

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Carrera de Electrónica y Telecomunicaciones

Análisis comparativo entre tecnologías dedicadas y soluciones de bajo costo para la implementación de sistemas domóticos

Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Ingeniero en
Electrónica y Telecomunicaciones

Autor:

Victor Daniel Astudillo Vallejo

Joel Francisco Reinoso Delgado

Director:

Luis Ismael Minchala Ávila

ORCID: 0000-0003-0822-0705

Cuenca, Ecuador

2023-02-01

Resumen

Este trabajo presenta detalles acerca del diseño e implementación de dos sistemas domóticos, a fin de comparar la eficiencia, confiabilidad, seguridad y escalabilidad entre una tecnología de uso dedicada a la domótica y otra de bajo costo y fácil integración (DIY - Do It Yourself). En este contexto, se comparan por un lado la tecnología Local Control Network (LCN) y, por otro lado, dispositivos integrables con el asistente de voz de Amazon, Alexa. Cada red es planeada con la intención de automatizar las luminarias, así como su intensidad, la desconexión automática de equipos que consuman energía innecesariamente y un sistema de vigilancia. Las dos viviendas presentan hábitos de consumo similares, lo que permite compararlas y determinar hasta qué punto las soluciones de bajo costo tienen un rendimiento eficiente frente a las tecnologías dedicadas. Adicionalmente, para mejorar las prestaciones de los sistemas domóticos, se propone modificaciones de arquitectura de cada tecnología, como la implementación de un sistema de visualización a través de una plataforma de software libre, Home Assistant; así también, el seccionamiento de la red de bajo costo. Esta implementación permitió definir las principales ventajas de las tecnologías dedicadas que utilizan líneas de bus, destacándose la escalabilidad, baja latencia y seguridad por encima de las tecnologías de bajo costo; por otra parte, su costo es muy alto y tiene muchas prestaciones para la aplicación en la domótica.

Palabras clave: domótica, automatización, LCN, Amazon Alexa

Abstract

This work presents details about the design and implementation of two home automation systems, in order to compare the efficiency, reliability, security and scalability between a technology dedicated to home automation and another low cost and easy integration (DIY - Do It Yourself). In this context, Local Control Network (LCN) technology is compared, on the one hand, and devices that can be integrated with Amazon's voice assistant, Alexa, on the other. Each network is planned with the intention of automating the luminaires, as well as their intensity, the automatic disconnection of equipment that consumes energy unnecessarily, and a surveillance system. The two houses present similar consumption habits, which allows them to be compared and to determine to what extent the low-cost solutions have efficient performance compared to dedicated technologies. Additionally, to improve the performance of home automation systems, architectural modifications of each technology are proposed, such as the implementation of a visualization system through a free software platform, Home Assistant; likewise, the sectioning of the low-cost network. This implementation made it possible to define the main advantages of dedicated technologies that use bus lines, highlighting scalability, low latency and security over low-cost technologies; On the other hand, its cost is very high and it has many benefits for application in home automation.

Keywords: home automation, comparative, LCN, Amazon Alexa

Índice general

1. Introducción	12
1.1. Justificación	12
1.2. Objetivos	13
1.2.1. Objetivo general	13
1.2.2. Objetivos específicos	13
1.3. Alcance	14
1.4. Estado del arte	14
1.5. Contribuciones	15
2. Fundamentos teóricos	17
2.1. Domótica	17
2.1.1. Concepto	17
2.1.2. Pilares de la domótica	17
2.1.3. Dispositivos del sistema	18
2.1.4. Niveles de domotización	19
2.2. Arquitectura de la domótica	20
2.2.1. Arquitectura centralizada	20
2.2.2. Arquitectura descentralizada	21
2.2.3. Arquitectura distribuida	21
2.2.4. Arquitectura híbrida	22
2.3. Medios de transmisión	22
2.3.1. Línea eléctrica	23
2.3.2. Línea de bus	24
2.3.3. Comunicaciones inalámbricas	25
2.4. Tecnología LCN	27
2.4.1. Características principales	27
2.4.2. Fundamentos	27
2.5. Asistentes de voz	28
2.5.1. Amazon Alexa	29
2.5.2. Acerca de WebRTC	30
2.6. Home Assistant	30
3. Diseño y planificación de la red LCN	32
3.1. Requisitos del proyecto	32
3.1.1. Diseño	32
3.1.2. Implementación	34
3.1.3. Sistema de monitoreo	40
4. Diseño y planificación de la red de bajo costo	44
4.1. Requisitos del proyecto	44
4.2. Diseño	44
4.3. Implementación	46
4.4. Red dedicada	47
4.4.1. Acerca del seccionamiento de redes	47
4.4.2. Estudio del indicador de fuerza de la señal recibida (RSSI)	48
5. Análisis de resultados y comparativa	52
5.1. Análisis de consumo energético	52

5.1.1. Análisis de consumo en dispositivos domóticos	52
5.1.2. Análisis de consumo en circuitos de luminarias	53
5.2. Análisis económico	58
5.2.1. Análisis económico para LCN	58
5.2.2. Análisis económico para las soluciones de bajo costo	58
5.3. Análisis de confiabilidad	60
5.3.1. Medición de latencia en la red de bajo costo.	60
5.3.2. Medición de latencia en la red LCN	67
5.3.3. Tabulación de resultados y comparativa.	72
5.4. Evaluación subjetiva y QoE	74
5.4.1. Calidad de experiencia para el sistema de bajo costo	74
5.4.2. Calidad de experiencia para el sistema LCN	75
6. Conclusiones y recomendaciones	76
6.1. Conclusiones	76
6.2. Recomendaciones	78
6.3. Trabajos futuros	79
Bibliografía	80
A. Anexos	83
A.1. Datos técnicos de los módulos LCN	83
A.1.1. Módulo Universal Dimmer y Conmutador para Caja de Empotrar (LCN-UPP)	83
A.1.2. Módulo Universal Dimmer y Conmutador para Carril DIN (LCN-SH)	84
A.1.3. Adaptador para pulsadores convencionales con señal acústica (LCN-T8)	85
A.1.4. Interfaz táctil de cristal con 10 teclas, 6 LED y display de 2,8" (LCN-GT10D)	86
A.1.5. Interfaz táctil de cristal 6 teclas, 6 LED, sensor de temp., luz corona (LCN-GT6)	87
A.1.6. Módulo acoplador para redes IP (LCN-PKE)	88

Índice de figuras

2.1. Elementos de un sistema domótico	19
2.2. Modelo de arquitectura centralizada	21
2.3. Modelo de arquitectura descentralizada	21
2.4. Modelo de arquitectura distribuida	22
2.5. Modelo de arquitectura híbrida	22
2.6. Envío de mensaje con el protocolo X-10 [1].	24
2.7. Datos transmitidos en el bus LCN. Obtenido de [2]	28
2.8. Arquitectura de los asistentes virtuales inteligentes.	29
2.9. Arquitectura del sistema Amazon Alexa.	30
2.10. Señalización WebRTC. Obtenido de [3]	31
3.1. Diagrama unifilar para la planta baja.	35
3.2. Diagrama unifilar para la primera planta alta.	35
3.3. Declaración de módulos de la planta baja.	36
3.4. Declaración de módulos de la primera planta alta.	36
3.5. Configuración de módulos LCN.	37
3.6. Planos de la vivienda con sistema domótico LCN	38
3.7. Conexión de pulsantes en LCN-T8 [2]	39
3.8. Arquitectura de una integración en Home Assistant [4]	40
3.9. Dashboard de Home Assistant	42
3.10. Diagrama de bloques del desarrollo de Home Assistant	43
4.1. Interruptor inteligente sin neutro.	45
4.2. Planos de la vivienda con sistema domótico de bajo costo.	47
4.3. Segmentación de la red.	49
4.4. Interfaz gráfica Software Wi-Fi Designer.	50
4.5. Simulación de la red inalámbrica en la edificación de domótica de bajo costo.	51
5.1. Comparación de consumo energético entre semana de los dos sistemas domóticos y una vivienda sin automatización.	56
5.2. Comparación de consumo energético en fin de semana de los dos sistemas domóticos y una vivienda sin automatización.	57
5.3. Diagrama de Red con Proxy.	61
5.4. Montaje de un servidor Zentyal en una máquina virtual.	62
5.5. Captura de paquetes mediante Wireshark.	62
5.6. Comportamiento de la Latencia: Control de un periférico, Red No Seccionada.	64
5.7. Comportamiento de la Latencia: Control de un grupo de periféricos, Red No Seccionada.	65
5.8. Comportamiento de la Latencia: Control de un periférico, Red Seccionada.	66
5.9. Comportamiento de la Latencia: Control de un grupo de periféricos, Red Seccionada.	67
5.10. Captura de paquetes mediante Wireshark, Red LCN.	68
5.11. Comportamiento de la Latencia: Control de un periférico.	70
5.12. Comportamiento de la Latencia: Control de un periférico, Red LCN.	71
5.13. Comportamiento de la Latencia: Control de un grupo de periféricos, Red LCN.	71

5.14. Comportamiento de la Latencia: Control de un grupo de periféricos, Red LCN. 72

Índice de extracto de códigos

3.1. Definición de LCN-PKE	41
3.2. Definición de objetos	41

Índice de tablas

2.1. Datos técnicos de LCN.	27
3.1. Requerimientos funcionales del usuario.	32
3.2. Dimensionamiento de circuitos de iluminación.	33
3.3. Consumo de energía eléctrica en stand-by.	34
4.1. Requerimientos funcionales del usuario.	44
4.2. Dispositivos empleados en la instalación.	46
5.1. Consumo eléctrico de los dispositivos LCN.	52
5.2. Consumo eléctrico de los dispositivos DIY.	53
5.3. Modelo energético entre semana para un sistema LCN y de bajo costo.	54
5.4. Modelo energético de fin de semana para un sistema LCN y de bajo costo.	55
5.5. Comparación del consumo energético de los sistemas domóticos entre semana.	56
5.6. Comparación del consumo energético de los sistemas domóticos en fines de semana.	57
5.7. Comparación del consumo energético de los sistemas domóticos en fines de semana.	58
5.8. Análisis de precios para la tecnología LCN.	59
5.9. Análisis de precios para las soluciones de bajo costo.	59
5.10. Niveles de Latencia en la Red.	72
5.11. Escala para valoración subjetiva.	74
5.12. Valoración subjetiva para cada usuario - red de bajo costo.	74
5.13. Valoración subjetiva para cada usuario - Red LCN.	75

Agradecimientos

Expreso mis más sinceros agradecimientos a la Universidad de Cuenca por haberme dado la oportunidad y todos los medios necesarios para ser un profesional de la ingeniería. A mi mamá María Eugenia y mis hermanas, Lesly, Mishel y Nicole, que me han acompañado incondicionalmente durante toda mi vida para alcanzar este nuevo logro. A mi novia Erika por el apoyo absoluto para la culminación de este proyecto. Al Ing. Ismael Minchala por su tiempo y entrega incondicional a los estudiantes y a todos mis amigos, compañeros y profesores que han sido parte de esta enriquecedora experiencia.

Victor Daniel Astudillo Vallejo

Agradecimientos

Nada, absolutamente nada de todo lo que he conseguido en este camino, hubiese sido posible sin haber tenido el apoyo de mi familia. Han sido decenas de noches sin dormir, dosis inconmensurables de bebidas energéticas y una considerable cantidad de dolores y enfermedades causadas por el insomnio y los largos lapsos de tiempo sentado frente a las pantallas, cuadernos y documentos. Sin embargo, lo más difícil, fueron las incontables ocasiones en las que no fue posible compartir con mi familia por culpa de las tareas y exámenes que debí sacar adelante, con la finalidad de haber llegado a este preciso momento. Por eso, pido perdón, y les rindo cuentas, de que todo el esfuerzo invertido no ha sido en vano.

Esta tesis se encuentra dedicada a mis padres Fabián y Matilde por el apoyo en todos y cada uno de los detalles del día a día en mi vida. Son el cimiento de la persona que soy el día de hoy, y el reflejo de todo lo que he intentado aprender de ustedes. A mis hermanos Sofía y Mateo, quienes han sufrido junto a mí y me han sabido comprender en los momentos más difíciles.

A la Universidad de Cuenca expreso mis más sinceros agradecimientos por haberse convertido en mi segundo hogar durante este largo trayecto, y por permitir convertirme en el profesional que me he planteado ser desde un principio. Al Ingeniero Ismael Minchala, quien con su paciencia y conocimiento nos ha guiado de manera excepcional para el desarrollo del presente proyecto de titulación.

Finalmente, a todos mis profesores y a mis amigos, a los que se quedaron en el camino y quienes lograron sobrevivir y llegaron hasta el final, gracias por todos los momentos y apoyo que fue tan necesario para alcanzar el objetivo.

Gracias.

Joel Francisco Reinoso Delgado

1. Introducción

La palabra domótica es un concepto que engloba todas las herramientas, dispositivos y tecnologías de control y gestión para brindar un nivel de automatismo a una vivienda con el fin de aumentar el nivel de confort y seguridad a sus ocupantes. Un concepto más amplio asociado a la domótica es el de *hogar inteligente*, que según [5], se define como una vivienda sujeta a automatización con el soporte de la electrónica digital y a las comunicaciones, basadas en redes digitales internas y externas, que permiten brindar una serie de teleservicios.

El auge de la idea de las casas inteligentes se remonta a los años setenta y desde entonces, varios fabricantes han buscado dar soluciones eficientes mediante el desarrollo de dispositivos y protocolos destinados a automatizar una vivienda. Por tal motivo en la actualidad nos interesa conocer cuales son las alternativas más convenientes que se tiene a disposición del usuario en el mercado y como nos podrían beneficiar en los 4 aspectos fundamentales de la domótica: seguridad, confort, ahorro energético y comunicaciones.

Las tecnologías domóticas pueden clasificarse de varias maneras, ya sea por el tipo de protocolo que utilizan, su arquitectura, modo de instalación, etc. En este caso, diferenciaremos tecnologías dedicadas, que cuenten con licencia, y las soluciones de bajo costo, tecnologías que utilizan un asistente de voz y periféricos compatibles de varias marcas, comúnmente conocido como *Do It Yourself* (DIY).

El proyecto propuesto implica: diseñar, instalar y poner en operación cada una de estas tecnologías en dos viviendas diferentes, pero con similares hábitos de uso tecnológico. En este contexto, se automatizarán todas las luces (encendido, apagado y atenuación de luminosidad para creación de ambientes), la conexión y desconexión de equipos que consuman energía eléctrica innecesariamente y un sistema de seguridad que contará con un circuito cerrado de cámaras, alarma y control de acceso. Se utilizarán las tecnologías de LCN (Local Control Network) y los asistentes de voz de Amazon Alexa con dispositivos compatibles para la comparación y análisis integral entre tecnologías dedicadas y de bajo costo respectivamente.

1.1. Justificación

La domótica es un campo en desarrollo, ya que hasta la fecha no se tienen estándares definidos para la misma y existe absoluta libertad para trabajar con distintas tecnologías, arquitecturas y protocolos para brindar soluciones de automatización en nuestros hogares. Esta problemática genera la necesidad de comparar sistemas domóticos con el fin de detallar las ventajas y desventajas en la implementación de cada uno; esto facilitará la planificación e instalación de las casas inteligentes, brindando un sistema de alto rendimiento, con calidad de servicio y abaratando costos.

En la actualidad existen varias marcas reconocidas que se dedican al desarrollo e implementación de sistemas domóticos con el fin de brindar un mayor nivel de co-

modidad, seguridad y ahorro energético mediante una licencia para su uso. Por otro lado, se tienen las soluciones de bajo costo, dispositivos fabricados para que cualquier persona pueda automatizar su vivienda, tales como: interruptores, bombillas y tomacorrientes con WiFi, actuadores para convertir una TV en *smart*, sensores de movimiento o temperatura, cerraduras con clave, etc. Todos estos compatibles con asistentes de voz, el centro de un hogar futurista e inteligente. Sin embargo, aunque se conocen algunas ventajas y desventajas de estas tecnologías, no se tiene un estudio técnico detallado para saber hasta que punto las tecnologías de bajo costo son una mejor solución a la alternativa de tecnologías dedicadas.

El presente proyecto está dirigido a la implementación y análisis de los sistemas domóticos utilizando las dos tecnologías mencionadas anteriormente, con el fin de comparar su eficiencia, vulnerabilidad y costos, a medida que incorporamos más dispositivos dentro del hogar.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Realizar un estudio comparativo experimental entre una tecnología domótica dedicada y las soluciones de bajo costo para automatizar dos escenarios físicos similares.

1.2.2. Objetivos específicos

- Desarrollar un análisis integral del rendimiento de un sistema domótico de alta eficiencia utilizando dos tipos de tecnologías diferenciadas: dedicada y DIY.
- Integrar módulos propietarios de LCN en un sistema domótico integral de alta eficiencia de una vivienda de dos pisos.
- Ensamblar un sistema domótico integral incorporando componentes tecnológicos DIY que cumpla con estándares de calidad establecidos sobre una vivienda de dos pisos, gestionando los parámetros de control disponibles sobre cada equipo instalado y en función de cada una de las etapas de desarrollo.
- Implementar un modelo de análisis estadístico capaz de brindar información acerca de la eficiencia y rendimiento entre los dos tipos de tecnologías domóticas diferentes.
- Establecer una línea de comparación funcional y esquematizada que permita brindar al usuario todos los aspectos técnicos, económicos y sistemáticos entre cada una de las soluciones domóticas planteadas, así como también sus diferencias esenciales.

1.3. Alcance

El trabajo de titulación propuesto en este documento tiene como finalidad el diseño, ensamblaje y estudio de un sistema domótico de alta eficiencia utilizando dos tipos de tecnologías diferenciadas. Por una parte, se usará una tecnología tipo DIY basada en asistentes de voz, como el Amazon Alexa, capaz de desarrollar habilidades de automatización en función de un comando de voz, hora o ubicación, actuando directamente sobre sus terminales periféricos conectados a la misma WLAN, convirtiéndose en una herramienta de domótica sumamente interesante y poderosa. Por otra parte, se implementará otro sistema domótico bajo la alternativa de una tecnología dedicada, en este caso LCN. La tecnología modular LCN corresponde a una empresa de productos hardware y software propietarios totalmente flexibles. Para la comunicación entre los módulos y sus periféricos se utiliza el cableado disponible en la propia vivienda. Los datos se transmiten por una línea de bus adicional de forma sencilla, a través del tendido de red convencional, por lo que no requiere de un procedimiento invasivo para su instalación, transformándose así también, en una potente alternativa para la instalación de un sistema domótico de alta eficiencia.

El presente proyecto técnico propone un estudio de benchmarking (seguridad, interacción con el usuario, eficiencia energética, compatibilidad con periféricos, alcance, QoS, métricas en el proceso de comunicaciones, nivel de confort) entre las dos tecnologías establecidas anteriormente, con el fin de instaurar un punto de comparación de gran impacto que ponga a disposición, a los usuarios comunes, las diferentes ventajas y desventajas de cada tipo de tecnología. De esta manera, este trabajo propone, como eje central, una comparativa desde el punto de vista económico entre las dos tecnologías en base a los resultados obtenidos de los distintos estudios, considerando cada uno de los equipos y material utilizados en cada escenario y experimento, así como también el tiempo-hombre requerido para su instalación. Mediante esta metodología, se procede a adquirir y entregar información importante al usuario de modo que éste disponga de bases sólidas para decidir si utilizar una tecnología u otra según su planificación y sus necesidades.

