PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR SEDE ESMERALDAS

CARRERA:

INGENIERÍA DE SISTEMAS Y COMPUTACIÓN

PREVIO AL GRADO ACADÉMICO DE INGENIERÍA DE SISTEMAS Y COMPUTACIÓN

TEMA DE INVESTIGACIÓN:

SISTEMA DE CONTROL DIFUSO PARA LA MONITORIZACIÓN Y CONTROL AUTOMÁTICO DE CONFORT DENTRO DE EDIFICIOS INTELIGENTES DESARROLLADO CON OPENHAB

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

AUTOMATISMOS Y APLICACIONES INTELIGENTES

PREVIO A LA OBTENCIÓN DE TÍTULO DE:

INGENIERÍA DE SISTEMAS Y COMPUTACIÓN

AUTOR

AARON SORIN JARAMILLO MERA

ASESOR

PABLO PICO VALENCIA (PhD)

ESMERALDAS, 2021

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Título: Sistema de control difuso para la monitorización y control automático de confort dentro de edificios inteligentes desarrollado con OpenHAB.

Autor(a): Aaron Sorin Jaramillo Mera

PhD. Pablo Pico Valencia f._____
Asesor

Mgt. José Luis Carvajal f._____
Lector #1

Mgt. Juan Casierra Cavada f._____
Lector #2

Mgt. Susana Patiño Rosado f._____
Coordinadora de carrera

AUTORÍA

Yo, **Jaramillo Mera Aaron Sorin** con número de cédula de identidad **0804341584** manifiesto que mediante la presente investigación sobre el tema **"SISTEMA DE CONTROL DIFUSO PARA LA MONITORIZACIÓN Y CONTROL AUTOMÁTICO DE CONFORT DENTRO DE EDIFICIOS INTELIGENTES DESARROLLADO CON OPENHAB"** los resultados obtenidos como tesis de grado, previo a la obtención del título de **"INGENIERO EN SISTEMAS Y COMPUTACIÓN"** son de total responsabilidad del autor, y que se ha respetado las fuentes de información consultadas, realizando las citas correspondientes y los resultados alcanzados son totalmente personales, únicos y legítimos. Al mismo tiempo declaro que todo el contenido incluyendo resultados, discusión, conclusiones, recomendaciones y otros efectos legales y académicos que se desglosan, son y serán exclusiva responsabilidad legal y académica del autor y de la PUCESE.

_____

Jaramillo Mera Aaron Sorin

0804341584

DEDICATORIA

Esta investigación se la dedico principalmente Dios por mantenerme todavía con vida y de gozar de buena salud, por ayudarme a superar todos los retos que se interpongan en mi camino, por permitirme dar un paso más en mi formación académica y a esperas de un nuevo comienzo lleno de retos.

A mi padre Sonne Felipe Jaramillo Ruiz por estar presente en cada momento importante en mi vida, por todos aquellos consejos y conocimientos que me dabas mientras iba creciendo. A pesar de tu reciente partida sé que me seguirás acompañando en cada etapa de mi vida y estarás ahí cuando más te necesite, en donde sea que tu estés.

A mi madre Carmen Marisol Mera Alvarado por ser una persona tan comprensiva y atenta conmigo y mis hermanos, por todo el afecto y las palabras de aliento que siempre me levantan el ánimo cuando estoy deprimido, por estar todavía conmigo a pesar de todas las cosas por la que hemos pasado, para mí eres un farol de la esperanza y la salvación que guía mi camino en este mundo desconocido.

A mis hermanos y demás familiares con quienes he compartido todos estos años, por todos aquellos momentos llenos de felicidad y tristeza, por ser parte de mis recuerdos y deseos de superación.

Aaron Jaramillo.

AGRADECIMIENTO

Le agradezco a Dios por todas las cosas maravillosas que ha puesto en mi vida, principalmente a mi familia que los adoro con todo mi corazón, pues son los pilares que me mantienen unido a este mundo. A mis abuelos, tíos y demás familiares por brindarme apoyo y consideración en los momentos difíciles.

A todas aquellas personas que he conocido a través de los años, a los conocimientos impartidos por mis maestras en mi querida escuela cuando era niño, a los docentes de la secundaria y el bachillerato por ayudarme a escoger una especialidad que me gusta y donde pueda dar todo mi esfuerzo. A mis maestros de la universidad con quienes gocé de buenos y malos momentos pero que supieron impartir su conocimiento en mi formación académica.

Aaron Jaramillo

Índice de contenidos

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN ..... **I**

AUTORÍA ..... **II**

DEDICATORIA ..... **III**

AGRADECIMIENTO ..... **IV**

RESUMEN ..... **XI**

ABSTRACT ..... **XII**

INTRODUCCIÓN **13**

Presentación del problema 13

Planteamiento del problema 14

Justificación 15

Objetivos 16

General 16

Específicos 16

Contribuciones científicas relacionadas 17

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO **18**

1.1 Bases teóricas-conceptuales 18

1.1.1 Internet de las Cosas 18

1.1.2 Hogar digital conectado 28

1.1.3 OPENHAB 32

1.1.4 Sistemas de control difuso 41

1.2 Antecedentes 47

1.3 Fundamentación legal 50

CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS **52**

2.1 Delimitación 52

2.2 Tipo de investigación 52

2.3 Métodos de investigación 53

2.4 Población y muestra 53

2.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos 54

2.6 Técnicas de procesamiento y análisis de datos 54
2.7 Operacionalización de variables 55
2.8 Normas éticas 58
CAPÍTULO III: RESULTADOS 59
3.1 Metodologías y tecnologías para la gestión del confort en hogares y edificios digitales integrados 59
3.2 Comparación de las principales herramientas orientadas a la creación de controladores difusos compatibles con entornos de Internet de las cosas 59
3.3 Construcción de los controladores difusos de la investigación 60
3.3.1 Aspectos más relevantes para el establecimiento de un entorno de IoT en un hogar inteligente 60
3.3.2 Diseño de los controladores difusos que se utilizaron 61
3.3.3 Relacionando los perfiles de usuario con los controladores creados 62
3.3.4 Conjuntos y controladores difusos 64
3.3.5 Desarrollo de los controladores difusos 73
3.3.6 Objetos en el entorno de OpenHAB 75
3.4 Proceso de ejecución del proyecto 77
3.5 Evaluación de la calidad del controlador difuso integrado en un edificio digital conectado simulado usando IoT 77
3.5.1 Análisis de la precisión de respuesta de los controladores difusos 78
3.5.2 Análisis del tiempo de respuesta de los controladores difusos 78
CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN 80
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 82
5.1 Conclusiones 82
5.2 Recomendaciones 83
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 85
ANEXOS 96
Anexo 1. Instrumento para realizar la entrevista 97
Anexo 2. Ficha para realización del diseño experimental 98
Anexo 3. Reglas de los controladores difusos de la investigación 105

Anexo 4. Aspecto del edificio de la simulación 108

Índice de figuras

Figura 1. Aplicaciones del IoT. 19
Figura 2. Esquematización del protocolo HTTP. 24
Figura 3. Esquematización del protocolo CoAP. 25
Figura 4. Esquematización del protocolo MQTT. 26
Figura 5. Arquitectura de red de IoT. 27
Figura 6. Sensores de IoT. 28
Figura 7. Panel de control de OpenHAB. 32
Figura 8. Arquitectura de OpenHAB. 33
Figura 9. Características de OpenHAB. 34
Figura 10. Estados de las cosas. 36
Figura 11. Ejemplo de un mapa del sitio en OpenHAB. 40
Figura 12. Estructura de un sistema de control difuso. 42
Figura 13. Fuzzificación de la variable de temperatura. 42
Figura 14. Funciones de pertenencia a) triangular, b) trapezoidal, c) forma de s, d) forma de pi, e) forma de beta, f) gaussiana. 43
Figura 15. Métodos de defuzzificación. 45
Figura 16. Tipos de confort. 59
Figura 17. Conjuntos difusos del controlador lumínico a) luz exterior, b) luz interior, c) lampara, d) cortina 65
Figura 18. Conjuntos difusos del controlador HVAC a) temperatura, b) humedad, c) calentador, d) aire acondicionado, e) ventana. 67
Figura 19. Conjuntos difusos del controlador AQI a) NO_2, b) SO_2, c) AQI 69
Figura 20. Conjuntos difusos del controlador de fuego a) cambio temperatura, b) cambio humedad, c) tiempo, d) control fuego 71
Figura 21. Conjuntos difusos del controlador de ventilación a) estación, b) humedad, c) humificador, d) extractor de aire 73
Figura 22. Objetos del tipo sensor en el entorno de OpenHAB 75
Figura 23. Objetos del tipo actuador en el entorno de OpenHAB. 76
Figura 24. Página para la selección de perfiles de usuario en el entorno de OpenHAB. 76
Figura 25. Flujo de procesos del proyecto. 77
Figura 26. Tiempo promedio entre método GET y POST. 79
Figura 27. Edificio de frente 108
Figura 28. Planta de los departamentos 109

Índice de tablas

Tabla 1. Comparación de los estándares. 23
Tabla 2. Características de las aplicaciones de domótica. 31
Tabla 3. Marcas más populares integradas con OpenHAB. 40
Tabla 4. Diferencias entre los modelos de inferencia Mamdani y Sugeno. 44
Tabla 5. Ejemplo de reglas basadas en el Mamdani fis. 44
Tabla 6. Cuadro de variables del estudio 55
Tabla 7. Comparación entre los lenguajes de programación expuesto. 60
Tabla 8. Variables de los controladores difusos 62
Tabla 9. Aspectos de confort según el perfil usuario 62
Tabla 10 Relación entre perfiles de usuario y controles 63
Tabla 11. Estaciones del año en Ecuador 71
Tabla 12. Tiempo promedio de respuesta entre cada controlador difuso 79
Tabla 13. Resultados del banco de pruebas del controlador AQI 98
Tabla 14. Resultados del banco de pruebas del controlador HVAC 99
Tabla 15. Resultados del banco de pruebas del controlador de fuego 101
Tabla 16. Resultados del banco de pruebas del controlador de lumínico 102
Tabla 17. Resultados del banco de pruebas del controlador de ventilación 103
Tabla 18. Reglas del controlador lumínico 105
Tabla 19. Reglas del controlador HVAC 105
Tabla 20. Reglas del controlador AQI 106
Tabla 21. Reglas del controlador de fuego 106
Tabla 22. Reglas del controlador de ventilación 107

RESUMEN

Gracias al avance tecnológico, hoy en día las personas pueden disfrutar de innumerables servicios en sus hogares a través de las invenciones entorno a los dispositivos y ambientes de Internet de las Cosas (IoT), que permiten que las personas se sientan más seguras y a gusto en sus hogares. Para ayudar a mejorar los servicios, en esta investigación se ha planteado desarrollar un sistema de monitorización y control automático de confort integrando un controlador difuso y tecnologías de IoT para la personalización de servicios orientados a usuarios y la optimización de recursos en edificios inteligentes. Metodológicamente, se realizó una revisión bibliográfica para conocer los métodos y tecnologías más utilizadas para la gestión del confort. Además, se hizo un análisis de las herramientas necesarias para el desarrollo de los controladores difusos en contextos de IoT. Los aspectos técnicos para llevar a cabo acciones de control sobre el IoT se determinaron a través de una entrevista con un experto en automatización. Para la evaluación de los controladores que se desarrollaron en esta investigación (lumínico, climatización y ventilación (HVAC), calidad del aire (AQI), ventilación y control de fuego) se utilizó una batería de pruebas de 20 iteraciones. Los resultados que se obtuvieron a partir de dicha evaluación permitieron confirmar que los controladores difusos son una buena alternativa para establecer acciones de control de confort con altos niveles de precisión y de manera muy eficiente. En términos de eficiencia, el tiempo de respuesta con respecto a la comunicación en cada controlador difuso y el entorno de IoT implementado en OpenHAB fue en promedio de 6.045 s para el controlador de iluminación, 6.531 s para el controlador HVAC, 4.415 s para el controlador AQI, 9.672 s para el controlador de fuego y de 5.885 s para el caso del controlador de ventilación. Cabe resaltar que el controlador de calidad de aire fue el que obtuvo el menor tiempo entre los demás controladores debido a que presenta pocas variables de entrada y de salida. En conclusión, se pudo determinar que utilizar controladores difusos permite gestionar de forma eficiente los servicios que se utilicen en hogares, y que el entorno OpenHAB es una buena herramienta para la administración de los dispositivos de IoT en edificios inteligentes.

Palabras claves: Internet de las Cosas, Sistemas de Control, Controlador Difuso, Lógica Difusa, Edificio Inteligente, OpenHAB, Python, Mamdani.

ABSTRACT

Thanks to technological advancement, nowadays people can enjoy countless services in their homes through inventions around Internet of Things (IoT) devices and environments, which allow people to feel safer and more comfortable in their homes. To help improve services, this research has proposed to develop an automatic comfort monitoring and control system integrating a fuzzy controller and IoT technologies for the personalization of user-oriented services and the optimization of resources in smart buildings. Methodologically, a literature review was carried out to know the most used methods and technologies for comfort management. In addition, an analysis was made of the tools needed for the development of fuzzy controllers in IoT contexts. The technical aspects to carry out control actions on the IoT were determined through an interview with an automation expert. For the evaluation of the controllers that were developed in this research (lighting, air conditioning and ventilation (HVAC), air quality (AQI), ventilation and fire control) a test battery of 20 iterations was used. The results obtained from this evaluation confirmed that fuzzy controllers are a good alternative to establish comfort control actions with high levels of precision and in a very efficient manner. In terms of efficiency, the response time with respect to communication in each fuzzy controller and the IoT environment implemented in OpenHAB was on average 6.045 s for the lighting controller, 6.531 s for the HVAC controller, 4.415 s for the AQI controller, 9.672 s for the fire controller and 5.885 s for the case of the ventilation controller. It should be noted that the air quality controller was the one that obtained the shortest time among the other controllers because it has few input and output variables. In conclusion, it was determined that using fuzzy controllers allows to efficiently manage the services used in homes, and that the OpenHAB environment is a good tool for the management of IoT devices in smart buildings.

Keywords: Internet of Things, Control Systems, Fuzzy Controllers, Fuzzy Logic, Smart Building, OpenHAB, Python, Mamdani.

INTRODUCCIÓN

Presentación del problema

En el contexto actual del mundo, el crecimiento de la población es un hecho inminente que genera la disminución de los espacios abiertos y el incremento del sector urbano. A partir de esta premisa, cabe recalcar que la búsqueda de un nuevo hogar tanto en edificios como zonas residenciales, no siempre es posible encontrar un espacio que se adapte a las necesidades de las personas [1].

Otro aspecto importante que se ha evidenciado, es la estrecha relación existente entre la tecnología y la modernidad, que se presenta como un hecho cotidiano desde la perspectiva del hombre en su diario vivir, la cual genera la apertura de nuevos espacios accesibles como el Internet de las cosas [2]–[4] (*IoT*, por sus siglas en inglés), que ha permitido la automatización de diferentes escenarios como hogares, edificios, plazas, universidades e industrias, generando la transformación de espacios tradicionales en espacios inteligentes. Las tecnologías de IoT en este tipo de escenarios puede optimizar los recursos (i.e., lumínicos, hídricos, energéticos, climáticos) a través de la utilización de sensores (i.e., térmico, ultrasónico, infrarrojo) que le permite receptar información y enviarla a la nube (*cloud*) para la toma de decisiones [3], [5].

Gracias a los avances tecnológicos en relación a IoT, se introdujo el confort de manera que dio lugar a las diversas áreas inmobiliarias, entre ellas se encuentran los edificios inteligentes que es la combinación de tecnología y la inteligencia artificial (*IA*, por sus siglas en inglés), que cumplen funciones autónomas de control del ambiente y de los recursos energéticos [6]. Hoy en día existe una tendencia de construir edificios y casas modernas en IoT para que sean energéticamente eficiente y que el usuario se sienta cómodo y confortable en el lugar donde vive [3]. La presente investigación planteó la creación de un sistema de control difuso para la monitorización y control automático de confort dentro de edificios inteligentes desarrollados con OpenHAB.

Planteamiento del problema

En el momento en el que alguien se plantea acerca de las necesidades que puede requerir una persona para alcanzar el máximo nivel de bienestar, esto es equivalente al confort. Se puede interpretar de la siguiente manera, donde un individuo percibe los elementos de su entorno como la temperatura, la humedad, la luminosidad y el estado del aire; en un espacio pequeño como una habitación (i.e., sala, comedor, baño), y este desea realizar un cambio para mejorar su estado actual [7]. Otro aspecto importante a considerar para la gestión del confort es la calidad del aire en la región, debido a la presencia de varios factores que intervienen en su contaminación, como el humo que generan los escapes de los vehículos, los gases químicos que emanan las fábricas, además de la luminosidad y el ruido de las ciudades que afecta al ambiente [8], [9]. Por ello, es necesario conocer ¿qué servicios o elementos se debe tomar en cuenta al momento de elaborar un sistema de confort orientado a casas y edificios?

Los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (*HVAC*, por sus siglas en inglés) son uno de los más famosos para brindar confort con un excelente servicio a la hora de apaciguar el ambiente climático de interiores [10]. Además, la aplicación de un controlador clásico como es el modelo del tipo proporcional, integral y derivativo (*PID*, por sus siglas en inglés), es la sugerencia más convencional a la hora de establecer un mecanismo simple y de fácil comprensión [11]. No obstante, para sistemas más complejos no presenta una buena solución debido a que el funcionamiento de este tipo de controlador se basa en la toma de acciones lineales, generando así un desperdicio de energía adicional [12]. Una solución viable para este tipo de problema es la aplicación de una técnica de Inteligencia Artificial (IA) de carácter difuso que optimice las decisiones del usuario [13], [14].

La lógica difusa es una técnica de IA que simula el razonamiento humano, que a diferencia de las reglas Si-entonces (*IF-THEN*) que se basan en elecciones binarias, esta técnica utiliza un motor de inferencia que permite controlar las decisiones a través de una matriz de reglas. Para dicho proceso el controlador difuso utiliza un tipo de conjunto difuso (i.e., triangular, trapezoide) para representar las variables y las reglas, y a través de su motor de inferencia determinar un resultado adecuado. Esta técnica tiende a no tener presente un control convencional como lo es en el caso de la lógica binaria, que es estricto y poco flexible para llevar a cabo acciones de control [4], [11], [15], [16].

Por lo tanto, el trabajo quiere responder a dos interrogantes importantes. La primera interrogante consiste en verificar si ¿es realmente eficaz utilizar un controlador difuso para la monitorización y control automático de confort en un hogar y edificio inteligente? Por otro lado, también se busca conocer si ¿es factible llevar a cabo tareas de confort a diferentes niveles (i.e., lumínicos, hídricos, energéticos) y con distintos perfiles de usuarios en hogares y edificios que son implementados a través de un controlador difuso.

Finalmente, es importante señalar que la creación de los sistemas para hogares inteligentes presenta un grave problema a la hora de integrar servicios y dispositivos de diferentes fabricantes. Para ello se plantea emplear la herramienta OpenHAB para el desarrollo de hogares y edificios inteligentes utilizando IoT [17], y así verificar si ¿OpenHAB es una buena herramienta para la simulación de servicios en el área de domótica y confort?

Justificación

Los sistemas actuales de IoT mantienen las mismas especificaciones en cuanto a los parámetros y magnitudes para el control de servicios que brindan al usuario, pero que no consideran algunos factores que pueden generar un cambio. Muchas de las edificaciones inteligentes bajo el manto de IoT utilizan sistemas de confort con la necesidad de mejorar el servicio que necesitan, pero que muchas veces no logran llegar al resultado deseado en cuanto a los servicios que generan, logrando que el servicio no sea óptimo y que el consumo en ciertos espacios sea innecesario en algunas ocasiones.

Para acotar la idea del párrafo anterior, un ejemplo es el caso de un controlador lumínico para carreteras donde el modelo deja las luces encendidas cuando no hay nadie presente, lo que genera un consumo de energía innecesario [9]. Otro ejemplo en la misma línea de estudio, es el caso de una universidad donde no se presenta adecuadamente la administración de los sistemas de control térmico y lumínico, lo cual provoca incomodidad tanto a estudiantes como al personal administrativo para realizar tareas de gestión y de enseñanza–aprendizaje [13]. Cabe resaltar que dicha problemática también es posible de encontrar tanto en hogares como edificios.

Por lo tanto, la siguiente investigación tiene como finalidad presentar la creación de un sistema de control y monitorización para la optimización de los servicios y recursos

de hogares o edificios inteligentes a través del uso de un controlador difuso. Además, es pertinente la elaboración de este tipo de sistemas en Ecuador, debido a que sería una alternativa de solución a la incomodidad generada por los factores ambientales de cada región.

Es importante que en los hogares y edificios inteligentes puedan integrar tecnología distintos proveedores como lo son tecnologías heterogéneas a nivel de sensores (i.e., electrodomésticos, ambientales), las cuales son necesarias para la formación de ecosistemas inteligentes. Por lo tanto, se plantea el uso de una aplicación utilizando una herramienta especializada para la construcción de hogares domóticos, que facilite la construcción y el monitoreo de los dispositivos del ambiente de IoT a través de una interfaz gráfica que permita al usuario conocer el estado actual de sus servicios a través de la nube, como lo es la plataforma de OpenHAB recomendada en la investigación de Froiz-Míguez et al. [18] al realizar una comparación de herramientas de domótica. Además, cabe resaltar que la combinación entre los controladores difusos y tecnologías del Internet de las cosas permitirá crear, diseñar o modelar e implementar hogares y edificios inteligentes que tomen decisiones como lo hacen los humanos, esto se logra usando reglas difusas del tipo Si-Entonces (si la temperatura es mayor a 35 y la humedad es mayor a 70, entonces encender el aire acondicionado; si la luz exterior es mayor a 20 y la temperatura es menor a 10, entonces abrir las ventanas) y finalmente, esto ayudaría a establecer un control automático basado en la información imprecisa tal y como funciona en la realidad.

Objetivos

General

Desarrollar un sistema de monitorización y control automático de confort mediante un controlador difuso y tecnologías de Internet de las cosas para la personalización de servicios de confort y la optimización de recursos en edificios inteligentes.

Específicos

a. Investigar metodologías y tecnologías para la gestión del confort en hogares y edificios digitales integrados.

b. Comprender las principales herramientas orientadas a la creación de controladores difusos compatibles con entornos de Internet de las cosas.
c. Construir un controlador difuso especializado en la monitorización continua y el control automático de confort en hogares digitales conectados basado en perfiles de usuario.
d. Evaluar la calidad del controlador difuso integrado en un edificio digital conectado simulado usando IoT.

Contribuciones científicas relacionadas

La investigación ha dado como fruto una publicación enviada a un congreso internacional. Los detalles del medio científico se describen como sigue:

Jaramillo-Mera, Aaron; Pico-Valencia, Pablo; Juan A. Holgado-Terriza. Control difuso de ecosistemas de Internet de las Cosas: Un caso de estudio empleando Python y OpenHAB. *XII Congreso Internacional sobre Aplicación de Tecnologías de la Información y Comunicaciones Avanzadas (ATICA 2021)* (Aceptado).

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1 Bases teóricas-conceptuales

En este apartado se describen las bases conceptuales relacionadas con la temática de estudio, esto es, el paradigma Internet de las cosas, hogar digital conectado y la lógica difusa. A partir de las descripciones de estas bases teóricas se pretende que se entiendan los conceptos para crear un hogar inteligente en el que se aplique acciones de control difuso de confort.

1.1.1 Internet de las Cosas

El Internet de las cosas (*IoT*, por sus siglas en inglés) es la combinación entre múltiples objetos inteligentes denominados "cosas", es decir, que hace referencia a todo aparato que puede utilizarse para obtener información de sensores y a su vez, compartir los datos recolectados a través de Internet [1]. De manera simple se puede ver estas "cosas" como cualquier objeto real o virtual capaz de conectarse a una red y compartir información en el ciberespacio [4].

El IoT es considerado como el puente que une la realidad con el mundo virtual a través de la generación de espacios inteligentes compuestos por la integración de múltiples dispositivos de diferentes proveedores. Todo esto es posible gracias a la labor investigativa del ser humano en su invención de automatizar los procesos para generar un nivel de confort en los escenarios donde se desempeña cotidianamente [2]. Esto no quiere decir que el ser humano sea el foco principal de IoT, ya que también es posible monitorear el estado de cualquier ser vivo como las plantas y los animales [3].

Las tecnologías basadas en IoT son usadas para crear diversidad de escenarios inteligentes, esto son: hogares, zonas residenciales, industrias, edificios, departamentos, entre otros. Todos estos escenarios, tienen la peculiaridad de ser inteligentes y tiene como fin el de monitorear y controlar los servicios como: consumo de energía, seguridad y vigilancia, monitoreo de condiciones ambientales, procesos agrícolas, monitoreo de vehículos y animales, entre otros. Para ello, se apoyan de algunas de las tecnologías ilustradas en la Figura 1.



Figura 1. Aplicaciones del IoT [19].

1.1.1.1 Estándares de comunicación

Los estándares de comunicación inalámbricas para IoT, son el resultado de años de investigación por parte de la comunidad científica, que tiene como fin proporcionar un ambiente de comunicación entre dispositivos o máquinas a máquinas (*M2M*, por sus siglas en inglés) tanto local como remoto, a través de señales inalámbricas [20].

Wifi y Bluetooth son considerados como los estándares de comunicación más populares por parte de la comunidad móvil, pero esto no quiere decir que estas sean los únicos en el mercado actual, ya que si se profundiza el tema es posible encontrar más estándares inalámbricos que son utilizados en ambientes de IoT. A continuación, se describen los estándares inalámbricos más populares y usados en el desarrollo de aplicaciones de IoT, y especialmente en la creación de sistemas para hogares digitales conectados.

Wifi

Es una de las tecnologías más utilizadas en la actualidad, que abarca un sin número de dispositivos como computadoras, teléfonos inteligentes (*smartphones*), impresoras, televisores, bocinas de música, entre otros. Su finalidad es intercambiar información entre los diferentes dispositivos mediante el uso de una red [21]. Este tipo de tecnología

también es conocida como la norma de conectividad IEEE 802.11, la cual presenta algunas características como su velocidad de datos entre 1-54 Mb/s, una sensibilidad de -95 dBm y opera con una frecuencia de 2.4 GHz/5 GHz [22], [23].

