5
3	Reistencias 10kΩ	6
1	Condensador 10uF 25v	20
1	Botón	20
25	Cable jumper	35
50 cm.	Cable de cobre	10
1	Clavija	10
Costo final		771

Tabla 21: Costo de los componentes del Módulo Manual.

- Módulo de Recompensa.

Como se explicó en el Capítulo 3, el Módulo de Recompensa consta de dos botones, además del sensor de corriente. Como podrá verse en el diseño mostrado anteriormente este módulo es similar al Módulo Manual, el único cambio entre ambos es la integración de un botón extra para poder transmitir la retroalimentación del usuario al sistema. En la Tabla 22, se muestra el costo de todos los componentes que integran el Módulo de Recompensa.

- Módulo de Control.

El Módulo de Control fue diseñado para realizar varias tareas simultáneamente, como se ha mencionado a lo largo de este trabajo, es el que realiza un mayor trabajo de procesamiento, por lo cual el componente central de este módulo debe ser robusto y poseer la capacidad de realizar las tareas correspondientes. En la Tabla 23 se muestra el costo de los componentes que forman este módulo.

Cantidad	Componente	Costo (Peso mexicano)
1	NodemCU	200
1	SCT013	185
1	Regulador 5v	280
1	Baquelita perforada 5x5 cm	5
4	Reistencias 10k Ω	8
1	Condensador 10uF 25v	20
2	Botón	40
25	Cable jumper	35
50 cm.	Cable de cobre	10
1	Clavija	10
Costo final		793

Tabla 22: Costo de los componentes del Módulo de Recompensa.

Cantidad	Componente	Costo (Peso mexicano)
1	Raspberry Pi 4B	1700
1	ACS712	110
1	Regulador 5v	280
1	ADS1115	240
20	Cable jumper	35
1	Cargador Raspberry Pi 4B	170
Costo final		2535

Tabla 23: Costo de los componentes del Módulo de Control.

5.1.2. Sistema de iluminación desarrollado

Para la creación del sistema se siguieron los diseños electrónicos previamente mostrados en el Capítulo 3. Estos diseños se montaron sobre una baquelita perforada de 5x5 para cada uno de los módulos, en la Figura 43 se muestra el resultado final para cada tipo de módulo, los cuales fueron soldados y colocados dentro de una carcasa para protegerlos y poder instalarlos dentro de cada una de las habitaciones en el entorno real que serán utilizadas para realizar las pruebas.

Para realizar las pruebas en un entorno real, el sistema fue colocado en una casa familiar donde se utilizaron tres habitaciones, cada una de ellas con diferentes características, por lo cual se crearon 3 Módulos de Iluminación/Sensado, 3 Módulos de Sensado, 3 Módulos Manuales, 3 Módulos de Recompensa y un Módulo de Control. Estos módulos fueron utilizados tanto por el sistema con control manual, como por el sistema con control inteligente, a continuación, se describe cada uno de ellos.



Figura 43: Módulos finales ensamblados.

■ Sistema de Iluminación con control Manual.

El sistema con un control manual fue formado por 3 diferentes tipos de módulos: Módulo de Iluminación/Sensado, Módulo Manual y el Módulo de Control. Su funcionamiento se basó en el intercambio de mensajes entre los módulos, donde este mensaje indica que luminaria se debe encender o apagar. En la Figura 44, se muestran los módulos creados para las pruebas del sistema con un control manual, como se puede observar fueron un total de 7 módulos, los cuales fueron colocados dentro de cajas rectangulares con algunos orificios y elaboradas de plástico duro.



Figura 44: Sistema de iluminación con control manual.

El sistema resultante es capaz no solo ofrecer al usuario un control total de las luminarias,

también es capaz de generar un reporte con los datos de consumo eléctrico de cada uno de los módulos que lo integran, este reporte se actualiza de forma constante para evitar la pérdida de datos y pueda ser consultado cuando el usuario lo desee.

- Sistema de Iluminación con control Inteligente.

El sistema con un control inteligente fue probado en 3 habitaciones con las mismas características que las utilizadas durante las pruebas del sistema con control manual. Por lo cual el sistema de iluminación con un control inteligente que se obtuvo al final está conformado por: 3 Módulos de Iluminación/Sensado, 3 Módulos de Sensado, 3 Módulos de Recompensa y un Módulo de Control.

En la Figura 45, se muestran los módulos creados para las pruebas del sistema con un control inteligente, estos módulos creados fueron un total de 10. En cada habitación se colocaron 3 Módulos para recolectar la información de su entorno, mientras el Módulo de Control se encargaba de ejecutar el algoritmo inteligente diseñado para evaluar las acciones del sistema y colocar un valor Q a cada par estado-acción del mismo.



Figura 45: Módulos que integran el sistema con control inteligente.

El sistema resultante es capaz de elegir una acción para cierto estado respecto al valor Q que obtiene dicha acción conforme avanza el aprendizaje, puede adaptarse al entorno cuando éste cambie y aprender de él. Al utilizar un algoritmo de QLearning el sistema es capaz de tener un aprendizaje continuo, ofreciendo la capacidad de adquirir nuevo conocimiento y reaccionar ante situaciones imprevistas, con las interacciones que el sistema tenga con los usuarios y el entorno su aprendizaje ira aumentando y mejorando.

Como se describió en el Capítulo 3 se diseñaron una serie de carcasas para cada uno de los módulos, la carcasa del Módulo de Iluminación/Sensado de la habitación 1 se realizó con una impresión 3D del diseño mostrado anteriormente, sin embargo al momento de realizar el resto de las impresiones, la impresora 3D presentó fallas dejando las impresiones a medias, deteniendo el proceso. Dado que el tiempo de la impresión de cada uno de los diseños iba de 6 a 8 horas, los fallos presentados podían llegar a retrasar el trabajo, por lo cual se optó por comprar cajas de plástico duro con dimensiones

similares para proteger los circuitos.

El sistema resultante, con ambos tipos de controles, se implementó solo en 3 de las 9 habitaciones existentes en el hogar, sin embargo, este sistema puede ser implementado en más habitaciones, pues al ser un sistema modular basta con crear los módulos y añadir sus características en el archivo de configuración de las habitaciones para que el sistema sea capaz de integrar los nuevos módulos y recopilar los datos obtenidos por los mismos. Este archivo de configuración se puede encontrar dentro del entorno creado, es un archivo “.conf”, utilizado por el sistema para conocer las características de los componentes que lo integran.

5.2. Resultados experimentales

Es importante mencionar que este trabajo se realizó durante el periodo de pandemia, por lo cual las pruebas y experimentaciones se realizaron en una casa familiar, donde los usuarios participantes son miembros de una familia. Sin embargo, este sistema es capaz de implementarse en diferentes tipos de lugares como escuelas, oficinas y otros espacios cerrados, además de una vivienda familiar, como se muestra en este trabajo.

5.2.1. Pruebas de laboratorio

Las pruebas de laboratorio se desarrollaron en un lugar fijo, donde cada uno de los componentes fueron evaluados por separado para asegurar que el dato obtenido fuera el correcto. Al iniciar con la creación de los módulos, el esquema eléctrico fue probado en una protoboard donde se pueden probar las piezas sin comprometerlas físicamente. Una vez superada la evaluación individual, tanto en conexiones como en programación, fueron montados los módulos y evaluados, como se observó en los diseños mostrados en el Capítulo 3, los módulos se clasificaron de acuerdo a su funcionalidad, por lo cual la programación de cada tipo de módulo fue la misma con algunos ligeros cambios para la calibración de algunos de los sensores.

Las pruebas de cada uno de los componentes se basaron en verificar que las conexiones fueran las correctas para que la pieza funcionara correctamente, además, se verificó que la lógica en la programación fuera la adecuada para tratar los datos obtenidos por el componente y poder transmitirlo al Módulo de Control. El sistema funciona mediante el intercambio de paquetes en la red de forma inalámbrica, por lo cual se evaluó que la conexión al servidor MQTT fuera estable para poder asegurar su disponibilidad en cualquier momento.

Para realizar las pruebas necesarias se utilizó una computadora portátil, con la cual se estableció una conexión hacia la tarjeta Raspberry Pi 4B por medio del protocolo Secure Shell (SSH), mediante dicha conexión se pudo configurar la tarjeta para mantener el servicio MQTT encendido, crear y administrar la base de datos durante la etapa de pruebas, y crear las clases necesarias para el tratamiento de datos recibidos por el resto de los módulos. A continuación, se describen en que consistieron las pruebas de

laboratorio realizadas:

- Pruebas de conexiones electrónicas. Durante las pruebas de los componentes electrónicos se supervisó que las conexiones del componente fueran las adecuadas para su correcto funcionamiento, tanto la alimentación de las piezas, así como la conexión a la placa para transmitir el dato obtenido por algunas de ellas. Se supervisó además, que el dato obtenido por los sensores fuera correctamente tratado antes de ser enviado para ser lo más claro posible y reducir el tráfico en la red, así como el espacio de almacenamiento en la base de datos del Módulo de Control.

Durante las pruebas individuales se probaron cada uno de los componentes electrónicos, las conexiones para poder hacerlo se realizaron en una protoboard donde los componentes pueden ser manipulados fácilmente. Se comprobaron los resultados de la programación que se realizó para estas piezas.

Los resultados obtenidos en estas pruebas demostraron deficiencias en los diseños esquemáticos originales, algunas de las conexiones no fueron las indicadas para el funcionamiento, tal es el caso de la conexión del sensor de corriente SCT013 a la tarjeta electrónica, el diseño original incluía el amplificador operacional, el cual se encargaba de limpiar la señal obtenida por el sensor para transformarla en un dato analógico que la tarjeta pueda leer. El diseño se modificó al percibir que la pieza llegaba a un punto de saturación con el voltaje suministrado de 3.3V emitido por la tarjeta, la pieza fue sustituida por un divisor de voltage que pueda suministrar un voltaje menor para la lectura de la señal, la cual, al tratarse de corriente alterna, tiende a ser positiva y negativa.

Otro de los datos recopilados por los sensores es la presencia, la cual se planificó sería recopilada mediante el sensor PIR, por lo cual se realizaron pruebas de alcance de detección del sensor para verificar la viabilidad de esta opción, sin embargo, los resultados obtenidos mostraron fallas al detectar la presencia en la habitación, siendo la puerta de acceso donde la detección de presencia comenzaba a fallar. Para solventar este problema se hizo uso del sensor ultrasónico como un dato complementario al valor obtenido por el sensor PIR.