1.4. Estado del arte

En la actualidad el campo de la domótica se ha llegado a varios sectores, destacándose el industrial (Siemens, LCN, etc.) y los desarrolladores de software (Microsoft IoT). A pesar de ser empresas privadas se está optando por el desarrollo de tecnologías abiertas y de libre acceso, de esta manera pueden impulsar el aprendizaje estandarizado y fomentar el crecimiento [6]. Debido a esta gran expansión existen varios fabricantes desarrollando soluciones de bajo costo para implementar sistemas domóticos 100 % eficaces y funcionales.

La planificación para implementar sistemas domóticos utilizando tecnologías de bajo costo como ZigBee, WiFi, Arduino; son objeto de un sinnúmero de investigaciones, cada una enfocada a resolver distintos aspectos sociales, económico o tecnológicos. En

[7] [8] se plantean sistemas abiertos de automatización enfocados al ahorro energético destacando que los principales problemas son: el consumo en *stand by* de los electrodomésticos y el mal uso de los sistemas de iluminación y calefacción, dando como resultado el desarrollo de sistemas inteligentes que automaticen y controlen estas variables para la conexión y desconexión de cargas.

Una de las tecnologías que ha tenido mayor impacto en domótica es ZigBee, su implementación en varios sistemas siempre ha sido destacable por encima de otras opciones como Z-wave o Bluetooth, debido a que es un protocolo abierto, de bajo consumo para los sensores y actuadores, su alcance es ideal para aplicaciones en las que se necesita una baja tasa de transmisión de datos [9] [10]. Además, la conexión con otras tecnologías como el infrarrojo o WiFi es relativamente sencilla, por lo que es fácilmente adaptable a un sistema híbrido [11]. A pesar de las notables ventajas de ZigBee, en la actualidad la tecnología que sigue predominando en dispositivos de fácil integración domótica es WiFi.

Por otro lado, existen desarrolladores de sistemas domóticos muy sofisticados, los cuales tienen reconocimiento a nivel mundial por su eficiencia, hasta la fecha LCN se ha instalado en más de 5000 construcciones tomando en cuenta los distintos requerimientos y tamaños de las redes, partiendo desde viviendas residenciales hasta plantas comerciales e industriales [2].

La domótica es un campo muy extenso, al no contar con normativas o estándares se da completa libertad para que cada usuario pueda utilizar distintas tecnologías y arquitecturas en la automatización de las viviendas. Como se ha mencionado existen varios estudios para desarrollar sistemas cada vez más eficientes, existen estudios comparativos de utilizar o no un sistema domótico en el hogar [12]; sin embargo, los estudios de *benchmarking* son muy escasos. En la Universidad de Cuenca se desarrolló una comparativa inicial entre la tecnología LCN y las soluciones utilizando la plataforma Arduino [13] para automatizar viviendas y ayudar a personas con discapacidad, brindando una primera revisión a las ventajas y desventajas de las tecnologías dedicadas sobre las de bajo costo, dando a conocer que ambos sistemas son eficientes pero LCN tiene un costo elevado y Arduino presenta problemas de escalabilidad.

1.5. Contribuciones

El desarrollo de este trabajo generó:

- Un sistema domótico eficiente utilizando tecnologías propietarias y dedicadas a la automatización de viviendas, con un sistema de monitoreo y gestión de libre acceso y amigable con el usuario.
- Un sistema domótico de bajo costo y fácil integración con dispositivos compatibles al asistente inteligente de Amazon, Alexa.
- Una comparativa teórica y experimental de dos tecnologías domóticas que brindan solución a las mismas problemáticas, basándose en distintas arquitecturas, medios de transmisión y modos de programación.

- Un listado de problemáticas y recomendaciones en la planificación e implementación de sistemas domóticos que utilizan tecnologías de uso dedicadas a la domótica y las de fácil integración (DIY).

2. Fundamentos teóricos

Este capítulo presenta nociones básicas de domótica, sus objetivos y principales arquitecturas. Adicionalmente, se describen tecnologías de integración con asistentes de voz y el detalle de operación de la tecnología LCN.

2.1. Domótica

2.1.1. Concepto

La palabra domótica proviene del latín domus (que significa casa o domicilio), dando una idea básica de que nos referimos a la automatización de las viviendas. Sin embargo, esta idea abarca un campo muy extenso ya que existen niveles de complejidad y numerosas soluciones que se pueden brindar. De acuerdo a la CEDOM (Asociación Española de Domótica e Inmótica) la domótica se refiere al conjunto de tecnologías aplicadas al control y la automatización inteligente de la vivienda, que permite una gestión eficiente del uso de la energía, que aporta seguridad y *confort*, además de comunicación entre el usuario y la vivienda [7].

Según [14] esta definición aparece en los años setenta con la llegada de la tecnología X-10 que básicamente se concentraban en sistemas de climatización para el ahorro de energía. Desde entonces la idea de buscar la autonomía total en una vivienda ha sido un tema de sumo interés.

2.1.2. Pilares de la domótica

Según la CEDOM existen 4 pilares fundamentales en la automatización de viviendas [15]:

2.1.2.1. Confort

Uno de los propósitos más importantes de la domótica es brindar comodidad al usuario, permitiéndole gestionar todo el sistema desde algún control remoto o interfaz desde su celular o a través de la *web*. El sistema debe ser capaz de realizar distintas actividades ya sean estas de carácter activo, pasivo o mixto, por ejemplo:

- Manejo de conmutación de luces en la vivienda.
- Regulación de iluminación dependiente de la luz natural.
- Temporización para activar o desactivar circuitos de potencia e iluminación.
- Sistema de control y monitoreo de los dispositivos en la vivienda.
- Gestión de servicios multimedia.

- Manejo automático de persianas.

2.1.2.2. Seguridad

El aspecto de seguridad hace referencia a todo sistema, dispositivo o red encargada de proteger los bienes patrimoniales y a los usuarios de la vivienda, para cumplir este pilar los requerimientos principales son:

- Sistema de control de intrusos, esto hace referencia a las cámaras de seguridad, portero automático, sistema de alarmas, etc.
- Simulación de presencia, crear escenas de luces dentro del hogar para no dejar la casa desprotegida.
- Sensores para detectar humo, fugas de gas y de agua.

2.1.2.3. Ahorro energético

La domótica tuvo su origen para dar solución a esta problemática, se busca la implementación de sensores y actuadores que permitan regular la intensidad luminosa de lámparas, conexión y desconexión automática de equipos de potencia o incluso apagar toda la instalación cuando el usuario abandone la vivienda. Con el fin de disminuir el consumo de energía eléctrica hasta en un 25 % los principales sistemas que se deben controlar son los de iluminación y control de temperatura.

2.1.2.4. Comunicaciones

Son un aspecto implícito en las funcionalidades mencionadas anteriormente ya que se encarga de los enlaces dentro del hogar y sus interfaces fuera de la instalación para mantener una correcta gestión del sistema.

2.1.3. Dispositivos del sistema

Una vivienda automatizada puede considerarse como un sistema en general, que consta de una o varias señales de entrada provenientes de distintos periféricos o sensores, estas son identificadas y procesadas para emitir una señal de salida con el fin de accionar o desactivar los actuadores. Este proceso se muestra en la Figura 2.1. Los elementos que componen estos sistemas se describen a continuación [7]:

- **Sensor:** Es un dispositivo que monitoriza el entorno tomando una lectura de distintas variables para transmitir información al sistema. Estos sensores pueden ser de: temperatura, luz, movimiento, encendido/apagado, etc.
- **Actuador:** Es un dispositivo capaz de interpretar señales eléctricas y cambiar las características del entorno, encendiendo/apagando dispositivos, modificar la temperatura, abrir persianas o puertas, etc.

- **Controlador:** Son los dispositivos encargados de recibir la información de los sensores y gestionarla en función de su programación para manejar los actuadores. Puede haber un solo controlador o varios, dependiendo de la arquitectura del sistema.
- **Bus:** Es el medio por el que se transmite la información a los diferentes dispositivos mencionados anteriormente, este puede ser alámbrico o inalámbrico.
- **Interfaz:** Son dispositivos donde el usuario puede interactuar directamente con el sistema, enviando o recibiendo información. Estos pueden ser: celular, computadora, interruptores, etc.

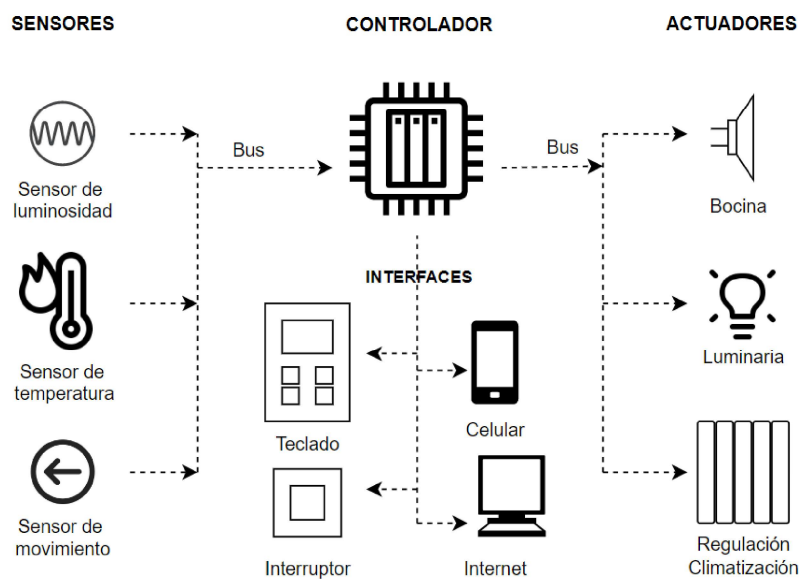


Figura 2.1: Elementos de un sistema domótico

2.1.4. Niveles de domotización

El comité de AENOR (Asociación Española de Normalización) CS205 conjuntamente con el CEDOM, instauraron la normativa AENOR EA0026 referente al nivel de domotización en las viviendas. Esta especifica los requisitos mínimos que debe cumplir una instalación domótica para ser certificada en base a una clasificación de cuatro niveles [16].

2.1.4.1. Nivel 0: Preinstalación

- Se tiene una vivienda preparada para una instalación domótica.
- Debe disponer de cuadro eléctrico, cajas de derivación y línea de conexión.

2.1.4.2. Nivel 1: Básico

- Cuenta con 13 dispositivos y 3 aplicaciones como mínimo

- Gestiona la energía mediante sistemas de climatización, electrodomésticos y control de alumbrado.
- Seguridad de usuarios y bienes, detección de fugas de agua o gas y escenarios para simulación de presencia.

2.1.4.3. Nivel 2: Intermedio

- Cuenta con 30 dispositivos y 3 aplicaciones como mínimo.
- Gestión de energía igual al nivel 1 y racionalización de circuitos.
- Seguridad de usuarios y bienes de nivel 1 incluyendo detección de incendios y presencia.
- Confort: Visualización de video y TV en diferentes estancias.
- Monitoreo desde teléfono celular.

2.1.4.4. Nivel 3: Excelente

- Cuenta con 45 dispositivos y 6 aplicaciones como mínimo.
- Gestión de energía de nivel 2 incluyendo automatización de alumbrado interior y exterior.
- Seguridad de usuarios y bienes de nivel 2, además de alerta médica, llamado de auxilio, etc.
- Confort de nivel 2, automatización de persianas y control de iluminación.
- Comunicaciones de nivel 2, videoportero y transmisión de alarmas.

2.2. Arquitectura de la domótica

La arquitectura hace referencia a la distribución y ubicación de los elementos mencionados con anterioridad. Existen principalmente 4 tipos de arquitecturas: centralizada, descentralizada, distribuida e híbrida. Sus principales diferencias radican en su topología y la ubicación del controlador, su uso dependerá del grado de automatización requerido [8] [7].

2.2.1. Arquitectura centralizada

Un sistema centralizado cuenta con una UCI (Unidad central inteligente), el mismo que se dispone en el centro del sistema y está conectada a todos los periféricos. Esta unidad recibe los datos de los sensores y envía información a todos los actuadores mediante el bus. Como se muestra en la Figura 2.2 se utiliza la topología en estrella.

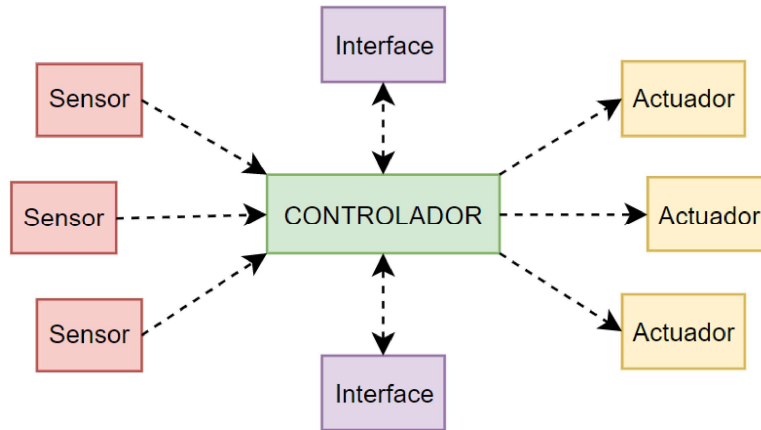


Figura 2.2: Modelo de arquitectura centralizada

2.2.2. Arquitectura descentralizada

Un sistema descentralizado no cuenta con una única unidad de inteligencia, existen varias de ellas distribuidas a lo largo del sistema e intercomunicadas a través de un bus, cada una con su distinta configuración. En la Figura 2.3 se muestra la independencia y coexistencia de los controladores.

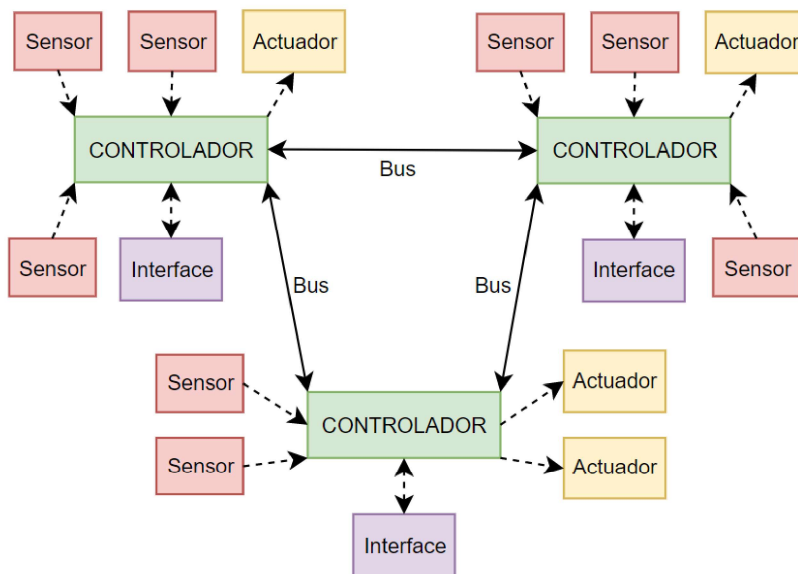


Figura 2.3: Modelo de arquitectura descentralizada

2.2.3. Arquitectura distribuida

En una arquitectura distribuida no existe una UCI encargada de tomar decisiones ya que cada nodo se puede programar para ser autónomo y ser capaz de enviar y recibir información del sistema. Todos los sensores y actuadores se comunican mediante un bus con una interfaz de acceso compartido, tal como se muestra en la Figura 2.4.

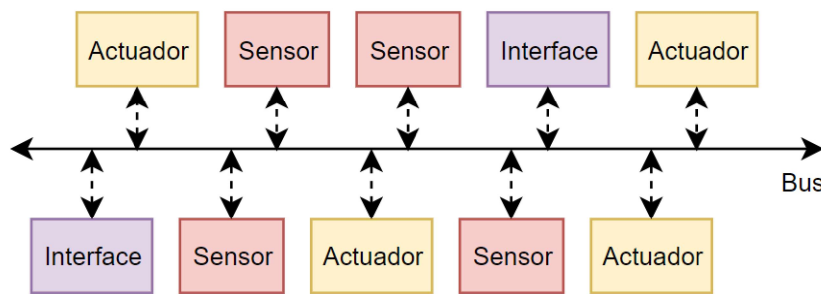


Figura 2.4: Modelo de arquitectura distribuida

2.2.4. Arquitectura híbrida

Este tipo de arquitectura reúne las características de las arquitecturas mencionadas anteriormente, dado que se permite tener uno o varios controladores y además disponer de sensores y actuadores que funcionen junto a controladores. En la Figura 2.5 se muestra una ejemplificación de esta arquitectura.

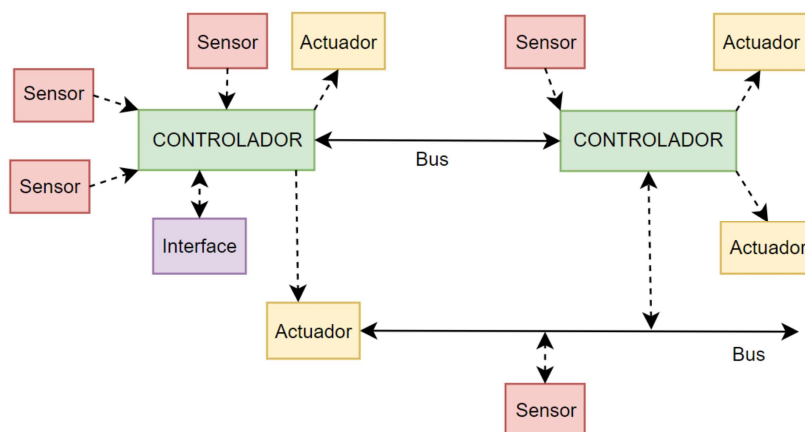


Figura 2.5: Modelo de arquitectura híbrida

2.3. Medios de transmisión

Los medios de transmisión hacen referencia a los elementos por los que se transporta la información a todos los nodos involucrados en un proceso de comunicación [17], estos deben cumplir con una serie de requerimientos como disminuir la cantidad de ruido y distorsión, permitir flexibilidad al manejo físico y capacidad de escalabilidad. En términos generales existen dos clases de medios de transmisión: guiados (en estos, existe un cable con uno o más hilos conductores para enviar la información) y no guiados (donde se utiliza el aire como medio de transmisión).

Para la implementación de un sistema domótico se utilizan principalmente tres medios de transmisión: 1) Línea eléctrica, donde los datos se envían mediante la red de potencia; 2) línea de bus, los datos se envían por un cable independiente dedicado a los

datos de control; y 3) inalámbricos, que se refiere a los medios no guiados [11]. Cada uno de estos tiene distintas características que han permitido el desarrollo de varios dispositivos y protocolos.

2.3.1. Línea eléctrica

Las comunicaciones mediante cable eléctrico (*Power Line Communications*, PLC) hace referencia a la tecnología que aprovecha las líneas de energía eléctrica como medio físico para transmitir señales de radio con propósitos de comunicación [18]. Desde hace más de 80 años esta tecnología ha sido utilizada con fines de automatización, transmitiendo información de sistemas de audio o sistemas elementales remotos para encender y apagar luminarias.

El principio de funcionamiento de este tipo de tecnologías se basa en el montaje de una portadora modulada en frecuencia o amplitud sobre la tensión de la red. Normalmente las redes transmiten una baja frecuencia de 50 o 60 Hz y señales mucho más altas para datos de hasta 1 MHz sin que exista interferencia entre estas. Se utiliza una unidad de acondicionamiento HFPCN (*High Frequency Conditioned Power Network*) para transmitir datos y señales eléctricas [19]. Un HFPCN cuenta con varias unidades de acondicionamiento (CU) que se encargan de filtrar las señales de datos (filtro pasa alto) y las de consumo (filtro pasa bajos) distribuyéndolas a sus respectivos puertos.