Además, a través de los años se ha mejorado las características de este estándar, las cuales son, el tener mayor alcance y mayor compatibilidad con los dispositivos de IoT, debido a sus inconvenientes en el consumo energético. Como resultado, surge el estándar 802.11ah con una actualización de sus características como generar un ultra bajo poder de consumo y la facilidad de conectividad con las aplicaciones de IoT [24].

Bluetooth

Es un estándar inalámbrico bastante usado por los dispositivos de IoT debido a que utiliza muy poca memoria y energía para su consumo. Ha sido el rival de la tecnología Wifi por años en el campo de la comunicación entre dispositivos móviles y computadoras, por lo tanto, esta tecnología ha tenido la necesidad de seguir mejorando sus características de su versión estándar (4.0) a una nueva versión especializada que adapte y mejore su funcionamiento con los dispositivos de IoT, nombrado como Bluetooth Low Energy (*BLE*, en sus siglas en inglés) [23].

Esta nueva tecnología derivada, se caracteriza por su bajo nivel de consumo y mejoramiento de largo alcance que su predecesor no tenía, además esta versión tiene un ancho de banda de 2.4 a 2.485 GHz, una sensibilidad de -95 dBm y un rango de velocidad de datos de 1-2 Mb/s. Actualmente la versión 5 es la última actualización, que contiene características como la mejora de sus funciones de cobertura y comunicación para los dispositivos de IoT [22]–[24].

ZigBee

Es un estándar de comunicación inalámbrico de bajo consumo para el monitoreo y control de sensores en un ambiente conectado, como lo son zonas industriales, hogares y edificios. Al igual que la tecnología Bluetooth, tiene una comunidad de usuarios latente que proporcionan buenas reseñas en cuanto a su uso y aplicación, por lo tanto, la alianza ZigBee ha lanzado al mercado nuevas mejoras beneficiosas para los dispositivos de IoT.

ZigBee, a diferencia de Bluetooth, es más barato con sus servicios y proporciona un mayor alcance de comunicación en un área de 100 m a la redonda, aunque esta puede ser mayor mediante la aplicación de una arquitectura de red de tipo malla, que es la implementación característica en este estándar [23], [24].

Como se ha dicho, esta tecnología al relacionarse con los dispositivos de IoT, ha lanzado una versión que se centra en otorgar un alto nivel de seguridad mediante la encriptación de los datos y un bajo consumo de energía denominada como Control Remoto de ZigBee (*ZigBee Remote Control*). La última versión en el mercado es la 3.0 que se encuentra disponible desde el año 2015, el cual provee un bajo rango de datos y consumo de energía. Por último, este protocolo brinda una operatividad de 2.4 GHz, una sensibilidad de -100 dBm, y un rango de datos de 250 Kb/s [22]–[24].

Z-Wave

Es un estándar inalámbrico desarrollado por la compañía Zensys, cuyo propósito es la integración de sus servicios de control de dispositivos de interiores, orientado a entornos de hogares inteligentes e industrias. Esta tecnología actúa bajo la misma arquitectura de red al igual que Zigbee, donde Z-Wave tiene un radio de comunicación que abarca entre 30 a 100 m a la redonda, mediante un medio de transmisión punto a punto [24], [25]. Se caracteriza por ser una tecnología de bajo consumo energético para la comunicación de pequeños entornos conectados y en el control de diversos dispositivos térmicos, lumínicos, sensoriales y los que están centrados en el cuidado de la salud; por esta razón es muy utilizado en IoT. [24], [25].

Una comparativa de sus servicios se relaciona con la integración de los dispositivos del mismo proveedor, es decir, que asegura que la comunicación que puede realizar BLE con otros dispositivos no es comparable con la combinación de varios dispositivos en una red de Z-Wave, donde todos los dispositivos trabajan en conjunto como uno solo. La frecuencia con la que trabaja este estándar es de 900 MHz y un rango de transferencia de datos entre 40 a 100 Kb/s. Hay que tener claro, que esta última característica no impide que pueda trabajar con dispositivos de 2.4 GHz debido a que utiliza una banda menor a 1 GHz [23]–[25].

LoRa

Es un estándar inalámbrico desarrollado por Grenobable y más tarde comprado por la empresa Semetech, que actualmente (2020) aún mantiene los derechos de propiedad. En comparación a los demás estándares presentados, el alcance de comunicación de la red es medido por kilómetros, ya sea en las zonas urbanas entre 2 a 5 km o en zonas suburbanas alrededor de 15 km. Conociendo que, a mayor ancho de banda, mayor será el consumo de energía y la generación de infortunios en el tránsito de los datos, por lo que normalmente es preferible la utilización de redes de bajo alcance. También, al igual que Z-Wave, este estándar trabaja con un ancho de banda por debajo de 1 GHz [23], [25].

Un aspecto importante es que LoRa trabaja con radio frecuencia y es aplicable a cualquier topología de red; pero es recomendable utilizar la topología de estrella que normalmente es utilizada para zonas residenciales o ciudades inteligentes por su gran cobertura. Del mismo modo, la alianza de LoRa presenta la red de área amplia de largo alcance (*LoRaWAN*, en su acrónimo en inglés), la cual fue desarrollada especialmente para dispositivos de IoT con poca memoria y de bajo consumo energético. Tiene especificaciones como la sensibilidad es de -149 dBm y un rango de comunicación de información es entre 18 b/s a 37.5 Kb/s [22], [25].

RFID

La identificación por radiofrecuencia (*RFID*, por sus siglas en inglés) es uno de los estándares más antiguos que tuvo su primera aparición en los años 40 durante la segunda guerra de los dispositivos de radiofrecuencia. El funcionamiento de esta tecnología se basa en la identificación de radiofrecuencia que utiliza una antena para emitir ondas para capturar la señal que lo hace especial en comparación a otros dispositivos en el mismo campo como los lectores de los productos de los supermercados. Hay que conocer que dichos dispositivos tienen un distintivo único, esto quiere decir que puede haber productos utilizando el mismo dispositivo, pero que en el proceso de lectura el sistema lo identifica como un objeto diferente [26], [27].

A través de los avances tecnológicos modernos, es posible vincular los dispositivos RFID junto con la tecnología de IoT. Las características de esta tecnología difieren de la intensidad de la frecuencia de bajo y alto nivel, por lo tanto, en el caso de presentarse en una intensidad baja, el rango de transmisión se encuentra de 1 a 10 cm en comparación a

una intensidad alta que registra entre 1 a 100 cm, el rango de transmisión de los datos se mantiene en ambos casos con 424 kbps y su propagación en radiofrecuencia es de 135 KHz a 960 MHz para frecuencias muy alta. Por último, esta tecnología es posible encontrarla como frecuencia activa y pasiva que se diferencia por el manejo de la energía ya que el activo se mantiene en uso, en cambio la pasiva utiliza la energía proporcionada del lector cuando es utilizada [26]–[28].

Con el objetivo de resumir las principales características tales como: velocidad de datos, ancho de banda, alcance de las comunicaciones en redes que implementen estos estándares, y la intensidad de la señal, en la Tabla 1, se presenta una comparativa entre los estándares de comunicación inalámbrica antes descritos.

Tabla 1. Comparación de los estándares [22], [24], [28].

	Características			
Estándares	**Velocidad de datos**	**Ancho de banda**	**Alcance de comunicación**	**Intensidad de señal**
Wifi	1 - 54 Mb/s	2,4 - 5 GHz	100 - 150 m	-95 dBm
Bluetooth	1 - 2 Mb/s	2,4 -2,485 GHz	10 m	-95 dBm
Zigbee	250 Kb/s	2,4 GHz	10 - 100 m	-100 dBm
Z-Wave	40 - 100 Kb/s	800 - 900 MHz	30 - 100 m	0 dBm
LoRa	18 b/s - 37,5 Kb/s	915 MHz	2 - 15 km	-149 dBm
RFID	424 Kb/s	135 KHz - 960MHz	1 - 100 cm	-30 dBm

1.1.1.2 Protocolos de comunicación

Como se ha podido apreciar en la sección anterior se ha mencionado algunos estándares que son utilizados en los dispositivos de IoT. Sin embargo, no solo este aspecto debe considerarse debido a que es necesario de un protocolo que permita compartir información entre los diferentes sensores, controladores y actuadores que formen parte de un ecosistema o una red de IoT [29].

El IoT no tiene un único protocolo específico para establecer la comunicación de los dispositivos que trabajen en una red. Es por ello, que a la hora de elegir uno, hay que basarse en las funcionalidades de la arquitectura que se implemente ya que realmente no hay un protocolo que abarque todos los aspectos [27], [30]. Entre los distintos protocolos

que existen se presentaran los siguientes: HTTP, CoAP y MQTT; donde los dos últimos tienen una relación más cercana a IoT.

HTTP y HTTPS

El protocolo de transferencia de hipertexto (*HTTP*, en sus siglas en inglés) en términos simples, permite compartir la información a Internet de forma segura a través de una conexión protegida por medio de un protocolo de control de transmisión (*TCP*, por sus siglas en inglés), que se posiciona en la cabecera del mensaje mencionado para brindar autentificación del protocolo de Internet (*IP*, por sus siglas en inglés) [30].

Este protocolo es el más conocido para todo aquel que haya estudiado redes o programación, por el motivo de que es un protocolo cliente-servidor. Pero en los dispositivos de IoT cumple el rol de cliente debido a que se comunica con otros dispositivos (comunicación máquina a máquina, M2M) de una misma red y por lo tanto, es preferible mantener las entradas externas selladas para evitar la filtración de los datos [31], [32].

El formato de los mensajes que realiza el rol del cliente en este protocolo corresponde a los mensajes de solicitud (*request*) y respuesta (*response*), donde se aplican los métodos de obtener (*get*) y publicar (*post*) respectivamente como se ilustra en la Figura 2. El primer método normalmente es utilizado para obtener datos de la web mediante el uso de variables en la cabecera de la solicitud; mientras que el otro se encarga de enviar los datos que se hayan solicitado [33], [34].



Figura 2. Esquematización del protocolo HTTP [35].

En cuanto a la protección de la información, se combina esta tecnología con la capa de transporte (*TLS*, por sus siglas en inglés) y se obtiene como resultado HTTPS, el cual

es un protocolo seguro y sugerido a la hora de navegar en Internet. Las ventajas de realizar solicitudes en HTTP son las siguientes: tiene una buena fiabilidad durante las transiciones y es posible utilizarlo en diferentes plataformas en la nube [33], [34], plataformas con las que muchos dispositivos de IoT son actualmente compatibles.

CoAP

El protocolo de aplicación restringida (*CoAP*, en sus siglas en inglés) fue desarrollado por el grupo de trabajo de ingeniería de Internet (*IETF*, en sus siglas en inglés). Tiene características similares al protocolo HTTP con la diferencia de que este es más rápido debido a que este protocolo ha sido creado especialmente para la integración con los dispositivos IoT [20], [34].

El protocolo CoAP utiliza el protocolo de datagramas de usuario (*UDP*, por sus siglas en inglés) en comparación al TCP utilizado por el HTTP para establecer el intercambio de información entre el cliente y el servidor. El funcionamiento del protocolo se basa en la utilización de mensajes verificables (*CON*, por sus siglas en inglés) y mensajes de reconocimiento (*ACK*, por sus siglas en inglés), donde el primero envía un mensaje del cliente al servidor y el otro de forma viceversa como se presenta en la Figura 3; además, el tamaño del mensaje pesa entre 4 a 1024 bytes y son representados con números [34].

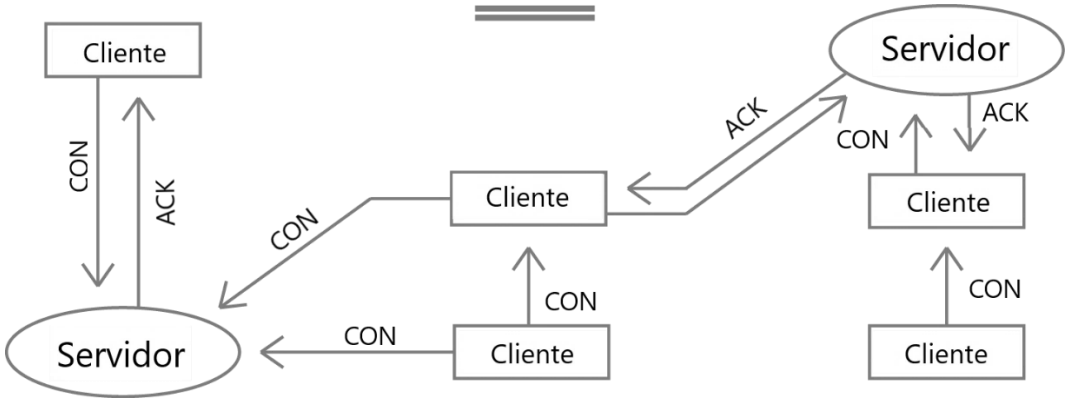


Figura 3. Esquematización del protocolo CoAP [36].

MQTT

MQTT, del anglo *Message Queue Telemetry Transport*, es un protocolo de peso ligero, asíncrono y especializado para dispositivos IoT, al igual que el protocolo CoAP. Se diferencia en comparación a los protocolos anteriores ya que este sistema se basa en la utilización de un sistema para la publicación y la suscripción, donde los mensajes tienen temáticas para que el proceso sea independientes entre las necesidades de las aplicaciones IoT [31].

Cabe añadir que este protocolo fue lanzado al mercado por la empresa IBM en el año 1999. En su arquitectura, el cliente puede editar o suscribirse a un sistema de la red (*broker*) como se presenta en la Figura 4, este último es el encargado de recibir todos los mensajes y aplicar un filtro a los clientes que estén suscritos o interesados en la temática [37].

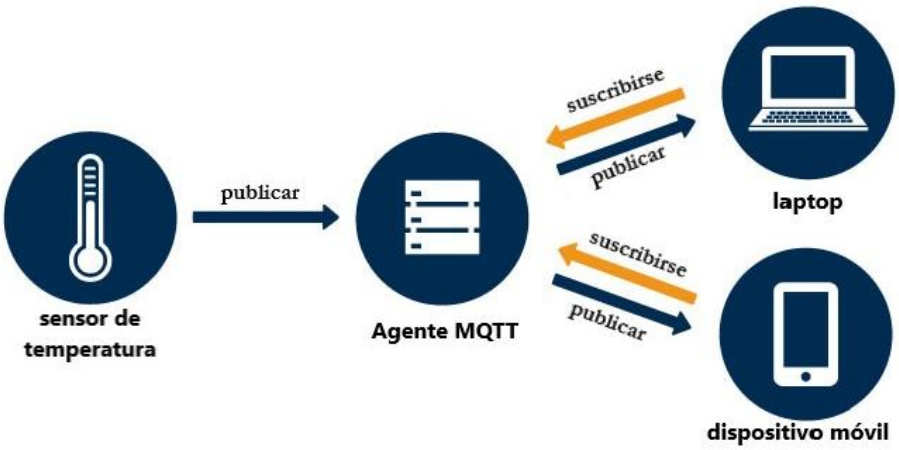


Figura 4. Esquematización del protocolo MQTT [38].

1.1.1.3 Arquitectura

La arquitectura es un apartado de suma importancia en el ámbito de IoT, esto debido a que constituye la forma en cómo se encontrará conformada la red con sus diversos dispositivos y aplicaciones. El tipo de arquitectura que se aplica con mayor frecuencia para la creación de redes de IoT es la arquitectura de N capas, la cual se basa en distribuir las tareas o responsabilidades en varias secciones y de esta manera, agilizar los procesos de gestión de los recursos de IoT.

Es importante señalar, que normalmente en la arquitectura-capas se suele utilizar de manera que se implemente la red de IoT usando 3 capas (percepción, red y de aplicación) tal y como se presenta en la Figura 5. No obstante, es posible extender dichas tres capas hasta 5 capas (percepción, red, middleware, aplicación y de negocio) [28], [39].

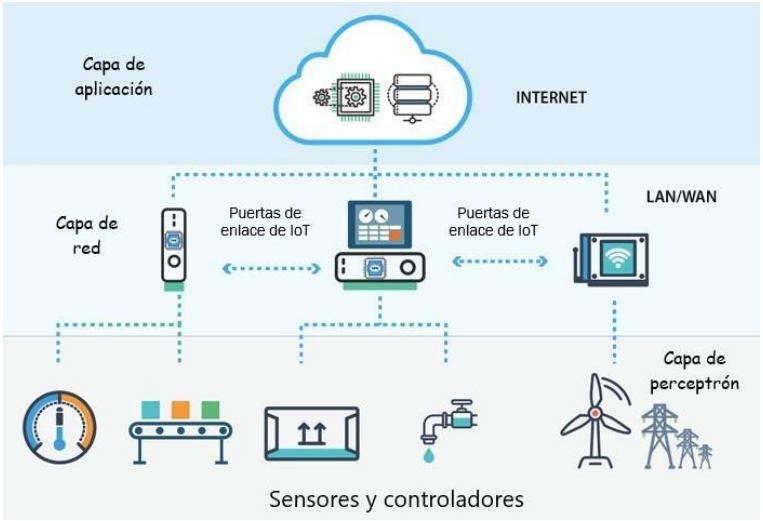


Figura 5. Arquitectura de red de IoT [40].

- **Capa de percepción.** Es la primera capa que se centra en la conexión de los dispositivos físicos como son los sensores y actuadores, de los cuales se obtendrán los datos de manera analógica o digital y luego se procede en compartirla a las capas superiores [39], [41].
- **Capa de red.** Es la capa intermedia encargada de transmitir o manipular la información de los datos obtenidos de la capa anterior con el propósito de compartir los datos mediante el uso de protocolos (i.e., HTTP, MQTT) y estándares de comunicación (i.e., Wifi, Bluetooth) comentados anteriormente [39], [41].
- **Capa de aplicaciones.** Es la última capa de la arquitectura, también conocida como la capa de negocio, la cual se encarga del manejo de los servidores y cuyo objetivo es responder a las necesidades de los clientes, como el desarrollo de aplicaciones de monitoreo [39], [41]. Dichas interfaces deben ser amigables con los usuarios a las que vayan dirigidas.

1.1.2 Hogar digital conectado

Es una de las diferentes aplicaciones que se le puede dar a las tecnologías de IoT. Se basa en la creación de un ambiente domótico compuesto de diferentes dispositivos, sensores, actuadores, protocolos de seguridad y estándares de comunicación inalámbricos con la finalidad de ser implementado en las instalaciones físicas de una casa. Además, las funciones que se realizan deben ser orientadas a brindar confort, seguridad, cuidado, ahorro y comodidad al usuario final, esto es, a los habitantes ya sea a nivel individual o familiar [42], [43].

1.1.2.1 Dispositivos/sensores

Son aquellos objetos encargados de la recolección de los datos del ambiente físico a un entorno digital o virtual. Entre los diversos tipos de dispositivos de IoT para hogares digitales se conforman los siguientes grupos: térmicos, lumínicos, energéticos, de reconocimiento facial (que están categorizados para la seguridad de los ocupantes), así como de otra naturaleza como se presenta en la Figura 6.



Figura 6. Sensores de IoT [44].

Todos los dispositivos conectados en un hogar digital conectado deben estar permanentemente monitoreando el entorno con el objetivo de que ante cualquier evento

que se origine en el escenarios se tomen medidas de control pertinentes de manera que satisfaga las necesidades del usuario [42].

1.1.2.2 Aplicaciones en domóticas

Es considerable entender que la integración de los electrodomésticos inteligentes en escenarios como son los hogares es un hecho inminente que está sucediendo y se entenderá de una manera exponencial en años posteriores, según vaya evolucionando y madurando el IoT. El objetivo de integrar estas tecnologías, en escenarios anteriormente tradicionales como son los hogares, es principalmente para mejorar la calidad de vida de las personas enfatizando en coadyuvar en el ahorro de recursos energéticos, hoy en día indispensables para preservar el Medioambiente.

A continuación, se describen algunos de los principales usos que los hogares inteligentes u hogares digitales conectados están teniendo gracias a las tecnologías compatibles con el IoT. Entre estos aspectos figuran el confort y la gestión energética, seguridad y, comunicación o interacción con el usuario.

Confort. Al hablar de confort, se hace referencia al grado de satisfacción que pueda tener una persona para mejorar su calidad de vida. A partir de esta idea este aspecto es uno de los indicadores más importantes en domótica ya que considera la automatización de todos los procesos y el mantenimiento óptimo de los servicios como una buena práctica. Como se ilustra en la Figura 16, los principales aspectos que se consideran para modelar confort en este tipo de escenarios son principalmente: el confort ambiental, lumínico, energético y la seguridad [19].

Gestión energética. La gestión energética en escenarios del hogar digital conectado tiene como puntos principales el ahorro, la eficiencia y la generación eléctrica en dichos escenarios. Esto es debido a que la administración y monitoreo de los dispositivos electrónicos en temas de automatización genera un gasto inadecuado de la energía y provoca que se tenga un costo inesperado. Por ello, es necesario aplicar acciones de control con el fin de optimizar y ahorrar cualquier tipo de energía que se pueda usar, esto

es, eléctrica, solar, eólica, entre otras [19]. Un ejemplo de buena práctica sería apagar las luces cuando no existen personas en la casa en horas del día.

Seguridad. Este aspecto es el encargado de proteger la integridad física de cada uno de los habitantes y los bienes que se encuentren dentro y fuera del hogar inteligente. Para cumplir esta meta, se hace indispensable llevar a cabo acciones de control local o remoto de los dispositivos, sensores, puertas y ventanas. Un ejemplo sería la utilización de sensores de reconocimiento facial para determinar intrusos y notificar a la policía [19].

Comunicación. Puede parecer la menos importante; pero es el aspecto más necesario para que el sistema instalado en el hogar digital conectado interactúe de la forma más natural posible con el usuario. Para lograr su objetivo, es importante brindarle al usuario la personalización del sistema para que se busque satisfacer sus necesidades específicas. Para ello, es importante proveer de mecanismos de personalización, automatización que no requiera su participación; pero puede ser controlado si se lo requiere, la supervisión y notificación de los eventos que sucedan en el escenario donde se desenvuelve el usuario [19].

1.1.2.3 Herramientas

La herramienta que se utilizará para la simulación de un ambiente domótico en esta investigación serán aplicaciones de código abierto (*open-source*) que sirvan para la automatización del hogar. A continuación, se presenta un listado de las herramientas más populares que se distribuyen de manera libre entre la comunidad de desarrolladores de hogares inteligentes basados en IoT.

- **IoBroker.** Es una plataforma desarrollada para el ámbito industrial y para el hogar cuyo propósito es brindar "una solución de software para integrar varios sistemas domésticos inteligentes, que seguirían siendo soluciones independientes sin ioBroker, en un sistema general" [45].

- **Calaos.** Es una plataforma creada por una empresa francesa que cuando cerró cambió su tipo de licenciamiento. Tiene algunas cualidades entre las cual destacan el manejo de varios dispositivos como luces y equipos de sonido [46].
- **Domoticz.** Es una plataforma que permite la gestión de varios dispositivos y sensores térmicos, lumínicos, eléctricos, así como tecnologías de terceros. La plataforma se encuentra desarrollada con HTML5 para que sea accesible tanto en entornos web como de escritorio [46].
- **Home Assistant.** A diferencia de las herramientas ya presentadas, ésta ha sido desarrollada con el lenguaje de programación Python, puede instalarse en dispositivos como un Rasperry Pi, en la nube, y en tecnología de contenedores con Docker. Permite también la integración de dispositivos y sensores de varios proveedores [46].
- **MisterHouse.** Es una aplicación multiplataforma desarrollada con Perl para la gestión y monitoreo de los dispositivos del hogar digital conectado. Ya sea que se utilice un ordenador o de manera remota, es posible aplicar varios eventos como encender las luces, recibir llamadas, conocer el estado del clima, así como otros aspectos [46].

En la Tabla 2 se presenta una comparativa entre las principales características que tiene cada software de domótica ya descrito. Es importante comentar que en dicha tabla también se ha incluido la herramienta OpenHAB debido a que es la herramienta que se ha seleccionado para desarrollar el ecosistema de IoT orientada a gestionar el hogar digital conectado, planteado en esta investigación. Además, esta herramienta no ha sido descrita previamente como las anteriores debido a que, por ser la herramienta usada en este proyecto, tiene un especial tratamiento en lo que a su descripción se refiere, esto es, tiene un apartado en el que se describe de manera detallada sus características, arquitectura conceptos y buenas prácticas de desarrollo.

Tabla 2. Características de las aplicaciones de domótica [18].

Herramienta	Licencia	Lenguaje	I. Web	Estándares	Protocolo	Plugin	Documentación
Calaos	GPL v3	C++	Si	Algunos	-	En desarrollo	Limitado (francés)

Domoticz	GPL v3	C++	Si	Muchos	MQTT	Muchos (basados en JSON)	Extensivo
Home-Assistant	Apache2.0	Python 3	Si	Muchos	MQTT	Muchos	Extensivo (parcialmente en alemán)
IoBroker	MIT	JavaScript Node.js	Si	Muchos	MQTT	Muchos	Extensivo
MisterHouse	GPL v2	Perl	Si	Algunos	-	Algunos	Extensivo
OpenHAB	EPL v1	Java	Si	Muchos	MQTT	Muchos	Extensivo

1.1.3 OPENHAB

Es un software de código abierto desarrollado con el lenguaje de programación Java cuyo objetivo es brindar una interfaz de usuario como se muestra en la Figura 7, donde se diseña un entorno de dispositivos conectados inteligentes para la automatización del hogar digital conectado [47]. La interfaz proporcionada está orientada tanto a aplicaciones web como aplicaciones para dispositivos móviles.



Figura 7. Panel de control de OpenHAB [48].

1.1.3.1 Arquitectura

OpenHAB al ser una plataforma de simulación de ambientes domóticos, es necesario comprender la constitución por la que está formada en un nivel de funcionamiento. Entre aquellos aspectos que se denotan en la Figura 8, se encuentran separados por colores, los cuales son los: complementos (*OpenHAB Add-ons*), componentes básicos (*OpenHAB Core Components*) y el marco OSGI (*OSGI Framework*).

- **Complementos.** Comprende la unión de diversos componentes que son propios o externos mediante la inclusión de terceras partes interesadas en prestar sus servicios para la mejora de la productividad de la herramienta. Algunos de estos aspectos se encuentran más detallados en la próxima sección, la interfaz de usuario es la que permite al usuario tener control de acceso de sus componentes conectados.
- **Componentes básicos.** Contiene información acerca de los medios donde se suscite el intercambio de información por medio de los protocolos, lo que vendría hacer los servicios transferencia de estado representacional (*REST*), el repositorio vendría hacer el lugar de almacenamiento de los datos obtenidos, y la librería es donde se obtienen los drivers para la integración de los componentes.