Durante las pruebas de laboratorio el Módulo de Iluminación/Sensado, el cual incluye el sensor PIR, se colocó en la parte central de la habitación, donde se aprovecha su rango de alcance para cubrir la mayor parte del lugar. Mientras el Módulo Manual, el cual contiene el sensor ultrasónico, se colocó sobre la puerta de acceso a la habitación para detectar la presencia en esta zona. Al hacer uso de dos datos de presencia, es necesario realizar un proceso interno para darle formato al dato de presencia utilizado por el algoritmo. A continuación, en la Figura 46, se muestra un ejemplo de este proceso:

Una vez comprobadas las conexiones de cada componente electrónico, así como su correcto funcionamiento lógico, la siguiente etapa consistió en mantener las conexiones fijas mediante la

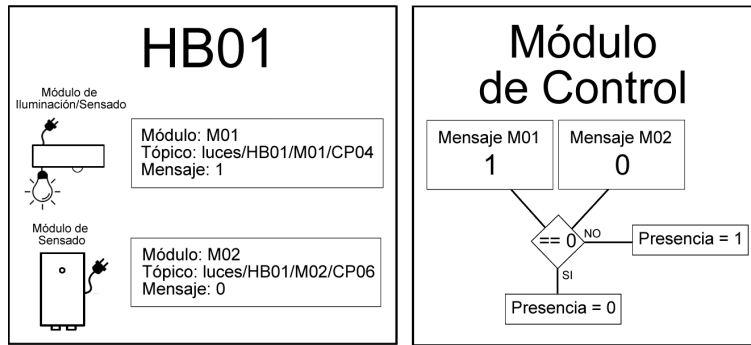


Figura 46: Ilustración del proceso de limpieza del dato de presencia.

soldadura de los componentes a una baquelita para asegurar que se mantengan en su lugar durante las siguientes pruebas. En la Figura 47, se muestra el resultado del Módulo de Sensado después de haber sido soldado.

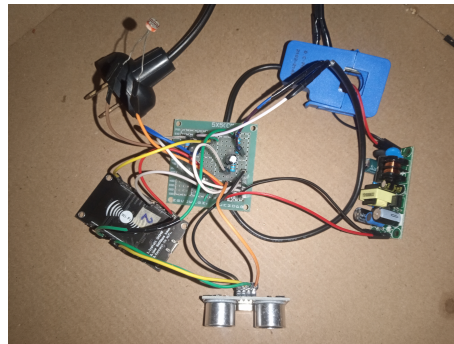


Figura 47: Módulo de Sensado soldado.

Para verificar que las piezas fueron soldadas correctamente se utilizó un multímetro, con ayuda de esta herramienta se verificó la continuidad en el circuito para asegurar que las piezas fueron conectadas entre sí correctamente. Además, dado que los módulos son alimentados por medio de una clavija conectada a la red eléctrica del hogar, se verificó que el transformador pudiera tomar esos 123v de corriente alterna suministrados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y convertirlos en los 5v de corriente directa necesarios para alimentar el circuito creado.

Con todas las pruebas realizadas de diseño e implementación a cada uno de los módulos creados fue posible detectar y corregir los problemas detectados para pasar al siguiente conjunto de pruebas.

- Pruebas en Base de Datos

Cada módulo que integra el sistema intercambia sus mensajes por medio de un tópico que los identifica, dependiendo del módulo la cantidad de información varía, las luminarias, así como cada sensor del sistema comparte la información recopilada bajo un tópico específico como se

muestra en la Figura 48. Estos datos son transmitidos hacia el Módulo de Control, el cual está suscrito a todos los tópicos de la categoría principal, lo cual se puede especificar utilizando la sintaxis “luces/#” al indicar el tema al cual se suscribe mediante la clase creada “Mosquitto” implementada en Python.

Habitación	Módulo	Componente	Tópico
HB01	M01	CP02	luces/HB01/M01/CP02
		CP03	luces/HB01/M01/CP03
		CP04	luces/HB01/M01/CP04
	M02	CP05	luces/HB01/M02/CP05
		CP06	luces/HB01/M02/CP06
		CP07	luces/HB01/M02/CP07
	M03	CP08	luces/HB01/M03/CP08
		CP09	luces/HB01/M03/CP09
	MR01	CP26	luces/HB01/MR01/CP26
CP27		luces/HB01/MR01/CP27	
HB02	M00	CP01	luces/HB02/M00/CP01
	M04	CP10	luces/HB02/M04/CP10
		CP11	luces/HB02/M04/CP11
		CP12	luces/HB02/M04/CP12
	M05	CP13	luces/HB02/M05/CP13
		CP14	luces/HB02/M05/CP14
		CP15	luces/HB02/M05/CP15
	M06	CP16	luces/HB02/M06/CP16
		CP17	luces/HB02/M06/CP17
MR02	CP28	luces/HB02/MR02/CP28	
	CP29	luces/HB02/MR02/CP29	
HB03	M07	CP18	luces/HB03/M07/CP18
		CP19	luces/HB03/M07/CP19
		CP20	luces/HB03/M07/CP20
	M08	CP21	luces/HB03/M08/CP21
		CP22	luces/HB03/M08/CP22
		CP23	luces/HB03/M08/CP23
	M09	CP24	luces/HB03/M09/CP24
		CP25	luces/HB03/M09/CP25
	MR03	CP30	luces/HB03/MR03/CP30
CP31		luces/HB03/MR03/CP31	

Figura 48: Tópicos de publicación por cada componente del sistema.

La conexión y gestión de la base de datos se realizó mediante Python, con ayuda de la clase “DataBase” se estableció la conexión a la base de datos creada llamada “Iluminacion.db”, la cual almacenará los datos recopilados por cada uno de los módulos que integran el sistema. Para verificar que la conexión se estableciera correctamente, se realizaron pruebas individuales a cada módulo, para posteriormente comenzar a compartir y almacenar los mensajes enviados por cada uno de ellos.

Como se puede ver en la Figura 49, el mensaje compartido por cada componente posee una estructura definida. Por lo cual al momento de recibir el mensaje, el Módulo de Control realiza una división del mismo para limpiar el dato y poder almacenarlo en la base de datos creada bajo el diseño mencionado en el Capítulo 4.

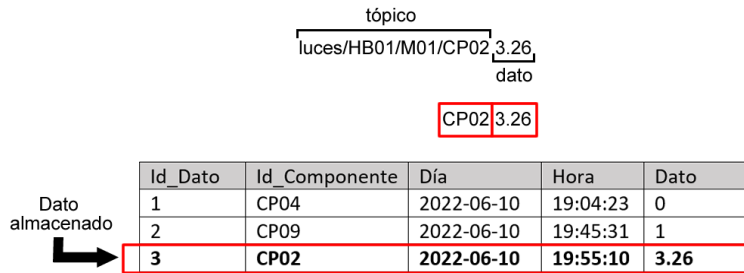


Figura 49: Estructura básica del mensaje compartido en la red.

Durante el periodo de pruebas se compartieron datos por medio de la red inalámbrica, los cuales fueron tratados por las clases “DataBase” y “TratamientoDatos” para darle formato a los datos recibidos y poder almacenarlos en la base de datos. Para verificar el correcto almacenamiento y la integridad de los datos se hizo uso de los comandos básicos de SQLite para la consulta de datos:

```
SELECT * FROM Datos;
```

Este comando muestra todos los datos almacenados en la tabla, permitiendo observar si alguno de los datos fue mal procesado.

- Pruebas en servidor MQTT

Al instalar el servidor MQTT en Linux, este servicio se inicia inmediatamente, sin embargo, la configuración predefinida del servidor no le permite comunicarse con clientes externos. El archivo de configuración del servidor solo permite escuchar mensajes enviados desde el propio dispositivo bajo la dirección 127.0.0.1, por lo cual durante la etapa de pruebas fue necesario modificar su configuración permitiendo que dispositivos externos pudieran conectarse al servidor y ser escuchados. La configuración del archivo permite que al iniciar el Módulo de Control, el servicio MQTT se inicie y esté disponible con la nueva configuración, permitiendo el intercambio de mensajes en la red creada para el sistema.

Dentro del Módulo de Control se creó una clase para que el módulo pudiera suscribirse y realizar publicaciones utilizando el mismo servidor, sin embargo, de acuerdo al diseño de Mosquitto, un cliente no puede suscribirse al mismo tópico publicado por el mismo. Durante el periodo de pruebas se buscó la solución al problema detectado, optando por dividir la clase creada, de esta forma el resultado fue la creación de la clase “Mosquitto_pub”, la cual permite al módulo compartir los datos de consumo de energía eléctrica, y por otro lado la clase “Mosquitto_sub” la cual le permite escuchar a todos los módulos para procesar sus mensajes.

5.2.2. Pruebas de campo

Una vez superadas las pruebas de laboratorio, se realizaron las pruebas en un entorno real, las cuales fueron realizadas 3 habitaciones con distintos usos dentro de una casa familiar (habitación, pasillo, habitación común). En la Figura 50, se muestra la ubicación de dichas habitaciones. Tanto el sistema manual, como el sistema inteligente fueron usados por los integrantes de la familia, las características de los usuarios participantes se muestran en la Tabla 24.

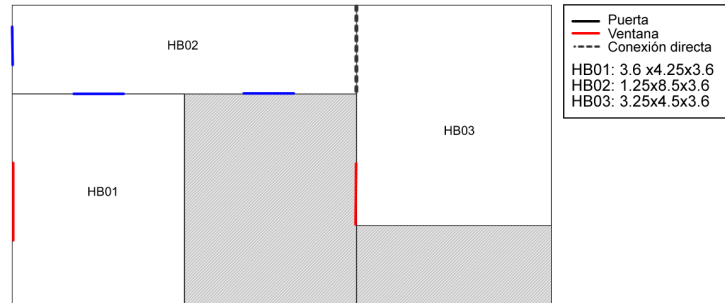


Figura 50: Habitaciones utilizadas durante el periodo de prueba del sistema.

Participante	Sexo	Edad
1	Masculino	60
2	Femenino	60
3	Femenino 5v	31
4	Femenino	30
5	Masculino	25

Tabla 24: Características de los usuarios participantes en las pruebas del sistema.