Como una de las aplicaciones de esta tecnología se tiene a la domótica, la red domiciliaria es la capa física utilizada por los protocolos X-10 e INSTEON. Estos utilizan portadoras en un rango de los 20 k y 200 kHz y una comunicación full duplex con el fin de tener un control centralizado, información codificada e indicadores precisos para operar los dispositivos. Adicionalmente, se tiene señales de retorno informando el acuse de recibo (ACK) de las instrucciones y el resultado de la tarea realizada [18].

2.3.1.1 X-10

X-10 es uno de los primeros protocolos desarrollados para aplicaciones domóticas, este permite la comunicación entre emisores y receptores mediante el cableado eléctrico de la vivienda, utilizando ráfagas de radio frecuencia de 120 KHz [20]. La transmisión de la señal debe sincronizarse con el punto de cruce por cero de la onda de corriente alterna de 50 o 60 Hz con una variación máxima de 200 milisegundos [1]. El 1 binario se representa mediante un pulso de 120 kHz que dura 1 ms, y el 0 es la ausencia de este pulso, tal como se muestra en la Figura 2.8.

La estructura de los mensajes en X-10 consta del código de inicio **1110**, y posteriormente la identificación del dispositivo que consta de 9 bits, los 4 primeros corresponde al código de la casa (*House Code*) y los otros 5 bits al código de dispositivo (*Number Code*). El protocolo X-10 puede utilizar hasta 16 unidades por cada dirección de casa lo cual nos daría un total de 256 unidades.

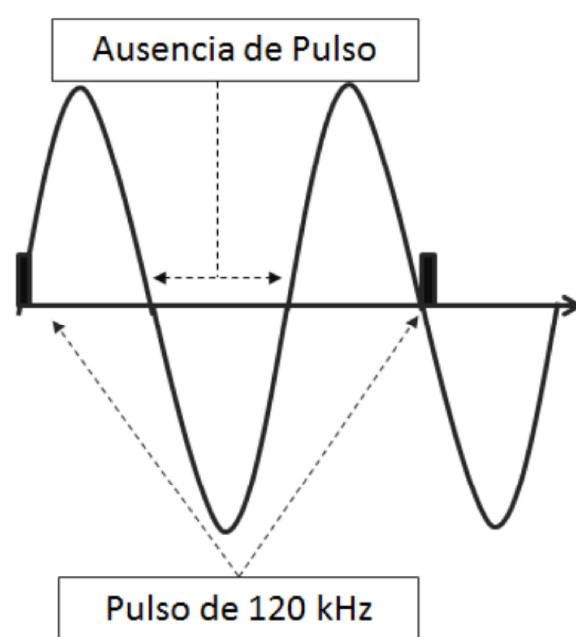


Figura 2.6: Envío de mensaje con el protocolo X-10 [1].

2.3.2. Línea de bus

Estas tecnologías utilizan un cable dedicado e independiente (bus) para la transmisión de los datos. Los sistemas que integran un bus son estables, seguros y muy eficientes. La utilización de esta vía de transmisión hace que el sistema no tenga que compartir funciones, esto evita los problemas de interferencia y saturación obteniendo como resultado una señal óptima [21].

Debido a la constante expansión en el campo de la domótica, existen varias soluciones en el mercado cada una con sus distintas características que dependerá de las necesidades de los clientes. En la actualidad existen dos tipos de fabricantes, los que emplean tecnologías basadas en estándares mundiales (KNX, LonWorks y DALI) y los sistemas propietarios (LCN, Vivimat, BUSing).

2.3.2.1. KNX

KNX es un sistema estándar abierto de instalación domótica e inmótica que nace de la fusión de EIB (*European Installation Bus*), EHS (*European Home Systems*) y BatiBUS. Sus características principales son la compleja gama de medios de transmisión y de modos de configuración, una única herramienta de puesta en marcha y, además, está aprobado por los principales sistemas del mundo [22] [23].

KNX permite 4 medios de transmisión los cuales pueden ser usados en uno o más modos de configuración dependiendo la necesidad del usuario. Estos medios son: Par trenzado (TP-1), Red eléctrica (PL110), radiofrecuencia (RF) y ethernet (IP). El par trenzado es el más utilizado y desarrollado ya que permite una velocidad de transmisión de 9600 bit/s.

2.3.2.2. BUSing

BUSing es un sistema de comunicaciones distribuido creado por la empresa Ingenium, diseñado para aplicaciones domóticas, dando capacidad de control sobre luminarias, persianas, cámaras IP y sistemas de seguridad [24]. Este cuenta con una arquitectura distribuida por lo que cada dispositivo es autónomo y puede trabajar como maestro y esclavo, brindando una comunicación continua a todos los nodos.

El bus utilizado consta de 4 hilos, de estos se utilizarán 2 para la transmisión de información de control y los otros 2 para la alimentación de los módulos. Dicha información es enviada a través de telegramas que constan de una serie de caracteres que se agrupan en distintos campos: direcciones (identificador del nodo emisor y receptor), comandos (señala la actividad que se debe ejecutar), datos (definen las acciones a ejecutar).

El sistema BUSing presenta un diseño que lo hace fácilmente escalable, para el correcto funcionamiento del bus se puede tener una distancia máxima de 300 metros entre dos nodos, pudiendo llegar hasta 1 km con la ayuda de repetidores. Además, cuenta con una estructura jerárquica, para sus configuraciones utiliza dos líneas: primaria y secundaria, uniéndolas a través de un dispositivo denominado ROUTing, esto permite que una instalación cuente con un total de 65.535 dispositivos de bus [25] [26]. La tasa de transmisión es de 9 kbps en el bus secundario y seleccionable entre 4.8 y 115.2 kbps en el bus primario.

2.3.3. Comunicaciones inalámbricas

Los medios no guiados aparecen como una solución de transmitir información en lugares donde es complicado el tendido de cable. Estos utilizan el espacio libre para propagar la información por medio de ondas electromagnéticas [10]. Cada tecnología utiliza bandas de frecuencia distinta con portadoras en el orden de los MHz hasta los GHz.

Las redes inalámbricas han tenido su auge en los últimos años debido a los avances en la electrónica integrada y la reducción de costos en ordenadores. Estas han permitido la evolución de los sistemas domóticos haciéndolos más accesibles, escalables, reduciendo costos de operación, mantenimiento e instalación, incluyendo la capacidad de brindar seguridad, control, confort y monitoreo remoto [11]. En general, se configuran redes WPAN, que son conectadas a un Gateway para expandir la red a la WLAN. Entre los principales protocolos de comunicación utilizados para la automatización de viviendas se tiene: WiFi, ZigBee, Bluetooth, Z-Wave.

2.3.3.1. WiFi

Wireless Fidelity (WiFi) es una tecnología inalámbrica basada en el estándar IEEE 802.11 que permite la conexión entre dispositivos y a Internet a través de un punto de acceso de red inalámbrica. Esta tecnología surgió con el fin de estandarizar un mecanismo de conexión inalámbrica para dispositivos de distintas marcas y origen,

ha ido evolucionando para brindar una mayor velocidad, menor latencia y diversas experiencias en el entorno[27] [28].

Existen dos categorías en esta tecnología: WiFi 2.4 GHz (IEEE 802.11b) y 5 GHz (IEEE 802.11ac). La primera trabaja en un canal de 2.4 GHz, este es utilizado por otras tecnologías como bluetooth, lo que provoca mayor interferencia y menos velocidad de conexión, de hasta 600 Mbps, pero tiene un mayor rango de alcance; mientras que, al utilizar el canal de 5 GHz tiene una menor cobertura pero cuenta con una velocidad de transmisión que puede llegar a 1.73 Gbps.

2.3.3.2. ZigBee

ZigBee es una tecnología inalámbrica de corto alcance y bajo consumo, basada en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal. Esta especificación se definió como una solución para aplicaciones que requieren comunicaciones seguras de baja tasa de envío de datos y maximización de la vida útil de sus baterías, teniendo aplicaciones en el hogar como la seguridad y la automatización [29] [10].

ZigBee utiliza las bandas de 868 MHz en Europa, 915 MHz en Estados Unidos y 2.4 GHz (disponible en casi todo el mundo sin licencia) y alcanza una tasa de 20 a 250 kbps en un rango de 10 a 75 metros. Su principal objetivo es el bajo consumo de energía y puede utilizarse para control industrial, alojar sensores empotrados, recolectar datos y en sistemas domóticos.

2.3.3.3. Bluetooth

Bluetooth es una tecnología inalámbrica de corto alcance que permite la comunicación de dispositivos digitales a una distancia máxima de 10 metros. Habitualmente la conexión se realiza entre dos nodos, sin embargo, ciertos dispositivos pueden actuar como maestros y conectarse a varios nodos. En lo referente a la domótica, el protocolo bluetooth ha sido ampliamente utilizado, sin embargo su consumo de potencia es relativamente mayor a las tecnologías mencionadas anteriormente.

Bluetooth transmite datos y voz a través de ondas de radio que operan en la banda de 2.4 GHz, para ello utiliza redes inalámbricas de área personal (WPAN, por sus siglas en inglés) [30]. En cuanto a la velocidad, esta tecnología alcanza 1 Mbps. Los nodos deben encontrarse dentro del radio de alcance, aunque esto dependerá de la clase del dispositivo, estos se clasifican en:

- **Clase 1:** Potencia máxima permitida de 100 mW y alcance de hasta 100 metros.
- **Clase 2:** Potencia máxima permitida de 2.5 mW y alcance de entre los 5 y 10 metros.
- **Clase 3:** Potencia máxima permitida de 1 mW y alcance de tan solo 1 metro.

2.4. Tecnología LCN

LCN (*Local Control Network*) es una marca especializada en soluciones de domótica e inmótica fundada en 1992 por la empresa Issendorff KG. En LCN, como sistema descentralizado, se produce una distribución de la inteligencia en la vivienda y los diversos componentes pueden adoptar decisiones y efectuar procesamiento de datos en el lugar que ocupen [2].

2.4.1. Características principales

- LCN utiliza un bus de datos que interconecta a todos los dispositivos del hogar, por lo que se requiere un cable adicional para la transferencia de datos que se incorpora junto a la red eléctrica.
- Cada módulo de bus en LCN está fabricado para funcionar de manera autónoma y su software de programación LCN-PRO es intuitivo y fácil de manejar.
- Las instalaciones son fácilmente escalables, se puede conectar un gran número de dispositivos y se asegura una gran velocidad en transmisión de datos.

En la tabla 2.1 se muestran los principales datos técnicos de LCN demostrando de esta manera las características de fiabilidad y velocidad en el bus de datos [31].

Tabla 2.1: Datos técnicos de LCN.

Tecnología	Datos
Tasa de datos	Nivel inferior del bus: 9600 kB/s = aprox. 100 Telegramas/s Segmento de bus: 305 kBit = 1000 T/s (hasta 10000 T/s)
Velocidad de transmisión	24 Bit aprox. (hasta 120 B/Telegrama)
Nivel inferior del bus	max. 250 módulos por segmento
Max. de segmentos	120 segmentos
Expansión máxima	30000 Módulos
Alcance	1 Km por segmento de bus > 20 Km con cable de fibra óptica

2.4.2. Fundamentos

- **Módulos:** Los módulos del bus son los elementos fundamentales para la automatización LCN, cada uno tiene una fuente de alimentación y un microprocesador que le permite procesar la información y comunicarse de manera autónoma.

Cada uno de los módulos se programa de la misma manera, pero existen varios tipos, dependiendo de sus conexiones disponibles y su diseño. Los principales grupos son los módulos empotrables y los de carril DIN.

- **Sensores y puertos:** Cada uno de los sensores y actuadores pueden comunicarse a través de los puertos disponibles en los módulos, estos son de tipo T, I y P.

Los puertos T generalmente sirven para conectar los módulos a los pulsantes o sensores con teclados electrónicos. El puerto I se utiliza para comunicar los módulos con los sensores. Finalmente el puerto P sirve para conectar con otros periféricos como bloques de relés o un sensor binario.

- **Comunicación:** La transmisión de información en LCN se realiza mediante el cable adicional para datos y el neutro, de tal manera que todos los módulos se comunican.

Los datos se transmiten en bloques de telegramas, estos contiene la información útil, dirección del emisor y receptor, mecanismo de reconocimiento de fallos y datos complementarios [2], tal como se observa en la Figura 2.7.

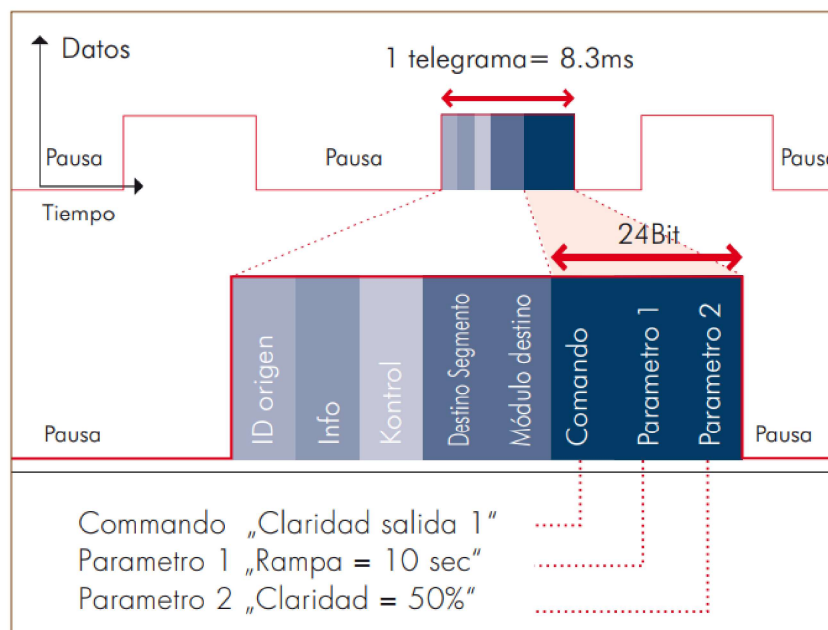


Figura 2.7: Datos transmitidos en el bus LCN. Obtenido de [2]

- **Modos de direccionamiento:** Cada módulo LCN debe tener un identificador para su respectiva programación. Se puede incluir hasta 250 módulos en un segmento, y pueden existir hasta 120 segmentos, de este modo el identificador único constará del ID del módulo y del segmento.

Cuando se necesita consultar a varios módulos por medio del mismo telegrama se puede conseguir asignando todos estos a un grupo. Se pueden crear 250 grupos y cada módulo puede estar hasta en 12 grupos diferentes.

2.5. Asistentes de voz

Un asistente inteligente virtual (IVA, por sus siglas en inglés) se define como un agente tipo software que permite realizar tareas y ofrecer servicios a un individuo mediante una interfaz de voz [32]. El objetivo de estos dispositivos es disminuir la interacción hombre-máquina y llevar a cabo distintas tareas cotidianas del hogar como el manejo

de las luces, obtener información de las condiciones meteorológicas, ajustar la temperatura, etc.

Su arquitectura general se muestra en la Figura 2.8 donde se puede observar las distintas capas que atraviesa una petición de voz para llegar a una acción en concreto. Los asistentes convierten el sonido en texto mediante funciones especializadas, estas peticiones llegan a los servidores de los IVA, donde se procesan mediante el análisis del lenguaje natural y de ser necesario se utilizan servicios de terceros para devolver la petición en forma de una acción o en sonido [33].

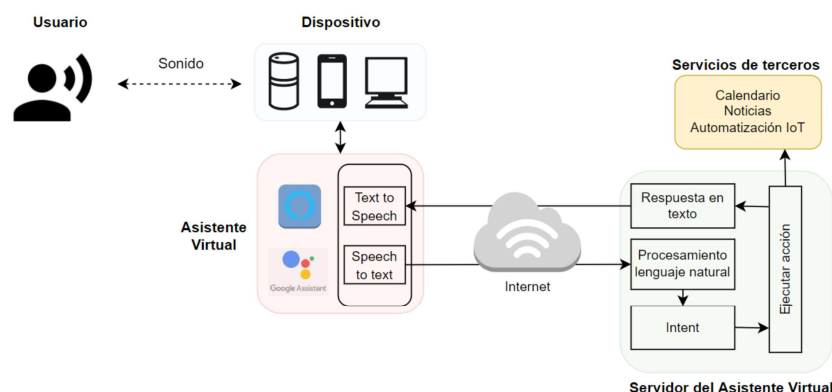


Figura 2.8: Arquitectura de los asistentes virtuales inteligentes.

Como se puede deducir estos asistentes virtuales necesitan de una conexión a Internet para ejecutar la mayoría de sus funcionalidades ya que dependen de sus servidores y aplicaciones de terceros.

2.5.1. Amazon Alexa

Alexa es un servicio de voz ubicado en la nube de Amazon disponible en sus dispositivos o los de terceros que tengan Alexa integrado. Este asistente virtual puede controlar varios dispositivos IoT (*Internet of Things*) que sean compatibles con él, estos pueden ser focos, tomacorrientes, cámaras, cerraduras, etc. Además el desarrollo de aplicaciones de terceros o *skills* permite extender la funcionalidad que le podamos dar a Amazon Alexa.

En la documentación de Amazon es posible encontrar la arquitectura que maneja, similar al vistazo general que se mostró en la Figura 2.8. Cuando el usuario hace una petición a Alexa, esta se graba y llega hasta los servicios de voz de Amazon donde es procesada, esta solicitud se busca en los servidores de *skills* para poder ejecutarla y dar una respuesta. Cuando el *skill* recibe la petición se ejecuta o en su defecto consulta en los servidores de terceros. Como último paso desde Amazon Web Service Lambda se envían las ordenes a los dispositivos del hogar y un audio para informar desde los altavoces de Alexa que la acción se ha ejecutado satisfactoriamente. La Figura 2.9 muestra el procesamiento al encender una bombilla inteligente en un domicilio.

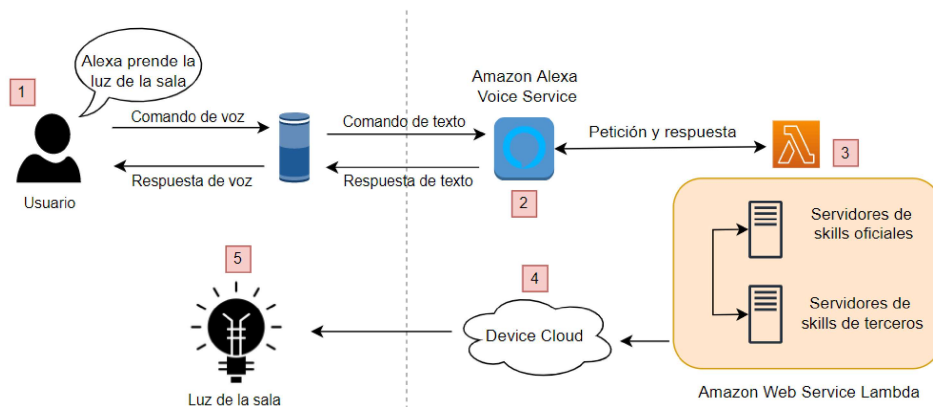


Figura 2.9: Arquitectura del sistema Amazon Alexa.

2.5.2. Acerca de WebRTC

WebRTC es un proyecto de código abierto que está siendo elaborado por la W3C, y permite a las aplicaciones del navegador realizar llamadas de voz, chat de video y uso compartido de archivos P2P, sin la necesidad de instalar plugins.

El estándar Web Real-Time Communication (WebRTC) admite la transmisión de vídeo, audio y datos arbitrarios en tiempo real entre dos nodos o pares. Amazon es compatible con WebRTC para permitir la transmisión en tiempo real de audio, vídeo y (opcionalmente) datos arbitrarios entre Alexa y los periféricos domésticos inteligentes. Alexa comunica comandos a través del canal de datos de comunicación en tiempo real (RTC) al periférico, y luego el dispositivo responde e informa el estado a través del canal de datos. Para habilitar la transmisión de audio y vídeo en tiempo real, es necesario implementar la interfaz *Alexa.RTCSessionController* como una *skill* de Alexa.