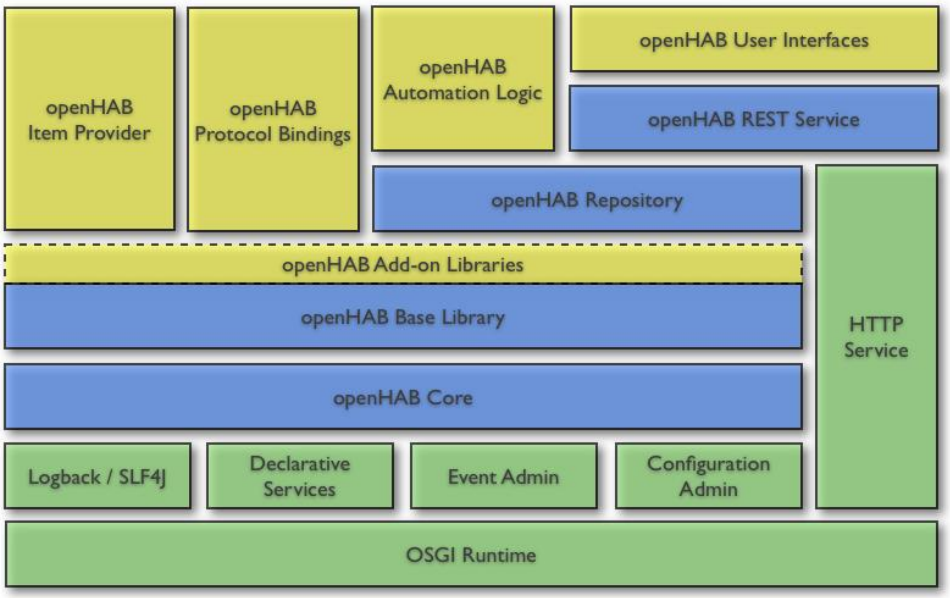


Figura 8. Arquitectura de OpenHAB [49].

- **Marco OSGI.** Iniciativa del Portal de Servicios Abiertos (*OSGI*, por sus siglas en inglés) es una tecnología desarrollada con Java que ejecuta un sistema de componentes dinámicos, permitiendo el ocultismo y comunicación de sus servicios entre los complementos, todo con la finalidad de reducir la complejidad de la arquitectura. Entre los principales servicios que se sobresalen son la administración de configuraciones donde se realizan los registros y se configura los servicios, y la administración de eventos de OSGI al ser dinámico presenta una variedad de aplicaciones de eventos, cuya comunicación se basa en el protocolo MQTT referente a las publicaciones y las suscripciones [50].

1.1.3.2 Componentes de desarrollo

OpenHAB emplea algunos conceptos para organizar los objetos virtuales de IoT, sus comunicaciones con los objetos reales, describir el comportamiento del sistema, definir el modelo de almacenamiento persistente y diseñar la interfaz gráfica de monitoreo. A continuación, se describen los principales y los que en esta investigación se han empleado para modelar el ecosistema de IoT, esto es, canales, enlaces, cosas, elementos, reglas y mapa del sitio como se presenta en la Figura 9.

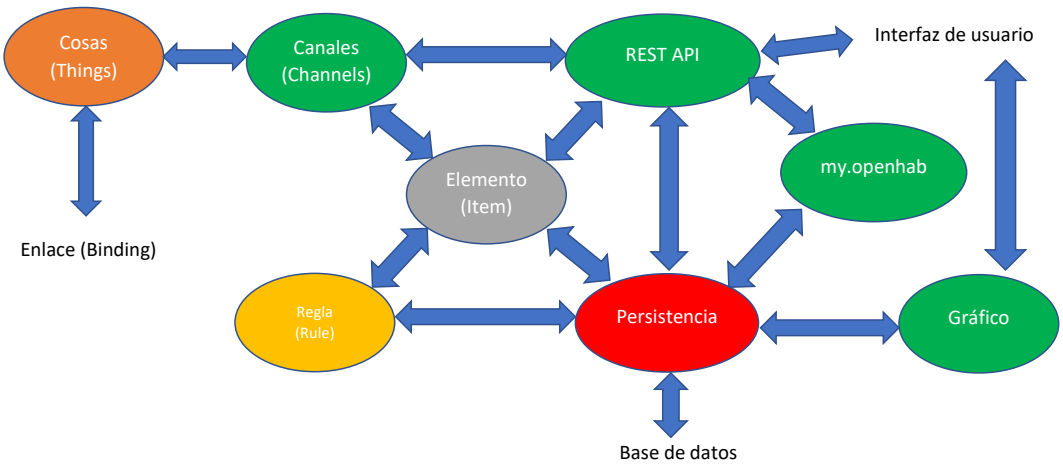


Figura 9. Características de OpenHAB [51].

Canales (Channels)

Es la unión lógica que permite la comunicación entre una cosa y un ítem. Los canales permiten la propagación de los datos en ambas direcciones y es formado cuando se crea un nuevo objeto en el sistema [47].

Hay que aclarar que este proceso se realiza automáticamente durante la creación de los objetos, pero es opcional la creación de los canales manuales en caso de que se requiera aumentar la cantidad de canales de los objetos para establecer la comunicación mediante estados numéricos y cadenas de texto, debe de contar con alguna etiqueta que sirva como identificador como se presenta en el Algoritmo 1 [47].

Algoritmo 1. Código para crear un canal en OpenHAB.

```
1. Channels:
2.    State String : customChannel1 "My Custom Channel" [
3.     configParameter="Value"
4.    ]
5.    State Number : customChannel2 []
```

En el Algoritmo 2, se muestra cómo se ha creado un canal para el parámetro de la temperatura, donde se establece el estado del sensor y patrón de transformación.

Algoritmo 2. Código de ejemplo de canal en OpenHAB.

```
1. Type     number:     Temperature     [stateTopic="tele/sonoff_TH/SENSOR",
   transformationPattern="JSONPATH:$.AM2301.Temperature"]
```

Enlace (*Binding*)

Es entendido como la unión formada entre los dispositivos y la plataforma de control que, mediante la instalación de paquetes de software por parte del usuario, actúa como lo haría un controlador (*driver*). A través de un enlace es posible la integración de diferentes tecnologías como por ejemplo ZigBee, Z-Wave, Bluetooth que son estándares de comunicación ampliamente usados en IoT [47].

En el siguiente fragmento de código (Algoritmo 3) se puede apreciar que dentro de la definición del objeto, el enlace es posible crearlo por medio de la definición del canal donde se receptarán o enviarán los mensajes, es precisamente la parte que está incluido

en la última llave [47]. Un ejemplo aplicando este apartado se puede denotar en el Algoritmo 4, donde se indica la creación de un elemento para el CO_2 en interiores, pero lo importante es el establecimiento del enlace por medio de la creación del canal.

Algoritmo 3. Código para crear un enlace en OpenHAB.

```
1.  itemtype itemname "labeltext [stateformat]" {channel="..."}
```

Algoritmo 4. Código de ejemplo de enlace en OpenHAB.

```
1.  Number Netatmo_Indoor_CO2 "CO2" channel="netatmo:NAMain:home:inside:Co2"}
```

Cosas u objetos (Things)

Son las entidades físicas más importantes que no necesariamente tienen que ser un dispositivo porque puede ser cualquier fuente o servicio que pueda receptar y manejar la información. Los objetos al igual que cualquier dispositivo conectado se compone de estados o eventos como se presenta en la Figura 10 [47].

Entre los principales estados que puede tener un objeto de IoT en OpenHAB figuran los siguientes: no inicializado, inicializado, en línea, desconectado, quitado y eliminado.

- **No inicializado.** Este estado se produce cuando el objeto o cosa recién se está integrando o en el caso de que se haya producido un error.

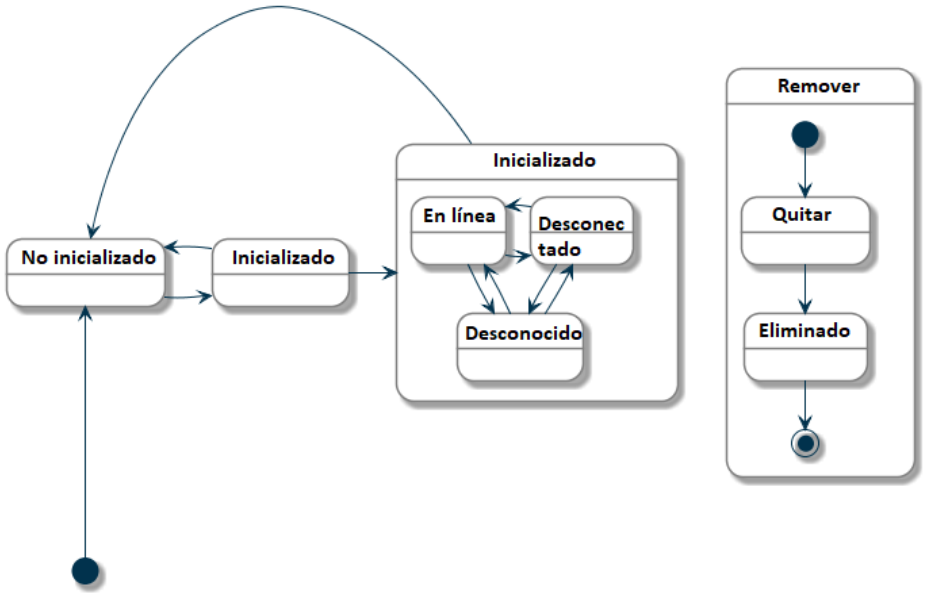


Figura 10. Estados de las cosas [47].

- **Inicializado.** El evento se produce cuando se inicializa la cosa para empieza a vincularse, por lo que no podrá realizar ninguna acción hasta que se encuentre en línea.
- **Desconocido.** Se presenta cuando el estado de la cosa es incierto por lo que no se da a conocer si ya se encuentra funcionando en línea o desconectado.
- **En línea.** De manera sencilla el objeto se encuentra en un estado óptimo para ser operado.
- **Desconectado.** Es lo puesto al estado en línea e indica que el dispositivo o servicio no responde.
- **Quitado.** Es un estado que preludia la eliminación de un objeto que no funciona.
- **Eliminado.** El estado es secuencia del anterior estado, donde el dispositivo o servicio problemático es removido del sistema.

Para la creación de un objeto es necesario conocer su sintaxis que se muestra en el Algoritmo 5. Primero se debe establecer la configuración la identificación del enlace, el tipo de objeto a conectar y la identificación del objeto; es posible colocar una etiqueta que represente lo anterior de manera opcional, también se debe agregar la localización y en los parámetros configurar detalles más específicos [47]. Un ejemplo de la creación de un objeto es presentado en el Algoritmo 6, donde se aprecia que crea un objeto de una cámara web que es instalada en la sala, además de proporcionar la dirección del servidor y tiempo de respuesta.

Algoritmo 5. Código para crear una cosa en OpenHAB.

```
1. Thing <binding_id>:<type_id>:<thing_id>
   "Label" @ "Location" [ <parameters> ]
```

Algoritmo 6. Código de ejemplo de una cosa en OpenHAB.

```
1. Thing network:device:webcam "Webcam" @ "Living Room"
   [ hostname="192.168.0.2", timeout="5000", ... ]
```

Elemento (Item)

A diferencia de las cosas que son catalogadas como físicas, los elementos son la representación de las aplicaciones como lo sería una interfaz gráfica o un proceso

automatizado. Entre los diversos elementos que son accesibles en OpenHAB, se encuentran imágenes que son datos binarios, una ubicación que almacena coordenadas geográficas en un sistema de posicionamiento global (*GPS*, por sus siglas en inglés), fecha y hora, entre otras [47].

Para la creación de un elemento es necesario comprender la sintaxis en el Algoritmo 7, que primero se debe establecer el tipo del elemento que puede corresponder a cualquier tipo de dato ya sea número (*Number*) o una cadena de texto (*String*), además de asignar un nombre y etiqueta a la variable. También se debe configurar el formato que utiliza el elemento, así como un icono que puede ser opcional, ser agrupado en grupos con identificaciones y vincularse a un enlace con un objeto [47]. En el Algoritmo 8, se muestra cómo se establece un elemento para monitorear la temperatura, donde se agrega un icono que ya se encuentra por defecto en el sistema, así como el grupo al que pertenece la cual es temperatura y sala, por último, se añade una etiqueta y la configuración del enlace.

Algoritmo 7. Código para crear un elemento en OpenHAB.

```
1. itemtype itemname "labeltext [stateformat]" <iconname>
   (group1, group2, ...) ["tag1", "tag2", ...] {bindingconfig}
```

Algoritmo 8. Código de ejemplo de un elemento en OpenHAB.

```
1. Number Livingroom_Temperature "Temperature [%.1f °C]" <temperature>
   (gTemperature, gLivingroom) ["TargetTemperature"] {knx="1/0/15+0/0/15"}
```

Regla (Rule)

Son indicadores para la automatización de procesos donde cada componente tiene como consecuencia una tarea. Esto podría representarse como por ejemplo el encendido del aire acondicionado o abrir las persianas durante la mañana. La ventaja de OpenHAB proporciona un gestor de tareas liviano y potente [47].

Para la creación de una regla es importante conocer la sintaxis como se encuentra en el Algoritmo 9, donde debe tener un nombre único, además se debe determinar el evento o los eventos se cumplan, por último se debe establecer una secuencia de comandos (*script*) [47]. En cuanto al ejemplo en el Algoritmo 10, se basa en una regla para el encendido de las luces cuando un sensor detecte la presencia del usuario, donde se establece en la condicional esta opción.

Algoritmo 9. Código para crear una regla en OpenHAB.

```
1. rule "<RULE_NAME>"
2. when
3.     <TRIGGER_CONDITION> [or <TRIGGER_CONDITION2> [or ...]]
4. then
5.     <SCRIPT_BLOCK>
6. end
```

Algoritmo 10. Código de ejemplo de una regla en OpenHAB.

```
1. rule "Motion sensor light"
2. when
3.     Member of MotionSensors received command
4. then
5.     if(receivedCommand == ON) Light.sendCommand(ON)
6.     else Light.sendCommand(OFF)
7. end
```

Mapa del sitio (Sitemap)

Es el conjunto de cosas y elementos que componen todos los objetos de un ambiente conectado. Tiene como fin crear una interfaz de usuario para la configuración del hogar inteligente. Estos mapas son archivos que se quedan almacenados en la plataforma donde la administración es fácil e intuitiva [47].

Para la creación del mapa de sitio es necesario utilizar una etiqueta para identificar el mapa del sitio, y dentro de las llaves se agregan todos los elementos según las preferencias del usuario [47], como se representa en el código del Algoritmo 11. En el ejemplo del Algoritmo 12, se encuentra la representación básica de un entorno de un hogar con algunos dispositivos conectados, donde se separan en dos secciones y la segunda opción contiene 4 elementos como se ve reflejado en la Figura 11.

Algoritmo 11. Código para crear un mapa del sitio en OpenHAB.

```
1. sitemap <sitemapname> label="<title of the main screen>" {
2.     [all sitemap elements]
3. }
```

Algoritmo 12. Código de ejemplo de un mapa del sitio en OpenHAB.

```
sitemap demo label="My home automation" {
    Frame label="Date" {
        Text item=Date
    }
    Frame label="Demo" {
        Switch item=Lights icon="light"
        Text item=LR_Temperature label="Livingroom [%.1f °C]"
        Group item=Heating
        Text     item=LR_Multimedia_Summary     label="Multimedia     [%s]"
icon="video" {
            Selection item=LR_TV_Channel mappings=[0="off", 1="DasErste",
2="BBC One", 3="Cartoon Network"]
            Slider item=LR_TV_Volume
        }
    }
}
```

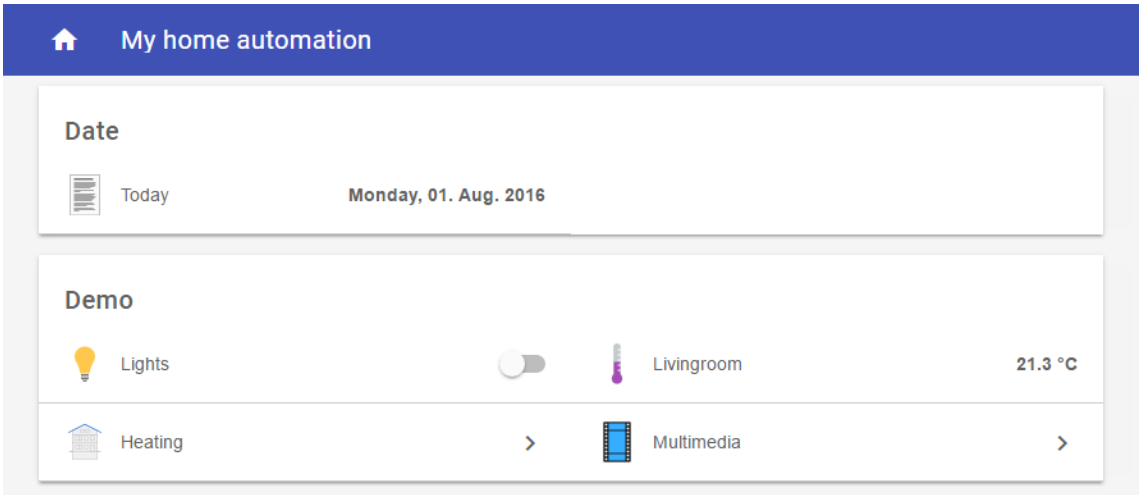


Figura 11. Ejemplo de un mapa del sitio en OpenHAB [47].

2.1.1.3. *Interoperabilidad en OpenHAB*

OpenHAB al ser parte de una comunidad muy grande de usuarios y de código libre, ha permitido que la plataforma pueda ser compatible con los productos de diferentes marcas, ya sea en el ámbito de servicios, dispositivos e incluso protocolos de comunicación [47]. Las marcas más populares que son compatibles con OpenHAB se encuentran en la Tabla 3, donde se resalta que tanto en acciones como transformación de la información casi no presentan muchos complementos.

Tabla 3. Marcas más populares integradas con OpenHAB [52].

Enlaces	Integraciones del sistema	Acciones	Persistencia de datos	Transformación de datos	Voz
Bluetooth	Azure IoT Hub Connector	MQTT	InfluxDB (0.9 and newer) Persistence	JavaScript Transformation Service	VoiceRSS Text-to-Speech
Philips Hue	Google Calendar Scheduler	Pushbullet	MongoDB Persistence	Map Transformation Service	Mary Text-to-Speech
KNK	HomeKit Add-on	Telegram	MySQL Persistence	Jinja Transformation Service	Macos Text-to-Speech
Kodi	OpenHAB Cloud Connector	XMPP	MQTT Persistence		Google Cloud Text-to-Speech
ZigBee		XBMC	JDBC Persistence		Pico Text-to-Speech
Z-Wave		Twitter			Polly Text-to-Speech

1.1.4 Sistemas de control difuso

La lógica difusa es un sistema de inferencia utilizado para la toma de decisiones, basándose en el tratamiento de la incertidumbre por medio de un conjunto de reglas, logrando así que el resultado opere pueda ser verdadero o falso [4], [53]. Por lo tanto, logra generar un razonamiento similar a como actuaría un ser humano, además hay que acotar que un sistema de control difuso no es más que un sistema de control que aplica la lógica difusa [2]

1.1.4.1 Arquitectura

Es posible apreciar el proceso que se realiza en un sistema de control típico como se observa en la Figura 12. A continuación, se describen brevemente los componentes que forman un controlador difuso y cuyo modelo ha sido implementado por muchas de las herramientas de software orientadas a desarrollar sistemas difusos.

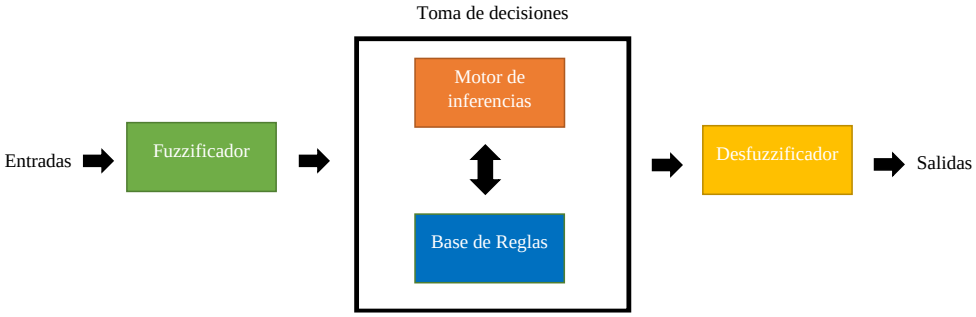


Figura 12. Estructura de un sistema de control difuso [54].

1.1.4.2 Fuzzificación

Es el primer paso que se ejecuta en el controlador difuso. Es un proceso que consiste en convertir los conjuntos clásicos (*crisp set*) en conjuntos difusos (*fuzzy set*) [8]. Los conjuntos clásicos se pueden entender como los números o los valores iniciales que ingresan como por ejemplo, una medida de temperatura de 27 ºC, y el conjunto difuso es entendido como las etiquetas que representan al estado de la variable, es decir, que la temperatura mencionada antes puede ser catalogada como frio, ambiental o caliente; como se encuentra representada la variable de temperatura en la Figura 13 donde la primera categoría se encuentra entre 0 ºC a 20 ºC, la segunda entre 10 ºC hasta 70 ºC y la última entre 35 ºC hasta 100 ºC [1], [55].

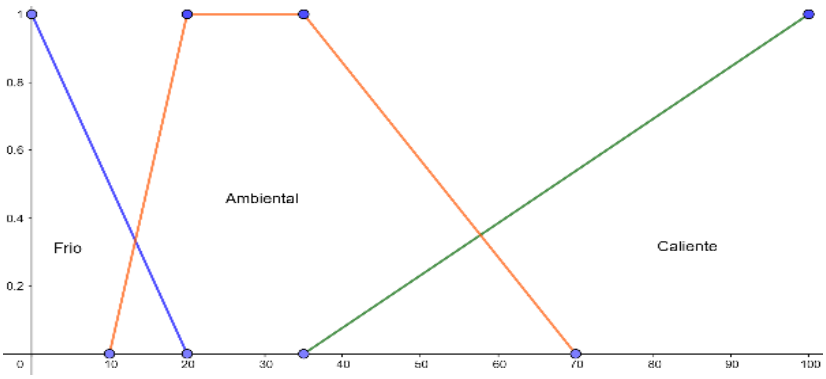


Figura 13. Fuzzificación de la variable de temperatura.

Otro aspecto importante es acerca de las funciones de pertinencia con la que se representa la información, donde las más comunes son la triangular (Figura 14.a), trapezoidal (Figura 14.b) y gaussiana (Figura 14.f). Sin embargo, otras menos comunes;

pero que también pueden emplearse para representar conjuntos difusos son: la forma de S (Figura 14.c), la forma de PI (Figura 14.d) y la forma de beta (Figura 14.e).

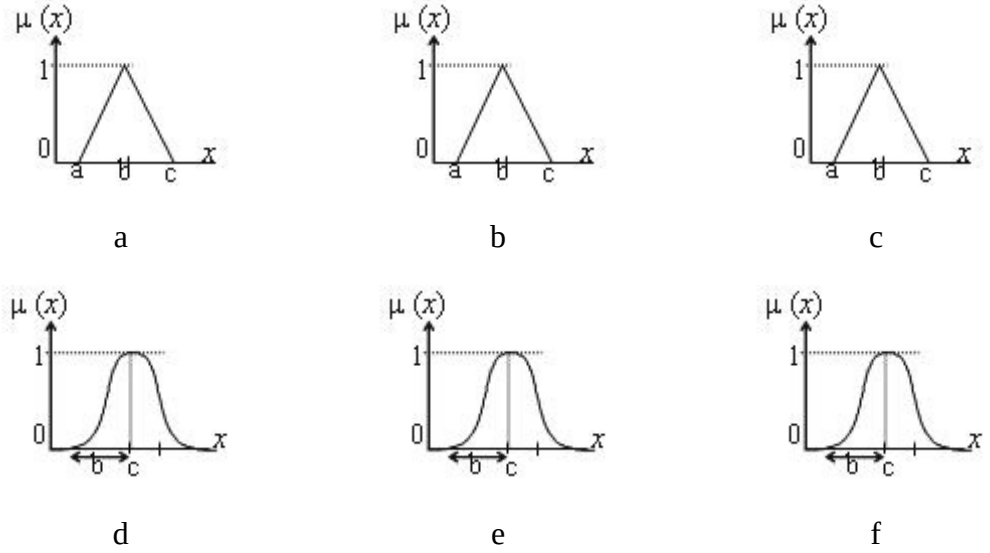


Figura 14. Funciones de pertenencia a) triangular, b) trapezoidal, c) forma de s, d) forma de pi, e) forma de beta, f) gaussiana [56].

1.1.4.3 Mecanismo de inferencia difusa

El padre de la lógica difusa fue el matemático Lotfi Zadeh de la Universidad de Berkeley en el año de 1965 [57], [58]. A partir de esta teoría surgieron dos propuestas para la creación de sistemas de inferencia difusa (*FIS*, por sus siglas en inglés) se han propuesto dos modelos ampliamente usados, esto es la propuesta hecha por Mamdani en el año de 1975 [59] y por Takagi-Sugeno-Kang (*TSK*) en el año de 1985 [60].

El modelo de inferencia Mamdani es catalogado como un método de máximos y mínimos al utilizar los operadores Y (*AND*) y O (*OR*) [58], [61], donde se aplica un control basado en un conjunto de reglas lingüísticas [2], [62] como un sistema de reglas Si-Entonces (*If-Then*) [54]. Un ejemplo de este tipo de inferencia sería: Si la temperatura es baja y la humedad es baja entonces apaga el calefactor.

En cambio Takagi-Sugeno-Kang se basa en obtener el valor del conjunto clásico por medio del peso promedio ponderado y la aplicación de una serie de funciones lineales [62]. Este método es una alternativa del modelo Mamdani FIS que es preferido por ser un método computacional flexible y eficiente que trabaja con sistemas más complejos en comparación al anterior método [54], [63].