Las pruebas se dividieron en tres fases: prueba sistema manual, prueba sistema inteligente (Entrenamiento) y prueba sistema inteligente (Funcional). Estas pruebas se realizaron durante una semana para cada prueba, donde los usuarios utilizaron el sistema correspondiente en las tres habitaciones durante un periodo aproximado de 11 horas al día. Al finalizar cada etapa se les aplicó un cuestionario a los usuarios para conocer su opinión y experiencia con el sistema, permitiendo además conocer sus recomendaciones para mejorarlo.

- Prueba sistema manual. El sistema con control manual está formado por 3 tipos de módulos diferentes, el Módulo de Iluminación/Sensado, el Módulo Manual y el Módulo de Control. En cada habitación se instalaron un par de módulos, en total fueron 7 módulos para cubrir las tres habitaciones, el sistema resultante fue un sistema que le brinda el control de las luminarias al usuario, donde él es capaz de manipularlas de acuerdo a sus necesidades.

En Módulo de Iluminación/Sensado fue colocado en el centro de cada habitación, de esta forma la luz producida por la bombilla puede cubrir la habitación completa y brindar la suficiente

luminosidad al lugar. El Módulo Manual fue instalado cerca del interruptor fijo para poder conectarse a la toma de corriente de forma más fácil. La instalación de los módulos dentro de las habitaciones se muestran en la Figura 51.



Figura 51: Módulos instalados por habitación.

El sistema fue utilizado durante una semana como única fuente de iluminación dentro de las habitaciones, durante los siete días de la semana el sistema se utilizó en un horario de 10:00 a 21:30 hrs. aproximadamente. Durante este periodo de tiempo se pudo observar que algunos usuarios mostraron desconfianza sobre el uso del sistema (personas con mayor edad) por lo cual el control de las luminarias fue realizado por el resto de los integrantes.

De acuerdo a los datos recopilados durante su periodo de prueba, el sistema con control manual tuvo un consumo aproximado de 31Wh durante la semana en que fue implementado. En la Tabla 25 muestra el consumo del sistema por módulo durante la semana de pruebas.

Módulo	Consumo eléctrico (W)
M00	550.9
M01	760.87
M03	252.65
M04	249.41
M06	399.28
M07	473.75
M09	167.05

Tabla 25: Consumo eléctrico por cada módulo del sistema con control manual.

Usualmente las luminarias fueron encendidas a las 19:30, cuando el sol se ocultaba y comenzaba la noche. De acuerdo a los resultados obtenidos en el cuestionario realizado a los usuarios participantes, la luminosidad otorgada por las bombillas led fue adecuada a las tareas realizadas en las diferentes habitaciones. Además en promedio se consideró que el desempeño del sistema fue

bueno, percibiendo un buen tiempo de reacción del sistema al indicarle la acción a la luminaria por medio del botón, al igual que algunos fallos en los módulos al inicio de las pruebas.

El nivel de comodidad del participante al utilizar el sistema con control manual fue en promedio regular. Se hicieron algunas recomendaciones para mejorar el sistema, entre las cuales destacan: mejorar el diseño de las carcasas y su instalación, dado que fue un poco rústica como se mostró en la Figura 51. Además, se sugirió cambiar el color de la bombilla utilizada y agregar la funcionalidad de encenderla gradualmente para evitar la molestia visual provocada al encender la bombilla rápidamente.

- Pruebas sistema inteligente.

Las pruebas realizadas al sistema con control inteligente se realizaron bajo las mismas condiciones que las pruebas al sistema con control manual. Este sistema está conformado por cuatro tipos de módulos: el Módulo de Iluminación/Sensado, el Módulo de Sensado, Módulo de Recompensa y el Módulo de Control. En total se utilizaron 10 módulos para cubrir las tres habitaciones. El sistema resultante fue un sistema capaz de aprender y adaptarse al entorno conforme la cantidad de interacciones con el usuario aumentaba.

El Módulo de Iluminación/Sensado fue colocado en el centro de cada habitación como en las pruebas anteriores, buscando cubrir la mayor cantidad de la superficie de la habitación. El Módulo de Sensado se colocó sobre el marco de la puerta de acceso de cada habitación. En esta ocasión el sistema cuenta con un Módulo de Recompensa, el cual proporciona una retroalimentación al sistema para ayudar en su aprendizaje. Finalmente, el Módulo de Control fue colocado en la habitación 2 (HB02). La instalación de los módulos dentro de las habitaciones se muestra en la Figura 52.

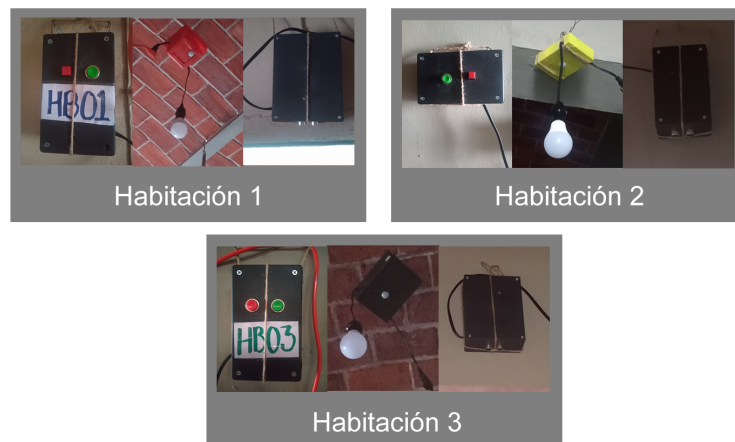


Figura 52: Módulos instalados por habitación para el sistema con control inteligente.

Para este sistema las pruebas se dividieron en dos etapas, ambas fueron realizadas durante

una semana, durante estos siete días el sistema se utilizó en un horario de 10:00 a 21:30 hrs. aproximadamente. Las etapas se dividieron en:

1. Pruebas de aprendizaje.

En esta etapa el sistema se encuentra limpio, sin conocimiento previo. Mediante las interacciones con su entorno y los usuarios fue aprendiendo poco a poco cual es la mejor acción que podía realizar para un estado específico. Mediante la ecuación 7 mostrada en el Capítulo 4, el sistema comenzó a asignarle un valor Q a cada par estado-acción que se fue presentando a la largo de las interacciones con el usuario. Con estos valores se creó la tabla Q , la cual fue consultada cada vez que se presentaba un estado, permitiendo al sistema decidir qué acción tomar frente a este. Aunque al principio de las pruebas los usuarios desconfiaban de la funcionalidad del sistema, con ayuda de las retroalimentaciones que proporcionaron el sistema mejoró gradualmente.

Al finalizar la semana, el sistema adquirió conocimiento que ayudó a que los usuarios lo aceptaran un poco más demostrando su mejoría. Al no ser necesario controlar directamente las luminarias, el usuario se mostró más cómodo con la interacción con el sistema. Sin embargo, al no tener un conocimiento previo sus primeras interacciones causaron impresiones negativas, las cuales fueron disminuyendo al notar la mejoría en su desempeño. De acuerdo a los datos recopilados durante su periodo de prueba, el sistema con control inteligente durante la etapa de aprendizaje tuvo un consumo aproximado de 43Wh durante la semana en que fue implementado. En la Tabla 26 se muestra el consumo que tuvo cada módulo del sistema durante este periodo de tiempo.

Módulo	Consumo eléctrico (W)
M00	567.03
M01	542.98
M02	225.94
MR01	341.57
M04	521.97
M05	259.58
MR02	348.13
M07	510.28
M08	261.38
MR03	346.72

Tabla 26: Consumo eléctrico por cada módulo del sistema con control inteligente (aprendizaje).

En promedio las luminarias mostraron un comportamiento impredecible con el control inteligente en la etapa de aprendizaje, lo cual era esperado. Como se comentó anteriormente, el sistema no tenía conocimiento previo del entorno, desconocía sus características y tareas diarias realizadas por los usuarios, por lo cual el comportamiento del sistema fue inestable.

Este comportamiento se modificó poco a poco, al finalizar la semana el sistema fue más estable gracias a las interacciones que tuvo con el entorno y los usuarios participantes de la prueba.

Algunos de los valores Q resultante después de la semana de pruebas, para cada par estado-acción en la habitación 1 (HB01) se muestran en la Tabla 27, ahí se encuentran algunos datos de ejemplo. Se puede notar que la acción con un mayor valor Q es encender la luminaria, cuando el entorno muestra una presencia en la habitación y el nivel de luminosidad es insuficiente, en un día entre semana en un lapso de tiempo de 10:00 a 19:00 hrs. sin un flujo detectado hacia la misma (1, 0, 0, 2, 0).

Estado	Acción	Valor
1, 0, 0, 2, 0	0	-0.351
1, 0, 0, 2, 0	1	-0.482
1, 0, 0, 2, 0	2	0.1498
1, 0, 0, 3, 0	0	-0.781
1, 0, 0, 3, 0	1	-0.3
1, 0, 0, 3, 0	2	0.006
1, 0, 1, 2, 0	0	-0.434
1, 0, 1, 2, 0	1	0.009
1, 0, 1, 2, 0	2	-0.3
1, 0, 1, 3, 0	0	-0.657
1, 0, 1, 3, 0	1	0.0441
1, 1, 0, 2, 0	0	0.821
1, 1, 0, 2, 0	1	0.28
1, 1, 0, 2, 0	2	-0.201
1, 1, 0, 3, 0	0	0.725
1, 1, 1, 2, 0	0	1.193
1, 1, 1, 2, 0	1	-0.288
1, 1, 1, 2, 0	2	-0.186
1, 1, 1, 3, 0	0	0.840

Tabla 27: Valores Q obtenidos de la habitación 1 durante la etapa de aprendizaje del sistema.

Sin embargo, también se puede observar que apagar la luminaria se muestra como la mejor acción a realizar cuando se detecta presencia en la habitación, los niveles de iluminación son suficientes, en un día entre semana en un lapso de tiempo de 10:00 a 19:00 hrs., sin un flujo detectado hacia la misma (1, 1, 0, 2, 0). Pese a haber sido entrenada durante una semana, el algoritmo necesita un periodo de aprendizaje más amplio para poder mejorar sus decisiones, reforzando el conocimiento adquirido sobre los posibles estados que se puedan presentar en las habitaciones.