Los usuarios pueden comunicarse de forma remota con sus dispositivos utilizando un Fire TV o cualquier dispositivo Echo, como Echo Dot, Echo Plus, Echo Show o Echo Spot. Los usuarios también pueden ver transmisiones en vivo desde una cámara en la aplicación Alexa. En la Figura 2.10 se observa el diagrama de secuencia del protocolo de señalización WebRTC entre Alexa y una *skill*.

2.6. Home Assistant

Home Assistant es una plataforma de código abierto utilizada principalmente para aplicaciones en la domótica. El servidor se utiliza como un elemento central encargado de la gestión y administración de todos los dispositivos en la red [34]. Este servidor puede ser instalado en una computadora con Windows o Linux, pero se recomienda tenerlo en un sistema embebido como una RaspberryPi, de tal manera que se pueda acceder remotamente al mismo y tener una interfaz interactiva del sistema domótico.

Una de las características más importantes de Home Assistant es su compatibilidad con varias marcas, ya que cuenta con varios integradores que se instalan fácilmente

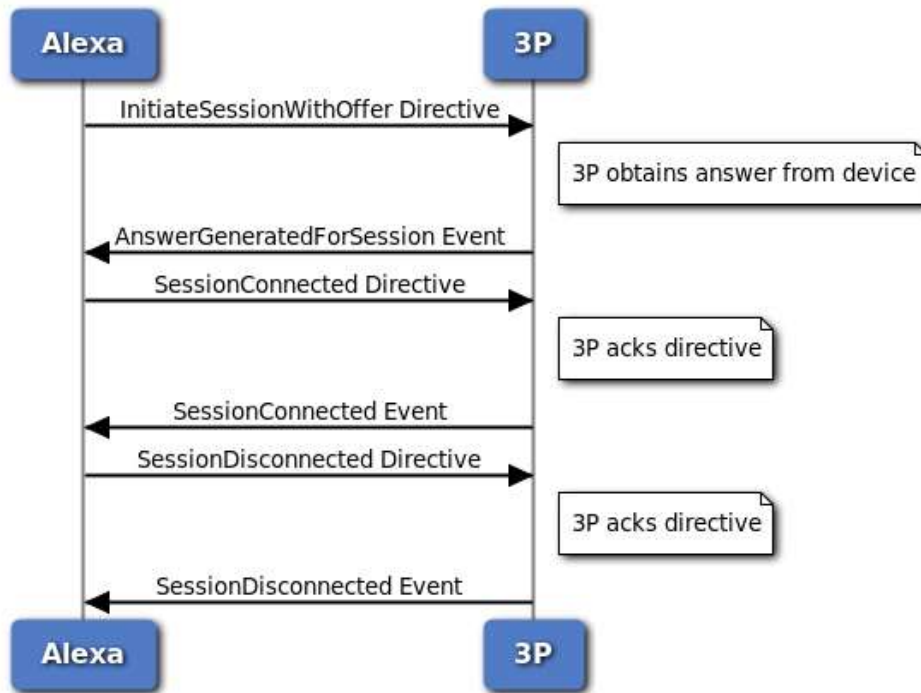


Figura 2.10: Señalización WebRTC. Obtenido de [3]

dentro del servidor, destacando su funcionamiento conjunto con LCN y Amazon Alexa.

3. Diseño y planificación de la red LCN

Para la implementación de un sistema domótico es importante tomar en cuenta su planificación como en cualquier otra red. Esto permite disminuir los costos de instalación, hace accesible la escalabilidad del sistema y principalmente permite cumplir eficientemente los cuatro pilares fundamentales de la domótica: confort, seguridad, ahorro energético y comunicaciones.

En este capítulo se detalla el proceso de análisis, diseño, implementación y verificación de la red domótica utilizando dispositivos de LCN, además, el desarrollo de un sistema de gestión y monitoreo de libre acceso con el fin de desplegar mayor funcionalidad a la que esta tecnología posee.

3.1. Requisitos del proyecto

Según lo analizado en el capítulo 2 acerca de los niveles de domotización (normativa AENOR EA0026) y el análisis de la función de calidad en [13], podemos determinar los requisitos básicos que debe contener una vivienda automatizada, los cuales se detallan en la tabla 3.1, cada uno con su nivel de importancia.

Tabla 3.1: Requerimientos funcionales del usuario.

Requerimiento	Nombre	Prioridad
R1	Encendido y apagado de luminarias	5
R2	Control de brillo	4
R3	Creación de escenarios	3
R4	Conexión y desconexión de equipos que consuman energía en stand-by	4
R5	Cámaras de vigilancia	4
R6	Control de persianas	2
R7	Sistema de gestión y monitoreo de la red	5

Además se debe tomar en cuenta los requisitos no funcionales del sistema: ser amigable con el usuario, tener escalabilidad y confiabilidad.

3.1.1. Diseño

Como primer paso se deben considerar los espacios o ambientes del hogar y su extensión para la planificación, de esta manera facilitará la generación de escenarios y rutinas. La vivienda consta de dos pisos y tienen un área de 70 m^2 . Para una red LCN no es necesario tener presentes los requisitos de alcance en la red WiFi ya que la

comunicación entre los módulos es alámbrica (uso de bus de datos). A continuación se detallan las soluciones a los requerimientos planteados:

- Para los requerimientos R1, R2 se utilizan los módulos LCN-UPP, estos cuentan con la capacidad de controlar dos salidas utilizando la información de sensores, teclados especializados de LCN o pulsantes de cualquier fabricante, dando la posibilidad de programar acciones de encendido, apagado o dimerizar luminarias mediante acciones o gestos predeterminados. A continuación, en la tabla 3.2 se muestran los ambientes con su respectivo número de circuitos de iluminación para dimensionar la cantidad de módulos y sensores necesarios.

Tabla 3.2: Dimensionamiento de circuitos de iluminación.

Ambiente	Circuitos de iluminación	Módulos requeridos
Entrada	2	LCN-UPP LCN-T8
Sala	2	LCN-UPP LCN-GT6
Cocina	2	LCN-UPP LCN-T8
Pasillo	2	LCN-UPP LCN-BMI
Habitación Principal	2	LCN-UPP LCN-GT10D LCN-NUI
Habitación 1	1	LCN-UPP LCN-T8
Habitación 2	2	LCN-UPP LCN-T8

- Con el fin de solucionar el requerimiento R3 se deberá crear grupos de módulos y de esta manera generar escenarios de una manera más rápida y eficaz. Reuniendo varias luminarias o lámparas para crear distintos ambientes, según lo necesite el usuario.
- El requerimiento R4 utiliza equipos de potencia, se debe identificar los dispositivos que consumen más energía eléctrica cuando se encuentran en estado de stand-by, estos se conectarán a tomacorrientes cableados por medio de un módulo LCN-SH y LCN-RxH ya que éstos simplemente cierran o abren contactos mecánicos. Estos mismos módulos deben utilizarse para R6 ya que tienen una conexión especializada para motores y su inversión de giro. Según [35] el mayor gasto innecesario de energía se da por los dispositivos eléctricos y electrónicos que funcionan en modo de espera, se ha medido y cuantificado la potencia que consumen algunos de estos y los resultados se muestran en la tabla 3.3.

Los módulos LCN-T8 permiten acoplar pulsantes de cualquier fabricante al sistema, para comandar las luminarias con tres tipos de acciones: Aplastar, soltar, sostener. A su vez, los módulos GT6 y GT10D son pantallas táctiles especializadas a las que se les puede programar distintos gestos, señales y la interfaz gráfica mostrada al usuario. Finalmente en el pasillo el sensor de movimiento

Tabla 3.3: Consumo de energía eléctrica en stand-by.

Dispositivo	Corriente (mA)	Potencia (W)
Consola de videojuegos	23.3	2.95
Televisor	22.6	2.88
Equipo de sonido	13.1	1.66
Cargador de laptop	10.3	1.3
Microondas	9	1.14
Total	78.3	9.93

LCN-BMI.

- LCN cuenta con sistemas de video vigilancia, sin embargo tienen un costo de inversión bastante alto, y para motivos de la comparación se pueden utilizar distintas marcas y de esta manera cubrir el requerimiento R5.
- LCN-GVS es una interfaz de visualización y gestión propia del fabricante que puede ayudar a cubrir el requerimiento R7, desde aquí se podrá monitorear la actividad de cada uno de los dispositivos LCN distribuidos en la vivienda.

3.1.2. Implementación

Como se mencionó con anterioridad la tecnología LCN utiliza un cable de datos para interconectar cada uno de los módulos y tener una comunicación eficaz entre cada uno de ellos, este bus se añade al cableado eléctrico de la vivienda, este fue el principal problema ya que se tuvo que adaptar a una casa ya construida, por lo que se comprometió la estructura.

Para la programación del sistema una vez instalado es necesario un módulo LCN-PKE, este es un acoplador de redes IP, permite la comunicación LAN o WLAN con el software de programación LCN-PRO, por tanto será el primer módulo a tomar en cuenta para la implementación. Una vez conectado se deberán crear un nuevo proyecto, asignando un nombre y una contraseña para la configuración de los módulos.

El resto de módulos a utilizar son los detallados en la tabla 3.2. Para el sistema de control de iluminación y dimerización se utilizará el módulo LCN-UPP, el cual cuenta con dos salidas (O1 y O2) y puede ser manejado mediante pulsantes comerciales (utilizando el módulo LCN-T8) o los teclados propios de LCN (conectados mediante el puerto T del módulo), como se evidencia en los diagramas de las figuras 3.1 y 3.2.

Para los circuitos de potencia se han utilizado los módulos LCN-SH y LCN-R8H brindando una fácil conexión y desconexión de equipos que consumen energía en modo de espera gracias a sus salidas binarias. Finalmente, en la habitación principal se tiene el control de las persianas por lo que es necesario el uso de el LCN-SH y un LCN-R2H que permite la inversión de giro de un motor.

Los diagramas de conexión para la instalación pueden observarse en las figuras ?? y 3.2.

Una vez instalados los módulos, se debe ingresar al software LCN-PRO, en donde

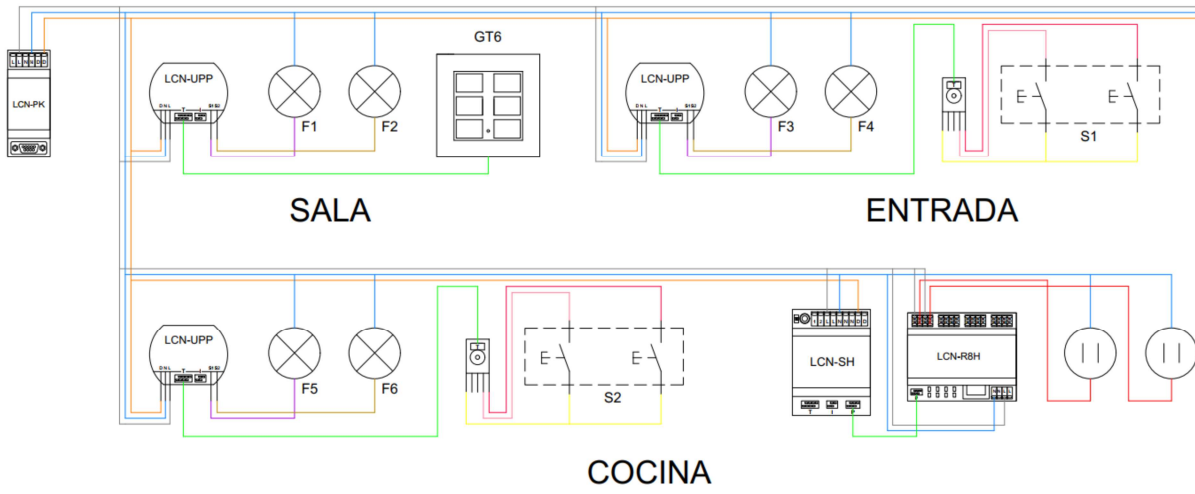


Figura 3.1: Diagrama unifilar para la planta baja.

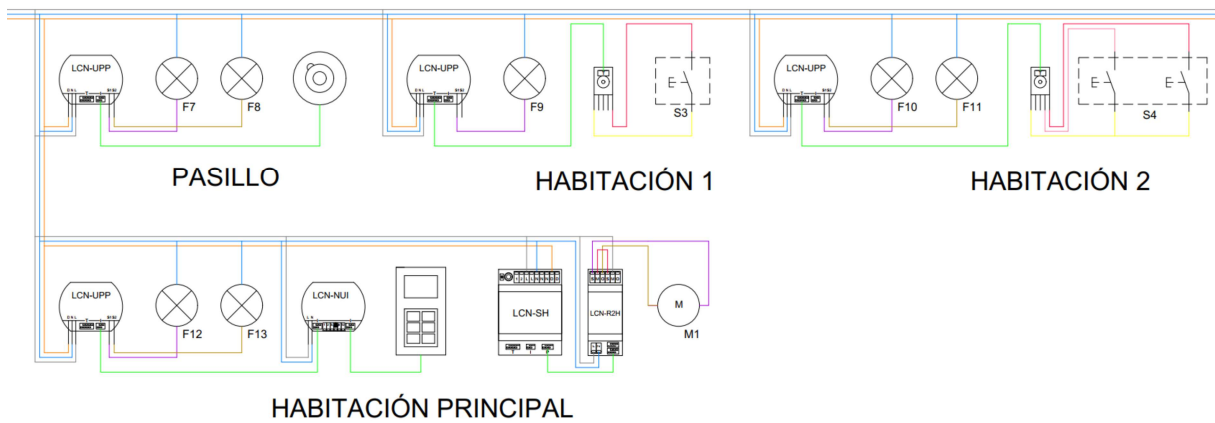


Figura 3.2: Diagrama unifilar para la primera planta alta.

se procede a crear un nuevo proyecto, en este punto el programa debe identificar y reconocer a cada uno de los módulos en el bus. Cada módulo cuenta con un número de serie para identificarlo en el software, al hacer click por primera vez podemos asignar un ID (un número entre 5 y 254) y un nombre al módulo identificado. Además, el software da la opción de asignar una descripción y de esta manera brindar más información para localizar correctamente a cada módulo. Finalmente, se establece que cada uno de ellos pertenece a el segmento 0, ya que, al ser una instalación relativamente pequeña, no se necesitarán más segmentos.

Todos los pulsantes o teclados pueden comunicarse con cualquiera de los módulos gracias a la conexión en bus, estos pueden diferenciar tres tipos de estados:

- **Corto (Hit):** Se realiza una acción al presionar brevemente, es la acción más común.
- **Largo (Make):** Se realiza una acción al tener presionado prolongadamente.
- **Soltar (Break):** Se realiza una acción al liberar la tecla después de una presión prolongada.

Posteriormente, se configuran los periféricos de cada módulo, en el caso de los módulos LCN-T8 se debe asignar una acción dependiendo el estado de los pulsantes. Con el fin de consumir menos energía, se utiliza el caso más práctico de CORTO para encender la luminarias a un porcentaje del 70 %, si el usuario desea aumentar el brillo a un 100 %, se asigna el caso LARGO.

En las figuras 3.3 y 3.4 se muestran los módulos LCN con su respectivo identificador, de esta manera podremos acceder a ellos y sus respectivas configuraciones de periféricos.



Figura 3.3: Declaración de módulos de la planta baja.

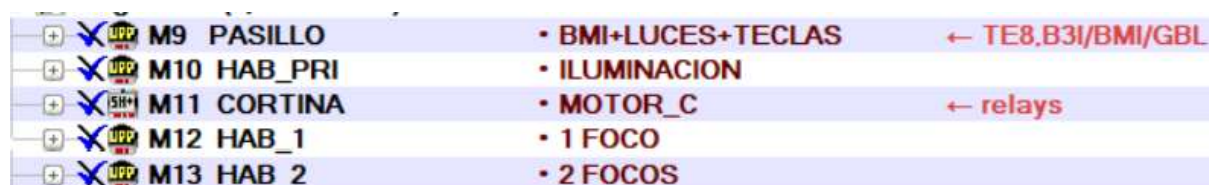


Figura 3.4: Declaración de módulos de la primera planta alta.

Para los teclados y sensores GT6, GT10D y BMI se utiliza el puerto I de los módulos UPP, desde aquí se comunican directamente y se pueden programar las acciones

de una manera más interactiva, en la pantalla GT10D se mostrará el estado de las luminarias, y será posible controlar las persianas mediante gestos. En la Figura 3.5 se muestra un diagrama de bloques para la configuración del sistema LCN.

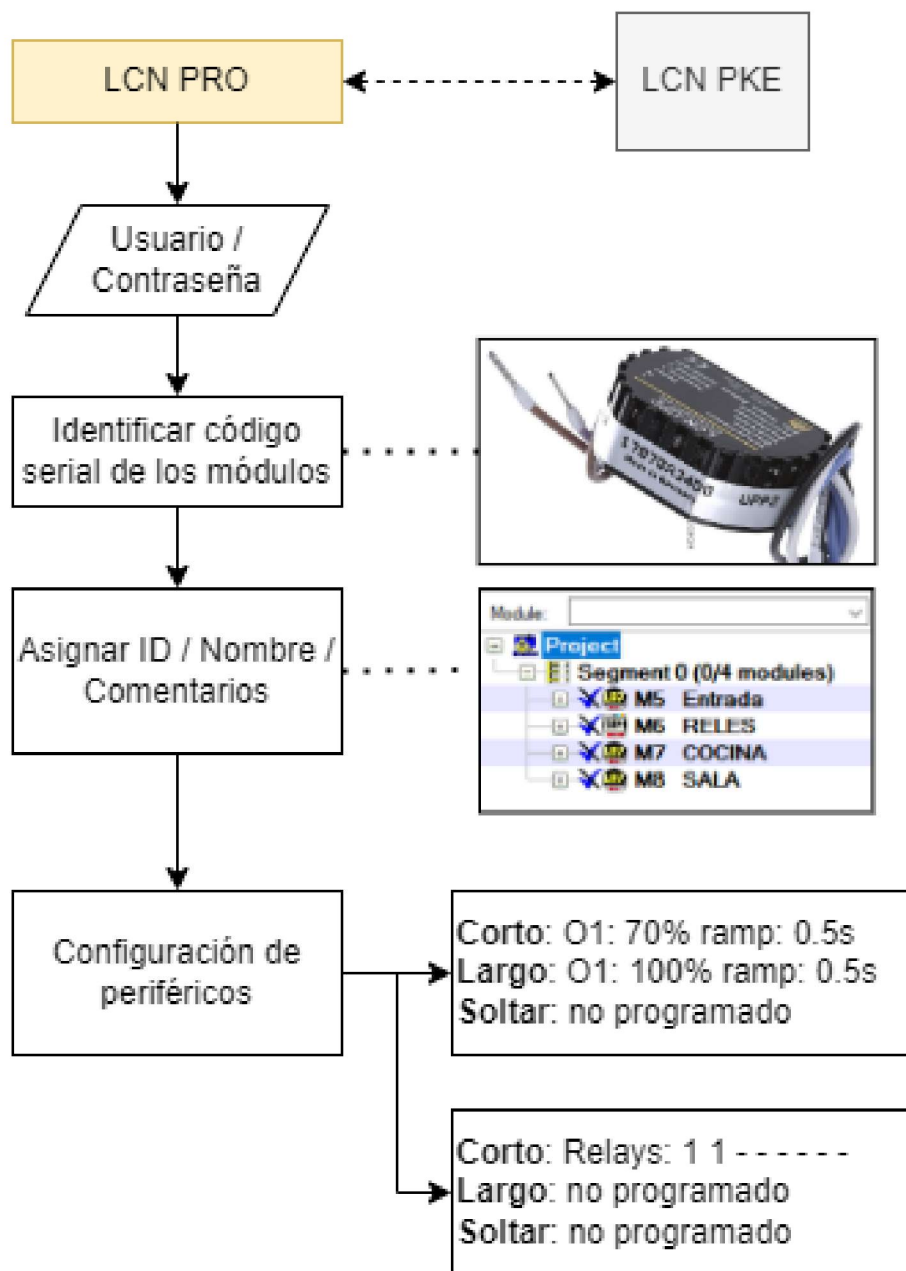


Figura 3.5: Configuración de módulos LCN.