En la Tabla 4 se presenta una comparación entre los modelos mencionados en esta sección, donde se detalla sus principales diferencias.

Tabla 4. Diferencias entre los modelos de inferencia Mamdani y Sugeno [64].

Métodos	Antecedente	Resultante	Defuzzificación
Mamdani	Conjuntos difusos	Conjuntos difusos	Centroide
Sugeno	Conjuntos difusos	Ecuación lineal constante	Promedio ponderado

1.1.4.4 Base de reglas difusa

Como se ha mencionado con anterioridad en el modelo de inferencia Mamdani, las reglas trabajan en el formato lingüístico de Si-Entonces que también puede ser representado en una matriz como se muestra en la Tabla 5. Es necesario comprender que las reglas son las que permiten al motor de inferencia determinar su grado de precisión, debido a que ocurriría un error si faltase alguna.

Tabla 5. Ejemplo de reglas basadas en el Mamdani fis.

Luz	Temperatura	Estado
<30	< 20	Prendida
	<35	Medio prendida
	<100	Medio prendida
<70	< 20	Medio prendida
	<35	Medio prendida
	<100	Apagada
<100	< 20	Medio prendida
	<35	Medio prendida
	<100	Apagada

1.1.4.5 Defuzzificación

Es la última parte del proceso del controlador difuso que es la encargada de convertir los resultados obtenidos del motor de inferencia a valores del conjunto clásico [1], [8], [55]; es decir, que los resultados obtenidos deben tener como resultado un número que real a partir del cual se aplican acciones de control sobre el sistema.

Para llevar a cabo el proceso de defuzzificación es necesario aplicar un método particular. En este sentido, se han propuesto varios métodos en la literatura tales como: el método del centroide, de bisectriz, y masados en máximos y mínimos. En la Figura 15 se muestran los valores a considerar para calcular el valor defuzzificado de una variable fuzzificada. [65].

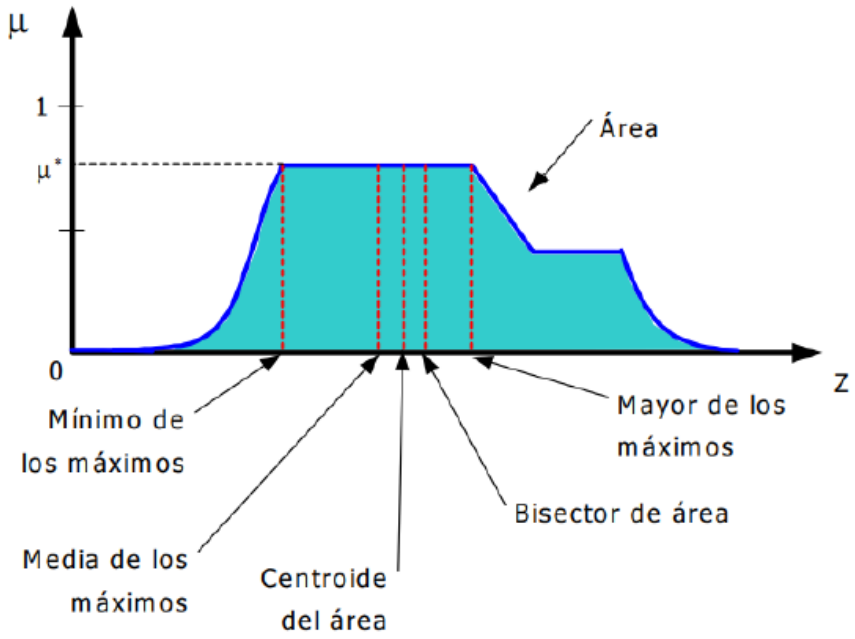


Figura 15. Métodos de defuzzificación [54].

En primero lugar, el método del centroide, es el método más utilizado a la hora de hallar el valor defuzificado utilizando el modelo Mamdani FIS y utiliza la fórmula (1) [8]. De manera general, consiste en encontrar el centro del área a través de la función de pertenencia c(z), la variable de salida 'z' y el dominio de la integral [66].

$$z = \frac{\int \mu\, c(z) * \ z * dz}{\int \mu\, c(z)\, dz} \tag{1}$$

En segundo lugar, se encuentra en método de bisectriz. Este método consiste en separar un área de una función de pertenencia en dos mitades de proporciones iguales, donde el valor de alfa representa el mínimo de x y el valor de beta el valor máximo de x. Todo esto es representado en la formula (2) [67], [68].

$$\int_{\alpha}^{x^*} \mu_A(x)\, dx = \int_{x^*}^{\beta} \mu_A(x)\, dx \tag{2}$$

En tercer lugar, se encuentra el método del peso promedio, que se utiliza en el modelo TSK FIS [64]. El método consiste en calcular el peso de cada función de pertenencia que sean de igual simetría para luego promediar los valores y obtener un resultado como se aprecia en (3).

$$x^* = \frac{\sum \mu(x).x}{\sum \mu(x)} \tag{3}$$

Finalmente, los métodos máximos se basan en hallar el valor máximo de la función de transferencia que tenga una proporción superior a los demás, donde se considera tres métodos a los que son aplicables como el máximo central (*MOM*, en sus siglas en inglés), y Máximo más pequeño (*SOM*, en sus siglas en inglés) y el Máximo más grande (*LOM*, en sus siglas en inglés), y estos aspectos se aprecian con claridad en la Figura 15 [54], [66], [68].

1.1.4.6 Herramientas

Para la creación de un sistema de control difuso, es necesario implementar una herramienta que permita construir el modelo del sistema de control. Las herramientas que se presentan a continuación están categorizadas como las más populares y usadas por los investigadores de esta línea.

Toolbox de lógica difusa de Matlab

Es una herramienta muy popular utilizada por muchos ingenieros debido al sin número de funcionalidades que brinda la aplicación tales como "cajas de herramientas desarrolladas profesionalmente para procesamiento de señales e imágenes, sistemas de control, comunicaciones inalámbricas, finanzas computacionales, robótica, aprendizaje profundo e inteligencia artificial, y más" [69].

De todas las herramientas que tiene Matlab, la caja de herramientas de lógica difusa (*Fuzzy Logic Toolbox*) es la encargada "de modelar comportamientos complejos del sistema mediante reglas lógicas simples y, posteriormente, implementar estas reglas en un sistema de inferencia difusa" [70].

Java

En su página oficial la define como un “lenguaje de programación y una plataforma informática comercializada por primera vez en 1995 por Sun Microsystems” [71], donde en la actualidad es muy famosa por ser independiente en portabilidad para el desarrollo de aplicaciones web y de escritorio [72]. Otra definición seria la siguiente, presentada en el libro escrito por Joyales Aguilar y Zahonero Martínez [73] donde se lo define como “un lenguaje de programación orientada a objetos, independiente de la plataforma (neutra), seguro y de más facilidad de aprendizaje que C++”.

La librería utilizada para el desarrollo de controladores difuso es jFuzzyLogic de código abierto, desarrollada por Pablo Cingolani basado en el estándar de lógica difusa definido por la Comisión Electrotécnica Internacional, con la intención de proporcionar un complemento utilizable para la plataforma independiente de Java [72].

Python

Al igual que Java, Python es uno de lenguajes de programación que están en tendencia en la actualidad. Esto se debe a que “Python es un lenguaje multiplataforma cómodo, flexible, potente y fácilmente extensible, ideal tanto para programar pequeñas soluciones como para acometer grandes proyectos informáticos” [74]. La librería utilizada es *skfuzzy*, la cual brinda un conjunto de herramientas de lógica difusa para Python [75].

1.2 Antecedentes

En la presente investigación se utilizaron diferentes artículos recuperados de bases de datos documentales de gran realce que son reconocidas por parte de la comunidad académica como IEEE xplore, Scopus y ACM. La búsqueda de los artículos ser realizó mediante el uso de la siguiente cadena de búsqueda ("fuzzy controller") AND ("smart" OR "intelligent") AND ("home" OR "building"), de la cual la mayoría de los artículos recuperados fueron encontrados en Scopus e IEEE Xplore mediante la aplicación de filtros como el título, resumen, palabras clave.

También se aplicó una restricción en el periodo de publicación de manera que se contemplaron únicamente estudios de los últimos cinco años (2016 hasta el presente), esto con la finalidad de que se identificaran antecedentes actuales. De la totalidad de los

artículos encontrados, se seleccionaron 6 artículos que se han organizado en base a dos criterios, esto es, el alcance de la investigación y el tipo de herramienta que se utilizó para construir el sistema difuso para el control de hogares inteligentes.

El hecho de que se presentan estudios elaborado en su mayoría con Matlab, no quiere decir que no existan más herramientas para crear sistemas de control difuso, de hecho, se ha evidenciado el uso de otras herramientas compatibles con los lenguajes de programación como Java y Python, pero estos últimos no han sido empleados para crear controladores difusos orientados a la gestión del confort como es de interés para esta investigación.

En un primer estudio propuesto por Sansyzbay y Orazbayev [76] se ha creado un controlador difuso para la supervisión de la temperatura en habitaciones de interiores ya sea en el caso de una casa o un departamento, mediante el control del parámetro de la temperatura para accionar la refrigeración o la calefacción del aire acondicionado. A partir de los resultados obtenidos del estudio es posible la creación y simulación de un sistema de control en Matlab, además se garantiza que el sistema de control inteligente de microclima es muy efectivo. Los autores proponen la implementación de más electrodomésticos climáticos para trabajos futuros.

A continuación, un segundo estudio realizado por Zhi et al. [77] tiene un enfoque similar al estudio anterior [76] basado en el control de confort en interiores, pero con la diferencia que en el entorno aplicable es un gimnasio que utiliza varios dispositivos para controlar el estado del ambiente para los clientes. Para la construcción del controlador de control los autores se enfocaron en el monitoreo de la calidad del aire a través de los parámetros del CO_2 y el PM2.5 que son pequeñas partículas de polvo, donde ambos son contaminantes que afectan a la salud pulmonar del ser humano. Para resolver dichos eventos durante el transcurso en el que los clientes realizan ejercicio, es necesario utilizar un ventilador y un limpiador del aire para ambientar el estado del aire. Como resultado se obtuvo que los ocupantes se sintieron a gusto con el estado del ambiente dentro del gimnasio durante la ronda de los ejercicios.

Un trabajo similar es posible encontrar en la investigación propuesta por Roy et al. [4] donde tiene la noción de integrar servicios web con IoT para monitorear y automatizar el control de los dispositivos inteligentes conectados en un hogar domótico a través de Internet. Se desarrolló una interfaz web con PHP para que el usuario pueda administrar

el control de las luces y tener conocimiento del estado del hogar, la obtención de los valores es gracias a los sensores como el sensor DHT11 que es un sensor de temperatura y humedad, y el otro que es un sensor de gas. La información recolectada de los sensores se aloja en una base de datos con MySQL, donde mediante el uso de la temperatura y humedad se quiere regular la velocidad del ventilador en las diferentes habitaciones. Para futuras mejoras en la investigación, se planteó realizar cambios en la interfaz, al igual que la adición de sensores de reconocimiento facial para la seguridad, control de los servicios por medio de la voz y la optimización de la energía.

En cambio, la investigación propuesta por Dimitroulis y Alamaniotis [16] está centrada en la implementación de un sistema de control energético en una zona residencial de edificios, que mediante el monitoreo de los parámetros de la energía solar y energía eólica en relación al costo de facturación por hora, genera que se minimice el consumo de energía eléctrica así como el costo por la energía utilizada por los dispositivos de confort. Se puede observar que en comparación con el anterior estudio planteado en [4], que se centraba en la implementación de algunos dispositivos climáticos, éste se centra en una de las mejoras que se habían planteado este grupo de investigadores que sería el control energético. Los resultados hallados por parte del aplicativo durante el mes de enero de 2019 proyectan una reducción del 7.05 % de la factura de energía mensual, por lo tanto, se concluye que se ha tenido éxito en su construcción.

En un quinto estudio propuesto por Prasad Sharma y Baine [78] propone realizar la creación de un controlador energético igual que el estudio propuesto en [16]; pero con la diferencia de que se aplica en la regulación de una batería de una vivienda con la intención de que sea posible utilizar simultáneamente todos los tipos de energía de entrada. La mecánica del controlador se basa en la utilización dos variables de entrada las cuales son la energía requerida que es la diferencia entre el consumo energético de la vivienda y de la energía solar suministrada, además del estado de cambio de la batería y, por último, una variable de salida que controla el estado de la batería Batt CMD para alcanzar la energía deseada. Por lo tanto, se obtuvo como resultado la obtención de un buen administrador de carga máxima y desplazamiento en el hogar, entonces el problema de si la batería se ha descargado o no, ya no presentaría una amenaza critica. Para futuros trabajos, los autores proponen aplicar diferentes baterías de diferentes marcas y precios para obtener buen control de la energía de las baterías.

Finalmente, un sexto estudio que fue propuesto por Carbonare et al. [61] presenta la construcción de un controlador de ventilación para la protección del moho, el ambiente saludable de interiores y el consumo energético. Este controlador fue elaborado mediante el lenguaje de programación Python, donde se utilizó la librería PyFMI que proporciona una interfaz para la planificación de estrategias, el control del algoritmo de procesos y el controlador (*driver*) para EnergyPlus que es una plataforma para la simulación del edificio del caso de estudio. Esta investigación utiliza como parámetros de entrada el CO_2 y el RH, y como variable de salida la velocidad del ventilador para controlar la calidad del aire. Como resultado, después la evaluación del controlador en simuladores de distintos programas informáticos se pudo concluir que presenta un ahorro energético del 25% y una mejora 12% en cuanto al rendimiento en comparación a sistemas de ventilación famosos, además del excelente control de ambientación.

1.3 Fundamentación legal

La presente investigación se basa en la aplicación y regimientos de las siguientes normas y leyes: Constitución de la República del Ecuador [79], la Ley Orgánica de Educación Superior (LOES) [80], la Ley de Propiedad Intelectual [81] y el Reglamento al Código Orgánico del Ambiente [82].

De acuerdo con la Constitución de la República del Ecuador en el Titulo VII de Régimen de buen vivir, Capitulo Primero de Inclusión y equidad, Sección octava de Ciencia, tecnología, innovación y saberes ancestrales; que en el Art. 385, menciona que "Desarrollar tecnologías e innovaciones que impulsen la producción nacional, eleven la eficiencia y productividad, mejoren la calidad de vida y contribuyan a la realización del buen vivir" [79]. Esta investigación favorece de tal manera que proporcione a la comunidad un nuevo sistema de control de confort que facilite la gestión de dispositivos a los ciudadanos, brindándoles un servicio que se agradable y amigable a sus necesidades.

Además, de acuerdo con la Ley Orgánica de educación superior en el Título I de Ámbito, objeto, fines y principios del sistema de educación superior; Capítulo 2 Fines de la educación superior, en el Art. 8.- Fines de la Educación Superior, describe en uno de sus apartados que "Fomentar y ejecutar programas de investigación de carácter científico, tecnológico y pedagógico que coadyuven al mejoramiento y protección del ambiente" [80]. Este estudio, tiene la intención de proporcionar una invención que resuelva una

problemática, fomentando la investigación tecnológica en virtud de colaborar en el desarrollo socio ambiental de los ciudadanos.

En la Ley de Propiedad Intelectual en el Libro I, en su Título I De los derechos de autor y derechos conexos, Capítulo I Del derecho de autor, Sección I Preceptos generales, el Art. 4 menciona que “Se reconocen y garantizan los derechos de los autores y los derechos de los demás titulares sobre sus obras” [81]. En consecuencia, de lo ya mencionado, el estudio cumplirá con todos los parámetros de autoría, respetando los lineamientos a fines del derecho de autor de los estudios previamente publicados y de los licenciamientos de las herramientas de software a usar para el desarrollo del sistema propuesto.

Finalmente, el Reglamento al código orgánico del ambiente, en el Libro IV Cambio climático, Título I Gestión del cambio climático, Capitulo VII Transferencia de tecnología y gestión del conocimiento, en la Sección 1ª Transferencia de tecnología, que en el Art. 709.- Criterios para la evaluación de necesidades tecnológicas, menciona qué los proyectos “contribuyan a la generación de beneficios sociales, económicos y ambientales adicionales a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero” [82]. Esta investigación quiere aportar al mejoramiento del estado ambiental de las zonas residenciales, proporcionando un buen control de los servicios de confort, al mismo tiempo crear un nivel de satisfacción económico y saludable.

CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Delimitación

En este proyecto de investigación se construyó un modelo para el ambiente de pruebas, que se basó en el clima de las regiones del Ecuador las cuales son frías, cálidas y húmedas. La investigación se realizó en un periodo de cinco meses, comprendido entre los meses de abril y agosto del 2021.

2.2 Tipo de investigación

Para la elaboración del estudio se consideró realizar una investigación con un enfoque mixto, es decir, que es tanto cualitativo como cuantitativo, según la naturaleza de los datos y la información.

El enfoque cualitativo "es aquella que utiliza preferente o exclusivamente información de tipo cualitativo y cuyo análisis se dirige a lograr descripciones detalladas de los fenómenos estudiados" [83]. La investigación utilizó este enfoque con la finalidad de conocer acerca de aquellas variables que intervenían durante la elaboración del estudio, como lo son las tecnologías de IoT que integrarán al prototipo propuesto (i.e., el proveedor de los dispositivos, el protocolo de comunicación), el método para la construcción del controlador difuso (i.e., el método de inferencia) y el nivel de confort (i.e., lumínico, térmico, seguridad).

En cambio, el enfoque cuantitativo "utiliza la recolección de datos para probar hipótesis con base en la medición numérica y el análisis estadístico, con el fin establecer pautas de comportamiento y probar teorías" [84]. Se planteó este tipo de investigación debido a que fue necesario medir y cuantificar los resultados que vayan a proveer los sensores y los valores de salida que el control difuso dé como resultado, todo ello fue necesario para poder estimar el nivel de confort y el tiempo de respuesta para la automatización de cada evento.

Además, en este estudio se utilizó la investigación experimental cuyo enfoque se basa en un estudio, donde "el experimento se puede replicar para comprobar la hipótesis" [85]. Por lo tanto, con este tipo de investigación se requiere encontrar la relación entre las

variables y el impacto que pueda generarse mediante la manipulación de las variables de la investigación (i.e., ambiente de simulación, confort, tecnologías open-source en hogares inteligentes).

2.3 Métodos de investigación

Relacionado a los métodos de investigación científica, se utilizó el estudio descriptivo por su nivel de profundidad y el método experimental por su nivel de manipulación de variables.

El estudio descriptivo "busca especificar propiedades y características importantes de cualquier fenómeno que se analice" [84]. Este método fue necesario describir todas las variables con sus respectivos indicadores, que fueron necesarios para el proceso de construcción y evaluación del prototipo que se va a elaborar en este estudio.

En cambio, el método experimental es un "experimento en que el efecto de todas o casi todas las variables independientes influyentes no concernientes al problema de investigación se mantiene reducido lo más posible" [84]. A través de este método se ejecutó la simulación virtual de un hogar domótico para descubrir las variables que generan mayor impacto durante el proceso evaluativo del prototipo.

2.4 Población y muestra

La presente investigación consideró como población a todas las variables que se encuentren relacionadas a la generación de confort en hogares inteligentes, pero a partir de una revisión bibliográfica se dio a conocer que esta temática abarca una gran diversidad que la componen, por lo tanto, se seleccionó como muestra a 22 variables que se encuentran distribuidas entre las tres categorías de confort que se basa este proyecto para la elaboración de los controladores difusos.

2.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para la prosperidad del estudio se planteó la incorporación de dos técnicas de investigación, con la que se abarcaron todos los puntos principales a estudiar y fomentar una buena investigación.

Para ello, la primera técnica que se utilizó fue una entrevista a un profesional en automatismos, con la intención de obtener información sobre aquellos aspectos necesarios para la construcción del ambiente de simulación, y a partir de ello comenzar con el desarrollo de los controladores difusos para la administración de confort en base a los sensores y actuadores que se utilicen en este proyecto. La entrevista constó de 10 preguntas abiertas para asegurar que las opiniones y respuestas del entrevistado según su punto de vista. El cuestionario es descrito en el Anexo 1, y se llevó a cabo durante la segunda semana del mes de julio de 2021.

Además, aparte de la opinión de un experto fue necesario realizar un diseño experimental que se encuentra ubicado en el Anexo 2, que facilitó la identificación de las principales variables que pueden influir en los resultados deseados al momento de testear el prototipo. Este proceso se llevó a cabo una vez fue construido el modelo en base a las respuestas obtenidas de la entrevista, y se ejecutó el 9 de agosto del 2021. Por último, se documentó todo el proceso desde la construcción hasta los resultados que se halló a través de esta técnica.

2.6 Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Para el análisis de la información se utilizó la estadística descriptiva, la cual “es una disciplina que se encarga de recoger, almacenar, ordenar, realizar tablas o gráficos y calcular parámetros básicos sobre el conjunto de datos” [86]. Esta técnica se utilizó para la gestión de los resultados cuantificables (i.e., ambiente de simulación, confort, tecnologías open-source en hogares inteligentes) que tuvo el estudio, estos fueron obtenidos a partir del diseño experimental para luego ser representados como cuadros y gráficos estadísticos.

2.7 Operacionalización de variables

En la investigación se estudiaron cuatro variables, las cuales son: tecnologías open-source en hogares inteligentes, control difuso, confort y ambiente de la simulación; donde cada una de las variables es descrita de forma detallada en la Tabla 6. En esta misma tabla se puede encontrar que, las primeras tres variables contienen tres dimensiones cada una a excepción de la cuarta variable que solo contiene una dimensión. También, cabe añadir que la primera variable presenta 14 indicadores, la segunda variable está conformada por cinco indicadores, la tercera variable un aproximado de 18 indicadores y, por último, la cuarta variable está compuesta por siete indicadores; generando así un total de 44 indicadores que se investigarán en este estudio.

Tabla 6. Cuadro de variables del estudio

VARIABLE	DESCRIPCIÓN	DIMENSIONES	INDICADORES	TIPO DE VARIABLE	DESCRIPCIÓN	UNIDAD DE MEDIDA
Tema de estudio: Tecnologías open-source en hogares inteligentes	Se determina las distintas tecnologías que se utilizan a la hora de crear simulaciones de hogares, que sean de código abierto.	Comunicación	Arquitectura	Cualitativa	Es el diseño donde se establece el entorno de comunicación y sus partes.	N capas, SOAP
			Estándares		Es aquel que permite la creación de una red, cuya principal característica es el alcance que tendrán los dispositivos conectados.	Wi-Fi, Bluetooth, Z-Wave
			Protocolos		Es el modelo de comunicación de mensajes que se utiliza para compartir la información con el servidor.	HTTP/HTTPS, MQTT, CoAP
		Dispositivos conectados	Compatibilidad con la nube		Determinar si los dispositivos que proveen información tienen la posibilidad de anexarlos a un ambiente virtual como es la nube.	Público, Privado, Hibrido
			Marca de proveedores		Quienes son los fabricantes de los dispositivos que se van a utilizar.	-
			Rango de transmisión	Cuantitativa	La distancia con la cual el dispositivo puede compartir la información recolectada.	Metros
			Compatibilidad con otras marcas	Cualitativa	Este indicador se ha creado con la finalidad de comprender, sí el dispositivo que se ha seleccionado es compatible con diferentes dispositivos de diferentes proveedores y funcione con regularidad.	Si, No

VARIABLE	DESCRIPCIÓN	DIMENSIONES	INDICADORES	TIPO DE VARIABLE	DESCRIPCIÓN	UNIDAD DE MEDIDA
			Tipos de sensores		Son las categorías de los dispositivos que se utilizan en los entornos domóticos.	-
		Plataforma	Acceso de la información		Son los medios por la cual se pueden obtener los datos.	-
			Compatibilidad con la nube		Determinar si los dispositivos que proveen información tienen la posibilidad de anexarlos a un ambiente virtual como es la nube.	Público, Privado, Hibrido
			Dispositivos electrónicos		Aquellos aparatos que estarán conectados de manera física o inalámbrica.	-
			Hardware de ejecución		Es el dispositivo o medio físico donde se instalará el sistema operativo	Arduino, Raspberry Pi
			Sistema operativo		Es el entorno virtual donde se ejecuta todos los procesos, que permite la comunicación con diversos dispositivos.	-
			Tiempo de operatividad	Cuantitativa	Es el período de tiempo funcionamiento de la plataforma que el usuario puede acceder.	Horas
Tema de estudio: Control difuso	Se utiliza para analizar y comprender cuales serían las herramientas y procedimientos esenciales.	Defuzzificación	Métodos	Cualitativa	Es el método de transformación de los valores difusos a reales.	-
		Fuzzificación	Funciones de pertenencia		Es la función que se utiliza para la representación del rango de las métricas de una variable difusa.	-
			Modelos de inferencia		Es el modelo de lógica difusa que se aplica para la interpretación de los valores de entrada del sistema.	Mamdani, TSK
		Herramientas	Lenguaje de Programación		Es el lenguaje con el cual se elabora el controlador difuso.	-
			Tipo de licenciamiento de software		Es el tipo de derecho legal que el creador permite a los clientes, para la utilización de la herramienta.	Libre, Comercial
Tema de estudio: Confort	Considera los puntos esenciales para que el entorno sea agradable para el ser humano.	Lumínico	Calidad de luz	Cuantitativa	Es el nivel de luminaria que es aceptable para el individuo.	Alta, media, baja
			Clima	Cualitativa	Es el evento meteorológico que sucede en un lugar en concreto.	-
			Hora del día	Cuantitativa	Es el periodo de tiempo que se da en un día.	Horas
			Posición de percepción		Es el ángulo por la que se percibe la luz.	Grados

VARIABLE	DESCRIPCIÓN	DIMENSIONES	INDICADORES	TIPO DE VARIABLE	DESCRIPCIÓN	UNIDAD DE MEDIDA
			Radiación solar		Es la cantidad de luz ultravioleta que sol emite.	Radiación ultravioleta
			Tiempo de ejecución		Es el tiempo que tarda el controlador en ejercer el tipo de confort.	Milisegundos
			Tipos de luz	Cualitativa	Es el tipo de fuente que emite la luz.	-
		Seguridad	Espacio	Cuantitativa	Es el lugar donde se aplica la seguridad, ya que dependiendo del lugar se establecen las medidas.	Interior, Exterior
			Número de incidentes		Cantidad de incidentes que se hayan producido.	Entero
			Tiempo de respuesta		Es el tiempo que tarda el controlador en ejercer el tipo de confort.	Milisegundos
		Térmico	Calidad del aire	Cualitativa	El grado de contaminación del aire es basado a los principales contaminantes que afectan a la salud del ser humano.	Alto, medio, bajo
			Clima		Es el evento meteorológico que sucede en un lugar en concreto.	-
			Estación		Se refiere a la temporada que se encuentra la región.	-
			Humedad Relativa	Cuantitativa	Es la cantidad de agua que hay en la atmosfera.	Porcentaje
			Radiación solar		Es la cantidad de luz ultravioleta que sol emite.	Radiación ultravioleta
			Temperatura		Es el nivel térmico de la atmosfera.	Grados Celsius
			Tiempo de respuesta		Es el tiempo que tarda el controlador en ejercer el tipo de confort.	Milisegundos
			Velocidad del aire		Es desplazamiento del aire de manera horizontal.	Metros por segundos
Tema de estudio: Ambiente de la Simulación	Para crear la simulación es necesario conocer los aspectos necesarios para la construcción.	Construcción	Cantidad de sensores conectados		La cantidad de dispositivos de IoT, que va a integrar cada estar conectados	Entero
			Cantidad de voltaje eléctrica		La cantidad de voltaje eléctrica necesaria para la conexión.	Voltios
			Conectividad de los dispositivos	Cualitativa	Es la forma de cómo se encuentran los dispositivos conectados de forma física.	-
			Distribución de los objetos		La posición donde se colocarán los objetos en una habitación.	-
			Electrodomésticos conectados		Son los electrodomésticos domésticos que pueden ser parte de los ambientes de IoT.	-
			Número de habitaciones	Cuantitativa	La cantidad de habitaciones que debe tener un departamento.	Entero
			Número de pisos		La cantidad de pisos que debe tener mínimo un edificio de confort	Entero

2.8 Normas éticas

El presente estudio a pesar de que solo llegue ser un prototipo virtual tiene un enfoque social y científico. Por el lado social, la investigación propone establecer un sistema de control de confort para el beneficio de la comunidad, especialmente para aquellas personas que integren IoT en sus hogares y necesiten un sistema de gestión más confiable. Por otra parte, incluye el enfoque científico porque se espera cumplir con los objetivos planteados y con la metodología propuesta anteriormente.