Como se mencionó anteriormente, el sistema trabaja por medio de agentes, los cuales a través del aprendizaje por refuerzo son modelados para atender y proporcionar la iluminación adecuada a la habitación de acuerdo al estado que se presente, siendo capaces de adaptarse rápidamente a los cambios presentados en los mismos. De acuerdo a las variables

que conforman el estado se calcularon 64 posibles estados por habitación, los cuales son tratados de forma diferente de acuerdo a las actividades desarrolladas en cada una de ellas. Dado que el periodo de prueba abarcó una semana completa fue posible manejar la variable “día” en el rango completo. Sin embargo, el periodo de prueba por día solo abarcaba dos de los cuatro valores que la variable “hora” podía tomar, esta variable es la que más valores puede tomar. De acuerdo a lo anterior solo se pudieron experimentar el 50% del total de posibles estados estimados. Las condiciones climatológicas fue un factor externo que no puede ser controlado, por lo cual las posibilidades de detectar poca iluminación en el rango de 10 a 19 horas fueron casi nulas.

El aprendizaje que adquiere el sistema debe ser reforzado para que el sistema mejore, sin embargo, con el lapso de tiempo estipulado en este trabajo para el aprendizaje del sistema no fue posible explorar todos los estados en cada habitación. Pese a ello, los estados presentados pudieron generar conocimiento al sistema, permitiendo notar como las mejorías del sistema avanzaban conforme las interacciones con el usuario aumentaban. Durante este periodo de pruebas el sistema inteligente, en su etapa de aprendizaje tuvo un consumo eléctrico aproximado de 43Wh.

En cuando al desempeño del sistema, de acuerdo a las respuestas proporcionadas por los usuarios participantes a través del cuestionario realizado, se muestra que la luminosidad otorgada por las bombillas led para realizar las tareas cotidianas fue regular de acuerdo a la percepción de los usuarios. Esto dado que las luminarias podían encender o apagarse ante cualquier cambio en el estado percibido en las habitaciones.

Así mismo, se consideró por parte del usuario, que el desempeño del sistema fue de regular a malo, ya que el sistema inteligente en su etapa de aprendizaje fue inestable, haciendo que los usuarios de la prueba se mostraran inconformes con su desempeño. Entre las sugerencias y recomendaciones que se hicieron para mejorar el sistema y su desempeño se destacan: agilizar la etapa de aprendizaje para que el sistema no tenga que aprender de cero, añadir los valores para las acciones lógicas cuando se presenta determinadas características en las habitaciones. Igualmente se sugirió mejorar el diseño de los módulos.

2. Pruebas funcionales.

Esta etapa de pruebas se realizó con la misma instalación de los componentes realizada para las pruebas del sistema con control inteligente en la fase de aprendizaje (Figura 52). Los 10 módulos que integran el sistema permanecieron en el mismo sitio interactuando con su entorno. En las tres habitaciones el sistema fue utilizado como única fuente de iluminación durante una semana en un lapso de tiempo que abarco de 10:00 a 21:30 hrs aproximadamente.

Durante el periodo de tiempo en el que se realizaron las pruebas se pudo observar que el

comportamiento del sistema fue más estable, cometiendo menos errores gracias a la ayuda del aprendizaje adquirido previamente. Los usuarios se mostraron más dispuestos a interactuar con él, dado que con la experiencia previa lograron comprender mejor cómo funciona el sistema y la importancia de otorgar recompensas al mismo para que pueda mejorar. Sin embargo, el par de participantes de mayor edad optaron por dejar que el resto de los usuarios fuera los que otorgaran las recompensas.

De acuerdo a los datos recopilados durante el período de prueba, el sistema inteligente en su fase funcional tuvo un consumo aproximado de 41Wh durante la semana en que fue utilizado por los usuarios participantes. En la Tabla 28 se muestra el consumo del sistema por módulo durante las pruebas.

Módulo	Consumo eléctrico (W)
M00	576.61
M01	492.38
M02	207.9
MR01	320.52
M04	445.75
M05	286.13
MR02	353.04
M07	477.12
M08	279.8
MR03	332.38

Tabla 28: Consumo eléctrico por cada módulo del sistema con control inteligente (funcional).

En promedio las luminarias se encendían entre las 19:30 - 20:00 hrs, cuando la iluminación natural ya no era suficiente en las habitaciones de prueba y la presencia de los usuarios era más frecuente en las mismas. De acuerdo a los resultados obtenidos en el cuestionario realizado a los usuarios participantes, la luminosidad otorgada por las bombillas led fue suficiente para las tareas realizadas en las diferentes habitaciones. Además, en promedio se consideró que el desempeño del sistema fue bueno, ya que el sistema inteligente logró identificar las preferencias de los usuarios con los estados más comunes dentro de las habitaciones. Se consideró que el sistema fue capaz de elegir la mejor acción para los estados la mayoría de las veces, haciendo que el participante se sintiera más cómodo con su funcionamiento.

El nivel de comodidad del participante al utilizar el sistema mediante un control inteligente en esta etapa funcional fue mejor que en su etapa de aprendizaje, en promedio su comodidad se evaluó como buena. Entre las respuestas a la encuesta realizada a los usuarios participantes se obtuvieron algunas recomendaciones para mejorar el sistema, entre las cuales destacan: agregar un regulador de intensidad para la luminaria, así como integrar una aplicación móvil para enviar la retroalimentación al sistema. Así mismo se sugirió de nuevo mejorar el diseño y la instalación de los módulos, dado que la instalación actual se consideró

muy improvisada.

La serie de pruebas realizadas tanto a los módulos, como al sistema final logró mostrar algunas deficiencias en el software. Las más destacadas fueron errores al momento de tratar los datos recibidos por el servidor MQTT, alojado en el Módulo de Control. Al hacer uso de la base de datos, la extracción de la información debe ser tratada de acuerdo a los diferentes tipos de datos trabajados, desde cadenas, enteros a flotantes. El proceso de tratamiento de datos implica conexiones a la base de datos para obtener la información, al ejecutarse en varios puntos del código fue necesario cerrar dicha conexión cada vez que el proceso terminaba, de esta forma se liberaba la base de datos evitando que la conexión se bloquee.

Así mismo se logró identificar ciertas preferencias en los usuarios, las cuales cambiaban de acuerdo a la habitación que era evaluada. Tanto la habitación 1 y 3 son las más frecuentadas por los usuarios. Mientras la habitación 2 suele ser más utilizada como acceso a la vivienda o como conexión entre la habitación 1 y 3, por lo cual el tiempo en el cual se detecta una presencia suele ser corto y el uso de las luminarias es considerablemente menor.

Los usuarios de la prueba mostraron una evidente preferencia por mantener esa luminaria apagada la mayor parte del tiempo, lo cual se vio reflejado en las retroalimentaciones proporcionadas al sistema. Como se puede observar en la Tabla 29.

Estado	Acción	Valor
1, 1, 1, 2, 0	2	-0.3
1, 1, 0, 3, 0	1	0
1, 1, 1, 3, 0	0	0.3
1, 1, 1, 2, 0	0	0.3
1, 1, 0, 2, 1	0	0.51
1, 1, 0, 3, 1	0	0.363
1, 1, 0, 3, 0	0	0.420
0, 0, 0, 3, 1	0	0.3
0, 0, 0, 3, 0	0	0.363
0, 0, 0, 2, 1	0	0.3
1, 1, 0, 3, 1	2	-0.3
1, 0, 0, 2, 0	0	0.3
1, 0, 0, 2, 0	2	0.153
1, 0, 1, 3, 0	2	0.3
1, 0, 0, 3, 0	0	-0.237
1, 0, 0, 2, 1	0	0.51
0, 0, 1, 2, 0	2	-0.237

Tabla 29: Valores Q obtenidos de la habitación 2 durante la etapa de aprendizaje del sistema.

El sistema inteligente presentó mejoría después de la fase de aprendizaje. Sin embargo, el tiempo que se asignó para que el sistema adquiriera este aprendizaje fue corto por lo cual el sistema no pudo reaccionar a todos los estados (64 posibles estados por habitación) previstos. La disponibilidad de los

usuarios para realizar estas pruebas fue marcado por un lapso de tiempo al día que abarco de 10:00 a 21:30 hrs., por lo cual el sistema no pudo experimentar la totalidad de los posibles estados calculados, siendo solo el 50 % de ellos con los cuales se pudo trabajar al menos una vez.

5.3. Consumo y desempeño del sistema

Durante la semana de pruebas asignada a cada arquitectura del sistema, se logró obtener algunos datos interesantes. Entre ellos se encuentra el consumo que tuvieron los módulos y el sistema en general, en las siguientes tablas se muestra un poco de ello. La Tabla 30, muestra el consumo que obtuvo en promedio cada uno de ellos, clasificados por habitación.

Habitación	Módulo	Consumo promedio por prueba al día (W)		
		Manual	Aprendizaje	Funcional
HB01	M01	95.1	67.8	61.5
	M02		28.2	26
	M03	31.6		
	MR01		42.7	40
HB02	M00	68.9	70.9	72
	M04	31.2	65.2	55.8
	M05		32.4	35.8
	M06	49.9		
	MR02		43.5	44.1
HB03	M07	59.2	63.8	59.6
	M08		32.7	34.9
	M09	20.9		
	MR03		43.3	41.5
Consumo total por prueba		356.8	492.5	471.2

Tabla 30: Promedio de consumo eléctrico al día por prueba y módulo.

Como se puede observar al realizar el comparativo entre el consumo que se obtuvo en el mismo periodo de tiempo entre las pruebas realizadas al sistema inteligente, tanto en la etapa de aprendizaje como en la funcional, el consumo promedio por día del sistema funcional fue mejor que el consumo del sistema en el periodo de aprendizaje. Este ligero ahorro de energía de 2Wh podría aumentarse al mejorar el desempeño del sistema al proporcionarle más conocimiento, interactuando con los usuarios y su entorno.

Se puede notar que el 80 % de los módulos que componen el sistema inteligente redujeron su consumo después de haber pasado la etapa de aprendizaje. Si el periodo de pruebas se extiende en futuros trabajos podría ampliarse esta diferencia y así proporcionar un mayor ahorro de energía beneficiando al usuario.

Puede observarse que el sistema de iluminación con un control manual fue el que menos electricidad consumió en el periodo de pruebas. También puede observarse la diferencia entre la cantidad de módulos utilizados entre el sistema con control manual y el sistema con control inteligente. Ambas observaciones

pueden adjudicar la diferencia entre el consumo de ambos sistemas a la cantidad de módulos empleados.