Una vez configurados los módulos y las acciones de los teclados y sensores se crean grupos con el fin de crear los escenarios o manejar distintos espacios con una sola acción.

En la Figura 3.6 se puede apreciar la conexión entre los módulos dentro de los planos de la vivienda.

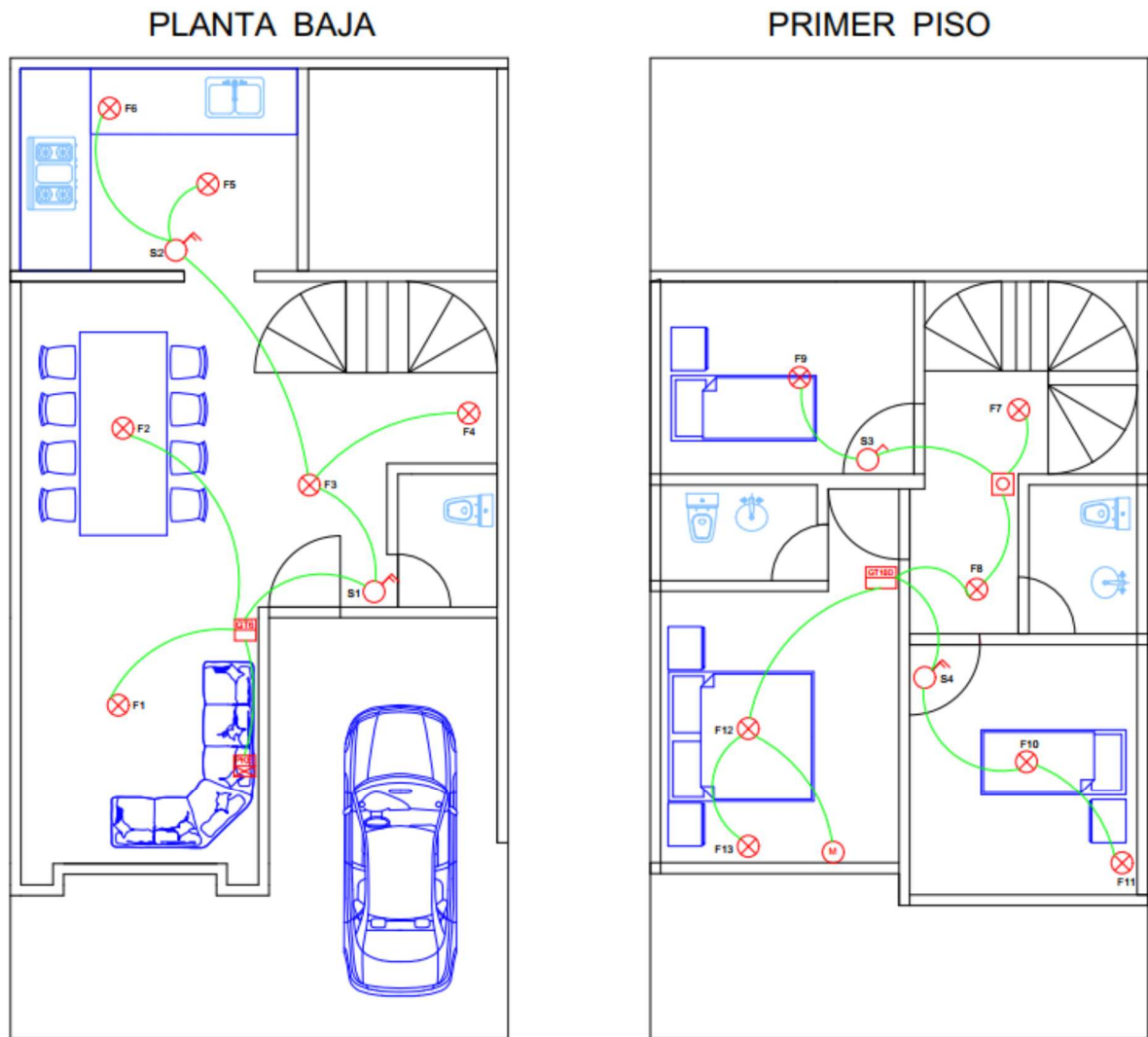


Figura 3.6: Planos de la vivienda con sistema domótico LCN

Configuración de pulsantes con LCN-T8

Para adaptar pulsantes convencionales al sistema LCN se utiliza el módulo LCN-T8, el cual cuenta con 6 cables que permite la conexión de hasta 8 pulsantes (como se muestra en la Figura 3.7). Sus estados se reflejan directamente en la lista de teclas A en la configuración. En cada tecla observaremos los tres estados mencionados anteriormente, en este punto se deberá configurar las acciones de dimerización para la función corto y largo con rampas de 5 segundos e intensidad del 70% y 100% respectivamente.

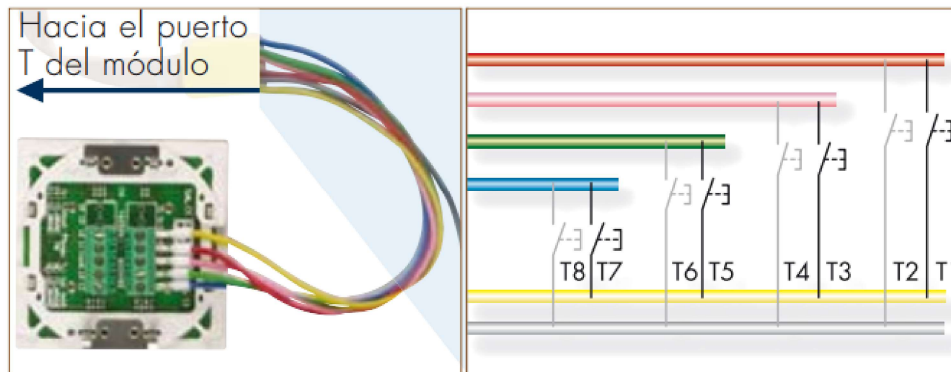


Figura 3.7: Conexión de pulsantes en LCN-T8 [2]

Configuración de teclados LCN-GT6 y LCN-GT10D

Los módulos LCN-GT se conectan directamente a un módulo LCN-UPP mediante la conexión T o I, dependiendo el modelo, y de ser necesario se suministran con una fuente de alimentación empotrable (LCN-NUI). Las direcciones de las teclas corresponden a la tabla A, desde la llave 1 hasta la 6. Estos teclados trabajan con las mismas tres funciones, pudiendo agregar las acciones ON/OFF/PARPADEAR/TITILAR.

Configuración de sensor LCN-BMI

El LCN-BMI es un detector de movimiento que se conecta a los módulos LCN-UPP mediante la conexión I. Este es un sensor PIR (pasivo infrarojo) que registra la radiación térmica de un cuerpo (humano) [2]. Las respuestas del sensor se dan en las direcciones B4, B5, B6 y B7, se programan los eventos largo y soltar dependiendo de la lectura del sensor.

Sistema de seguridad

Para el sistema de vigilancia, se ha optado por la marca TONTON ya que tiene un precio más accesible y ofrece servicios de visualización similares a los de LCN, ya que se permite acceder a ellos desde un monitor o un teléfono celular. Se han colocado 4 cámaras para monitorear el exterior e interior de la vivienda, estas se conectan a un DVR con un disco duro de 1 Tb.

3.1.3. Sistema de monitoreo

LCN cuenta con un sistema propio de gestión y monitoreo para la red domótica, Global Visualization System (LCN-GVS), sin embargo, al ser esta una tecnología dedicada existe una licencia para su uso que restringe el número de dispositivos que se pueden manejar, sin contar con su costo adicional a los equipos utilizados. Es por este motivo que se plantea una solución para abaratar costos y brindar un servicio eficiente y de calidad para el monitoreo de los elementos en la red LCN.

Home Assistant es un software gratuito y de código abierto capaz de controlar y gestionar los dispositivos de una red domótica, además puede brindar información de consumo eléctrico, de ancho de banda, enviar y recibir información de distintos periféricos. Esta herramienta permite personalizar la interfaz con nuestro sistema domótico. Puede ser instalada sobre cualquier Windows o Linux, sin embargo, lo más recomendable es instalarlo como sistema operativo en un dispositivo embebido como una RaspberryPi, posteriormente se accede remotamente a esta mediante una PC o un teléfono móvil.

Integraciones

Home Assistant puede ampliarse con integraciones, estas se encargan de un dominio específico, en nuestro caso controlarán el hardware de LCN. Las integraciones están escritas en Python y su arquitectura se muestra en la Figura 3.8.

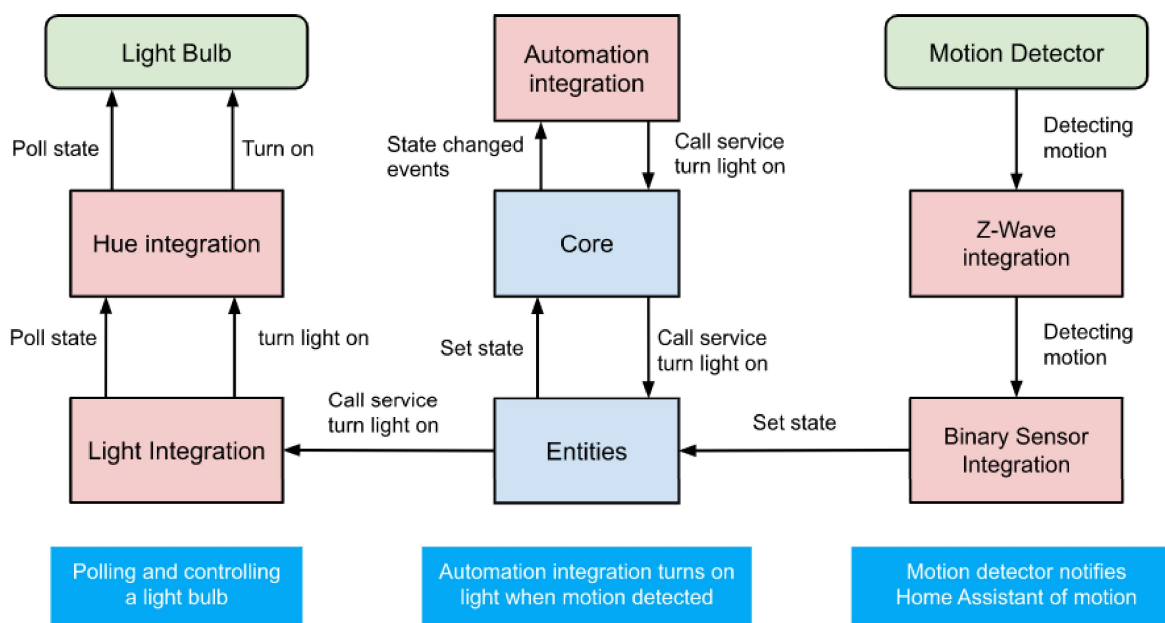


Figura 3.8: Arquitectura de una integración en Home Assistant [4]

Para acoplar el sistema LCN en Home Assistant, es necesario descargar la integración respectiva, posteriormente se agrega la extensión de Visual Studio Code con el fin de modificar los archivos del servidor. Accedemos al archivo **configuration.yaml** y se agregan las líneas mencionadas a continuación para especificar la dirección IP y el puerto del LCN-PKE, se recomienda que esta sea estática.

```
lcn :
  connections :
    - name: myhome
      host: 10.13.1.110
      port: 4114
      username: lcn
      password: lcn
```

Extracto de código 3.1: Definición de LCN-PKE

Una vez configurado el LCN-PKE se deben crear los objetos vinculándolos con cada módulo de LCN para posteriormente asignarles una acción en la interfaz. A continuación se muestra como definir cada uno de los objetos en nuestra red LCN [36].

```
lights :
  - name: Bedroom light
    address: myhome.s0.m7
    output: output1
    dimmable: true
    transition: 5
switches :
  - name: Sprinkler switch
    address: myhome.s0.m7
    output: relay1
scenes :
  - name: Romantic
    address: myhome.s0.m7
    register: 1
    scene: 4
    outputs: [output1, output2, relais1, relais3, relais4]
    transition: 5
```

Extracto de código 3.2: Definición de objetos

Para el caso de las luminarias conectadas a los módulos LCN-UPP se utiliza la primera sentencia **lights** en la sección *address* se debe indicar el nombre que se le a dado al PKE (en este caso myhome), el segmento al que pertenece (s0) y el identificador del módulo (m7); las líneas siguientes sirven para definir la salida y la respuesta que dará.

En el caso de los dispositivos de potencia conectados al LCN-R8H se utiliza la sentencia **switches**, al igual que en el caso anterior se identifica el módulo y el relé que será activado.

Para programar escenas se deben definir el nombre y las salidas que interactúan en las mismas.

Posterior a esta definición pueden programarse botones en el *dashboard* de Home Assistant para realizar distintas acciones con los módulos, en la Figura 3.9 se muestra la integración de algunos módulos a la interfaz.

En la interfaz es posible colocar indicadores de varios tipos: clima, hora, recordatorios, consumo de banda ancha, etc. De esta manera se puede potenciar las capacidades

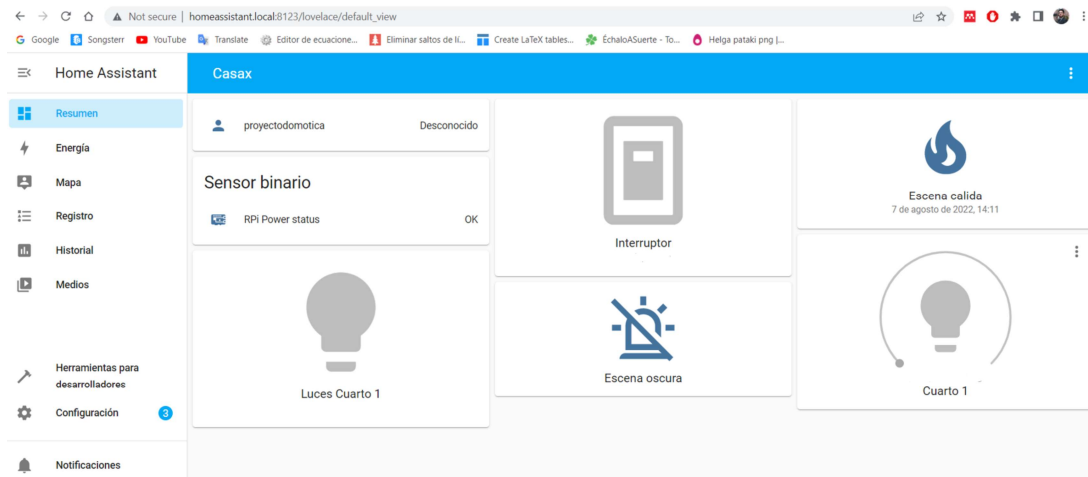


Figura 3.9: Dashboard de Home Assistant

del sistema LCN de una manera más personalizada. En la Figura 3.10 podemos observar el proceso de implementación del gestor Home Assistant, donde se observa una conexión remota desde una computadora, este puede ser un ordenador principal o cualquier dispositivo del hogar, ya que se podrá acceder a este incluso desde el teléfono celular.

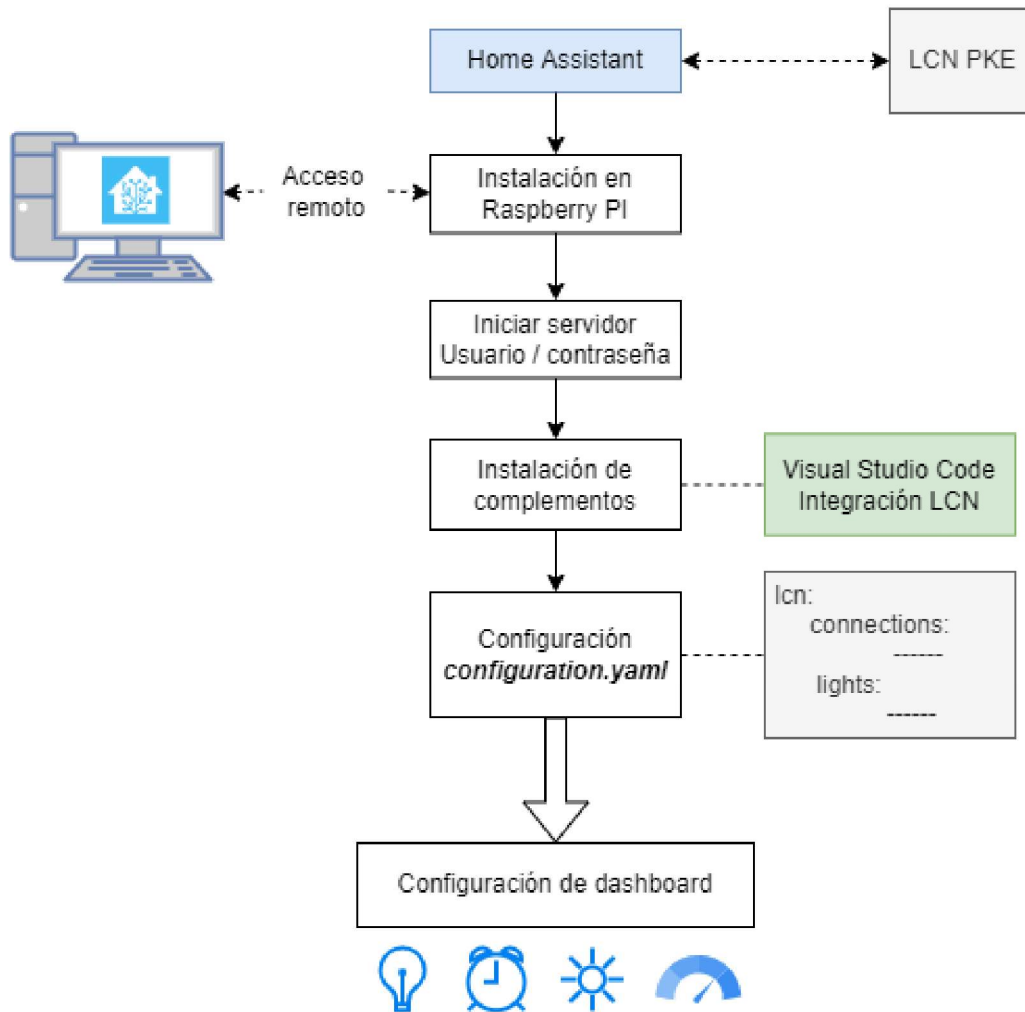


Figura 3.10: Diagrama de bloques del desarrollo de Home Assistant

4. Diseño y planificación de la red de bajo costo

En el presente capítulo se detalla el proceso de diseño e implementación de una red domótica de bajo costo utilizando un asistente inteligente de voz Amazon Alexa y periféricos de distintas marcas que permiten a cualquier persona automatizar su hogar, o mejor conocido como Do It Yourself (DIY). El objetivo es verificar si estas soluciones son eficientes al colocarlas completamente en una vivienda residencial.

4.1. Requisitos del proyecto

Las soluciones de bajo costo para domótica se implementarán en una vivienda residencial en el sector de Ricaurte, el sistema debe considerar los requisitos mencionados en la Tabla 4.1 con su nivel de prioridad estimado del 1 al 5, donde 1 es el más bajo y 5 es el más alto.