Además, en este estudio se considera el reglamento de grado de la PUCESE considerando el carácter universitario donde se realiza la investigación, el respeto de los derechos de autor por la recopilación de todos los trabajos que se han recolectado para la redacción de esta investigación, y el respecto de los derechos de licenciamiento de software en cuanto a las herramientas que se utilizaron para la elaboración del controlador difuso y el ambiente de IoT.

CAPÍTULO III: RESULTADOS

3.1 Metodologías y tecnologías para la gestión del confort en hogares y edificios digitales integrados

Para el cumplimiento del objetivo se realizó una investigación bibliográfica, del cual se identificó que el confort en entornos reales tiende a basarse en cuatro de los cinco sentidos del ser humano (tacto, vista, oído, olfato), y que existe un quinto que no es el gusto; sino la percepción que vendría ser una agrupación de los demás sentidos. De los cuatro sentidos mencionados, en la Figura 16 se encuentra los principales aspectos o características que se deben considerar para generar confort.



Figura 16. Tipos de confort [87], [88].

3.2 Comparación de las principales herramientas orientadas a la creación de controladores difusos compatibles con entornos de Internet de las cosas

De igual manera como en el apartado anterior, se realizó una revisión bibliográfica para realizar una comparativa de las principales herramientas actuales para desarrollar controladores difusos que fueran compatibles con las tecnologías de IoT (sobre todo que soportaran al menos uno de los protocolos de comunicación). Los resultados obtenidos se describen en la Tabla 7. De forma más detallada, la información que se presenta es acerca de las principales características de cada lenguaje de programación, donde se encuentran

semejanzas y diferencias en cada aspecto que se ha definido por el autor de este documento.

Tabla 7. Comparación entre los lenguajes de programación expuesto [89]–[91].

	Lenguajes de programación		
Características	**Matlab**	**Java**	**Python**
Tipo de compilación	Interprete	Compilador	Interprete
Tipo de escritura	Dinámico	Estático	Dinámico
Rendimiento	Lento	Rápido	Medio
Aprendizaje	Complejo	Complejo	Fácil
Verbosidad	Detallado	Detallado	Concisa
Popularidad	Poca	Media	Mucha
Plataforma	Independiente	Independiente	Dependiente
Documentación	Poca	Mucha	Media
Tipo de licencia	De paga	Gratis	Gratis

Se consideró utilizar Python como la herramienta óptima para el desarrollo de los controladores difusos, porque sus características en consideración de las otras son más convenientes para el caso de este estudio. Además, los controladores desarrollados en Python pueden ejecutarse en componentes del ordenador de placa única (*SBC*, por sus siglas en inglés) u ordenadores de un solo núcleo sin problema alguno.

3.3 Construcción de los controladores difusos de la investigación

3.3.1 Aspectos más relevantes para el establecimiento de un entorno de IoT en un hogar inteligente

A partir de la entrevista realizada con el experto en automatismos, se consideró algunos datos que fueron utilizados para el desarrollo de los controladores difusos. Como una introducción, el profesional define que el confort no es más que el lujo que una persona se pueda brindar hacia ella misma para satisfacer una necesidad.

Es necesario entender que tanto los pasillos, parqueaderos, patios, departamentos, ente otros; en un edificio residencial deben tener presente mecanismos que aseguren la seguridad y la iluminación, como por ejemplo el uso de la tecnología de RFID para tener control del acceso de los individuos a la residencia.

En cuanto a las habitaciones, la cocina debe priorizar en tener un sistema que alerte en caso de que algo quede encendido o haya un incendio, en los dormitorios el sistema

de iluminación no debe faltar y tampoco la ventilación/climatización del ambiente en la habitación. En la sala, al ser la zona más concurrida en el hogar, el control de las luces es necesario y también tener el control de un área de entretenimiento. Y, por último, el baño debe tener sensores que detecten si el piso se encuentra mojado para evitar malos percances por parte de los inquilinos.

Se debe priorizar el uso del Wifi a través de puntos de red en las habitaciones y los enrutadores (*routers*) en cada piso para la creación de la red de IoT, y deshacerse la idea de utilizar cables de red que obstaculizan y generar más gatos innecesarios. El protocolo recomendado para las comunicaciones entre los elementos de una red de IoT es MQTT, que puede ser utilizado por los dispositivos y actuadores de varias marcas entre las cuales destacan Hickvision y Sonofff, que son preferidas por el entrevistado.

Para finalizar el entrevistado afirmó que en caso de realizar un sistema que realice procesos automáticos, estas respuestas deben ser lo más rápido posible (1 segundo).

3.3.2 Diseño de los controladores difusos que se utilizaron

A través de la entrevista realizada, el autor de esta investigación se planteó la idea de construir 5 controladores difusos que cubran los tres aspectos del confort que se habían definido con anterioridad, esto, con la intención de resolver las necesidades que puedan ser gestionadas por dispositivos reales e incluso aquellos que se han añadido de forma virtual.

Para cada controlador se seleccionaron sus respectivos sensores que son los encargados de la suministración de los datos y los actuadores que son los encargados de ejecutar acciones que mejoren el estado del medio al que son ubicados dentro del entorno de IoT. En la Tabla 8 se describen las variables que usaron para la construcción de cada controlador difuso, las cuales representan un objeto que bien es un sensor o un actuador como se presenta en el cuadro.

Tabla 8. Variables de los controladores difusos

	Controladores				
Tipo	**Lumínico**	**Térmico**	**Seguridad**		
	Iluminación	**Control HVAC**	**Calidad de aire**	**Fuego**	**Ventilación**
Sensor	Luz exterior (0 – 250) lux	Temperatura (-9 - 45) ºC	No2 (0 - 150) ug/m^3	Tiempo (0 - 10) min	Estación (-9 - 45) ºC
	Luz interior (0 – 250) lux	Humedad (0 - 100) %	So2 (0 - 150) pm	Cambio temperatura (0 - 10) ºC	Humedad (0 - 100) %
				Cambio humedad (0 - 20) ºC	
Actuador	Lampara (0 – 250) lux	Calefactor (0 - 100)	AQI (0 - 500)	Gas (0 - 1)	Humificador (0 - 100)
	Cortina (0 – 1)	Aire acondicionado (0 - 100)		Alarma (0 - 1)	Extractor de aire (0 - 100)
				Rociador de agua (0 - 3)	

3.3.3 Relacionando los perfiles de usuario con los controladores creados

Una vez que se han definido los controladores, lo que sigue es crear una relación con los perfiles de usuario al cual se le aplican cada control que se ha desarrollado. A través de una revisión bibliográfica se han determinado varios factores que son necesarios para generar confort en un hogar inteligente con respecto a cada grupo de usuario como se presenta en la Tabla 9.

Tabla 9. Aspectos de confort según el perfil usuario [92]–[97]

Perfiles de usuario			
Alérgicos	Discapacitados	Tercera edad	Niños
Filtro de aire	Cortinas y persianas	Monitores de salud	Interruptores
Temperatura y humedad	Iluminación	Sensores de movimiento	Botón de pánico
	Termostato	Iluminación inteligente	Bloquear los pulsadores
	Timbre inteligente	Interruptores	Apagar la tv
	Cerradura inteligente	Cerradura inteligente	Iluminación inteligente
	Sensor de movimiento	Dispensador de pastillas	Despertador
	Humo	Sistemas de acceso	

	Fuga de agua	Iluminar escaleras	
	Puerta inteligente	Cerrar una llave de gas o de agua	
	Depende	Regar el jardín	

A partir de esta investigación, los grupos que tienen más necesidades son los adultos de la tercera edad y las personas que presentan algún tipo de discapacidad. Hay que hacer énfasis en este punto debido a que esta puede ser movilidad, visual o auditiva, y para cada una de ella los aspectos a desenvolver son necesarios. En el caso de esta investigación solo se consideró a las personas con discapacidad móvil, debido a que ciertos dispositivos son necesarios que se tengan de forma real mas no en una simulación como se ha realizado. Además, no se agregó la columna de los adultos puesto a que sus necesidades se encuentran entre las demás.

Por lo tanto, en la Tabla 10 se encuentran la asignación de controles que se ha considerado para cada perfil de usuario, junto con algunos controles adicionales que se encuentran en la columna roja (IF-THEN) debido a que aquellos controles no necesitan utilizar la lógica difusa para tomar decisiones y, por lo tanto, solo se agregaron dentro de las reglas en el OpenHAB.

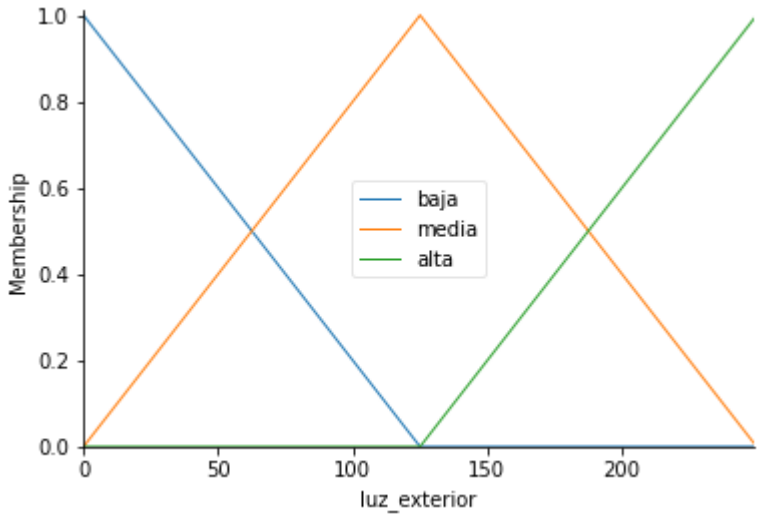
Tabla 10 Relación entre perfiles de usuario y controles

PERFILES DE USUARIO	**CONTROLES**							
	DIFUSO					**IF-THEN**		
	LUMÍNICO	**TÉRMICO**	**SEGURIDAD**					
	Iluminación	Control HVAC	Calidad de aire	Fuego	Ventilación	Cerradura inteligente	Puertas	Piso mojado
Niños	X	X		X		X		X
Adultos	X	X		X	X			X
Tercera edad	X	X	X	X	X	X	X	X
Discapacitados (movilidad)	X	X				X	X	X
Alérgicos		X	X		X			

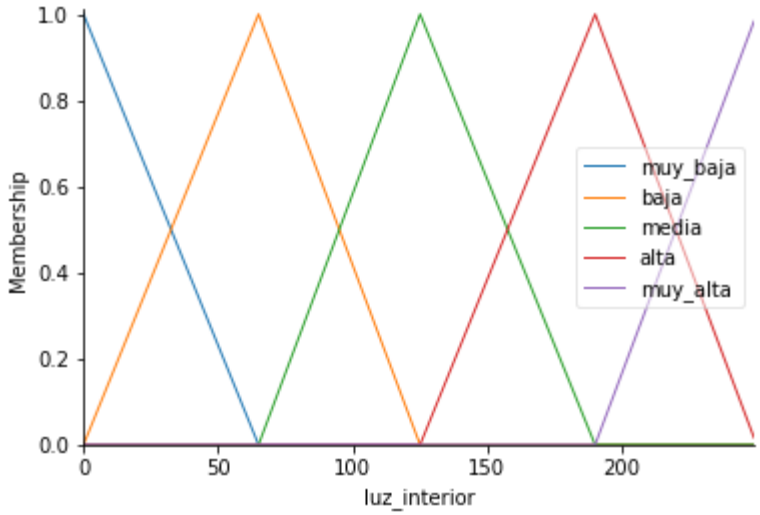
3.3.4 Conjuntos y controladores difusos

3.3.4.1 Controlador lumínico

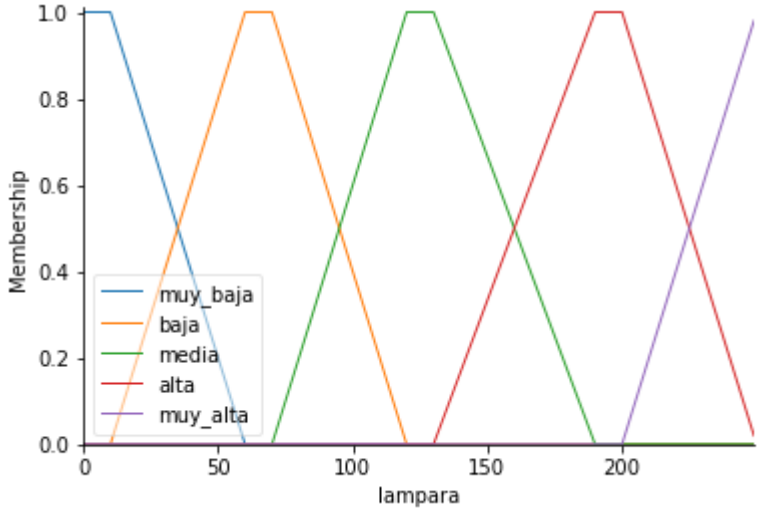
El diseño del controlador que se encuentra en la Figura 17 se basó en el estudio realizado por Panjaitan y Hartoyo [98], el cual tiene como variable de entrada la luz exterior y la luz interior, y como variable de salida la intensidad lumínica (*lux*) de lámpara. Estas variables se encuentran en un rango entre 0 a 250 lux por lo que al momento de agregarlas dentro de OpenHAB se utilizó un atenuador (*dimmer*). Como aporte el autor de este estudio decidió agregar la apertura de las cortinas que se encuentra entre 0 a 1 como una nueva variable de salida, con la intención de aprovechar la luz natural y evitar el consumo innecesario de energía eléctrica.



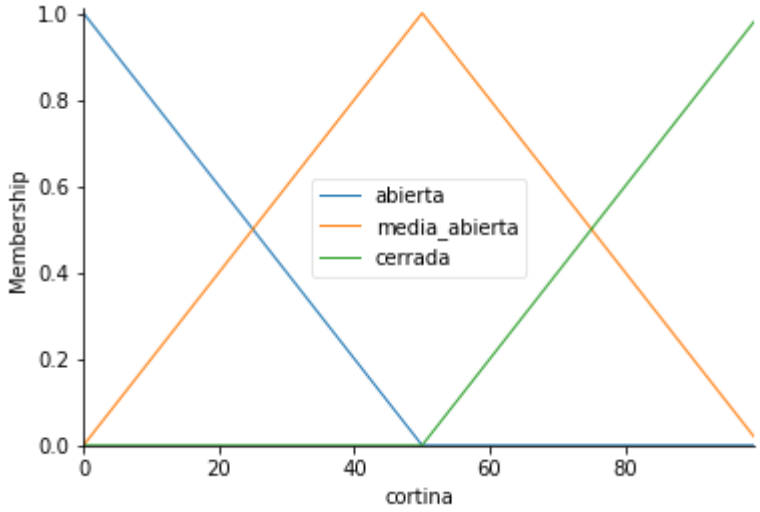
a



b



c



d

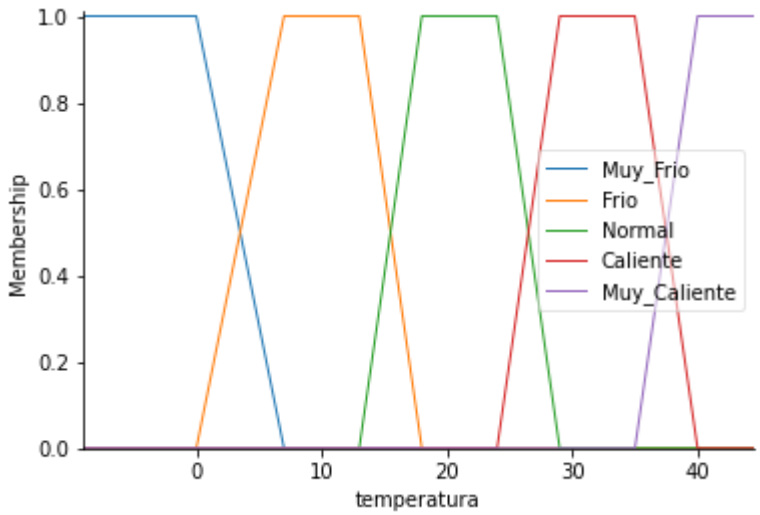
Figura 17. Conjuntos difusos del controlador lumínico a) luz exterior, b) luz interior, c) lampara, d) cortina

3.3.4.2 Controlador HVAC

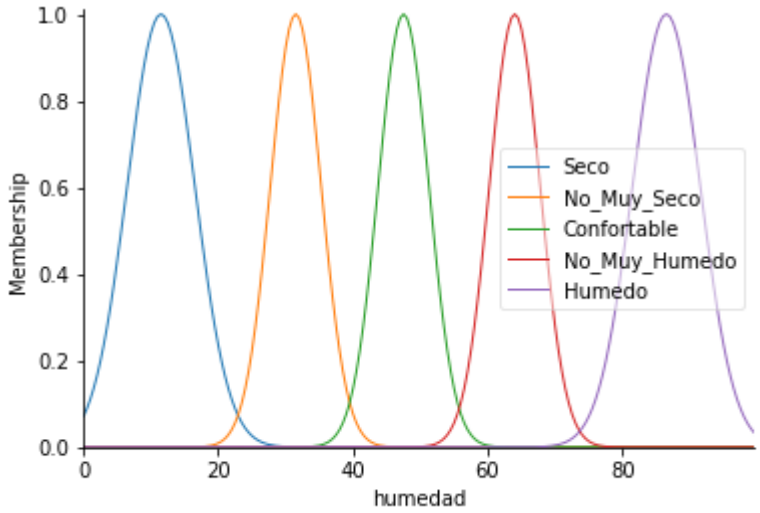
Para el desarrollo de este controlador se consideró como primera instancia diseñarlo utilizando como variables de entrada la temperatura y la humedad. Además, como variables de salida se consideró la velocidad de un ventilador y la apertura de las ventanas. Pero al final se decidió reemplazar el uso del ventilador por un HVAC que controle tanto el calefactor como un aire acondicionado, y esta idea fue inspirada en base a la investigación realizada por Das y Das [99]. Por lo tanto, se tuvo que realizar cambios con

relación al rango mínimo y máximo de las temperaturas de tal forma que esta concuerde con el rango establecido en Ecuador que se encuentra entre los -9 ºC hasta alcanzar un grado superior a los 35 ºC [100].

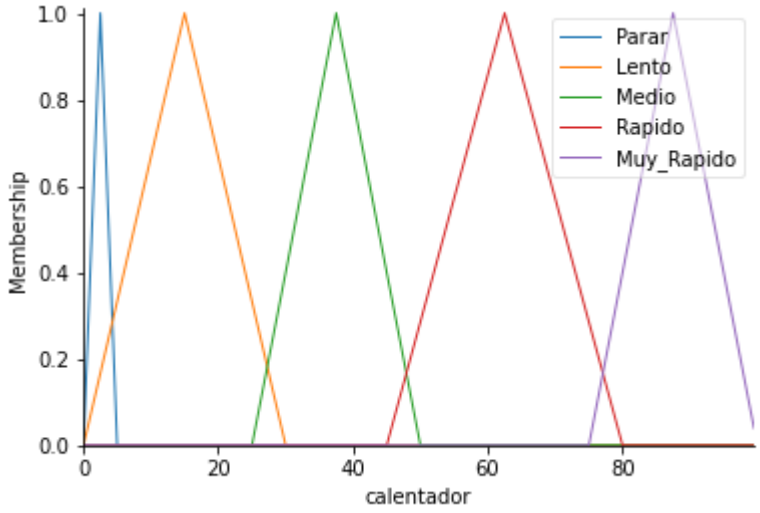
Como se visualiza en la Figura 18, se puede observar que el rango de la humedad, la velocidad del calefactor y del aire acondicionado se encuentran entre 0 a 100. Y solo la apertura de la ventana se encuentra entre 0 a 1.



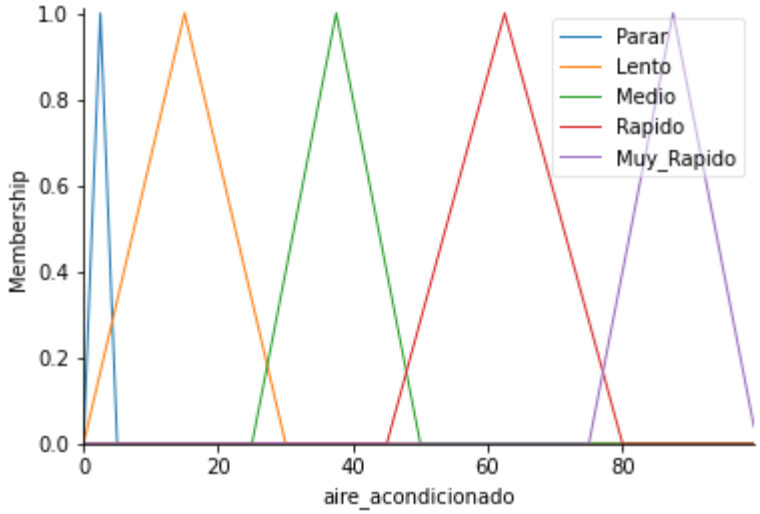
a



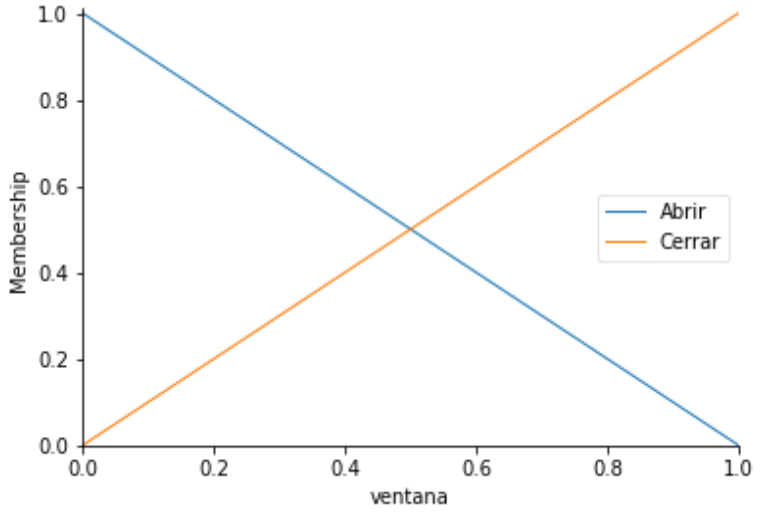
b



c



d

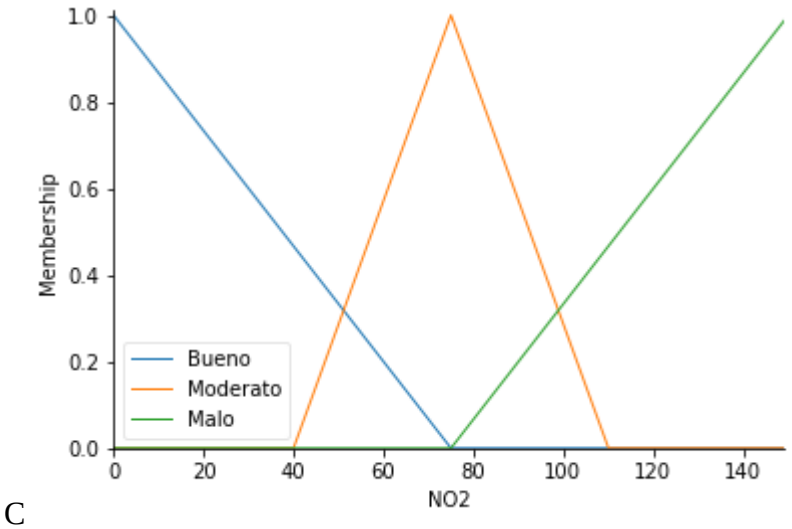


e

Figura 18. Conjuntos difusos del controlador HVAC a) temperatura, b) humedad, c) calentador, d) aire acondicionado, e) ventana.