Si comparamos el consumo del Módulo de Control (M00), se puede notar que la diferencia fue mínima entre las 3 pruebas. Por lo cual, tomando como referencia el Módulo de Iluminación/Sensado en cada habitación, en el cual realiza la acción en ambos sistemas, la diferencia entre el consumo eléctrico entre la prueba Manual y la prueba Funcional presentó una reducción de apenas 8.6W entre ambos sistemas. Con esta comparación se muestra la mejoría al utilizar el sistema inteligente en su etapa funcional en contraste con el sistema con control manual, lo cual puede reflejarse en un menor consumo eléctrico por parte del sistema inteligente.

Como se puede verificar en las Tablas 27 y 29, pese a que el sistema pudo aprender durante el periodo de pruebas, aun puede seguir mejorando. Si bien no todas las acciones realizadas por el sistema inteligente fueron las mejores, la mayoría presentó buenos resultados. Por lo cual se sugiere continuar entrenando al sistema en trabajos futuros para mejorar los resultados.

En cuanto al desempeño del sistema, se realizó una encuesta a los usuarios sobre el desempeño del sistema y su comodidad al utilizarlo después de cada semana de prueba. A continuación, se describen los resultados obtenidos de las mismas.

Como parte del desempeño del sistema y la comodidad del usuario con el mismo, se le preguntó al participante si los niveles de iluminación que fueron proporcionados por el sistema, en las tres pruebas, fueron lo suficientemente buenos para realizar la o las tareas diarias en las diferentes habitaciones. Como se puede observar en la Figura 53, los mejores resultados fueron para el sistema manual el cual logró un mejor puntaje, pues el 40% de los usuarios consideraron que la iluminación fue la correcta siempre. Sin embargo, el sistema inteligente en su etapa de aprendizaje presentó la peor evaluación, al ser considerado que los niveles de iluminación fueron regularmente buenos.

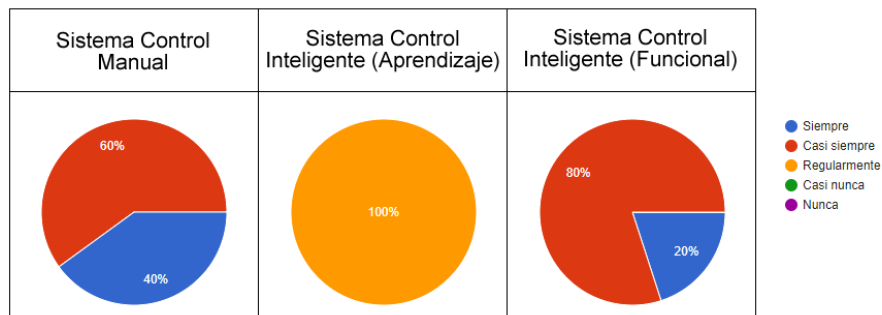


Figura 53: Evaluación de los niveles de iluminación proporcionados por el sistema en sus diferentes pruebas.

El usuario presentó molestias visuales durante las pruebas del sistema inteligente en su etapa de aprendizaje. Al comportarse de forma aleatoria la iluminación proporcionada por el sistema no fue la adecuada para los usuarios, desde encenderse a apagarse en forma inesperada. El usuario tuvo fatiga y cansancio visual provocado por el deslumbramiento al encenderse las luminarias y en otras ocasiones

por no contar con iluminación cuando era necesario, haciéndolos forzar la vista.

En cuanto al desempeño del sistema, los usuarios lo evaluaron de acuerdo a sus experiencias vividas. En la Figura 54, se muestra la evaluación del desempeño para cada una de las pruebas, donde se puede ver que el peor evaluación la obtuvo el sistema inteligente en su fase de aprendizaje.

El desconocimiento del entorno por parte del sistema lo hizo explorar hasta tener un mejor conocimiento de lo que sucede en su entorno. Por lo cual, se pudo observar un comportamiento aleatorio durante la etapa de aprendizaje, pues al estar familiarizándose con el entorno, el sistema realizaba acciones inadecuadas en los primeros días. Esta experiencia hizo que el usuario evaluara de regular a malo su desempeño, pues pese a haber mejorado con el paso del tiempo el usuario le otorgo mayor peso al primer acercamiento que tuvo con el.

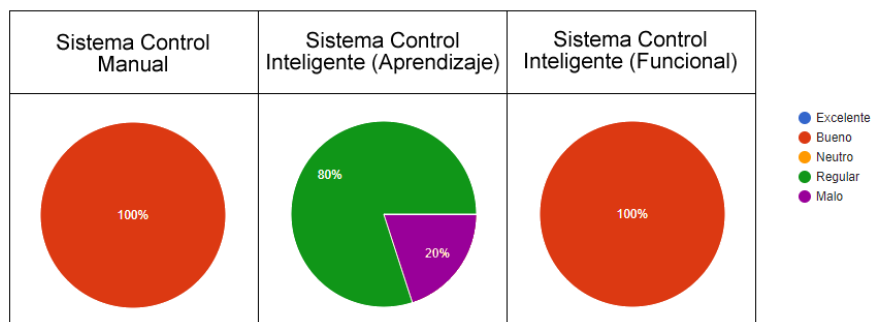


Figura 54: Evaluación del nivel de desempeño de los sistemas de acuerdo al usuario, en las diferentes pruebas.

En general el tiempo de reacción del sistema fue evaluado como bueno, pues el tiempo entre la acción y reacción fue rápido causando una buena impresión en el usuario. Como se puede observar en la Figura 55, tanto el sistema con control manual, como el sistema inteligente en su etapa de aprendizaje, el tiempo de reacción fue evaluado en promedio como bueno. En el caso del sistema inteligente en su etapa funcional, este resultado mejoró.

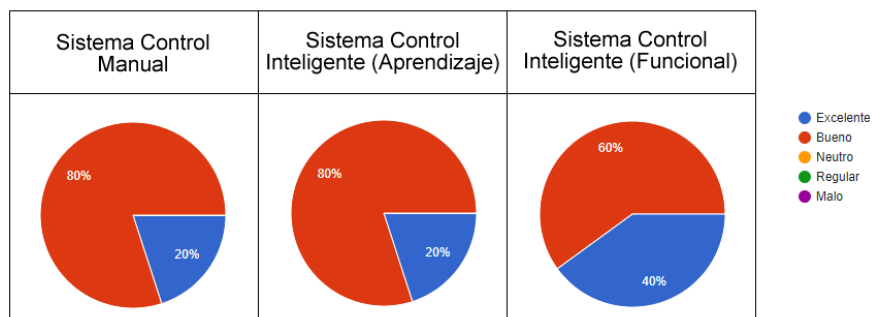


Figura 55: Evaluación del tiempo de reacción del sistema en sus diferentes pruebas.

Durante el periodo de pruebas los usuarios pudieron ser testigos de la instalación de los módulos en las diferentes habitaciones, así como las pruebas iniciales del funcionamiento del sistema. Por medio de

esta experiencia el usuario pudo presenciar fallos en los módulos los cuales se presentaron con mayor frecuencia en la etapa de las pruebas del sistema manual, pues al ser la primera vez que se instalaban los módulos se detectaron errores que se pudieron corregir en las instalaciones posteriores.

Como se puede observar en la Figura 56, las principales fallas detectadas durante la etapa de pruebas del sistema con control manual fueron aquellas que implican al hardware. Entre estas fallas se señaló el daño de algún componente durante el periodo de pruebas, así como la emisión de sonidos molestos. En contraste, durante el periodo de pruebas del sistema inteligente los fallos detectados fueron más sobre el proceso interno realizado por el software, donde el comportamiento de las bombillas fue la principal falla detectada.

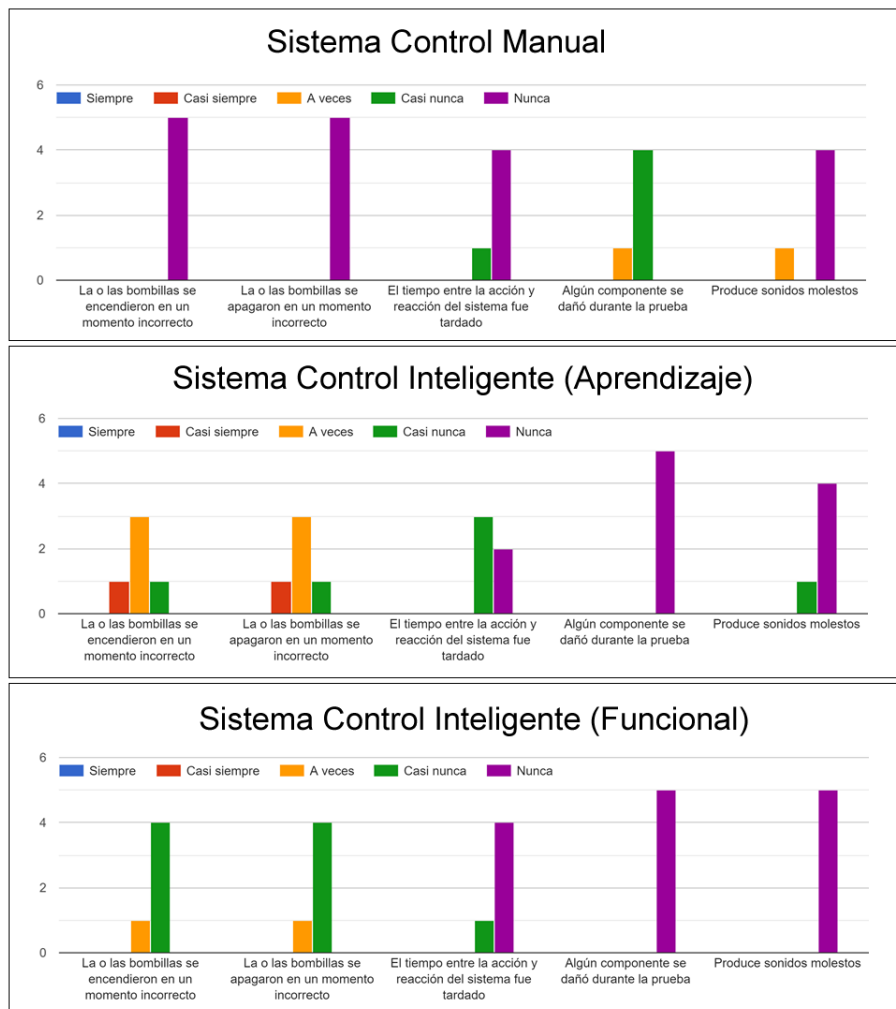


Figura 56: Fallas del sistema detectadas por el usuario en sus diferentes pruebas.