Tabla 4.1: Requerimientos funcionales del usuario.

Requerimiento	Nombre	Prioridad
R1	Encendido y apagado de luminarias	5
R2	Control de brillo	4
R3	Creación de escenarios	3
R4	Conexión y desconexión de equipos que consuman energía en stand-by	4
R5	Cámaras de vigilancia	4
R6	Control multimedia	3
R7	Sistema de gestión y monitoreo de la red	4

Se pretende que esta red tenga una respuesta confiable y sin retardos, que sea de fácil instalación y no requiera de conocimientos avanzados para su configuración.

4.2. Diseño

La vivienda consta de dos pisos y tiene un área de $100 m^2$. Para esta red es importante tomar en cuenta la cobertura de WiFi ya que los dispositivos utilizan este protocolo para comunicarse con Echo Alexa. A continuación se detallan las soluciones a los requerimientos planteados:

- Para los requisitos R1 y R2 se utilizarán interruptores inteligentes con WiFi capaces de encender, apagar y dimerizar las luminarias. Además se ha optado por

utilizar bombillas inteligentes que son manejadas por un hub (Philips) y se comunican mediante el protocolo Zigbee, esto permite que existan más dispositivos manejados por una sola dirección IP.

Los interruptores inteligentes más comunes funcionan con la alimentación de la red eléctrica (Línea y Neutro) y el cable de retorno hacia las luminarias, y los interruptores convencionales únicamente cuentan con el cable de línea y el de retorno, esto quiere decir que para instalar estos dispositivos debemos pasar un cable de neutro, para una vivienda que no tenga acceso al cableado esto significa comprometer la estructura como en el caso de LCN. Afortunadamente, se han desarrollado interruptores sin neutro, los cuales necesitan únicamente de la conexión de un capacitor en la carga (luminaria) de esta forma los interruptores convencionales se reemplazan y se coloca el capacitor, tal como se muestra en la Figura 4.1.

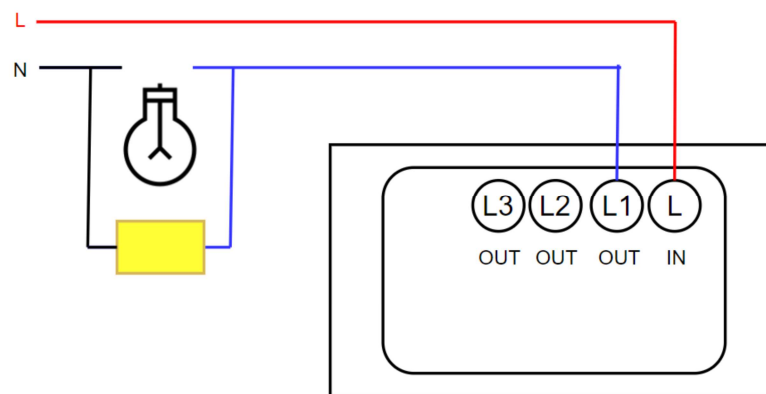


Figura 4.1: Interruptor inteligente sin neutro.

- Gracias a que todos los dispositivos estarán vinculados con Alexa, la creación de escenarios y rutinas podrá programarse directamente por un comando de voz o simplemente desde el teléfono móvil, podré controlar con una sola acción el comportamiento de varias luminarias e incluso de lámparas que se pueden conectar a los tomacorrientes inteligentes. De esta manera se da solución a R3.
- Para el requisito R4 simplemente se utilizarán tomacorrientes inteligentes que pueden activar o desactivar el paso de la corriente con un comando de voz, esto evita la desconexión manual de los artefactos, que muchas veces se encuentran en lugares de difícil acceso. Los dispositivos de alto consumo en *stand-by* se mostraron en la sección anterior (Ver Tabla 3.3).
- Los sistemas de video vigilancia compatibles con Alexa son de un precio muy accesible, sin embargo al tener un dispositivo que se activa por voz sin ninguna restricción, se considera vulnerable tener nuestro sistema de seguridad vinculado con la red domótica, por lo que se opta por cámaras de seguridad de otras marcas o simplemente no tenerlas conectada a Alexa, en la actualidad la mayoría de cámaras puede funcionar desde una aplicación en el celular sin una configuración compleja.
- El requisito R6 tiene baja prioridad y es uno de los más fáciles de solucionar, Alexa ya es un dispositivo que puede reproducir música, simplemente se debe

vincular alguna cuenta de plataformas como Spotify o Amazon Music. Para la integración con nuestros televisores se cuenta con varias restricciones de región, entonces, se opta por el uso de un Fire stick, un dispositivo especializado capaz de convertir las televisiones en Smart y que es compatible con Amazon Alexa.

- El requisito R7 viene integrado en la instalación del sistema ya que la aplicación de Alexa en el teléfono permite programar y gestionar todos los dispositivos, escenas, rutinas y descargar skills para realizar distintas actividades.

4.3. Implementación

Para la instalación del sistema con soluciones de bajo costo se debe configurar un Echo Alexa, en modo de configuración se realiza la conexión a la red WiFi de la edificación, se accede a la cuenta y se brinda información básica de ubicación. Posteriormente, se deben reemplazar los interruptores convencionales por los interruptores WiFi teniendo en cuenta que el capacitor siempre debe ir conectado en la luminaria L1, teniendo especial cuidado de marcar los cables al retirar los interruptores originales si estos manejan más de un circuito de luminarias. A diferencia de la red LCN, estos únicamente podrán encender las luminarias al 100%, por lo que el efecto de ahorro de energía recae en la facilidad de apagar luminarias innecesarias con un comando de voz.

Para los ambientes que necesiten de generación de escenarios como la sala o el bar, se pueden colocar los interruptores dimerizables o en su defecto los focos inteligentes, teniendo en cuenta que para estos últimos el interruptor no se debe apagar. En la Tabla 4.2 se muestra los ambientes con los dispositivos implementados en cada uno.

Tabla 4.2: Dispositivos empleados en la instalación.

Ambiente	Requisito	Dispositivo
Exterior	R1, R5	Interruptor triple Cámara
Entrada	R1, R2, R3	Interruptor triple
Sala	R1,R2,R3, R4, R6	Foco inteligente Tomacorriente inteligente Fire Stick
Cocina	R1, R4	Foco Inteligente Tomacorriente inteligente
Comedor	R1	Interruptor simple
Pasillo	R1	Interruptor doble
Gradas	R1	Interruptor simple
Habitación principal	R1	Interruptor doble
Habitación 1	R1	Interruptor simple
Habitación 2	R1	Interruptor simple
Habitación 3	R1	Interruptor simple

Finalmente, los tomacorrientes WiFi se colocan en los artefactos que consumen energía en *stand-by*, y la cámara se colocará en la puerta principal.

En la Figura 4.2 se ilustran los elementos automatizados en la vivienda. Se ha utilizado únicamente un altavoz de Amazon Alexa en una ubicación estratégica de modo que sea posible realizar una petición desde cualquier parte de la vivienda.

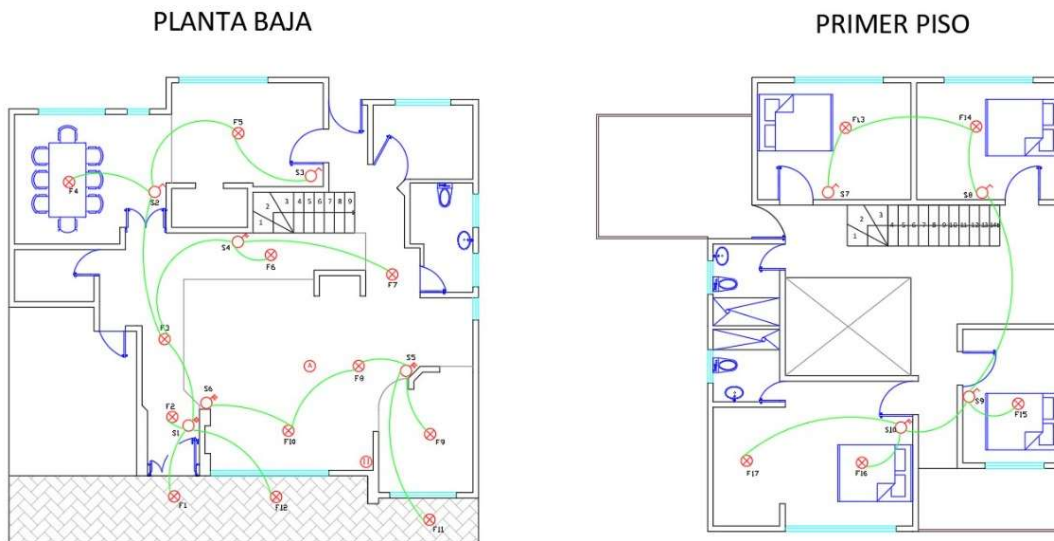


Figura 4.2: Planos de la vivienda con sistema domótico de bajo costo.

4.4. Red dedicada

4.4.1. Acerca del seccionamiento de redes

Los routers modernos están capacitados para tener una gran cantidad de dispositivos conectados al mismo tiempo. Con el paso de los años las redes inalámbricas han mejorado notablemente y eso también se traduce en menos problemas a la hora de que los puntos de acceso puedan administrar las diferentes conexiones. En redes antiguas la cantidad de dispositivos simultáneos era notablemente menor a las que se tienen hoy en día, principalmente considerando el avance de IoT.

No obstante, la capacidad de los routers domésticos no es ilimitada en término de manejo de dispositivos conectados simultáneamente. En cada uno de los dos escenarios estudiados se disponen de equipos con una máscara de subred /24, lo que indica una capacidad máxima teórica de 253 elementos administrables por cada router. Sin embargo, las capacidades del equipo no permiten, de una manera práctica, conectar simultáneamente más de 16 dispositivos según varios fabricantes. En caso de que exista un número mayor de dispositivos simultáneos, es probable que surjan problemas de rendimiento tales como lentitud en la navegación, cortes en la conexión, etc. Este valor límite dependerá del router y es normal que dicho valor se encuentre establecido por defecto en la propia configuración.

En base a lo mencionado anteriormente, en la red de bajo costo se debe considerar que, al realizar la instalación y agregación de cada elemento domótico, se aumenta gradualmente el número de dispositivos que requieren acceder al router para poder realizar su respectivo proceso de comunicación y salida a internet.

Esto ha generado inconvenientes en la percepción de la calidad de servicio brindada por los equipos y la red en la instalación de bajo costo, debido a que se ha experimentado una notable reducción en la velocidad de internet por parte de dispositivos personales, además de cortes ocasionales en el servicio producto de la desconexión/-reconexión cuando han existido problemas de saturación en la red, comprobando el planteamiento mencionado anteriormente. Por lo tanto, se han buscado opciones para la reducción o eliminación de este efecto adverso en el rendimiento de la red.

Una opción sumamente interesante considerada para el desarrollo del presente proyecto ha sido el de las Redes Wifi Mesh. Este tipo de redes están compuestas por un router/estación base y sus satélites o puntos de acceso que se comunican entre ellos para, mediante una única red Wifi con gestión avanzada de los elementos de la red, sean capaces de reenrutar el tráfico por la red siempre de la forma óptima para disponer de la mejor señal posible. Esto se logra mediante el cálculo del nodo al que es necesario conectarse en cada momento según el estado de otros nodos, los dispositivos conectados, la distancia a cada uno de los nodos, potencia de la señal y otros muchos factores. Dicho proceso se realiza de forma completamente transparente al usuario, el cual no tiene que preocuparse de a qué nodo está conectado.

Sin embargo, el principal problema de esta solución es el apartado económico, ya que, considerando que se trabaja en el entorno de una red de bajo costo, exceder el objetivo esencial de minimizar costes se convierte en un impedimento, a pesar de la altísima eficiencia que brinda la solución expuesta.

A partir de un análisis exhaustivo, se ha planteado la siguiente solución: Agregar en la red un router de mejores características operativas dedicado únicamente a la administración DHCP, tal como se muestra en la Figura 4.3. Esto ha permitido conectar todos los elementos domóticos de la edificación domiciliaria a dicho router dedicado, reduciendo la cantidad de equipos simultáneos manejados por el router principal y proporcionando un mecanismo para evitar colisiones y saturación de equipos. No obstante, tanto en las pruebas de confiabilidad de la red como pruebas subjetivas, se realizará la comparativa de rendimiento entre la red seccionada y no seccionada.

4.4.2. Estudio del indicador de fuerza de la señal recibida (RSSI)

Para un estudio completo del comportamiento del estado de la red en la edificación en donde ha sido instalado el sistema domótico de bajo costo, es necesario establecer una línea de medición que permita obtener un índice del nivel o intensidad de las señales de Wi-Fi, ya que, como se ha mencionado anteriormente, la cobertura de la señal que permite la comunicación entre los dispositivos inalámbricos inteligentes



Figura 4.3: Segmentación de la red.

afecta de manera directa a su comportamiento en términos de latencia, disponibilidad, etc.

Para cumplir con el objetivo planteado, se procede a utilizar el indicador RSSI. El indicador de intensidad de señal recibida (RSSI) es un parámetro de referencia que tiene como objetivo medir el nivel de potencia de las señales recibidas por un dispositivo en redes inalámbricas. Cuando la escala se aproxima al valor de cero como su centro, representa 0 RSSI o 0 dBm. Aunque en teoría es posible medir valores positivos, la escala suele expresarse en valores negativos; cuanto más negativo es, mayor es la pérdida de señal. Además, cabe mencionar que el RSSI indica la fuerza recibida, no la calidad de la señal. Sin embargo, este indicador entrega información importante y será de gran utilidad para alcanzar la meta establecida.

La metodología realizada para la medición del nivel de RSSI se indica a continuación. En la edificación en donde ha sido instalado el sistema de bajo costo, mediante la utilización de los planos que se observan en la Figura 4.2, se realizó una simulación de la colocación de los AP en cada ambiente utilizando el software Wi-Fi Designer de Cambium Networks.

Es necesario un proceso de autenticación y registro para la utilización. La interfaz gráfica de este software se presenta a continuación en la Figura 4.4.

Wi-Fi Designer es una herramienta intuitiva para diseñar la cobertura de RF de la red Wi-Fi, que entrega los valores de RSSI en una escala de 0 a -90 RSSI, mediante la siguiente interpretación de niveles:

- 0: señal ideal, difícil de lograr en la práctica.

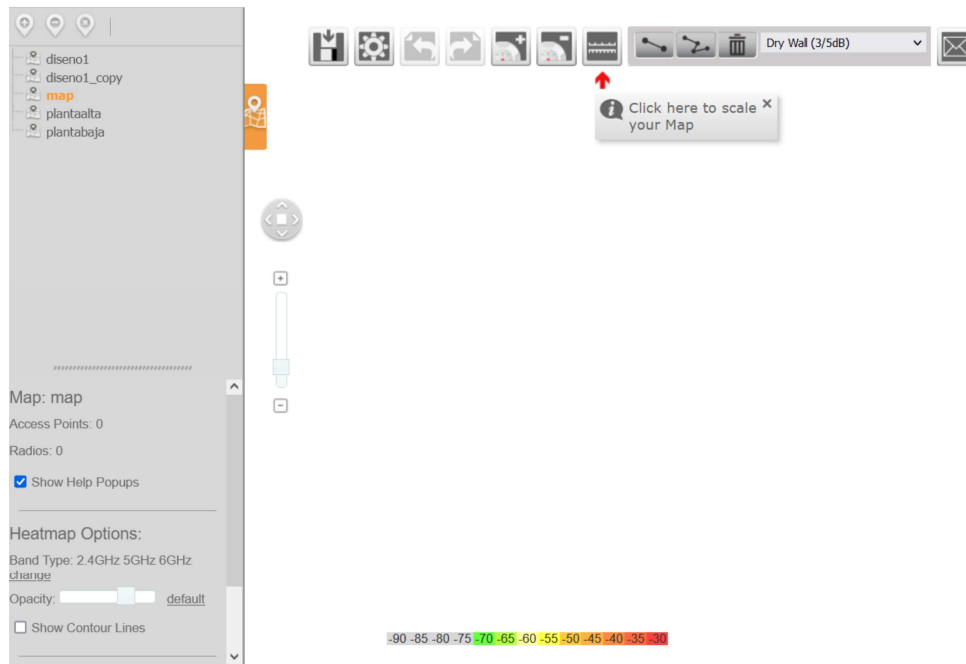


Figura 4.4: Interfaz gráfica Software Wi-Fi Designer.

- -40 a -60: señal idónea con tasas de transferencia estables.
- -60: enlace bueno; ajustando la transmisión (Tx) se puede lograr una conexión estable al 80 %.
- -70: enlace medio-bajo; es una señal medianamente buena aunque se pueden sufrir problemas con lluvia y viento.
- -80: es la señal mínima aceptable para establecer la conexión; pueden ocurrir caídas que se traducen en corte de comunicación (pérdida de llamada, pérdida de datos), etc.

Entonces, una vez establecida la metodología empleada y la herramienta de software utilizada, procedemos a realizar la simulación del servicio inalámbrico de internet, según los diseños de la Figura 4.2. Este proceso se ilustra en la Figura 4.5.

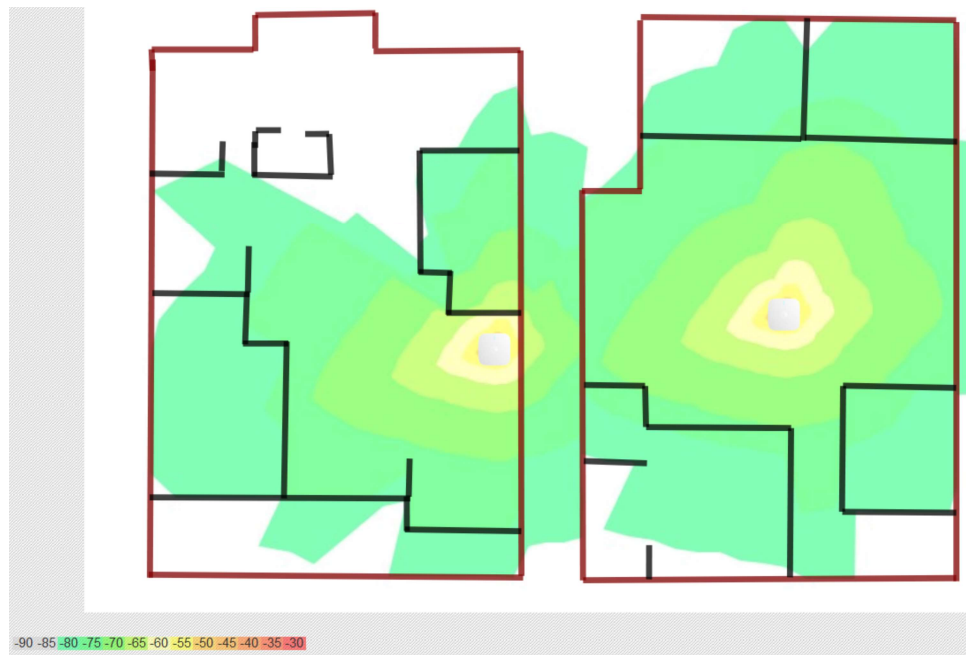


Figura 4.5: Simulación de la red inalámbrica en la edificación de domótica de bajo costo.

Tal como podemos observar en la Figura 4.5, se ha realizado la simulación de los ambientes de la edificación en el software mencionado, utilizando las distancias reales y ocupando las distintas herramientas que permite utilizar el software con respecto a los materiales de la misma. En base a esto, se han colocado las paredes y se han instalado los Access Point en los puntos especificados.