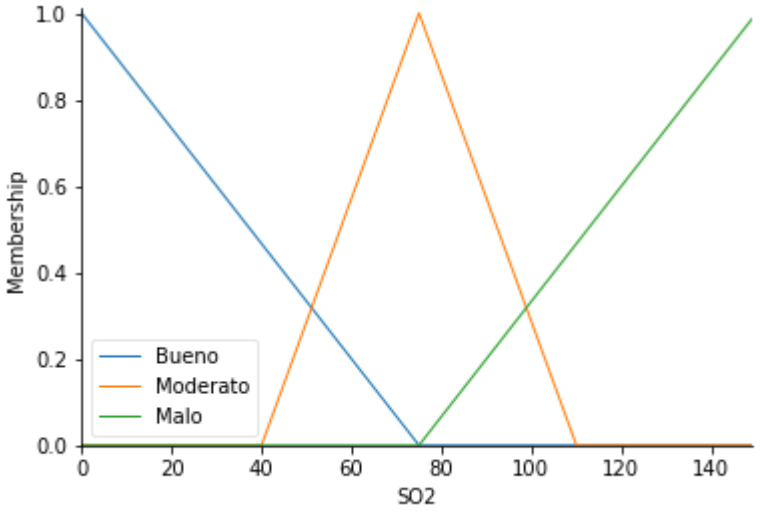
3.3.4.3 Controlador AQI

Para medir la calidad del aire (*AQI*, por sus siglas en inglés) se basó en el trabajo realizado por Riyaz y Pushpa [8], el cual se encuentra estructurado en la Figura 19 con dos contaminantes ambientales como variable de entrada las cuales son la NO_2 y la SO_2 que presentan un rango entre 0 a 150. También se incluyó como variable de salida el valor de la calidad de aire, que en el caso de este estudio se utilizó un rango comprendido entre 0 a 500.

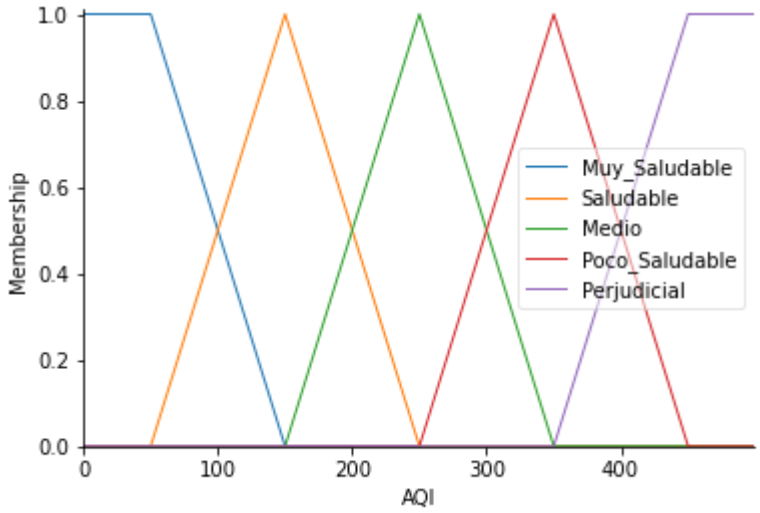


C

a



b



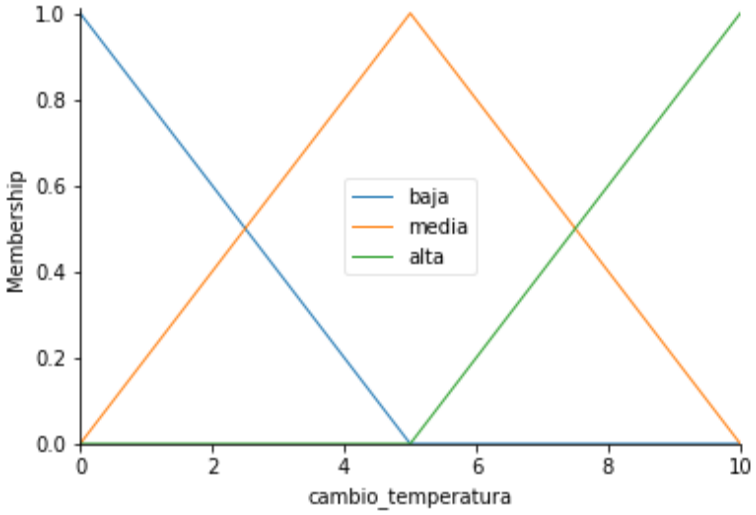
c

Figura 19. Conjuntos difusos del controlador AQI a) NO_2, b) SO_2, c) AQI

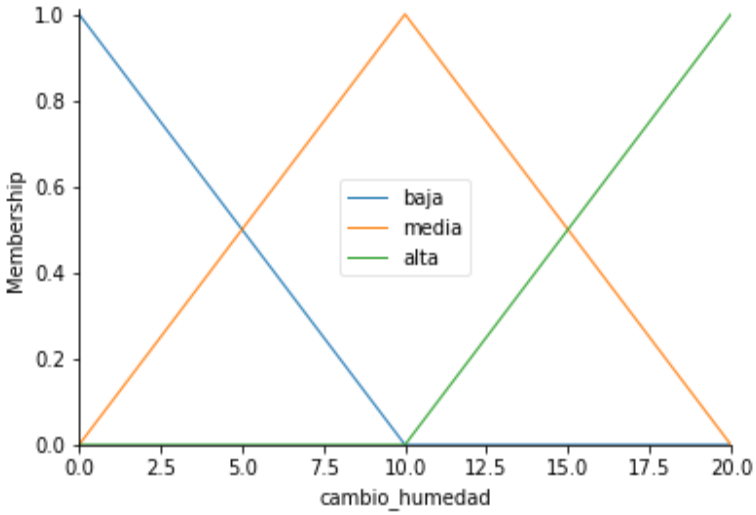
3.3.4.4 Controlador de fuego

Al momento de diseñar un controlador relacionado con la seguridad se tomó en cuenta el trabajo creado por Sarwar et al. [101], del cual se tuvo que realizar algunos cambios debido a que el rango entre sus conjuntos no presentaban relación alguna, lo cual generaba que se obtuvieran errores durante las pruebas.

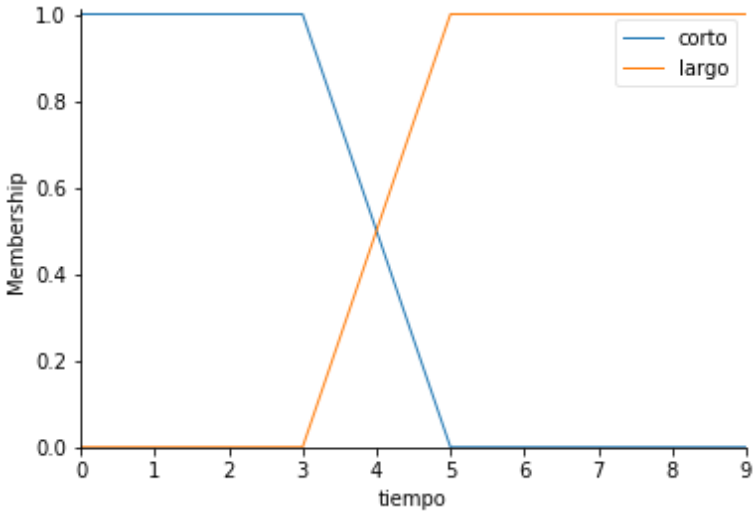
Los rangos de las variables del estudio son visibles en la Figura 20, entre ellas se encuentra el cambio de temperatura entre 0 a 10 ºC, el cambio de humedad entre 0 a 20 % y el tiempo en minutos entre 0 a 9 para ser las variables de entrada; como variable de salida el control del fuego entre 0 a 100, solo que el resultado de este último permite las acciones de tres actuadores que funcionan en OpenHAB. Si el valor es menor a 30 se activa la sirena, si es menor a 60 la sirena se mantiene activa, el gas se apaga y se activa el rociador de agua a un estado bajo. Si el resultado es mayor a 60 toma en cuenta las acciones de los actuadores ya mencionados con la diferencia que la salida del rociador de agua es alta.


1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
Membership
baja
media
alta
0
2
4
6
8
10
cambio_temperatura

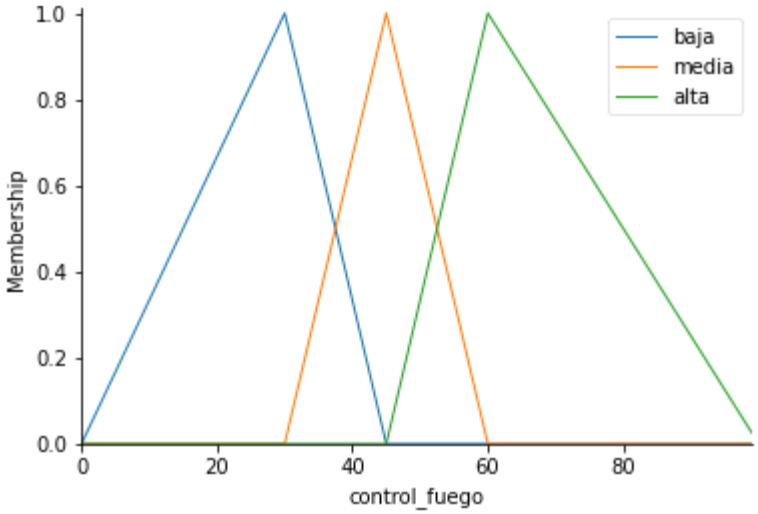
a


1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
Membership
baja
media
alta
0.0
2.5
5.0
7.5
10.0
12.5
15.0
17.5
20.0
cambio_humedad

b


1.0
0.8
0.6
0.4
0.2
0.0
Membership
corto
largo
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
tiempo

c



d

Figura 20. Conjuntos difusos del controlador de fuego a) cambio temperatura, b) cambio humedad, c) tiempo, d) control fuego

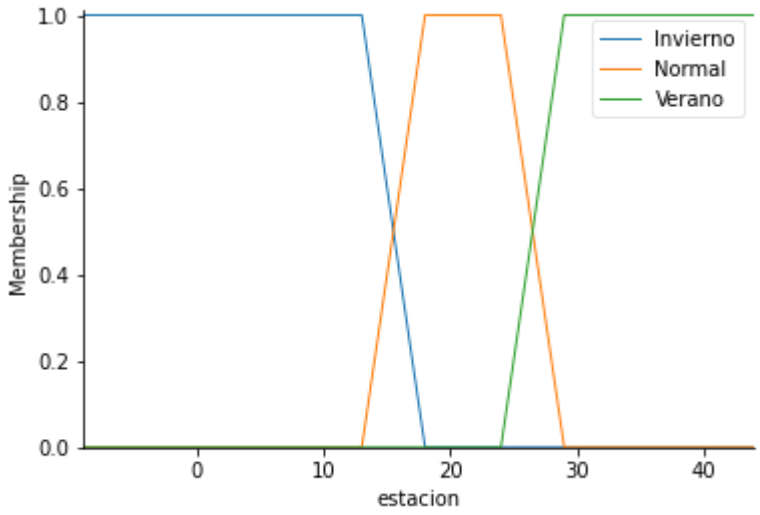
3.3.4.5 Controlador de ventilación

Para el diseño de este último controlador difuso se tuvo que trabajar con el mismo rango de las variables de entrada de la temperatura y humedad presentada en el controlador HVAC, con la diferencia de que este se encuentre relacionado con las estaciones del año. El inconveniente que se presentó fue que no se pudo encontrar un estudio que determine de manera exacta los rangos de temperatura para cada estación, pero se encontró el rango de las fechas de cada estación del año con respecto al Ecuador (
Tabla 11).

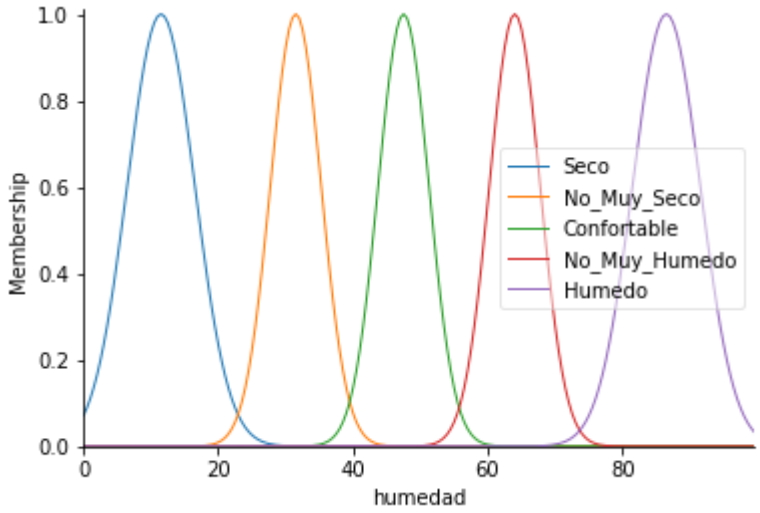
Tabla 11. Estaciones del año en Ecuador [102]

Estaciones del año	Meses	Días
PRIMAVERA	MARZO	1
	ABRIL	-
	MAYO	31
VERANO	JUNIO	1
	JULIO	-
	AGOSTO	31
OTOÑO	SEPTIEMBRE	1
	OCTUBRE	-
	NOVIEMBRE	30
INVIERNO	DICIEMBRE	1
	ENERO	-
	FEBRERO	28

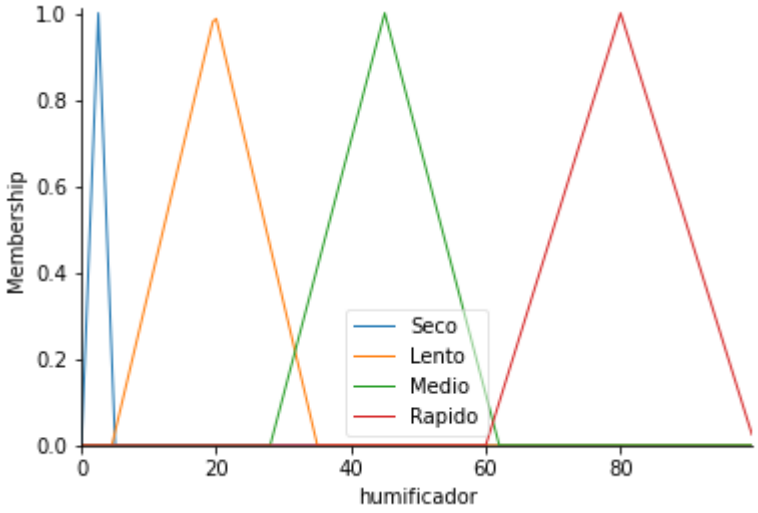
Por lo tanto, como se visualiza en la Figura 21 se decidió establecer que el valor de todas las temperaturas que estén clasificadas como frías y muy frías se agrupen como invierno, y se agrupo como verano aquellas temperaturas que sean calientes y superiores. Por último, se utilizó como variables de salida un humificador y extractor de aire que tienen valores entre 0 a 100, para que controle el estado de la humedad en interiores porque si no es controlable puede generar un impacto malicioso en la salud.



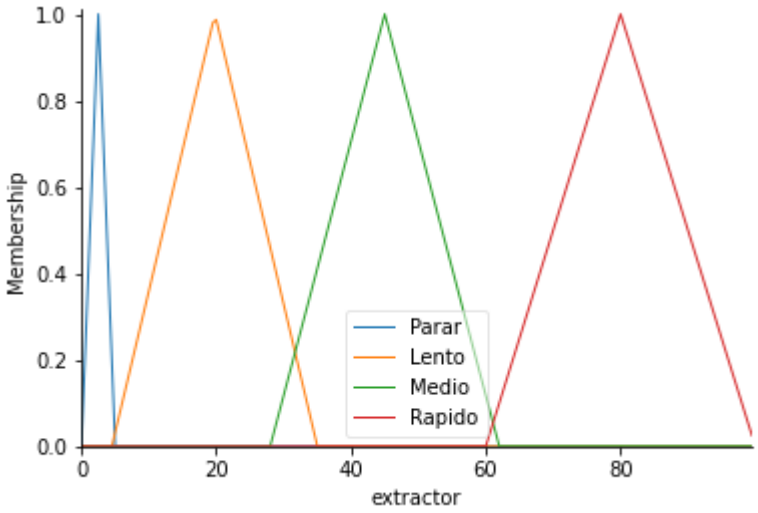
a



b



c



d

Figura 21. Conjuntos difusos del controlador de ventilación a) estación, b) humedad, c) humificador, d) extractor de aire

3.3.5 Desarrollo de los controladores difusos

Para el desarrollo de cada controlador difuso se utilizó la librería *skfuzzy* que es accesible mediante el uso del lenguaje de programación Python. Con esta herramienta se crearon cinco controladores los cuales ya se lo ha mencionado con anterioridad.

Para cada controlador fue necesario establecer un conjunto de reglas a la cual se aplica el proceso de la inferencia difusa. En el Algoritmo 13 se presenta una porción de código donde se visualiza la sintaxis de cómo se elaboró algunas de las reglas creadas

para controlar el índice de calidad del aire. Las reglas aplicadas para cada controlador difuso se describen en el Anexo 3.

Algoritmo 13. Generar reglas difusas para el controlador AQI

```
1.  #Generación de reglas
2.  rule1 = ctrl.Rule( (no2['Bueno'] & so2['Bueno']), aqi['Muy_Saludable'])
3.  rule2 = ctrl.Rule( (no2['Bueno'] & so2['Moderato']), aqi['Saludable'])
4.  rule3 = ctrl.Rule( (no2['Bueno'] & so2['Malo']), aqi['Medio'])
```

En cambio, en el Algoritmo 14 se presenta el código de una función llamada controlador que se encarga de realizar el proceso del controlador difuso desde la etapa donde se ingresan los datos, hasta cuando devuelve los resultados. En la primera línea se encuentran todos los atributos que se utilizan dentro de la función, para que el proceso comience primero se obtiene los estados de los objetos del tipo sensor desde OpenHAB a través de una función REST (línea 3), después este valor es evaluado por una condición con la intención de evitar consultas innecesarias y ahorrar tiempo (línea 6). Si la condición se cumple con éxito se obtiene los datos (línea 6-7), que serán utilizados en el controlador para el cálculo de la inferencia difusa (línea 10), y una vez terminado el resultado es enviado con otra función REST para cambiar el estado de un objetivo del tipo actuador en OpenHAB (línea 11). En el caso donde el valor del estado no cumpla con la condición (línea 6), entonces se devolverá un valor base al actuador en OpenHAB (línea 14).

Algoritmo 14. Interactuar con OpenHAB

```
1.  def controlador(css, endpoint, resource, cuarto, a, b, c, d):
2.      motion = Get_IoT_Data(endpoint, a, resource)
3.      print("\n----------::"+cuarto+"::----------")
4.      print("Movimiento: "+motion)
5.      if motion == "ON":
6.          no2 = float(Get_IoT_Data(endpoint, b, resource))
7.          so2 = float(Get_IoT_Data(endpoint, c, resource))
8.          print("NO2: \t"+str(a)+" ug/m3")
9.          print("SO2: \t"+str(b)+" pm")
10.         ctrl_aqi = prueba2(reglas, no2, so2)
11.         PyFuzzyControlloing(endpoint, d, resource, str(ctrl_aqi))
12.         print(f"AQI: \t{ctrl_aqi}")
13.     else:
14.         PyFuzzyControlloing(endpoint, d, resource, '0')
```

3.3.6 Objetos en el entorno de OpenHAB

En OpenHAB se ha construido un entorno compuesto de dispositivos IoT reales y virtuales, y un conjunto de reglas para la administración de un edificio. El edificio cuenta con cuatro pisos, donde desde la primera hasta la tercera planta son ocupados por los inquilinos. Cada piso cuanta con dos modelos de departamento, el primer modelo cuenta con una sala, una cocina-comedor, un dormitorio y un baño; en cambio el segundo modelo tiene lo mismo más un dormitorio adicional, las imágenes de la forma del edificio se encuentra en el Anexo 4. Los objetos se encuentran separados en dos grandes grupos, el primero son los sensores que están encargados de obtener la información del estado actual del entorno que lo rodea, y el segundo son los actuadores son los objetos encargados de brindar cambios en el medio.

En la Figura 22 se encuentran todos los sensores que se encuentran en las habitaciones de la sala y dormitorio de cada departamento, por ser lugares muy concurridos es necesario prestar más atención.



Figura 22. Objetos del tipo sensor en el entorno de OpenHAB

Por el contrario, en la Figura 23 se encuentran los actuadores que se utilizan en estas mismas habitaciones. Cabe resaltar que objeto tiene su propio icono y unidad de medida, de tal forma que se pueda identificar fácilmente.

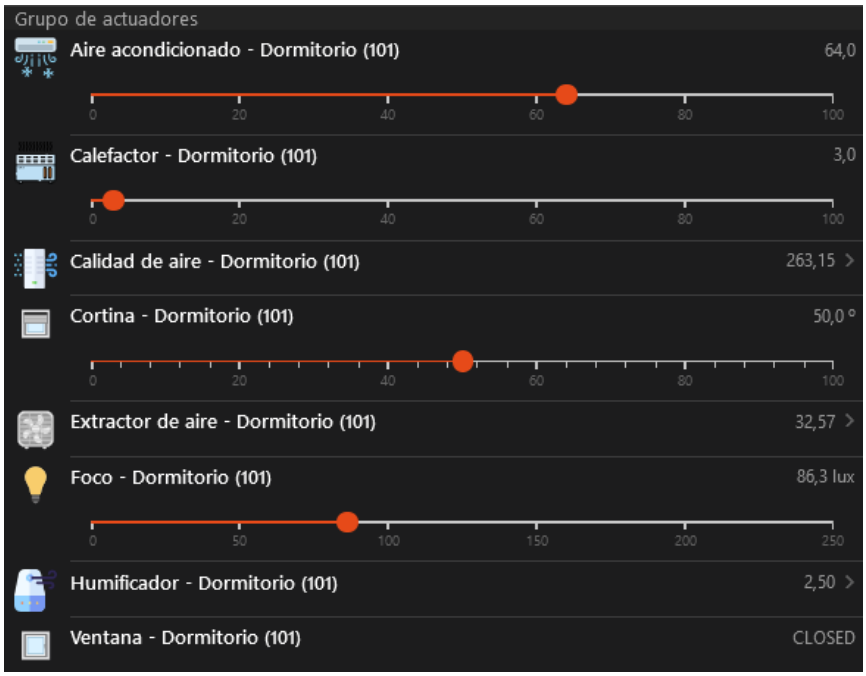


Figura 23. Objetos del tipo actuador en el entorno de OpenHAB.

En cambio, en la Figura 24 se encuentra una página creada en OpenHAB con la intención de poder administrar cada perfil de usuario en cada departamento.



Figura 24. Página para la selección de perfiles de usuario en el entorno de OpenHAB.

3.4 Proceso de ejecución del proyecto

Como se ha presentado hasta este momento, se tiene la noción acerca de las partes necesarias para la construcción de los controladores difusos y de las configuraciones que se realizaron en la plataforma de OpenHAB, pero es necesario añadir esta sección con la intención de explicar el funcionamiento del proyecto como se encuentra en la Figura 25.

Primero es necesario que el usuario ingrese a la plataforma ya sea desde la versión en escritorio o móvil, a partir de allí debe seleccionar a que categoría corresponde sus preferencias para establecer confort en el departamento designado. Una vez establecido hasta este punto, los controladores difusos realizan una petición a través del protocolo HTTP para obtener los datos, se realiza el proceso difuso para la toma de decisiones a partir de la información ingresada y el conjunto de reglas predefinidas.

Por último, los resultados obtenidos de cada controlador es necesario enviar dicha información utilizando el mismo protocolo de comunicación para que el usuario pueda apreciar los cambios a través de la interfaz gráfica de la plataforma.

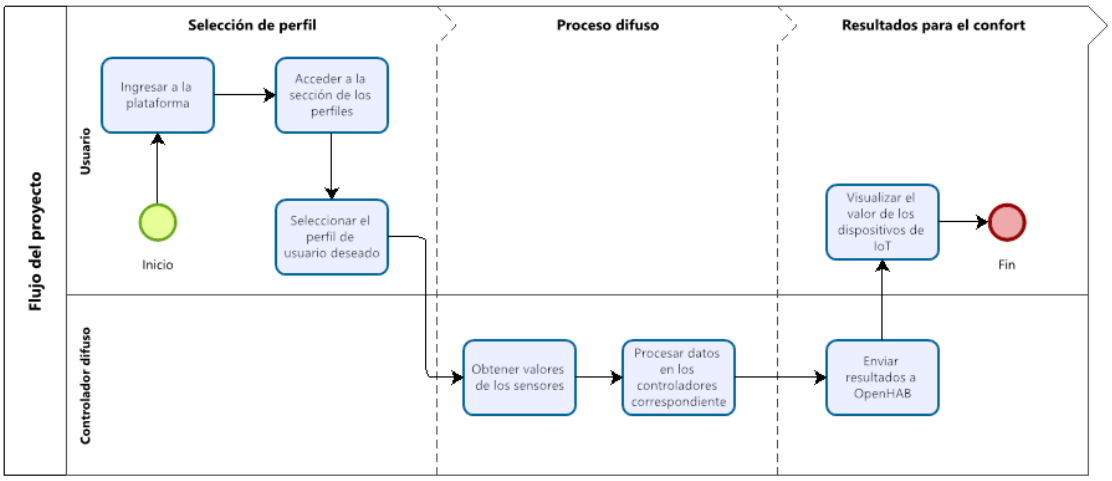


Figura 25. Flujo de procesos del proyecto.

3.5 Evaluación de la calidad del controlador difuso integrado en un edificio digital conectado simulado usando IoT

En esta última sección de los resultados se presenta el análisis que se obtuvo a través de un diseño experimental cuyas tablas se encuentran se encuentran en el Anexo 2. Se utilizó

una batería de prueba de 20 iteraciones con la intención de comprobar la precisión de los resultados obtenidos por parte de los controladores difusos, además del tiempo que demora cada interacción en el proceso de obtención y envió de datos en OpenHAB.

3.5.1 Análisis de la precisión de respuesta de los controladores difusos

Los resultados obtenidos de cada batería de prueba tuvieron una precisión muy alta, que se asemeja a los conjuntos de salida que se estableció para cada variable de salida, que a pesar de que algunos controladores tuvieron o bien más variables de entrada o de salida no presentó dificultad en relación con la precisión.

Debido a que se desarrolló un buen diseño en cuanto a los conjuntos difusos de cada controlador, evita que sucedan inconvenientes al momento de suscitar este tipo de pruebas. Además, la cantidad de reglas que se establece en cada controlador es relevante para que la exactitud no disminuya y genere resultados cruzados. Puede observar en el Anexo 3, los conjuntos que se utilizó por cada variable.