Al comparar la evaluación de las fallas en las pruebas del sistema inteligente, se puede notar que el comportamiento de las bombillas mejoró. Durante las pruebas del sistema inteligente en su etapa de aprendizaje el usuario evaluó en promedio que la falla en el comportamiento de las luminarias se

presentaba “a veces”, mientras la misma falla se presentaba en promedio “casi nunca” durante las pruebas del sistema inteligente en su etapa funcional.

El nivel de comodidad del usuario al utilizar el sistema se puede observar en la Figura 57, la evaluación de la comodidad por parte del usuario fue distinto para cada prueba. Durante el periodo de prueba del sistema con control manual la mayoría de los usuarios, es decir el 80%, indicio que su nivel de comodidad fue regular. En cambio, durante el periodo que se utilizó el sistema inteligente en su etapa de aprendizaje, la evaluación mostró que el 60% tuvo un nivel malo de comodidad al usar el sistema.

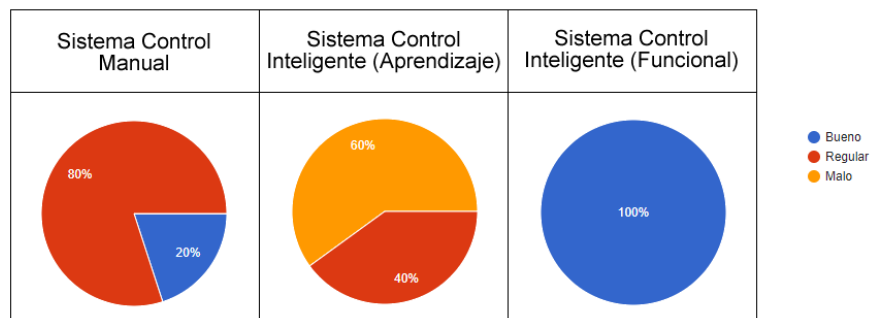


Figura 57: Nivel de comodidad del usuario al utilizar el sistema en sus diferentes pruebas.

La comodidad del usuario al utilizar el sistema inteligente en su etapa funcional fue evaluada como bueno. Al comparar su experiencia en las pruebas anteriores, donde la desconfianza de utilizar un sistema de iluminación “diferente” al tradicional y su mala experiencia al utilizar un sistema “inestable” con cambios impredecibles en las luminarias, la evaluación del sistema inteligente en la última prueba fue el mejor de ellos. Este sistema fue más estable que en su etapa de aprendizaje, además de ofrecer al usuario iluminación sin necesidad de que el usuario enviara la orden directamente al sistema fueron vistos como ventajas ante los sistemas anteriormente utilizados.

5.4. Síntesis y conclusiones del capítulo

El consumo eléctrico del sistema en cada una de las pruebas se midió contantemente, obteniendo como resultado un archivo csv, el cual se puede manipular para calcular el consumo ya sea por módulo, ubicación o lapso de tiempo. Los resultados mostrados en el archivo muestran que el sistema con un control manual tuvo un consumo de 31Wh durante el periodo de prueba, mientras el sistema inteligente en su etapa de aprendizaje obtuvo un consumo de aproximado de 43Wh durante el mismo periodo, finalmente el sistema inteligente en la etapa funcional consumió 41Wh. Como se puede observar al comparar las tres cifras, el sistema con control inteligente, durante su proceso de aprendizaje, obtuvo un mayor consumo eléctrico, mientras el sistema con un control manual fue el de menor consumo.

Conocer el consumo eléctrico del sistema de iluminación empleado es importante para decidir qué tipo de sistema elegir, en este trabajo de investigación los resultados no solo se enfocan en el ahorro

de energía eléctrica, además de ello se busca conocer la experiencia que el usuario puede experimentar al emplear el sistema, por lo cual se diseñó una corta encuesta para conocer un poco más acerca de esta experiencia en cada una de las etapas de prueba, así como las posibles deficiencias del sistema detectadas por el usuario. De acuerdo a la opinión de los usuarios, la iluminación proporcionada por el sistema durante el periodo de prueba con control manual y control inteligente fue la adecuada para la realización de las diferentes actividades en las habitaciones 1, 2 y 3, sin embargo, la iluminación proporcionada por el sistema con control inteligente durante su periodo de aprendizaje fue insuficiente y molesta. Al encontrarse con un sistema que aprende de su entorno, es necesario interactuar con el mismo durante un lapso de tiempo adecuado para que éste pueda adquirir conocimiento y su desempeño mejore.

Cuando el sistema se inicia no posee conocimiento alguno de su entorno, por lo cual se establece una variable que le ayude a experimentar con el estado del entorno en el que se encuentra y las posibles acciones que puede tomar, en este caso: encender, mantener o apagar. Conforme el usuario interactúa con el sistema, las acciones irán adquiriendo y actualizando un valor llamado valor Q que lo ayude a definir cuál es la mejor acción que puede realizar cuando el estado se vuelva a presentar. Pese a que el sistema añade un valor Q a una acción, este valor puede cambiar de acuerdo a las interacciones con el usuario, por lo cual el aprendizaje del sistema es continuo lo cual le permite adaptarse a situaciones inesperadas y mejorar con el tiempo.

El usuario pudo detectar este cambio entre el sistema inteligente en su etapa de aprendizaje, y el sistema inteligente después de esta etapa, cuando cuenta con información de la tabla Q y puede consultarla de acuerdo a los cambios que se presenten en el entorno. La evaluación del desempeño del sistema inteligente después de haber adquirido conocimiento fue mejor que la evaluación otorgada al mismo durante su etapa de aprendizaje, el usuario en promedio evaluó su desempeño como bueno.

Durante la instalación del sistema, el usuario fue testigo que algunas fallas presentadas en los módulos, como fallas en las conexiones entre el regulador de voltaje y el circuito, así como interferencias entre el soporte para colgar los módulos y los sensores. Durante el aprendizaje del sistema inteligente, los usuarios se mostraron incomodos cuando el sistema realizara una acción indeseada, por lo cual fue necesario añadir una aplicación móvil para modificar el estado de la luminaria cuando la acción tomada por el sistema fuera no fuera la esperada.

De las tres pruebas realizadas, el sistema inteligente en su etapa de aprendizaje obtuvo el menor puntaje en cuanto a comodidad por parte del usuario, dada su falta de conocimiento, las acciones realizadas por el sistema no siempre fueron las mejores, por lo cual el usuario calificó su nivel de comodidad entre regular y malo.

Con base a los criterios: consumo eléctrico y confort del usuario, los cuales fueron medidos después de realizar las pruebas en el entorno real, se puede observar que el sistema con control manual obtuvo un mayor ahorro en consumo eléctrico, mientras el sistema inteligente mostró resultados más positivos

en la encuesta realizada al usuario, por lo cual se puede decir que el usuario mostro una mayor comodidad al utilizar este sistema. Con la información obtenida de los resultados arrojados durante las tres pruebas realizadas, se puede mostrar que el sistema de iluminación diseñado con un control inteligente obtuvo una mejor aceptación del usuario de acuerdo a la encuesta realizada a los usuarios que recopila su opinión sobre dicho sistema, así mismo se notó un consumo eléctrico intermedio entre las tres pruebas, de acuerdo a los datos recopilados por el sensor de corriente de cada módulo.

6. Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

Con los resultados obtenidos, los cuales se muestran en el Capítulo 5 se pueden realizar algunas conclusiones, así como observaciones al sistema diseñado y desarrollado para mejorar su desempeño. A continuación, se muestran las conclusiones, recomendaciones, limitaciones y trabajo futuro sugerido para mejorar el sistema presentado en este trabajo de investigación.

6.1. Conclusiones

El sistema inteligente de iluminación fue diseñado con el objetivo de ahorrar el consumo de energía eléctrica en iluminación, sin afectar al usuario buscando mantener su nivel de confort al utilizarlo. Este objetivo se logró cumplir parcialmente, pues los usuarios se mostraron cómodos al utilizar el sistema inteligente, obteniendo buenos comentarios respecto a el control de las luminarias de forma automática. Sin embargo, los resultados obtenidos respecto al consumo eléctrico del sistema durante la semana que fue asignada para cada prueba dentro del trabajo de investigación, se pudo observar que el sistema con control manual fue el que obtuvo menor consumo.

Este resultado pudo deberse a la diferencia en la cantidad de módulos que forman el sistema manual (7 módulos) y el sistema inteligente (10 módulos). Como se puede observar en la Tabla 30 del Capítulo 5, al comparar solamente el consumo del módulo de Iluminación/Sensado se pudo notar el ahorro que producía utilizar el sistema con control inteligente en comparación con el sistema con control manual en el lapso de pruebas.

El sistema de iluminación creado, con control manual y control inteligente, es capaz de proporcionar la iluminación adecuada a los usuarios de una vivienda. El tiempo de reacción entre la acción seleccionada y su ejecución es bueno y no presenta fallas. El diseño de las carcasas de cada uno de los módulos puede mejorar, así como su instalación. La implementación del sistema de iluminación requiere de la instalación de al menos 2 módulos por habitación (Módulo de Iluminación/Sensado y Módulo Manual) en el caso de que se desee implementar el control manual. En el caso del sistema con control inteligente, los módulos instalados por habitación son al menos 3 (Módulo de Iluminación/Sensado, Módulo de Sensado y Módulo de Recompensa).

La instalación del sistema es relativamente sencilla, al contar con un diseño modular puede crecer de acuerdo a las necesidades del lugar donde se implementará. Para instalarlo basta con colocar los módulos en el lugar deseado dentro de la habitación y conectarlo a la toma de corriente más cercana. El software del sistema permite agregar el o los módulos al archivo de configuración dentro del entorno para que el nuevo módulo comience a funcionar.