De esta manera, el software nos entrega información acerca del estado de la red inalámbrica en cada ambiente, mediante la escala en RSSI que se denotan en cada caso. Como se puede observar, para ambos pisos y en cada ambiente tenemos una buena cobertura, dado que el nivel de la señal es alto, rondando los -75 RSSI en el peor de los casos y situándose en la escala de enlace medio-bajo, en la cual se considera que la señal es medianamente aceptable y que, en caso de eventos como lluvias, se tendrá un mínimo de pérdidas. Además, todos los puntos de la edificación están cubiertos, cumpliendo así con el objetivo planteado, lo que permite indicar que los AP han sido colocados en puntos físicos ideales contribuyendo, de esta manera, a una comunicación eficiente de todos los equipos pertenecientes a la red de bajo costo.

5. Análisis de resultados y comparativa

En esta capítulo se muestra la comparativa entre las dos tecnologías de automatización de viviendas. Las dos fueron instaladas y probadas en entornos reales, poniendo a prueba sus capacidades y, de esta manera, descubrir las ventajas y desventajas que cada una aporta a un mercado en desarrollo como lo es el de la domótica.

5.1. Análisis de consumo energético

5.1.1. Análisis de consumo en dispositivos domóticos

Para el análisis del consumo energético se considerará la potencia consumida por cada uno de los módulos en cada tecnología, de esta manera se busca conocer el consumo mínimo que se debe contrarrestar. En las tablas 5.1 y 5.2 se muestran los dispositivos y periféricos de cada tecnología y su potencia real medida (conociendo que su alimentación des de 110 V y midiendo su corriente al estar en uso), se debe tomar en cuenta que estos dispositivos estarán alimentados las 24 horas.

Tabla 5.1: Consumo eléctrico de los dispositivos LCN.

Cantidad	Dispositivo	Consumo Unit. (W)	Consumo (W)
7	LCN-UPP	0.5	3.5
2	LCN-SH	0.5	1
1	LCN-R8H	1.1	1.1
1	LCN-R2H	1.1	1.1
1	LCN-BMI	1.1	1.1
1	LCN-GT6	3	3
1	LCN-GT10D	3	3
1	LCN-PKE	7.5	7.5
1	LCN-NUI	4	4
	Total		25.3

Según la Tabla 5.1 el consumo total de los dispositivos LCN que se están utilizando es 25.3 W lo que representa 18.2 KWh al mes.

Al observar la Tabla 5.2 es posible notar que, en términos de consumo, las soluciones de bajo costo también son superiores a las de LCN, ya que su consumo es de 13.2 W, siendo un total de 9.5 KWh al mes. Sin embargo, esta comparativa únicamente brinda información relacionada a la potencia que debe contrarrestar a una vivienda sin ningún sistema domótico, ya que la finalidad es brindar un ahorro energético a la misma. Además, hay que recordar que en LCN se toman medidas para que las

Tabla 5.2: Consumo eléctrico de los dispositivos DIY.

Cantidad	Dispositivo	Consumo Unit. (W)	Consumo (W)
4	Interruptor WiFi Simple	0.5	2
2	Interruptor WiFi Doble	0.5	1
3	Interruptor WiFi Triple	0.5	1.5
2	Foco Inteligente	0.6	1.2
1	Philips Hue	3.1	3.1
1	Repetidor	2	2
2	Tomacorriente WiFi	0.5	1
1	Echo Alexa	1.4	1.4
	Total		13.2

luminarias consuman únicamente un 70% de su potencia nominal en el caso más común.

5.1.2. Análisis de consumo en circuitos de luminarias

Para poder realizar una comparativa igualitaria se han planteado dos escenarios de consumo, uno para los días laborales y otro para fines de semana, ya que el consumo es distinto. Se detalla el consumo promedio normal que tendría una casa sin ningún sistema domótico. Con esta información se realizará un diagrama de tiempo y consumo durante un día. Además, se tomará en cuenta que al menos un 20% del tiempo las luces están encendidas innecesariamente (no hay ninguna persona en la estancia) y debido a la facilidad de apagar las luces desde el celular o por comandos de voz, esto se reduce a un 10%.

En la Tabla 5.3 se ilustra un cronograma de encendido de cargas entre la semana, mostrando un modelo energético genérico utilizando LCN (amarillo) y las soluciones de bajo costo (azul), donde es necesario tomar en cuenta que, al no tener sistema domótico, las cargas siempre están al 100%.

Para los fines de semana se tendrá otro comportamiento de consumo, el cual se encuentra detallado en la Tabla 5.4.

Tabla 5.3: Modelo energético entre semana para un sistema LCN y de bajo costo.

Hora	Sala	Comedor	Cocina	Entrada				
00:00								
01:00								
02:00								
03:00								
04:00								
05:00								
06:00			70 %	75 %	70 %	100 %		
07:00		70 %	100 %	70 %	75 %			
08:00								
09:00								
10:00								
11:00								
12:00								
13:00								
14:00								
15:00								
16:00								
17:00								
18:00	70 %	75 %						
19:00	100 %	100 %				70 %	100 %	
20:00	100 %	100 %	100 %	100 %	%100	100 %	100 %	
21:00	70 %	75 %			%100	75 %	70 %	100 %
22:00								
23:00								

Tabla 5.4: Modelo energético de fin de semana para un sistema LCN y de bajo costo.

Hora	Sala	Comedor	Cocina	Entrada			
00:00	70 %	50 %					
01:00							
02:00							
03:00							
04:00							
05:00							
06:00							
07:00							
08:00			70 %	75 %			
09:00			70 %	75 %			
10:00							
11:00							
12:00							
13:00							
14:00							
15:00							
16:00							
17:00							
18:00							
19:00	100 %	100 %					
20:00	70 %	75 %	70 %	100 %	100 %	100 %	100 %
21:00	70 %	75 %		70 %	75 %	70 %	100 %
22:00	70 %	75 %				70 %	100 %
23:00	70 %	75 %					

Utilizando los cronogramas de encendido de luminarias mostrados anteriormente se puede hacer un análisis comparativo entre las tecnologías dedicadas y las soluciones de bajo costo para verificar el ahorro de energía que suponen en los circuitos de iluminación. Con el fin de que la comparación no dependa de otros factores se utilizarán el mismo número de cargas y las mismas características para las luminarias, es decir, en cada estancia se considerarán 3 focos LED de 9W.

Una vivienda que no ocupe ningún sistema domótico siempre estará consumiendo el 100% de la potencia nominal de las cargas, es este caso, esto se traduce en al consumo de 12 luminarias de 9W, es decir, 108W. Esta potencia será utilizada como referencia al nivel máximo de consumo, de esta manera, y utilizando las tablas 5.3 y 5.4, es posible obtener un porcentaje de consumo de las tecnologías LCN y las soluciones de bajo costo (DIY).

5.1.2.1. Consumo energético entre semana

Para el patrón de consumo mostrado en la Tabla 5.3 se obtiene un porcentaje de potencia consumida de los 4 ambientes tomando en cuenta la atenuación de brillo y por tanto de potencia que cada sistema brinda para ahorrar energía. Como se observa en la Figura 5.1 los patrones de consumo del sistema LCN y de las soluciones de bajo

costo son muy similares ya que se ha tomado en cuenta el uso de la dimmers.

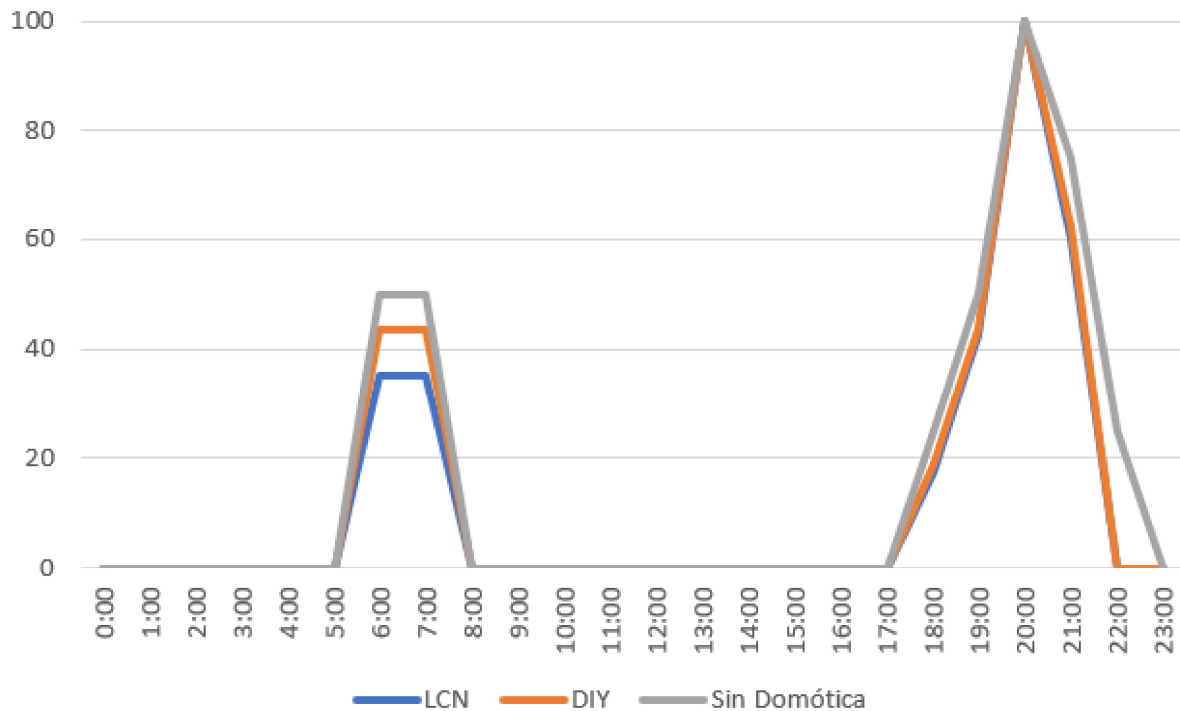


Figura 5.1: Comparación de consumo energético entre semana de los dos sistemas domóticos y una vivienda sin automatización.

El ahorro energético que brinda un sistema domótico es notable, en la Tabla 5.5 se puede observar el consumo mensual tomando en cuenta los 108W como el 100% de potencia consumida.

Tabla 5.5: Comparación del consumo energético de los sistemas domóticos entre semana.

	Sin Domótica	Tecnología LCN	Soluciones de bajo costo
Consumo (KWh)	8.1	5.64	6.075
Ahorro (KWh)	0	2.46	2.025

5.1.2.2. Consumo energético en fines de semana

Al analizar la Tabla 5.4 se puede observar que los fines de semana existe un comportamiento distinto en el consumo, por lo que es necesario otro análisis, en la Figura 5.2 puede apreciarse que al igual que en el caso anterior la tecnología LCN brinda una mayor ahorro de energía.

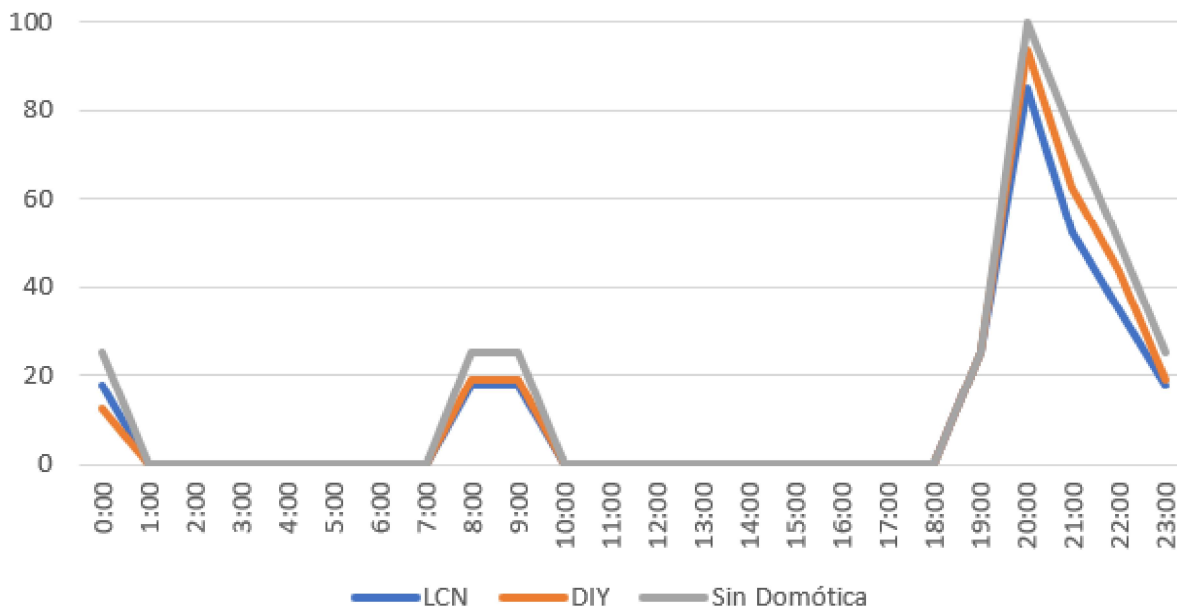


Figura 5.2: Comparación de consumo energético en fin de semana de los dos sistemas domóticos y una vivienda sin automatización.

A continuación, en la Tabla 5.6 se obtiene el consumo mensual y el ahorro energético que cada tecnología brinda, para los fines de semana.

Tabla 5.6: Comparación del consumo energético de los sistemas domóticos en fines de semana.

	Sin Domótica	Tecnología LCN	Soluciones de bajo costo
Consumo (KWh)	3.78	2.6	2.85
Ahorro (KWh)	0	1.18	0.93

Finalmente para conocer el valor total de potencia mensual que ahorra el sistema domótico se deben hacer ciertas consideraciones, las cuales se muestran en la ecuación 5.1.

$$P_A = A_s + A_f + P_{sb} - C_{dom} \tag{5.1}$$

Donde:

- P_A es la potencia total que ahorra el sistema domótico.
- A_s es el ahorro entre semana.
- A_f es el ahorro en fines de semana.
- P_{sb} es la potencia que se ahorra al desconectar los dispositivos trabajando en modo stand-by.
- C_{dom} es el consumo total de los dispositivos que conforman la red domótica.

Para P_{sb} , es necesario tomar como base en los datos obtenidos en la sección 4, en la Tabla 3.3, considerando que se desconecta la consola de videojuegos y el televisor 18 horas al día aproximadamente, traduciéndose esto a un ahorro mensual de 3.15 KWh.

En la Tabla 5.7 se resumen todos los valores mencionados anteriormente para obtener el ahorro de energía promedio que entrega cada sistema.

Tabla 5.7: Comparación del consumo energético de los sistemas domóticos en fines de semana.

	A_s	A_f	P_{sb}	C_{dom}	P_A
Sistema LCN	2.46 KWh	1.18 KWh	3.15 KWh	18.2 KWh	-11.41 KWh
Sistema DIY	2.025 KWh	0.93 KWh	3.15 KWh	9.5 KWh	-3.4 KWh

Como se puede observar ninguno de los sistemas ahorra energía realmente, ya que el consumo de todos los dispositivos es mayor a la potencia que ahorran al encender luminarias y desconectando equipos en stand-by. Sin embargo, las soluciones de bajo costo siguen teniendo una ventaja clara sobre LCN, ya que la potencia total de consumo es mucho menor, para el precio del KWh en Ecuador, LCN aumentaría la cuenta de la energía eléctrica en \$1.03, mientras que las soluciones de bajo costo representan \$0.30 centavos.

5.2. Análisis económico

5.2.1. Análisis económico para LCN

Para realizar el presupuesto se ha tomado en cuenta el costo de cada uno de los dispositivos utilizados provistos por el fabricante, la mano de obra utilizada, costos de cableado y licencias el correcto funcionamiento del sistema.

Se debe tener en cuenta que este es un costo específico para la solución que se ha dado a esta vivienda y puede variar dependiendo del área a cubrir o los requerimientos del usuario. En la Tabla 5.8 se muestra la descripción de cada gasto y su valor final en dólares americanos.

Tal como se puede observar el costo total del proyecto es de aproximadamente \$7200 considerando el uso del software de visualización LCN-GVS, sin embargo, al descartar este gasto y asumiendo el precio de la RaspberryPi que es de \$70 se tiene un ahorro del 11.3% que es significativo en una inversión de esta magnitud.

5.2.2. Análisis económico para las soluciones de bajo costo

Al igual que en el caso anterior se tomará en cuenta el costo de cada dispositivo utilizado para la automatización de la vivienda y para el sistema de seguridad, considerando el uso de un repetidor para mejorar la señal en todos los periféricos. En la Tabla 5.9 se resume el total de los gastos.

Tabla 5.8: Análisis de precios para la tecnología LCN.

Cantidad	Descripción	Precio unitario (USD)	Precio Total (USD)
7	Módulo LCN-UPP	230.6	1614.2
2	Módulo LCN-SH	234.84	469.68
1	Módulo LCN-R8H	226.8	226.8
1	Módulo LCN-R2H	49.32	49.32
1	Módulo LCN-BMI	117.59	117.59
4	Módulo LCN-T8	30.53	30.53
1	LCN-GT6	165.54	165.54
1	LCN-GT10D	318.23	318.23
1	LCN-PRO	1728.73	1728.73
1	LCN-PCHK	449.59	449.59
1	LCN-PKE	330.14	330.14
1	LCN-GVS	1017.56	1017.56
1	LCN-NUI	44.55	44.55
5	Mano de obra	20	100
4	Pulsantes	5	20
1	Motor (persianas)	400	400
4	Cámaras de vigilancia	300	1200
	Total		8374.05

Tabla 5.9: Análisis de precios para las soluciones de bajo costo.

Cantidad	Descripción	Precio unitario (USD)	Precio Total (USD)
4	Interruptor WiFi Simple	20	80
2	Interruptor WiFi Doble	22	44
3	Interruptor WiFi Triple	24	72
2	Foco Inteligente	15	30
1	Philips Hue	30	30
1	Repetidor	25	25
2	Tomacorriente WiFi	24	48
1	Fire Stick	42	42
1	Cámara de vigilancia	60	60
1	Echo Alexa	60	60
	Total		491

Como se puede observar en las tablas la implementación de un sistema utilizando LCN es costoso comparándolo con las soluciones no dedicadas, representando estas solamente un 5.86 % de la inversión en LCN.

Para un análisis de retorno de la inversión es necesario tomar en cuenta la sección del análisis de consumo, ya que como pudimos observar ninguno de los dos sistemas brinda un ahorro en la planilla de luz, esto debido a que el análisis se realizó únicamente en 4 estancias del hogar y las condiciones de consumo de 9W por luminaria.

5.3. Análisis de confiabilidad

Cada sistema físico con cualquier separación, entre origen y destino, experimentará algún tipo de latencia. En el campo de la interacción del ser humano con sistemas informáticos y domóticos, la latencia en conexión perceptible tiene un fuerte efecto en la satisfacción del usuario y la usabilidad. Debido a esto, se considera sumamente necesario realizar la medición de la latencia existente en cada una de las redes de las edificaciones planteadas, buscando cumplir el objetivo primordial de realizar una comparativa tanto objetiva como subjetiva del comportamiento de cada una de las arquitecturas con respecto al rendimiento basado en el aspecto de latencia.

Como un detalle esencial, es necesario mencionar que, en cada una de las edificaciones, el equipo del *router* se encuentra ubicado en la planta baja. Esto debe considerarse dadas las condiciones físicas de distancia entre *router* y periféricos, distancia inter-periféricos, interferencia debido a grosor de paredes, reflexión en materiales, ubicación de elementos principales y secundarios, etc. No obstante, dichas componentes afectarán en mayor cantidad a la red de bajo costo, debido a sus características intrínsecas de funcionamiento y operación inalámbrica, así como por su arquitectura. Se prevé que la red LCN, en base a su arquitectura en bus, no se vea afectada en gran medida por los problemas planteados anteriormente. Por lo tanto, se espera que la latencia en la red sea mayor en un proceso de comunicación que involucra a los dispositivos periféricos de la planta superior de las edificaciones, considerando todos los elementos descritos.