3.5.2 Análisis del tiempo de respuesta de los controladores difusos

Hay que resaltar que el tiempo obtenido por parte de la inferencia difusa como se presenta en la Tabla 12, cada controlador difuso tiene un tiempo de respuesta de 0.007 segundos para la tarea del análisis difuso, lo cual es considerado casi al instante. Por tal motivo, el tiempo considerado fueron: el tiempo de obtención de datos (GET) y el tiempo de envío (POST) de las peticiones para establecer acciones de control.

En la Figura 26 a excepción del tiempo de POST en el controlador de la calidad de aire, las demás presentan un tiempo superior a los tres segundos.

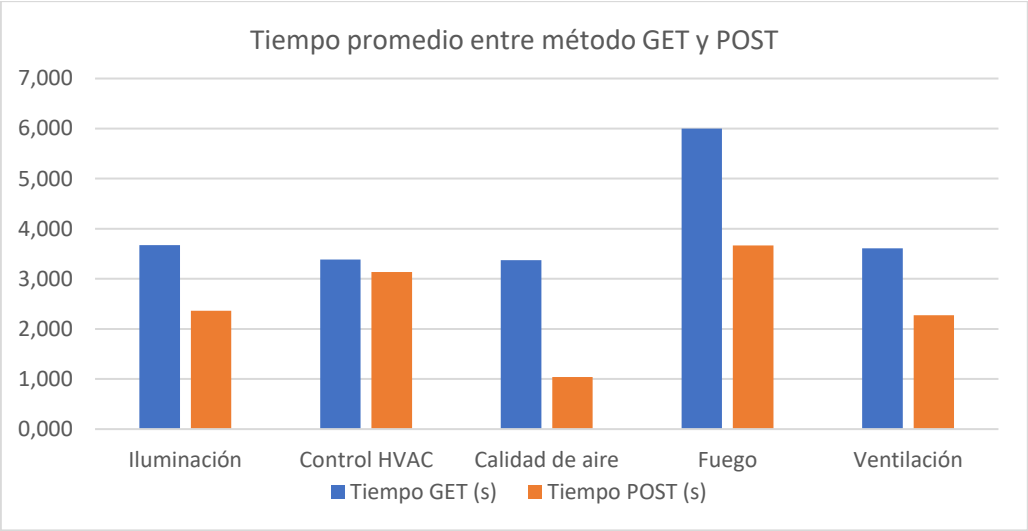


Figura 26. Tiempo promedio entre método GET y POST.

Una de las causas por la cual se dan estos resultados es debido a que cada controlador maneja una cantidad diferente de variables de entrada y de salida como se había presentado en la Tabla 8, por tal razón el control de fuego en comparación a los demás controladores en el tiempo del GET y POST es el que tarda más tiempo en obtener los datos y el envío de los resultados, con un tiempo promedio de 9.672 segundos.

Tabla 12. Tiempo promedio de respuesta entre cada controlador difuso

	Controlador	**Tiempo GET (s)**	**Tiempo Difuso (s)**	**Tiempo POST (s)**	**Tiempo Total (s)**
LUMINICO	Iluminación	3,673	0,007	2,365	6,045
TERMICO	Control HVAC	3,389	0,007	3,135	6,531
SEGURIDAD	Calidad de aire	3,373	0,005	1,038	4,415
	Fuego	5,998	0,008	3,666	9,672
	Ventilación	3,608	0,007	2,271	5,885
PROMEDIO		4,008	0,007	2,495	6,510

CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN

En la investigación realizada Sansyzbay y Orazbayev [76] se ha desarrollado un controlador difuso para la gestión de la temperatura en interiores de un domicilio, donde utilizan como actuadores las funciones calefacción y refrigeración de un HVAC. En cambio, en esta investigación a pesar de que se tuvo el mismo enfoque a la hora de crear el controlador térmico, se consideró a la humedad relativa junto a la temperatura en interiores como parámetros de entrada para mejorar la precisión del controlador. Además, la adición de una nueva salida en el controlador difuso como lo es la apertura de las ventanas permite que se evite el consumo de energía eléctrica innecesarios, que en el caso de una implementación real es un factor muy importante para tener en cuenta.

Eel estudio realizado por Zhi et al. [77] tuvo como objetivo desarrollar un controlador difuso que se encargue de la gestionar la calidad del aire en el interior de un gimnasio a través de los parámetros del CO_2 y el PM2.5. En comparación al controlador de calidad de aire (AQI) que se creó en esta investigación, se utilizó como variables de entrada para el controlador difuso los contaminantes NO_2 y SO_2 como una alternativa que permita obtener de forma óptima el estado del aire en los interiores de las habitaciones de los departamentos.

En la investigación propuesta por Roy et al. [4] se tuvo un enfoque similar a la que se propuso en esta investigación, la cual fue utilizar un ambiente visual que permita a los usuarios finales tener una mejor comprensión de los servicios que operan, que en el caso del trabajo de Roy et al. fue el control térmico de una habitación. En cambio, el autor de este escrito se basó en la integración de diferentes sensores que pueden ser compartidos entre los huéspedes de los departamentos del edificio y de actuadores en el entorno de OpenHAB. Con este entorno, fue posible administrar los servicios de una gran cantidad de departamentos de forma fácil y segura.

De las investigaciones realizadas por Dimitroulis y Alamaniotis [16] y Prasad Sharma y Baine [78], ambos trabajos tienen como objetico la creación de un controlador difuso que permita gestionar el uso de la energía eléctrica en los hogares inteligentes para reducir el consumo de energía eléctrica y por lo tanto que la tarifa por el uso del servicio disminuya de igual manera. Aunque no lo parezca, en esta investigación también se ha considerado el ahorro energético, pero no hasta al punto de buscar otras fuentes de

energías renovables que suplante el uso de energía eléctrica como en los trabajos presentados. El uso de diferentes controladores para cada tipo de servicio en un hogar inteligente facilita que solo se utilicen cuando sea necesario y que cuando no lo sea permanezcan desactivas o apagados, y de esta manera es posible ahorrar energía. Además, como se mencionó anteriormente con el controlador térmico con el uso de la ventana para evitar encender el HVAC, el controlador de iluminación tiene como salida adicional el control de las persianas permitiendo que se utilice la luz natural en vez de la artificial en cada momento.

Finalmente, en el estudio que fue propuesto por Carbonare et al. [61] se utilizó la librería PyFMI para crear un controlador difuso que administre las acciones de un ventilador, en comparación a la investigación realizada se aplicó la librería skfuzzy para la construcción de los controladores. Hay que resaltar que se utilizan diferentes librerías a pesar de utilizar el mismo lenguaje de programación (Python). Otro punto para considerar es que en la mayoría de los trabajos presentados en este estudio optan por utilizar Matlab como herramienta para el desarrollo de los controles y, al igual que Java y Python la aplicación de estos lenguajes programación en estudios similares son escasos.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

En esta investigación se presenta una particular metodología para clasificar el confort en un ambiente de IoT que se basa en los sentidos de los seres humanos, del cual se seleccionó tres aspectos para establecer un ambiente domótico en un edificio inteligente. Además, a través de una entrevista se pudo conocer sobre aquellos sensores y actuadores necesarios para brindar confort y se los relacionó con la metodología de confort investigada.

Se puede concluir que a través de una revisión bibliografía enfocada a las herramientas orientadas a la creación de controladores difusos, se determinó primero que a pesar de que Python no se encuentre presente en la mayoría de los trabajos que utilicen este tipo de tecnología, tiene un sinfín de características que apoyan en la utilización de esta. Conjuntamente, cabe destacar que todas las herramientas utilizadas en esta investigación tanto OpenHAB (para la creación del ambiente de IoT) como sweetHome (para el diseño del edificio) son gratuitas y de código abierto, y han sido seleccionadas porque permite la integración de mejoras y asesoramiento por parte de una gran comunidad de usuarios, además de evitar el gasto innecesario con herramientas que hacen la misma función.

Se construyó cinco controladores difusos que se encargaron de solventar las principales necesidades que se presentaron en esta investigación, como se ha mencionado anteriormente su utilizó Python como lenguaje de comunicación junto con la librería skfuzzy permitiendo que el proceso se desarrolle sin inconvenientes. Además, a través de la interfaz proporcionada por openHab la adición de los dispositivos y actuadores no se consideró un reto difícil.

Se evaluó la precisión y el tiempo de respuesta en cada proceso del controlador difuso, donde se pudo obtener una buena precisión en cuanto a los resultados obtenidos por cada controlador. En cuanto al tiempo de respuesta de la inferencia difusa fue un tiempo considerable como inmediato lo cual es muy bueno, en cambio al tiempo obtenido entre la comunicación de los controladores y los objetos del entorno de OpenHAB fueron superiores a los tres segundos. Las causas por la cual se da este tipo de resultado según el

autor de este escrito serían por la cantidad de objetos que utiliza el controlador difuso para establecer la comunicación, y posiblemente la velocidad del servicio de Internet que se utilizó.

5.2 Recomendaciones

Con el desarrollo de esta investigación permita la apertura a nuevos trabajos que se encuentren relacionada con esta temática que se ha presentado, en especial aquellos trabajos que se desarrollen en Sudamérica para el realce del uso de tecnologías en nuestro entorno cotidiano. Además, se espera que puedan mejorar aquellos aspectos que en esta investigación que tal vez el autor no supo cumplir en el momento y también mantener la investigación actualizada al contraste de las nuevas tecnologías que se produzcan en el futuro. En el siguiente enlace puede encontrar la información que se utilizó: https://bit.ly/39S5Wpk.

Se recomienda que, al momento de desarrollar un controlador difuso, se tenga primero la noción sobre que se va a realizar porque muchas veces esto no permite que la investigación avance, además que la elaboración de los conjuntos difusos para cada variable ya sea de entrada o de salida se encuentren relacionadas entre sí, para que en el momento en el que se asigne valores al controlador este no presente resultados con una mala precisión o directamente errores por una mala construcción.

Se recomienda que siempre se deba revisar la documentación de las herramientas que se utilice con anterioridad porque las librerías y las versiones pueden causar que el proyecto no genere como se ha esperado y surjan errores que no se conozca, en especial al utilizar el entorno de OpenHAB se tenga en cuenta que la versión 2.x.x no es igual a la 3.x.x, ya que esta última presenta una adicción y eliminación de algunas características que se encuentran en la vieja versión, como es en el caso del home builder que es un complemento que se puede descargar, pero que en la última versión se encuentra integrada en las páginas. Otro aspecto que se debe considerar es que los archivos que utiliza OpenHAB 3 se encuentran en formato JSON y los de la versión 2 están en formato Java.

Se recomienda que la investigación logre ser aplicada a un entorno real, ya que al estar la mayor parte simulada no se determina con exactitud la satisfacción que genere la

aplicación de los controladores en un usuario que utilicé dispositivos IoT. También que muchos sensores y actuadores que el autor pensó incluir dentro del proyecto no fueron posible agregarlos porque era necesario que fueran reales, como el uso de cámaras para el reconocimiento facial o de asistentes con voz como Alexa en el caso de los perfiles de usuario.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] H. Zhuang, J. Zhang, C. B. Sivaparthipan, y B. A. Muthu, «Sustainable smart city building construction methods», *Sustain.*, vol. 12, n.º 12, pp. 1-16, 2020, doi: 10.3390/SU12124947.

[2] L. Hang y D. H. Kim, «Enhanced model-based predictive control system based on fuzzy logic for maintaining thermal comfort in IoT smart space», *Appl. Sci.*, vol. 8, n.º 7, 2018, doi: 10.3390/app8071031.

[3] D. M. Jiménez-Bravo, Á. L. Murciego, D. H. de la Iglesia, J. F. de Paz, y G. V. González, «Central heating cost optimization for smart-homes with fuzzy logic and a multi-agent architecture», *Appl. Sci.*, vol. 10, n.º 12, 2020, doi: 10.3390/APP10124057.

[4] P. N. Roy, M. Armin, S. M. Kamruzzaman, y M. E. Hoque, «A Supervisory Control of Home Appliances using Internet of Things», *2nd Int. Conf. Electr. Comput. Commun. Eng. ECCE 2019*, pp. 1-6, 2019, doi: 10.1109/ECACE.2019.8679314.

[5] L. Yao, W. H. Lim, y C. C. Lai, «Self-Learning Fuzzy Controller-Based Energy Management for Smart Home», *Proc. - 2016 IEEE Int. Conf. Internet Things; IEEE Green Comput. Commun. IEEE Cyber, Phys. Soc. Comput. IEEE Smart Data, iThings-GreenCom-CPSCom-Smart Data 2016*, pp. 87-93, 2017, doi: 10.1109/iThings-GreenCom-CPSCom-SmartData.2016.41.

[6] F. Wahid, L. H. Ismail, R. Ghazali, y M. Aamir, «An efficient artificial intelligence hybrid approach for energy management in intelligent buildings», *KSII Trans. Internet Inf. Syst.*, vol. 13, n.º 12, pp. 5904-5927, 2019, doi: 10.3837/tiis.2019.12.007.

[7] S. Merabti, B. Draoui, y F. Bounaama, «A review of control systems for energy and comfort management in buildings», *Proc. 2016 8th Int. Conf. Model. Identif. Control. ICMIC 2016*, pp. 478-486, 2017, doi: 10.1109/ICMIC.2016.7804161.

[8] R. Riyaz y P. V. Pushpa, «Air Quality Prediction in Smart Cities: A Fuzzy-logic based Approach», *Proc. Int. Conf. Comput. Tech. Electron. Mech. Syst. CTEMS*

2018, pp. 172-178, 2018, doi: 10.1109/CTEMS.2018.8769195.

[9] Ekta y V. K. Garg, «Advance lighting and water pumping system using artificial intelligence», *PDGC 2018 - 2018 5th Int. Conf. Parallel, Distrib. Grid Comput.*, pp. 669-675, 2018, doi: 10.1109/PDGC.2018.8745742.

[10] S. Yordanova, D. Merazchiev, y L. Jain, «A Two-Variable Fuzzy Control Design with Application to an Air-Conditioning System», *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 23, n.º 2, pp. 474-481, 2015, doi: 10.1109/TFUZZ.2014.2312979.

[11] L. Ge, B. Liu, y T. Wang, «Improvement of surface temperature control system based on fuzzy adaptive PID algorithm», en *ACM International Conference Proceeding Series*, sep. 2019, pp. 368-373, doi: 10.1145/3366194.3366259.

[12] Y. Y. Ghadi, M. G. Rasul, y M. M. K. K. Khan, «Design and development of advanced fuzzy logic controllers in smart buildings for institutional buildings in subtropical Queensland», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 54, pp. 738-744, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.10.105.

[13] A. H. Abid y A. Hasan, «An approach for demand side management of non-flexible load in academic buildings», *2018 15th Int. Conf. Smart Cities Improv. Qual. Life Using ICT IoT, HONET-ICT 2018*, pp. 26-28, 2018, doi: 10.1109/HONET.2018.8551323.

[14] F. Wahid, M. Fayaz, A. Aljarbouh, M. Mir, M. Aamir, y Imran, «Energy Consumption Optimization and User Comfort Maximization in Smart Buildings Using a Hybrid of the Firefly and Genetic Algorithms», *Energies*, vol. 13, n.º 17, p. 4363, 2020, doi: 10.3390/en13174363.

[15] J. Flessner y M. Frenken, «Perception based method for indoor air quality Control», *2017 IEEE Int. Conf. Syst. Man, Cybern. SMC 2017*, vol. 2017-Janua, pp. 2034-2039, 2017, doi: 10.1109/SMC.2017.8122918.

[16] P. Dimitroulis y M. Alamaniotis, «Residential energy management system utilizing fuzzy based decision-making», *2020 IEEE Texas Power Energy Conf. TPEC 2020*, pp. 1-6, 2020, doi: 10.1109/TPEC48276.2020.9042571.

[17] R. A. Sowah, A. R. Ofoli, M. K. Tetteh, R. A. Opoku, y S. K. Armoo, «Demand side management of smart homes using OpenHAB framework for interoperability

of devices», *IEEE Int. Conf. Adapt. Sci. Technol. ICAST*, vol. 2018-Augus, pp. 1-8, 2018, doi: 10.1109/ICASTECH.2018.8506917.

[18] I. Froiz-Míguez, T. M. Fernández-Caramés, P. Fraga-Lamas, y L. Castedo, «Design, implementation and practical evaluation of an iot home automation system for fog computing applications based on MQTT and ZigBee-WiFi sensor nodes», *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, n.º 8, 2018, doi: 10.3390/s18082660.

[19] IECOR, «Aplicaciones de la Domótica (Usos, Funciones, Utilidades) - IECOR», *IECOR*. may 2017, Accedido: ene. 07, 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.iecor.com/aplicaciones-de-la-domotica/.

[20] G. A. Da Costa y J. H. Kleinschmidt, «Implementation of a wireless sensor network using standardized IoT protocols», en *Proceedings of the International Symposium on Consumer Electronics, ISCE*, 2016, pp. 17-18, doi: 10.1109/ISCE.2016.7797327.

[21] CISCO, «¿Qué es Wi-Fi? - Definición y tipos - Cisco», *CISCO*, 2020. https://www.cisco.com/c/en/us/products/wireless/what-is-wifi.html (accedido dic. 25, 2020).

[22] E. Pietrosemoli, «Wireless Standards for IoT: WiFi, BLE, SigFox, NB-IoT and LoRa», *ICTP*, 2017, [En línea]. Disponible en: http://wireless.ictp.it/school_2017/Slides/IoTWirelessStandards.pdf.

[23] K. K. Singh, A. Singh, K. Cengiz, y D. Le, Eds., *Machine Learning and Cognitive Computing for Mobile Communications and Wireless Networks*. Wiley, 2020.

[24] S. S. I. Samuel, «A review of connectivity challenges in IoT-smart home», *2016 3rd MEC Int. Conf. Big Data Smart City, ICBDSC 2016*, pp. 364-367, 2016, doi: 10.1109/ICBDSC.2016.7460395.

[25] A. Nikoukar, S. Raza, A. Poole, M. Gunes, y B. Dezfouli, «Low-power wireless for the internet of things: Standards and applications», *IEEE Access*, vol. 6, n.º c, pp. 67893-67926, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2879189.

[26] C. Játiva, «Estudio de la tecnología de identificación por radiofrecuencia (RFID), sus aplicaciones y la convergencia con el internet de las cosas (IoT)», 2016.

[27] S. Balaji, K. Nathani, y R. Santhakumar, «IoT Technology, Applications and

Challenges: A Contemporary Survey», *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 108, n.º 1, pp. 363-388, 2019, doi: 10.1007/s11277-019-06407-w.

[28] A. Giri, S. Dutta, S. Neogy, K. Dahal, y Z. Pervez, «Internet of things (IoT): A survey on architecture, enabling technologies, applications and challenges», 2017, doi: 10.1145/3109761.3109768.

[29] M. Kranz, «Why Industry Needs to Accelerate IoT Standards», *IEEE Internet Things Mag.*, vol. 1, n.º 1, pp. 14-18, 2018, doi: 10.1109/iotm.2018.1700011.

[30] P. Chen, *Standard for an architectural framework for the Internet of Things (IoT) - IEEE P2413*. 2016.

[31] T. Yokotani y K. Kawai, «Concepts and requirements of IoT networks using IoT Data Exchange Platform toward International standards», *2019 IEEE Conf. Stand. Commun. Networking, CSCN 2019*, 2019, doi: 10.1109/CSCN.2019.8931337.

[32] I. Sáez, «IoT: protocolos de comunicación, ataques y recomendaciones | INCIBE-CERT», *IoT: protocolos de comunicación, ataques y recomendaciones*. feb. 2019, Accedido: dic. 30, 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.incibe-cert.es/blog/iot-protocolos-comunicacion-ataques-y-recomendaciones.

[33] G. Mois, S. Folea, y T. Sanislav, «Analysis of Three IoT-Based Wireless Sensors for Environmental Monitoring», *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 66, n.º 8, pp. 2056-2064, 2017, doi: 10.1109/TIM.2017.2677619.

[34] M. A. Daud y W. S. H. Suhaili, «Internet of things (IoT) with coap and HTTP protocol: A study on which protocol suits IoT in terms of performance», en *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2017, vol. 532, pp. 165-174, doi: 10.1007/978-3-319-48517-1_15.

[35] M. Rouse y K. Ferguson, «What is HTTP - HyperText Transfer Protocol?», *W3cschool*, sep. 26, 2019. https://www.w3schools.in/http-tutorial/intro/ (accedido ene. 19, 2021).

[36] PickData, «MQTT vs CoAP, the battle to become the best IoT protocol», *PickData*, oct. 21, 2019. https://www.pickdata.net/es/noticias/mqtt-vs-coap-mejor-protocolo-iot (accedido ene. 19, 2021).

[37] D. Soni y A. Makwana, «A survey on mqtt: a protocol of internet of things(IoT)»,

Int. Conf. Telecommun. Power Anal. Comput. Tech. (Ictpact - 2017), n.º April, pp. 0-5, 2017, Accedido: ene. 19, 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/316018571_A_SURVEY_O.

[38] OPC Router, «What is MQTT? A practical introduction.», *OPC Router*, oct. 31, 2020. https://www.opc-router.com/what-is-mqtt/ (accedido ene. 19, 2021).

[39] K. S. Niraja, R. Murugan, y C. S. R. R. Prabhu, «Comparative analysis of security issues in the layered architecture of IoT», en *2018 3rd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information and Communication Technology, RTEICT 2018 - Proceedings*, 2018, pp. 1414-1417, doi: 10.1109/RTEICT42901.2018.9012515.

[40] S. Rojas, «Arquitectura empresarial con capas para IoT», *VS Sistemas*, jul. 01, 2019. https://www.vs-sistemas.com/Blog/Actualidad/arquitectura-empresarial-con-capas-para-iot (accedido ene. 06, 2021).

[41] R. Al Mogbil, M. Al Asqah, y S. El Khediri, «IoT: Security Challenges and Issues of Smart Homes/Cities», *2020 Int. Conf. Comput. Inf. Technol.*, pp. 1-6, 2020, doi: 10.1109/iccit-144147971.2020.9213827.

[42] S. Junestrand, X. Passaret, y D. Vázquez, *Domótica y hogar digital*, Paraninfo. 2004.

[43] D. Iounes, J. M. López Torralba, P. Pico Valencia, y J. Holgado Terriza, «Construyendo un dispositivo de internet de las cosas para el hogar conectado», *Researchgate.Net*, n.º September, p. 237, 2019, doi: 10.5281/zenodo.3452013.

[44] D. Comesaña y A. Comesaña, «El Internet de las Cosas», *BrosCom*, nov. 2016, Accedido: ene. 07, 2021. [En línea]. Disponible en: http://www.broscom.net/wp/internet-de-las-cosas/.

[45] IoBroker, «Documentación ioBroker», *ioBroker*, 2019. https://www.iobroker.net/#en/documentation (accedido ene. 07, 2021).

[46] J. Baker, «6 open source home automation tools», *Opensource.com*, dic. 14, 2017. https://opensource.com/tools/home-automation (accedido ene. 07, 2021).

[47] OpenHAB, «Introduction | openHAB», *openHAB Documentation*, 2019. https://www.openhab.org/docs/ (accedido ene. 04, 2021).

[48] M. Novotný, «OpenHAB | Moderní domek», *Moderní domek*, 2018. https://chytrydumsvepomoci.cz/blog/openhab (accedido ene. 04, 2021).

[49] K. Kreuzer, «openhab1-addons», *GitHub*, oct. 26, 2018. https://github.com/openhab/openhab1-addons/wiki (accedido feb. 03, 2021).

[50] openHAB, «Documentation openHAB», *openHAB Documentation*, ago. 06, 2020. https://www.openhab.org/docs/developer/osgi/osgi.html (accedido feb. 15, 2021).

[51] R. Koshak, «Lets talk about OH 2 Drawings», *openHAB Community*, sep. 07, 2016. https://community.openhab.org/t/lets-talk-about-oh-2-drawings/13096/14 (accedido feb. 03, 2021).

[52] Home-Automations.Net, «Openhab bindings - Home Automation», *Home-Automations.Net*, ago. 08, 2019. https://home-automations.net/4165-2/ (accedido feb. 15, 2021).

[53] R. Dilli, A. Argou, M. Pilla, A. M. Pernas, R. Reiser, y A. Yamin, «Fuzzy logic and MCDA in IoT resources classification», *Proc. ACM Symp. Appl. Comput.*, pp. 761-766, 2018, doi: 10.1145/3167132.3167216.

[54] S. Diciembre Sanahuja, «Sistemas de Control con Lógica Difusa: Métodos de Mamdani y de Takagi-Sugeno-Kang (TSK)», 2017.

[55] H. S. Ganesha, L. K. Vaswani, y R. N. Subudhi, «Applications of DEA», *Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng.*, vol. 8, n.º 12, pp. 3337-3341, 2019, doi: 10.35940/ijitee.L2829.1081219.

[56] W. Kit y H. Siong, *Extended Kalman Filter Based Fuzzy Adaptive Filter*, n.º June 2014. 2009.

[57] L. A. Zadeh, «Fuzzy algorithms», *Inf. Control*, vol. 12, n.º 2, pp. 94-102, 1968, doi: 10.1016/S0019-9958(68)90211-8.

[58] L. Mastacan y C. C. Dosoftei, «Temperature Fuzzy Control System with Mamdani Controller», *EPE 2018 - Proc. 2018 10th Int. Conf. Expo. Electr. Power Eng.*, pp. 352-356, 2018, doi: 10.1109/ICEPE.2018.8559861.

[59] E. H. Mamdani y S. Assilian, «An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller», *Int. J. Man. Mach. Stud.*, vol. 7, n.º 1, pp. 1-13, 1975, doi:

10.1016/S0020-7373(75)80002-2.

[60] T. TAKAGI y M. SUGENO, «Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control», *Readings Fuzzy Sets Intell. Syst.*, n.º 1, pp. 387-403, 1993, doi: 10.1016/b978-1-4832-1450-4.50045-6.

[61] N. Carbonare, T. Pflug, C. Bongs, y A. Wagner, «Simulative study of a novel fuzzy demand controlled ventilation for façade-integrated decentralized systems in renovated residential buildings», *Sci. Technol. Built Environ.*, vol. 26, n.º 10, pp. 1412-1426, 2020, doi: 10.1080/23744731.2020.1797442.