En periodo de prueba de esta tesis para cada prueba fue de una semana, específicamente, se realizó la experimentación de cada sistema por un periodo de 92 horas. En este periodo de tiempo los cinco usuarios interactuaron con el sistema en condiciones distintas. Este periodo de tiempo puede arrojar

una idea sobre el funcionamiento y desempeño del sistema de iluminación diseñado con un control manual, sin embargo, puede parecer corto para el sistema con control inteligente. Al ser relativamente corto para explorar la totalidad de los estados estimados para cada habitación, así como para reforzar el aprendizaje para cada uno de ellos. Para mejorar el desempeño del sistema es recomendable que el tiempo de aprendizaje inicial sea más amplio para aumentar su aprendizaje.

Durante las semanas de prueba del sistema inteligente (aprendizaje y funcional) se presentaron condiciones distintas en algunas de esas pruebas, por lo cual se pudo explorar diferentes estados en su entorno y aprender a actuar sobre ellos. Para tener un buen desempeño del sistema inteligente es necesario que este aprenda de su entorno tanto como le sea posible con ayuda de la interacción con los usuarios. Durante la semana dedicada al aprendizaje en este trabajo de investigación fue posible ver mejorías en su desempeño, sin embargo, aún hay muchos estados por explorar y acciones por ejecutar para que éste pueda mostrar una mejoría significativa frente al sistema con control manual. Al aumentar el lapso de tiempo de aprendizaje para el sistema con control inteligente, se mejorará su desempeño. Por lo cual se sugiere seguir experimentando con el sistema en trabajos de investigación futuros.

El sistema resultante es capaz de aprender, de forma continua y en tiempo real, del entorno que lo rodea siendo capaz de reaccionar ante él y ejecutar una acción sobre el mismo. A diferencia de los productos encontrados en el mercado, con el uso del sistema con control inteligente el usuario no posee un control directo de las luminarias. El sistema no es reactivo, por lo cual es posible que se adapte a los cambios y situaciones inesperadas, pues es capaz de aprender con las interacciones continuas de los usuarios.

Así pues, el sistema es capaz de:

- Instalarse de forma sencilla.
- Añadir más módulos a su funcionamiento.
- Ofrecer una buena iluminación al usuario.
- Monitorear su entorno.
- Reaccionar ante cambios en su entorno.
- Mejorar continuamente.
- Ofrecer comodidad al usuario.

Con este trabajo de tesis se pudo observar la etapa de diseño, la programación y el montaje del sistema, además se incluyeron los resultados de una serie de pruebas que permitieron comprender mejor el funcionamiento del sistema y probar su capacidad para ofrecer iluminación al usuario. Su desempeño fue evaluado por los propios usuarios por medio de una encuesta, donde de acuerdo a su percepción el sistema fue bueno.

6.2. Limitaciones observadas

Durante la etapa de pruebas del sistema se lograron encontrar algunas limitaciones para el sistema. El algoritmo codificado para obtener el estado de cada habitación ha sido creado para obtener dos datos de presencia y transformarlos en uno solo para que el algoritmo inteligente pueda ser utilizado, lo cual puede representar un problema cuando se desea utilizar más sensores de presencia para cubrir la superficie de la habitación ya que debería modificarse el método para obtener la presencia en la clase `TratamientoDatos.py` para que el nuevo dato de presencia pueda ser tomado en cuenta.

El sistema actual solo puede ser puesto en función por un técnico con conocimiento en el área, si bien los módulos diseñados son de fácil instalación, el software no es accesible para todos al correr sobre una tarjeta electrónica Raspberry Pi 4B, el usuario debe tener al menos el conocimiento básico sobre el sistema Linux y su funcionamiento para poder manejar la tarjeta y correr el software creado. Así mismo, añadir módulos al sistema requiere que el usuario entre al archivo de configuración del sistema y trabaje sobre él, lo cual puede resultar complicado para el usuario que no esté familiarizado con este tipo de archivos.

El sistema necesita la evaluación constante durante su etapa de aprendizaje para adquirir conocimiento y reforzar el ya adquirido, por lo cual es necesario que el usuario ofrezca retroalimentación al sistema por medio de las recompensas. De acuerdo a las observaciones realizadas durante el periodo de prueba en este trabajo de investigación, este proceso puede llegar a ser algo tedioso para el usuario, sin embargo, una vez superada esta etapa las retroalimentaciones al sistema pueden disminuir ya que se habrá adquirido el conocimiento suficiente sobre el entorno que lo rodea y las acciones que debe realizar de acuerdo al estado que se presenta.

6.3. Contribuciones

En este trabajo de tesis se diseñaron, implementaron y probaron los diferentes tipos de módulos para el sistema, el Módulo de Iluminación/Sensado que permite detectar presencia y brindar iluminación a la habitación, el Módulo de Sensado que permite monitorear la presencia y el nivel de luminosidad en el entorno, así como el Módulo Manual que permite controlar las luminarias, el Módulo de Recompensa y otorga retroalimentación al sistema, y finalmente el Módulo de Control, el cual funciona como nodo central de la red para almacenar y distribuir la información de todos los componentes del sistema.

Además, se trabajó con el diseño y codificación de un algoritmo que permita controlar las luminarias de forma inteligente, mediante el uso de *q learning*. Este algoritmo contiene además la función de generar reportes `.csv` del consumo eléctrico de cada módulo, el cual puede ser descargado y manipulado de acuerdo a las necesidades del usuario.

Con los módulos creados se pudo implementar y probar el diseño del sistema de iluminación, con dos tipos diferentes de control. El sistema de iluminación con control manual puede ser utilizado cuando se desea tener el control absoluto de las luminarias por parte del usuario, mientras el sistema

de iluminación con control inteligente utiliza el aprendizaje por refuerzo para controlar las luminarias de acuerdo al estado del entorno en el cual es utilizado, volviéndose más autónomo. Ambos sistemas pueden ser utilizados de forma independiente, simplemente seleccionando el tipo de sistema que se desea implementar en el entorno e instalando los módulos necesarios.

Como se mencionó en el Capítulo 2, actualmente existen muchos sistemas “inteligentes” en el mercado, los cuales basan su funcionamiento en la domótica permitiendo que el usuario tenga el control de las luminarias. El sistema manual diseñado y probado en este trabajo es similar a ellos, donde por medio un botón el usuario puede manipular las luminarias de acuerdo a sus necesidades. Por otra parte, el sistema con control inteligente ofrece un control más independiente del usuario, a diferencia de los productos actuales en el mercado revisados anteriormente, el sistema inteligente diseñado es más autónomo, además de modular y escalable. El uso de aprendizaje reforzado para dotar al sistema de inteligencia resultó ser una buena opción, como se pudo ver en los resultados de las pruebas realizadas en el Capítulo 5, el uso de QLearning fue capaz de detectar la mejor acción por medio de los valores Q obtenidos de la ecuación 7.

El sistema con control inteligente trabajado en esta tesis, propone utilizar el aprendizaje automático para dotar al sistema de iluminación de inteligencia, por medio de la recepción y procesamiento de los datos recopilados del sistema se podrá conocer el estado de la habitación, así como sus cambios. Si bien muchos sistemas de iluminación “inteligentes” encontrados en el mercado o en trabajos de investigación cuentan con sensores, el sistema diseñado añade una variable extra a la ecuación: flujo. Esta variable permite que el sistema detecte el desplazamiento del usuario hacia cada una de las habitaciones y trabaje con ese dato, ofreciendo la posibilidad de encender la luminaria antes de que el usuario llegue a la habitación y con ello evitar el deslumbramiento que puede resultar incómodo para el mismo.

El sistema resultante, es un sistema de iluminación con dos tipos de control: manual e inteligente. Se puede seleccionar el tipo de control que se desea emplear mediante su configuración y su instalación es sencilla. El sistema creado es modular y escalable, permitiendo agregar tantas habitaciones y módulos al sistema como sea necesario, para ello se debe agregar sus datos al archivo de configuración del sistema para que éstos sean tomados en cuenta.

6.4. Trabajo futuro y recomendaciones

Durante las diferentes etapas de desarrollo los diseños tanto de software como de hardware fueron modificados para mejorar el funcionamiento de los módulos y el sistema en general. El diseño final expuesto en los capítulos 3 y 4 se muestra como una base para este sistema. Dichos diseños pueden ser mejorados para agregar más funcionalidades al sistema o incluso mejorar las ya existentes.

El sistema propuesto en este trabajo presentó buenos resultados, sin embargo, siempre puede ser mejorado. Con el diseño del sistema propuesto es posible dotarlo de otra técnica de aprendizaje que pueda mejorar su desempeño. Se pueden tomar los diseños planteados en este trabajo, tomar lo nece-

sario y procesar los datos recopilados por otra técnica de inteligencia artificial como puede ser redes neuronales artificiales.

Pese a que los resultados generales indican un mayor consumo eléctrico por parte del sistema inteligente en su etapa funcional al ser comparado con el sistema con control manual, se puede notar que el número de módulos empleados en él es mayor que los utilizados en el control manual. Lo anterior puede marcar una desventaja en esta comparación, por lo cual al enfocarse en el consumo eléctrico que tuvo el Módulo de Iluminación/Sensado, el cual incluye al objeto de control (bombilla), se puede notar una ligera disminución del consumo eléctrico. Esta disminución puede aumentarse con más pruebas que puedan ayudar al sistema a elegir mejor sus acciones y así mejorar su desempeño. Como trabajo futuro se sugiere ampliar el periodo de pruebas, así como las horas al día en el que el sistema es utilizado. Esto le permitirá explorar todas las posibilidades y aprender de ellas.

Por otro lado, de acuerdo a los resultados arrojados durante el periodo de prueba, las sugerencias del usuario para mejorar el sistema se enfocaron al diseño de las carcasas y su instalación. Las carcasas actualmente tienen un diseño básico lo suficientemente bueno para cumplir su función de proteger los circuitos, sin embargo, dicho diseño se puede mejorar cambiando su color o las dimensiones y forma de dicha carcasa. Así mismo se pueden realizar orificios para tornillos o clavos que permitan que los módulos sean fijados en las superficies donde se instalaran, para ofrecer una mayor estabilidad y mejor estética.

Actualmente el sistema no cuenta con una interfaz para el usuario, por lo cual todo debe ser tratado por un técnico para correr el sistema. Como mejora al sistema se puede anexar una interfaz móvil que permita al usuario configurar el sistema de forma más amigable y sencilla. Con ayuda de la interfaz se podría hacer más sencilla la tarea de añadir y configurar nuevos módulos al sistema, ofreciendo la posibilidad de realizarse directamente sin necesidad de intermediarios. Así mismo, puede añadirse la función de monitoreo en tiempo real del consumo del sistema para que el usuario pueda supervisarlo en cualquier momento. Otra de las sugerencias del usuario fue añadir una función que le permita regular la intensidad de la luminaria, lo cual puede trabajarse para una segunda versión del sistema.

7. Anexos

7.1. Anexo A: Cuestionario de consumo y desempeño del sistema realizado al usuario

Fecha: ____/____/____

Prueba: _____

CUESTIONARIO

1. ¿Los niveles de iluminación en el área son adecuados para las tareas que realiza?

Siempre Casi siempre Regularmente Casi nunca Nunca

2. ¿Comúnmente a qué hora del día enciende las luminarias?

3. ¿Durante el período de uso del sistema, mostró algunos síntomas de cansancio o fatiga visual? _____ en caso de que su respuesta sea positiva, ¿cuál o cuáles?

Sensación de tener un velo delante de los ojos.

Vista cansada.

Picor de ojos.

Pesadez en los párpados.

Otro: _____

4. ¿Cómo calificaría el desempeño del sistema?

Excelente Bueno Neutro Regular Malo

5. ¿Cómo considera el tiempo que existe entre la instrucción dada y la actuación del sistema?

Excelente Bueno Neutro Regular Malo

6. ¿El sistema presentó alguna de las siguientes fallas? _____ ¿Con que frecuencia se presentó el fallo? (En caso de detectar otro fallo, incluirlo en los espacios en blanco)

Fallo	Frecuencia				
	Siempre	Casi siempre	A veces	Casi nunca	Nunca
La o las bombillas se encendieron en un momento incorrecto					
La o las bombillas se apagaron en un momento incorrecto					

El tiempo entre la acción y reacción del sistema fue tardado					
Algún componente se dañó durante la prueba					
Produce sonidos molestos					

7. ¿Cuál sería su evaluación respecto al desempeño del sistema?

Bueno Regular Malo

8. ¿Cuál sería su nivel de comodidad al usar el sistema?

Bueno Regular Malo

9. Recomendaciones para mejorar el sistema y su interacción con el usuario

7.2. Anexo B: Productos obtenidos

Publicaciones

Durante el desarrollo del tema de tesis se tuvieron 2 participaciones en coloquios estudiantiles, en cuyas memorias se publicó parte del proyecto realizado. Estos eventos fueron realizados en la modalidad virtual, dado las condiciones de pandemia que se suscitaron en el periodo en el que se trabajó esta investigación (2021-2022).

1. SIBIA 2021: Congreso de Generación de Soluciones Industriales Basadas en Inteligencia Artificial. Taller de desarrollo de ideas de negocio basadas en inteligencia artificial (INEBIA). Segunda edición: Noviembre, 2021
2. ENC 2021: Encuentro Nacional de Computación. Coloquio de estudiantes, primera Edición: Agosto, 2021

Propiedad intelectual

Se realizó el registro del software diseñado por parte del Instituto Nacional del Derecho de Autor (INDAUTOR) bajo el número de registro: 03-2022-011813332600-01.

Financiamiento obtenido

Bajo la convocatoria “Proyectos de Desarrollo Tecnológico e Innovación para Estudiantes”, publicada por el Tecnológico Nacional de México en 2021, se logró obtener el financiamiento para la compra de los componentes electrónicos que conforman el sistema diseñado en este trabajo de investigación.

Referencias

- Amador, J. L. G. (s.f.). Luminotecnia, magnitudes y unidades. <http://aducarte.weebly.com/>.
- Assaf, L. and Pereira, F. (2003). Perspectivas de la eficiencia energetica en la iluminación: Desafíos para el desarrollo. *Encontro Nacional sobre conforto no ambiente construido, 7 conferencia Latino-Americana sobre conforto e desempenho energético nas edificações*.
- Buen, O. D. (2013). Las acciones de la eficiencia energética de la comuee en la edificación. Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía.
- Caminos, J. (2011). Criterios de diseño en iluminación y color. *Santa Fe, edUTecNe*.
- Castellano, A. R. (2012). Bluetooth. introducción a su funcionamiento. *Univ. Pontif. Comillas, Madrid*, 1(1):1–16.
- Castro, R. (2005). Avanzando en la seguridad de las redes wifi. *Boletín de RedIRIS*, 73:23–33.
- de Fuerza y Luz, C. N. (s.f.). *Guía de Eficiencia Energética para Oficinas*. Compañía nacional de fuerza y luz, Avenida 5, Calle 1 y 0, Oficinas Centrales, San José, Costa Rica.
- del Valle, L. (2022). Guía de introducción a mqtt con esp8266 y raspberry pi. Programar fácil con Arduino.
- Esteso, M. P. (2015). ¿qué es mqtt? geekytheory.com.
- Gareth, J., Daniela, W., Trevor, H., and Robert, T. (2013). *An introduction to statistical learning: with applications in R*. Springer.
- Ghahramani, Z. (2003). Unsupervised learning. In *Summer school on machine learning*, pages 72–112. Springer.
- Gopalakrishna, A. K., Özçelebi, T., Liotta, A., and Lukkien, J. J. (2012). Exploiting machine learning for intelligent room lighting applications. In *2012 6th IEEE International Conference Intelligent Systems*, pages 406–411.
- Hagras, H., Callaghan, V., Colley, M., and Clarke, G. (2003). A hierarchical fuzzy–genetic multi-agent architecture for intelligent buildings online learning, adaptation and control. *Information Sciences*, 150(1-2):33–57.
- Heras, J. M. (2020). ¿cómo aprende la inteligencia artificial? IArtificial.net.
- Hinestroza Ramírez, D. (2018). El machine learning a través de los tiempos, y los aportes a la humanidad.

- Hurwitz, J. and Kirsch, D. (2018). *Machine Learning For Dummies*. John Wiley and Sons, Inc, 111 River Street, Hoboken, NJ07030, ibm limited edition edition.
- Iberdrola (s.f.). Descubre los principales beneficios del 'machine learning'. url <https://www.iberdrola.com/innovacion/machine-learning-aprendizaje-automatico>.
- Jin, Y., Yan, D., Zhang, X., An, J., and Han, M. (2020). A data-driven model predictive control for lighting system based on historical occupancy in an office building: Methodology development. In *Building Simulation*. Springer.
- LLamas, L. (2017). Sensor de corriente eléctrica no invasivo con arduino y sct-013. Luis LLamas.
- Llamas, L. (2019). ¿quÉ es mqtt? su importancia como protocolo iot. luisllamas.es.
- Lorentzen, D. C. and McNeil, M. (2019). Consumo de electricidad de edificios no residenciales en México: La importancia del sector de servicios. Technical report, Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía.
- Mendoza, W. and Palacios, J. E. M. (2017). Prototipo de automatización domótica del sistema de iluminación de una casa mediante comunicaciones via internet. In *Visión Electrónica*.
- Montaguano, C. F. (2018). Diseño e implementación de un sistema automatizado de control de iluminación de las áreas comunales del edificio torre de suite, mediante el uso del plc siemens (logo 230 rce). B.S. thesis, Quito: Universidad de las Américas, 2018.
- Montserrat, C. M. (s.f.). Luminarias. Grup d'Estudis Luminotècnics.
- Morales, G. (2002). Introducción a la lógica difusa. *Centro de Investigación y Estudios Avanzados. México*.
- Moreno Cerdà, F. (2018). Demostrador arquitectura publish/subscribe con mqtt. B.S. thesis, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Morillón D., Ecobedo, A. and Kerdan, I. (2015). *Retos y oportunidades para la sustentabilidad energética en edificios de México: Consumo y uso final de energía en edificios residenciales, comerciales y de servicio*, chapter CONSUMO DE ENERGÍA POR TIPO DE EDIFICIO, page 49. Instituto de Ingeniería, Ciudad Universitaria.
- Plesent Solís, E. et al. (2017). La iluminación artificial en el uso eficiente de entornos de oficina: caso de estudio, el desempeño de los usuarios de oficinas en la ciudad de México.
- Rodríguez, N. R., Murazzo, M. A., Chávez, S. B., Runco, T., Medel, D., and Rosenstein, J. (2019). La programación reactiva y de actor en entornos de internet de las cosas. In *XXI Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación (WICC 2019, Universidad Nacional de San Juan)*.

- Rojas, E. M. (2020). Machine learning: análisis de lenguajes de programación y herramientas para desarrollo. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*, 04(E28):586–599.
- Rus, C. (2019). Raspberry pi 4 es oficial: una completa actualización con procesador cortex-a72, hasta 4 gb de ram y... Xataka.
- Russell, S. and Norving, P. (2004). *Inteligencia Artificial, un enfoque moderno*. Pearson Prentice Hall, segunda edición edition.
- Salas, R. (2004). Redes neuronales artificiales. *Universidad de Valparaíso. Departamento de Computación*, 1:1–7.
- Sandhu, J. S., Agogino, A. M., Agogino, A. K., et al. (2004). Wireless sensor networks for commercial lighting control: Decision making with multi-agent systems. In *AAAI workshop on sensor networks*, volume 10, pages 131–140.
- SEGOB (2020). Estrategia de transición para promover el uso de tecnologías y combustibles más limpios. Diario oficial de la federación.
- SENER (2016). Prospectiva del sector eléctrico 2016-2030. SENER.
- Serrano, A. R. (2016). Recomendaciones y guías de eficiencia energética: control de alumbrado, submedición y verificación energética. Asociación Mexicana del Edificio Inteligente y Sustentable A.C.
- Sucar, L. E. and Tonantzintla, M. (2006). Redes bayesianas. *Aprendizaje Automático: conceptos básicos y avanzados*, 77:100.
- Suárez, J. (2017). Entorno de pruebas y demostración de algoritmos de ia para juegos y simulaciones. Universidad Politécnica de Catalunya.
- Talero Laiton, C. Y. (2016). Efectos y mejoras del proceso de iluminación en las áreas de trabajo. Universidad - Escuela Colombiana de Carreras Industriales.
- Vainio, A.-M., Valtonen, M., and Vanhala, J. (2008). Proactive fuzzy control and adaptation methods for smart homes. *IEEE Intelligent Systems*, 23(2):42–49.