[62] MathWorks, «Mamdani and Sugeno Fuzzy Inference Systems», *MathWorks*, 2020. https://la.mathworks.com/help/fuzzy/types-of-fuzzy-inference-systems.html (accedido ene. 04, 2021).

[63] A. A. Kaur y A. A. Kaur, «Comparison of Mamdani-Type and Sugeno-Type Fuzzy Inference Systems for Air Conditioning System», *Int. J. Soft Comput. {\&} Eng.*, vol. 2, n.º 2, pp. 323-325, 2012, [En línea]. Disponible en: http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.486.1238%7B%5C&%7Drep=rep1%7B%5C&%7Dtype=pdf.

[64] M. F. F. Arif, B. Anoraga, S. Handoyo, y H. Nasir, «Algorithm Apriori Association Rule in Determination of Fuzzy Rule Based on Comparison of Fuzzy Inference System (FIS) Mamdani Method and Sugeno Method», *Bus. Manag. Strateg.*, vol. 7, n.º 1, p. 103, 2016, doi: 10.5296/bms.v7i1.9410.

[65] C. Lebron y F. Andrade, «An intelligent battery management system based on fuzzy controller for home microgrid working in grid-connected and island mode», *Proc. 2016 IEEE ANDESCON, ANDESCON 2016*, pp. 2-5, 2017, doi: 10.1109/ANDESCON.2016.7836235.

[66] C. Guerra, «Lógica difusa y sistemas de control», *GitHub*, 2018.

[67] MathWorks, «Defuzzification Methods - MATLAB & Simulink», *MathWorks*, 2020. https://la.mathworks.com/help/fuzzy/defuzzification-methods.html (accedido ene. 04, 2021).

[68] D. Samanta, «Chapter 5 Defuzzification methods», pp. 1-7, 2001.

[69] Byrne Erin, «¿Qué es MATLAB?», *MathWorks*, oct. 28, 2020.

https://la.mathworks.com/videos/matlab-overview-61923.html (accedido ene. 04, 2021).

[70] V. Velikanov *et al.*, «Análisis de lógica difusa y eficiencia de proyectos de inversión en el entorno MatLab, Fuzzy Logic Toolbox», *Bulletin of the Academy of Pedagogical Sciences*, jul. 2014. https://la.mathworks.com/products/fuzzy-logic.html%7B%5C#%7Dfuzzy-inference-system-modeling.

[71] Oracle Corporation, «¿Qué es Java y para qué es necesario?», *Oracle Corporation*, nov. 27, 2018. https://www.java.com/es/download/help/whatis_java.html (accedido ene. 04, 2021).

[72] P. Cingolani y J. Alcalá-Fdez, «JFuzzyLogic: A robust and flexible Fuzzy-Logic inference system language implementation», *IEEE Int. Conf. Fuzzy Syst.*, pp. 10-15, 2012, doi: 10.1109/FUZZ-IEEE.2012.6251215.

[73] L. Joyanes Aguilar y I. Zahonero Martínez, *Programación en C, C++, Java y UML*, 2.ª ed. 2014.

[74] Á. P. Hinojosa Gutiérrez, *Python Paso a Paso*, 1.ª ed. Grupo Editorial RA-MA, 2016.

[75] J. Warner, «scikit-fuzzy», *PyPI*, 2015. https://pypi.org/project/scikit-fuzzy/ (accedido ene. 04, 2021).

[76] L. Z. Sansyzbay y B. B. Orazbayev, «Modeling the operation of climate control system in premises based on fuzzy controller», *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1399, n.º 4, 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1399/4/044017.

[77] S. Zhi, Y. Wei, J. Wang, y W. Zhao, «Fuzzy control of intelligent indoor exercise environment in air-polluted area», *2016 IEEE Int. Conf. Fuzzy Syst. FUZZ-IEEE 2016*, n.º 15, pp. 678-684, 2016, doi: 10.1109/FUZZ-IEEE.2016.7737752.

[78] K. Prasad Sharma y N. Baine, «Application of a Fuzzy Logic based Controller for Peak Load Shaving in a Typical Household», *IEEE Int. Conf. Fuzzy Syst.*, vol. 2019-June, pp. 1-6, 2019, doi: 10.1109/FUZZ-IEEE.2019.8858954.

[79] Asamblea Nacional Constituyente de Ecuador, «Constitución del Ecuador», en *Registro Oficial*, vol. 449, n.º 20 de Octubre, 2008, p. 173.

[80] Consejo de Educación Superior, *Ley Organica De Educacion Superior, LOES*. 2018, pp. 1-58.

[81] Propiedad Intelectual Registro Oficial No 320, «Ley de Propiedad Intelectual», en *Registro Oficial*, n.º 320, 2015, p. 92.

[82] S. del R. O. N. 507, «Reglamento al Código Orgánico del Ambiente», *Fielweb Evol. Jurídica*, vol. 752, n.º 507, pp. 1-192, 2019.

[83] D. Cauas, «Definición de las variables , enfoque y tipo de investigación», *Univ. Nac. Abierta y a Distancia*, pp. 1-11, 2005, [En línea]. Disponible en: http://www.mecanicahn.com/personal/marcosmartinez/seminario1/los_pdf/l-Variables.pdf.

[84] R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado, y P. Baptista Lucio, *Metodología de la Investigación*, 6.ª ed. McGraw-Hill Education, 2014.

[85] SurveyMonkey, «¿Qué es la investigación experimental?», *SurveyMonkey*, sep. 23, 2020. https://es.surveymonkey.com/mp/que-es-la-investigacion-experimental/ (accedido feb. 15, 2021).

[86] J. F. López, «Estadística descriptiva», *Economipedia*, may 11, 2020. https://economipedia.com/definiciones/estadistica-descriptiva.html (accedido feb. 07, 2021).

[87] EADIC, «Arquitectura bioclimtica», *Cuad. Form.*, 1997.

[88] A. R. R. Maristany, L. Abadía, S. Barra, L. Carrizo Miranda, M. Pardina, y M. M. M. Agosto, *Influencia de la conformación de la envolvente en las condiciones de confort térmico, acústico y lumínico*, 1.ª ed., n.º 2013. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Arquitectura. Urbanismo y Diseño, 2013.

[89] P. Wadhwani, «Java Vs Python: Which is Best for Enterprise Applications?», *Balance Technology*, sep. 08, 2020. https://www.bacancytechnology.com/blog/java-vs-python (accedido ene. 28, 2021).

[90] V. Puzhevich, «Python vs Java Comparison: The Difference Between», *SCAND Blog*, feb. 07, 2020. https://scand.com/company/blog/python-vs-java/ (accedido ene. 28, 2021).

[91] P. Pedamkar, «Python vs Matlab», *EDUCBA*, abr. 01, 2019. https://www.educba.com/python-vs-matlab/ (accedido ene. 28, 2021).

[92] Anónimo, «La domótica para personas con discapacidad, así funciona - Nettcontrol», *nettcontrol*, oct. 03, 2019. https://nettcontrol.com/domotica-para-personas-con-discapacidad/ (accedido jul. 28, 2021).

[93] Anónimo, «10 soluciones de domótica para un hogar con niños», *Ensaco*, mar. 21, 2021. https://www.ensaco.es/10-soluciones-domoticas-para-una-casa-con-ninos/ (accedido jul. 31, 2021).

[94] C. Molina, «Como la casa inteligente (SmartHome) facilita la vida del adulto mayor», *Smart Home Centro America*, jul. 26, 2019. https://smarthomesv.com/blogs/news/como-la-casa-inteligente-smarthome-facilita-la-vida-del-adulto-mayor (accedido jul. 31, 2021).

[95] J. Redacción, «Domótica al servicio de personas discapacitadas», *Blog Oi Realtor*, may 21, 2021. https://www.oirealtor.com/noticias-inmobiliarias/domotica-al-servicio-de-personas-discapacitadas/ (accedido jul. 28, 2021).

[96] Anónimo, «Domótica para discapacitados: 7 soluciones para cambiar tu vida», *Hinforcom*, jun. 12, 2013. https://hinforcom.com/domotica/domotica-para-discapacitados/ (accedido jul. 28, 2021).

[97] Anónimo, «Prepara tu hogar a prueba de alergias», *Mayo Clinic*, jul. 29, 2021. https://www.mayoclinic.org/es-es/diseases-conditions/allergies/in-depth/allergy/art-20049365 (accedido jul. 31, 2021).

[98] S. D. Panjaitan y A. Hartoyo, «A lighting control system in buildings based on fuzzy logic», *Telkomnika*, vol. 9, n.º 3, pp. 423-432, 2011, doi: 10.12928/telkomnika.v8i3.732.

[99] T. K. Das y Y. Das, «Design of A Room Temperature And Humidity Controller Using Fuzzy Logic», *Am. J. Eng. Res.*, n.º 11, pp. 86-97, 2013.

[100] Anónimo, «Clima promedio en Esmeraldas, Ecuador, durante todo el año», *Weather Spark*, nov. 07, 2017. https://es.weatherspark.com/y/19369/Clima-promedio-en-Esmeraldas-Ecuador-durante-todo-el-año (accedido jul. 09, 2021).

[101] B. Sarwar, I. S. Bajwa, S. Ramzan, B. Ramzan, y M. Kausar, «Design and

application of fuzzy logic based fire monitoring and warning systems for smart buildings», *Symmetry (Basel).*, vol. 10, n.º 11, 2018, doi: 10.3390/sym10110615.

[102] Anónimo, «Clima y tiempo en Ecuador», *Hikersbay*, nov. 28, 2018. http://hikersbay.com/climate/ecuador/esmeraldas?lang=es (accedido ago. 15, 2021).

ANEXOS

Anexo 1. Instrumento para realizar la entrevista

Nombre del entrevistador:
Nombre del entrevistado:
Fecha y hora de la entrevista:

1. En un edificio residencial o de departamentos, ¿qué servicios, mecanismos y espacios físicos considera que es indispensable de automatizar?
2. Uno de los usos de implementar IoT en hogares digitales es ayudar a la comodidad de los usuarios de dichas instalaciones proveyendo confort en cada momento. ¿Qué componentes de confort considera necesarios implementar en edificios residenciales y departamentos de hoy en día?
3. ¿Qué servicios/mecanismos de confort recomienda usted automatizar en la cocina-comedor de un departamento?
4. ¿Qué servicios/mecanismos de confort recomienda usted automatizar en los dormitorios de un departamento?
5. ¿Qué servicios/mecanismos de confort recomienda usted automatizar en la sala de un departamento?
6. ¿Qué servicios/mecanismos de confort recomienda usted automatizar en los baños de un departamento?
7. ¿De qué manera el sistema eléctrico de una construcción (edificios residenciales) debe estar preparada para implementar sistemas de IoT?
8. ¿Qué estándar inalámbricos y protocolo de comunicación recomienda usted para la implementación de tecnologías IoT en edificios residenciales?
9. ¿En cuanto a los sensores, cuáles son las marcas de proveedores que usted recomendaría instalar en edificios residenciales (global) y departamentos (individual)?
10. ¿Cuál es el tiempo que considera prudente ejecutar un ciclo de control sobre edificios inteligentes y departamentos?

Anexo 2. Ficha para realización del diseño experimental

Este instrumento fue ejecutado en una laptop marca Dell modelo Inspiron 5000 series, con 12GB de RAM y con un procesador I7 de séptima generación. Para el desarrollo de la práctica fue necesario establecer algunas reglas en el entorno de OpenHAB, de tal forma que permitiera la generación de valores ficticios en rangos prestablecidos con la intención de obtener información para los controladores difusos. Pero a pesar de ello, si se utilizó algunos sensores reales a través de una conexión establecida entre OpenHAB y Netatmo, esta última es una empresa que brinda una gran variedad de sensores de interiores y exteriores que envían sus valores obtenidos a través del Wifi a una estación meteorológica. Es gracias a este punto, que la adición de estos sensores fue posible dando un poco de realce a la integración de objetos reales en esta investigación.

Tabla 13. Resultados del banco de pruebas del controlador AQI

N.º	No2 (ug/m3)	So2 (pm)	AQI	Tiempo GET (s)	Tiempo Difuso (s)	Tiempo POST (s)	Tiempo Total (s)
0	143,08	126,48	439,95	3,189	0,008	1,007	4,204
1	14,60	72,80	242,38	3,400	0,002	0,990	4,393
2	14,60	18,84	58,36	3,444	0,004	1,003	4,450
3	10,73	114,62	350,00	3,449	0,012	1,055	4,517
4	17,97	113,90	350,00	3,390	0,005	1,021	4,415
5	41,83	113,90	350,00	3,248	0,009	1,068	4,325
6	105,61	33,81	226,72	3,432	0,003	1,038	4,473
7	138,93	5,10	250,00	3,378	0,004	1,206	4,588
8	147,33	60,96	324,34	3,378	0,006	1,014	4,397
9	17,23	119,08	350,00	3,260	0,003	1,073	4,335

10	17,23	77,96	255,91	3,360	0,002	0,963	4,324
11	24,27	143,07	350,00	3,287	0,003	1,012	4,302
12	27,22	29,67	61,16	3,333	0,009	1,014	4,356
13	48,11	29,67	106,53	3,270	0,001	1,003	4,274
14	112,67	141,80	436,21	3,340	0,002	1,002	4,344
15	140,22	33,21	250,00	3,320	0,007	1,265	4,592
16	22,11	148,64	350,00	3,206	0,002	0,974	4,182
17	81,05	135,48	355,21	3,275	0,002	1,071	4,348
18	81,05	52,22	219,63	3,444	0,011	1,017	4,472
19	102,21	135,19	394,21	4,057	0,003	0,957	5,018
Promedio				**3,373**	**0,005**	**1,038**	**4,415**

Tabla 14. Resultados del banco de pruebas del controlador HVAC

N.º	**Temperatura (ºC)**	**Humedad relativa (%)**	**Calentador**	**Congelador**	**Apertura ventana**	**Tiempo GET (s)**	**Tiempo Difuso (s)**	**Tiempo POST (s)**	**Tiempo Total (s)**
0	8,32	18,12	15,00	2,50	OPEN	3,261	0,023	3,104	6,387
1	-4,35	38,45	45,20	2,50	CLOSED	3,168	0,002	3,168	6,339
2	36,20	27,07	2,50	48,94	CLOSED	3,207	0,003	2,976	6,186
3	28,17	57,44	13,98	16,89	CLOSED	4,432	0,003	2,799	7,234

4	-5,29	99,59	87,36	2,50	CLOSED	3,158	0,003	2,964	6,126
5	-1,38	92,93	87,49	2,50	OPEN	3,176	0,011	3,113	6,301
6	41,19	94,23	2,50	37,50	CLOSED	3,179	0,003	3,004	6,185
7	-1,28	91,75	87,49	2,50	OPEN	3,420	0,013	2,875	6,308
8	40,79	49,18	2,50	62,49	CLOSED	3,229	0,007	3,090	6,326
9	27,60	17,32	2,50	54,79	CLOSED	3,367	0,003	3,101	6,471
10	8,11	11,47	15,00	2,50	OPEN	3,520	0,003	3,068	6,592
11	23,34	67,63	15,03	2,50	OPEN	3,304	0,014	3,400	6,719
12	-2,36	71,08	63,33	2,50	CLOSED	3,166	0,013	3,076	6,255
13	33,72	20,12	2,50	61,73	CLOSED	3,347	0,003	3,133	6,482
14	32,73	42,02	2,50	37,50	CLOSED	3,293	0,007	4,096	7,396
15	21,02	81,43	37,50	2,50	OPEN	3,311	0,006	3,002	6,319
16	7,80	7,94	15,00	2,50	OPEN	3,221	0,008	3,029	6,258
17	41,91	16,61	2,50	87,46	CLOSED	3,584	0,006	3,121	6,712
18	22,65	63,85	15,00	2,50	OPEN	3,517	0,005	3,125	6,647
19	44,79	36,47	2,50	62,50	CLOSED	3,918	0,005	3,461	7,384
Promedio						**3,389**	**0,007**	**3,135**	**6,531**

Tabla 15. Resultados del banco de pruebas del controlador de fuego

N.º	Temperatura (ºC)	Humedad relativa (%)	Tiempo (min)	Agua	Gas	Sirena	Tiempo GET (s)	Tiempo Difuso (s)	Tiempo POST (s)	Tiempo Total (s)
0	5,81	9,51	5,78	0	ON	ON	7,007	0,012	3,415	10,434
1	1,30	1,56	8,08	0	ON	ON	5,470	0,008	3,365	8,843
2	3,48	3,52	5,70	0	ON	ON	5,334	0,003	5,139	10,476
3	3,14	5,27	0,97	1	OFF	ON	7,983	0,002	3,126	11,112
4	15,36	4,83	0,97	2	OFF	ON	5,307	0,006	3,362	8,675
5	9,23	1,15	1,78	2	OFF	ON	5,328	0,002	3,413	8,743
6	0,15	2,89	0,96	0	ON	ON	5,279	0,004	3,350	8,633
7	6,81	8,92	5,79	1	OFF	ON	6,159	0,014	3,400	9,573
8	11,82	8,29	3,84	1	OFF	ON	5,655	0,013	3,347	9,015
9	5,31	7,30	6,96	0	ON	ON	5,198	0,013	3,364	8,575
10	6,06	3,34	1,15	1	OFF	ON	5,769	0,003	5,070	10,842
11	19,83	6,44	8,30	1	OFF	ON	5,977	0,003	3,523	9,504
12	6,30	3,03	8,86	0	ON	ON	5,546	0,013	3,328	8,887
13	11,14	1,05	3,22	2	OFF	ON	5,602	0,012	3,796	9,409
14	12,75	7,90	8,78	1	OFF	ON	6,996	0,016	3,600	10,612
15	16,47	4,90	9,70	1	OFF	ON	6,263	0,003	4,042	10,308

16	10,72	2,67	3,18	2	OFF	ON	6,945	0,002	3,594	10,541
17	19,49	7,40	9,00	1	OFF	ON	6,037	0,008	3,658	9,703
18	10,72	6,65	0,36	2	OFF	ON	6,445	0,009	3,766	10,220
19	19,82	3,35	0,34	2	OFF	ON	5,667	0,009	3,655	9,332
Promedio							**5,998**	**0,008**	**3,666**	**9,672**

Tabla 16. Resultados del banco de pruebas del controlador de lumínico

N.º	**Luz Exterior (lux)**	**Luz Interior (lux)**	**Foco (lux)**	**Cortina**	**Tiempo GET (s)**	**Tiempo Difuso (s)**	**Tiempo POST (s)**	**Tiempo Total (s)**
0	23,19	245,03	122,08	67,29	3,919	0,011	2,257	6,187
1	157,65	245,03	69,10	48,38	3,731	0,012	2,287	6,030
2	64,16	245,03	105,50	55,14	3,658	0,021	2,258	5,937
3	138,55	245,03	71,49	49,70	4,948	0,004	2,609	7,561
4	135,60	245,03	71,78	49,81	3,401	0,018	2,133	5,552
5	22,87	245,03	122,23	67,44	3,433	0,003	2,729	6,165
6	231,67	245,03	49,26	29,49	4,480	0,002	2,309	6,791
7	81,92	245,03	98,60	52,45	3,519	0,004	2,126	5,649
8	170,89	245,03	66,93	46,82	3,430	0,005	2,305	5,740
9	200,39	245,03	60,32	41,11	3,595	0,003	3,245	6,843

10	81,42	245,03	98,80	52,51	3,485	0,003	2,144	5,632
11	85,26	245,03	97,24	52,06	3,465	0,002	2,067	5,534
12	163,09	245,03	68,26	47,80	3,994	0,007	2,594	6,595
13	143,07	245,03	71,00	49,49	3,451	0,012	2,145	5,608
14	223,71	245,03	52,64	33,29	3,699	0,017	2,538	6,254
15	176,62	245,03	65,86	45,97	3,381	0,004	2,946	6,331
16	223,10	245,03	52,87	33,55	3,400	0,009	2,214	5,623
17	88,89	245,03	95,72	51,68	3,308	0,006	2,139	5,453
18	153,43	245,03	69,70	48,76	3,769	0,002	2,087	5,858
19	109,10	245,03	86,27	50,27	3,392	0,002	2,161	5,555
Promedio					**3,673**	**0,007**	**2,365**	**6,045**

Tabla 17. Resultados del banco de pruebas del controlador de ventilación

N.º	**Estación (ºC)**	**Humedad relativa (%)**	**Humificador**	**Extractor de aire**	**Tiempo GET (s)**	**Tiempo Difuso (s)**	**Tiempo POST (s)**	**Tiempo Total (s)**
0	44,87	29,94	2,50	2,50	3,469	0,017	2,180	5,666
1	13,29	33,15	42,86	2,50	3,437	0,003	2,084	5,524
2	27,53	67,33	2,50	36,77	4,390	0,002	2,014	6,406
3	19,71	37,30	19,50	2,50	3,631	0,002	2,461	6,094

4	35,73	70,72	2,50	46,45	3,585	0,004	2,220	5,809
5	37,11	41,96	2,50	2,50	3,417	0,001	2,119	5,537
6	22,81	28,24	19,97	2,50	3,645	0,003	2,860	6,508
7	42,41	69,30	2,50	45,35	3,368	0,004	2,224	5,596
8	38,62	2,69	2,50	2,50	3,382	0,010	2,215	5,607
9	-6,10	41,56	20,77	2,50	4,772	0,002	2,269	7,043
10	12,96	76,81	2,50	2,50	3,422	0,010	2,131	5,564
11	40,19	9,76	2,50	2,50	3,484	0,009	2,188	5,681
12	-2,80	40,26	34,41	2,50	3,514	0,002	2,442	5,959
13	13,25	86,86	2,50	19,57	3,567	0,009	2,051	5,627
14	13,50	32,01	41,58	2,50	3,331	0,006	2,175	5,512
15	37,03	34,85	2,50	2,50	3,426	0,010	2,780	6,216
16	19,02	42,70	5,46	2,50	3,941	0,009	2,078	6,029
17	32,04	85,05	2,50	79,99	3,284	0,013	2,297	5,594
18	9,82	65,03	2,50	2,50	3,476	0,011	2,430	5,916
19	3,00	72,52	2,50	2,50	3,615	0,007	2,195	5,817
Promedio					**3,608**	**0,007**	**2,271**	**5,885**

Anexo 3. Reglas de los controladores difusos de la investigación

Tabla 18. Reglas del controlador lumínico

	ENTRADA		SALIDA	
	LUZ EXTERIOR	LUZ INTERIOR	LAMPARA	CORTINA
1	BAJA	MUY BAJA	MUY ALTA	CERRADA
2		BAJA	ALTA	
3		MEDIO		
4		ALTA		
5		MUY ALTA	MEDIO	
6	MEDIA	MUY BAJA	ALTA	MEDIA ABIERTA
7		BAJA	MEDIO	
8		MEDIO		
9		ALTA		
10		MUY ALTA	BAJA	
11	ALTA	MUY BAJA	MEDIO	ABIERTA
12		BAJA	BAJA	
13		MEDIO		
15		MUY ALTA	MUY BAJA	

Tabla 19. Reglas del controlador HVAC

	ENTRADA		SALIDA		
	TEMPERATURA	HUMEDAD	CALENTADOR	AIRE ACONDICIONADO	VENTANA
1	MUY FRIO	HÚMEDO	MUY RÁPIDO	PARAR	CERRAR
2		NO MUY HÚMEDO	RÁPIDO		
3		CONFORTABLE			
4		NO MUY SECO	MEDIO		
5		SECO			
6	FRIO	HÚMEDO	RÁPIDO		
7		NO MUY HÚMEDO	MEDIO		
8		CONFORTABLE			
9		NO MUY SECO	LENTO		
10		SECO			
11	NORMAL	HÚMEDO	MEDIO		
12		NO MUY HÚMEDO	LENTO		
13		CONFORTABLE	PARAR		ABRIR
14		NO MUY SECO		LENTO	

15		SECO		MEDIO	
16	CALIENTE	HÚMEDO		LENTO	
17		NO MUY HÚMEDO			
18		CONFORTABLE		MEDIO	
19		NO MUY SECO			
20		SECO		RÁPIDO	
21	MUY CALIENTE	HÚMEDO		MEDIO	
22		NO MUY HÚMEDO			
23		CONFORTABLE		RÁPIDO	
24		NO MUY SECO			
25		SECO		MUY RÁPIDO	

Tabla 20. Reglas del controlador AQI

	ENTRADA		SALIDA
	NO2	**SO2**	**AQI**
1	BUENO	BUENO	MUY SALUDABLE
2		MODERATO	SALUDABLE
3		MALO	MEDIO
4	MODERATO	BUENO	SALUDABLE
5		MODERATO	MEDIO
6		MALO	POCO SALUDABLE
7	MALO	BUENO	MEDIO
8		MODERATO	POCO SALUDABLE
9		MALO	PERJUDICIAL

Tabla 21. Reglas del controlador de fuego

	ENTRADA			SALIDA
	TIEMPO	**CAMBIO TEMPERATURA**	**CAMBIO HUMEDAD**	**CONTROL FUEGO**
1	CORTO	**BAJA**	BAJA	BAJA
2			MEDIA	
3			ALTA	MEDIA
4		**MEDIA**	BAJA	
5			MEDIA	
6			ALTA	
7		**ALTA**	BAJA	ALTA

8			MEDIA	
9			ALTA	
10	LARGO	**BAJA**	BAJA	BAJA
11			MEDIA	
12			ALTA	
13		**MEDIA**	BAJA	
14			MEDIA	
15			ALTA	ALTA
16		**ALTA**	BAJA	MEDIA
17			MEDIA	
18			ALTA	ALTA

Tabla 22. Reglas del controlador de ventilación

	ENTRADA		**SALIDA**	
	ESTACIÓN	**HUMEDAD**	**HUMIFICADOR**	**EXTRACTOR DE AIRE**
1	**INVIERNO**	SECO	RAPIDO	PARAR
2		NO MUY SECO	MEDIO	
3		CONFORTABLE	SECO	
4		NO MUY HÚMEDO		
5		HÚMEDO		
6	**NORMAL**	SECO	MEDIO	
7		NO MUY SECO	LENTO	
8		CONFORTABLE	SECO	
9		NO MUY HÚMEDO		LENTO
10		HÚMEDO		MEDIO
11	**VERANO**	SECO		PARAR
12		NO MUY SECO		
13		CONFORTABLE		
14		NO MUY HÚMEDO		MEDIO
15		HÚMEDO		RAPIDO

Anexo 4. Aspecto del edificio de la simulación



Figura 27. Edificio de frente



Figura 28. Planta de los departamentos