5.3.1. Medición de latencia en la red de bajo costo.

Con el objetivo de interceptar el tráfico enviado y recibido por Amazon Echo, se procede a utilizar Wireshark, una herramienta *open source* que permite analizar el tráfico en diferentes protocolos de comunicación, configurando dicho software en su modo promiscuo, lo cual permite la opción de capturar todo el tráfico circundante en la red, incluido el tráfico no dirigido al host en el que se encuentra corriendo el analizador. Entonces, después de realizar el análisis y filtrado del tráfico del dispositivo Amazon Echo, se nota que no es posible capturar los paquetes generados en el proceso de comunicación entre el Amazon Echo y los dispositivos periféricos. La razón de este comportamiento se da debido a que no existen medios compartidos (cable) y el enrutador actúa como un *switch*. No obstante, dicha arquitectura se convierte en un impedimento para nuestro objetivo de medir la latencia en la red de bajo costo, por lo

tanto, se procede a ensamblar una nueva topología de red basada en el montaje de un servidor proxy. Para esto, se hace uso de una distribución de Linux Debian llamada *Zentyal*, un servidor que permite unificar y administrar fácilmente todos los servicios básicos de infraestructura de red y proporcionar el acceso a Internet mediante la integración de servicios como DNS/DHCP, CA, VPN, backup, gateway, cortafuegos y un proxy HTTP. A continuación, en la Figura 5.3 se ilustra el diagrama de red diseñado para posibilitar la lectura de tráfico en la red.

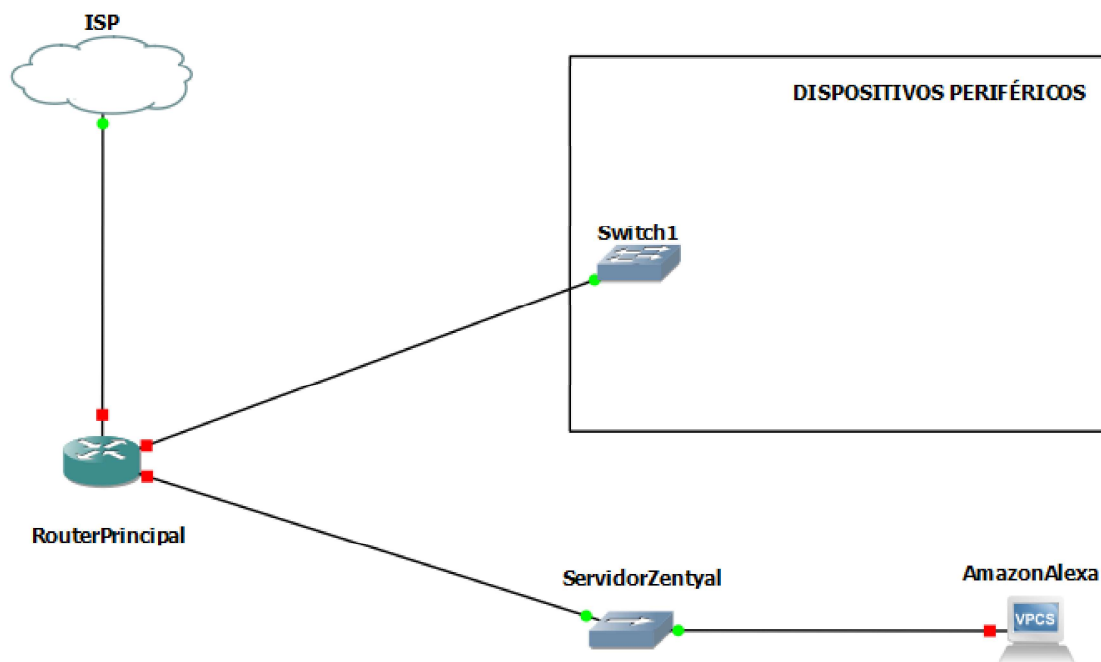


Figura 5.3: Diagrama de Red con Proxy.

Como se observa en la Figura 5.3, es necesario el montaje de un dispositivo que trabaje como Access Point, por lo que se procede a utilizar un *router* de la marca TP-Link para cumplir con dicho requerimiento. El *router* debe ser configurado de manera que reciba los paquetes provenientes de la interfaz inalámbrica y enrutarlos a través de una interfaz cableada hasta un servidor *Zentyal*, estableciendo el equipo proxy en una modalidad de gateway. Ahora, el servidor *Zentyal* es montado sobre una máquina virtual y configurado sobre la misma. En la Figura 5.4 se ilustra el proceso mencionado.

La arquitectura diseñada permite que el tráfico del elemento principal de la red de bajo costo pase, en primera instancia, por el servidor *Zentyal*, donde ya es posible ejecutar el software Wireshark y capturar los paquetes de la red al momento de que se ejecuten acciones orientadas a los dispositivos periféricos. Entonces, basándonos en la arquitectura de la Figura 5.3, se procede a realizar la medición de la latencia en la red. En la Figura 5.5 se observa un ejemplo de captura de paquetes en el servidor *Zentyal*.

El mecanismo para el cálculo de la latencia se describe a continuación. Como se había visto anteriormente, el proceso de comunicación entre el dispositivo de Amazon Alexa y un periférico implica un proceso de intercambio de paquetes transmitidos bajo el

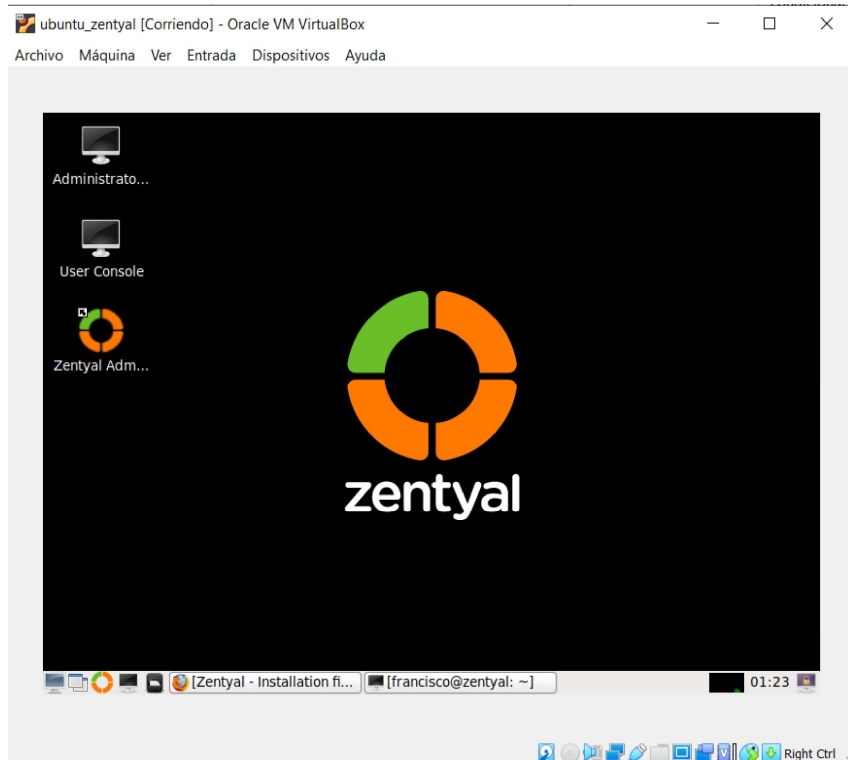


Figura 5.4: Montaje de un servidor Zentyal en una máquina virtual.

Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
0.000000	192.168.18.34	255.255.255.255	UDP	214	59092 → 6667 Len=172
0.211526	192.168.18.66	54.230.31.87	TCP	55	59838 → 443 [ACK] Seq=1 Ack=1 Win=1023 Len=1 [TCP s
0.287896	54.230.31.87	192.168.18.66	TCP	66	443 → 59838 [ACK] Seq=1 Ack=2 Win=131 Len=0 SLE=1 S
0.586679	192.168.18.66	192.168.18.73	TCP	164	59816 → 8009 [PSH, ACK] Seq=1 Ack=1 Win=1020 Len=11
0.623054	192.168.18.73	192.168.18.66	TCP	164	8009 → 59816 [PSH, ACK] Seq=1 Ack=111 Win=1419 Len=
0.666157	192.168.18.66	192.168.18.73	TCP	54	59816 → 8009 [ACK] Seq=111 Ack=111 Win=1026 Len=0
1.115603	192.168.18.47	255.255.255.255	UDP	214	55703 → 6667 Len=172
1.241847	192.168.18.77	255.255.255.255	UDP	214	54005 → 6667 Len=172
1.567181	192.168.18.79	255.255.255.255	UDP	214	64537 → 6667 Len=172
2.384128	192.168.18.78	255.255.255.255	UDP	214	63295 → 6667 Len=172
2.549057	192.168.18.66	100.100.0.10	TCP	66	59896 → 1688 [SYN] Seq=0 Win=64240 Len=0 MSS=1460 W
2.601396	192.168.18.35	255.255.255.255	UDP	214	59761 → 6667 Len=172
2.781046	192.168.18.1	255.255.255.255	DHCP	590	DHCP NAK - Transaction ID 0xe6296c1d
2.910759	HuaweiTe_79:da:b4	Broadcast	ARP	60	Who has 192.168.18.10? Tell 192.168.18.1
3.108658	Tp-LinkT_8a:1a:26	Broadcast	ARP	60	ARP Announcement for 0.0.0.0
3.108679	Tp-LinkT_8a:1a:26	Broadcast	LLC	60	[Malformed Packet]
3.278994	192.168.18.36	255.255.255.255	UDP	214	60373 → 6667 Len=172
3.939539	192.168.18.44	255.255.255.255	UDP	214	50032 → 6667 Len=172
4.037264	192.168.18.46	224.0.0.251	MDNS	136	Standard query 0x000d PTR _%9E5E7C8F47989526C9BCD95
4.041794	192.168.18.73	224.0.0.251	MDNS	499	Standard query response 0x0000 PTR MiTV-AESP0-1a8f2
4.047899	192.168.18.73	224.0.0.251	MDNS	451	Standard query response 0x0000 PTR MiTV-AESP0-1a8f2

> Frame 1: 214 bytes on wire (1712 bits), 214 bytes captured (1712 bits) on interface \Device\NPF_{472EBDC4-6243-4006-ADA5-FF6D4}	
> Ethernet II, Src: TuyaSmar_09:59:46 (38:1f:8d:09:59:46), Dst: Broadcast (ff:ff:ff:ff:ff:ff)	
> Internet Protocol Version 4, Src: 192.168.18.34, Dst: 255.255.255.255	

0000	ff ff ff ff ff 38 1f 8d 09 59 46 08 00 45 008-..YF..E..
0010	00 c8 41 b3 00 00 ff 11 a6 a7 c0 a8 12 22 ff ff	..A....."....
0020	ff ff e6 d4 1a 0b 00 b4 61 7f 00 00 55 aa 00 00a...U....

Figura 5.5: Captura de paquetes mediante Wireshark.

protocolo de capa de transporte TCP. Dicho protocolo provee información acerca del RTT o *Round Trip Time*, siendo este el tiempo necesario para que los datos viajen dentro de una solicitud de red desde el punto de partida hasta su destino y viceversa. RTT es un indicador importante para medir el rendimiento de la conexión en todo tipo de redes, por lo que es adecuado y eficiente utilizar esta métrica para evaluar la velocidad y la fiabilidad de nuestras conexiones de red para cada una de las topologías definidas. De esta manera, se logra obtener la latencia de un grupo determinado de paquetes implicados en el proceso de comunicación, generando datos estadísticos que permitan comprender el comportamiento del *delay* en la red. Naturalmente, el valor de RTT que se calcule en el proceso de ejecución de pruebas deberá ser medido.

Por otra parte, con respecto al proceso estadístico utilizado para el análisis de los datos obtenidos a partir de las pruebas, se ha observado que **los conjuntos de datos generados se ajusta a una distribución de probabilidad normal**, alrededor de su media respectiva y la desviación estándar para cada experimento.

A continuación, se procede a realizar un total de 4 pruebas de funcionamiento sobre la red de bajo costo, con el fin de observar el comportamiento de la latencia bajo distintos escenarios de operación, los cuáles se describen a continuación:

1. Prueba 1: Comunicación y control hacia un solo dispositivo doméstico, Red No Seccionada. En esta prueba se busca analizar el comportamiento de latencia de la red de bajo costo al ejecutar una acción de mando sobre un único dispositivo (encendido de una luminaria) utilizando únicamente el *router* principal.
2. Prueba 2: Comunicación y control hacia un grupo de dispositivos domésticos, Red No Seccionada. Con este experimento se busca obtener resultados de latencia de la red de bajo costo al realizar una acción de mando sobre varios dispositivos (encendido/apagado simultáneo de varias luminarias) utilizando únicamente el *router* principal.
3. Prueba 3: Comunicación y control hacia un solo dispositivo doméstico, Red Seccionada. En esta prueba se busca analizar el comportamiento de latencia de la red de bajo costo al ejecutar una acción sobre un único dispositivo doméstico en la red seccionada.
4. Prueba 4: Comunicación y control hacia un grupo de dispositivos domésticos, Red Seccionada. Con este experimento se busca obtener resultados que permitan interpretar el comportamiento del valor de latencia de la red de bajo costo al realizar una acción específica sobre un grupo de dispositivos al ser implementado el método de seccionamiento.

Los principales parámetros de medición se establecen de la siguiente manera:

- Número de experimentos por prueba: 10
- Nivel de confiabilidad: 95 %

Prueba 1: Comunicación y control hacia un solo dispositivo, Red No Seccionada.

A continuación, en la Figura 5.6 se observa el análisis estadístico de la comparación en el retardo de la red realizando un proceso de comunicación y control hacia un solo dispositivo periférico mediante comandos de voz, tanto en la planta alta como en la planta baja, medido en milisegundos. En los resultados se nota claramente que existe un menor retardo de transmisión en la planta baja en comparación con la planta alta. Al observar los intervalos de confianza, calculados con un 95 % de confiabilidad, se puede notar que la variación del *delay* o *jitter* es muy bajo y por lo tanto casi despreciable.

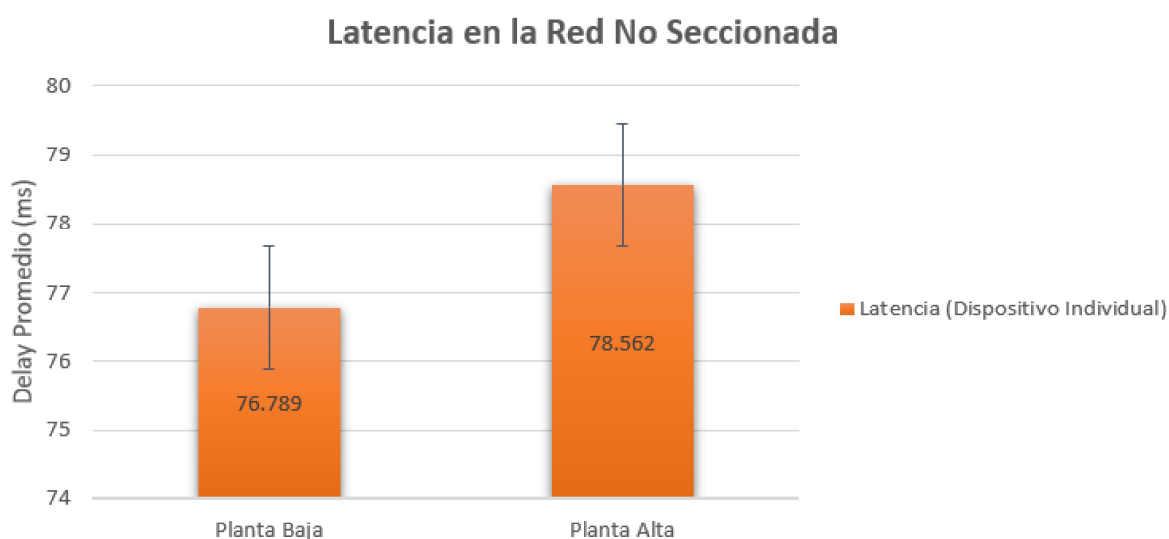


Figura 5.6: Comportamiento de la Latencia: Control de un periférico, Red No Seccionada.

Prueba 2: Comunicación y control hacia un grupo de dispositivos, Red No Seccionada.

De igual manera, en la Figura 5.7 se observa el análisis estadístico de la comparación en el retardo de la red realizando un proceso de comunicación y control hacia un grupo de dispositivos periféricos mediante comandos de voz, tanto en la planta alta como en la planta baja, medido en milisegundos.

En este punto es necesario denotar que el retardo en el proceso de comunicaciones ha aumentado ligeramente en comparación con los resultados obtenidos en la prueba 1, donde se realiza el encendido de un solo periférico para cada una de las plantas. En este caso, se obtiene un aumento de alrededor del 31.57 % de retardo en la red.

Prueba 3: Comunicación y control hacia un solo dispositivo, Red Seccionada.

Como parte de la prueba 3 se procede a generar tráfico mediante comandos de voz a un solo dispositivo, tanto en la planta alta como en la planta baja de la edificación,

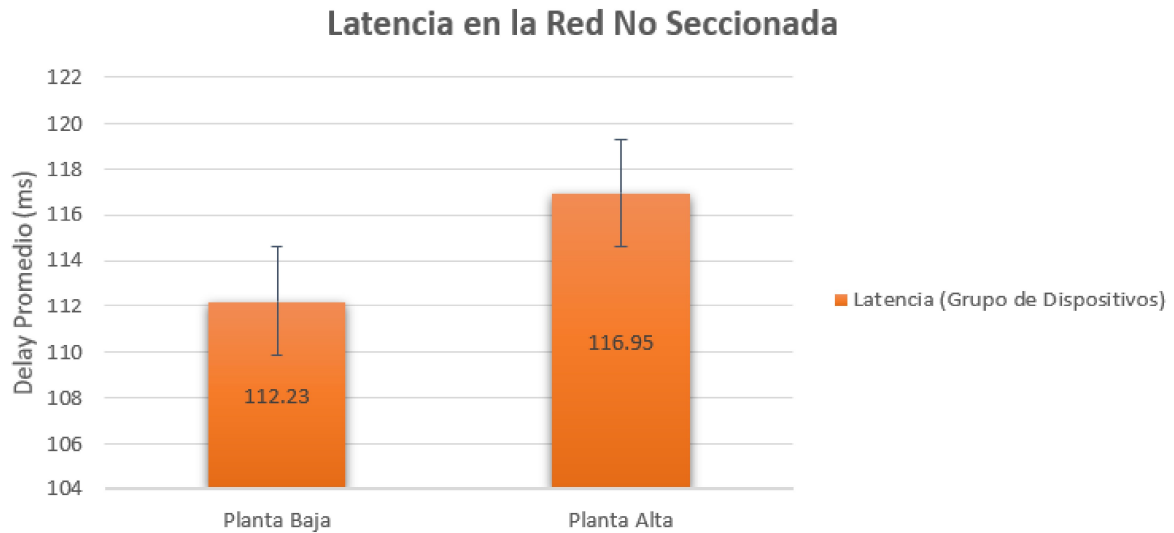


Figura 5.7: Comportamiento de la Latencia: Control de un grupo de periféricos, Red No Seccionada.

luego de haber realizado el proceso completo de migración de todos los periféricos de iluminación y potencia inteligentes hacia el *router* secundario (Seccionamiento de la red).

De esta manera, en la Figura 5.8 se ilustra el comportamiento del *delay* en la red seccionada bajo las condiciones de trabajo establecidas.

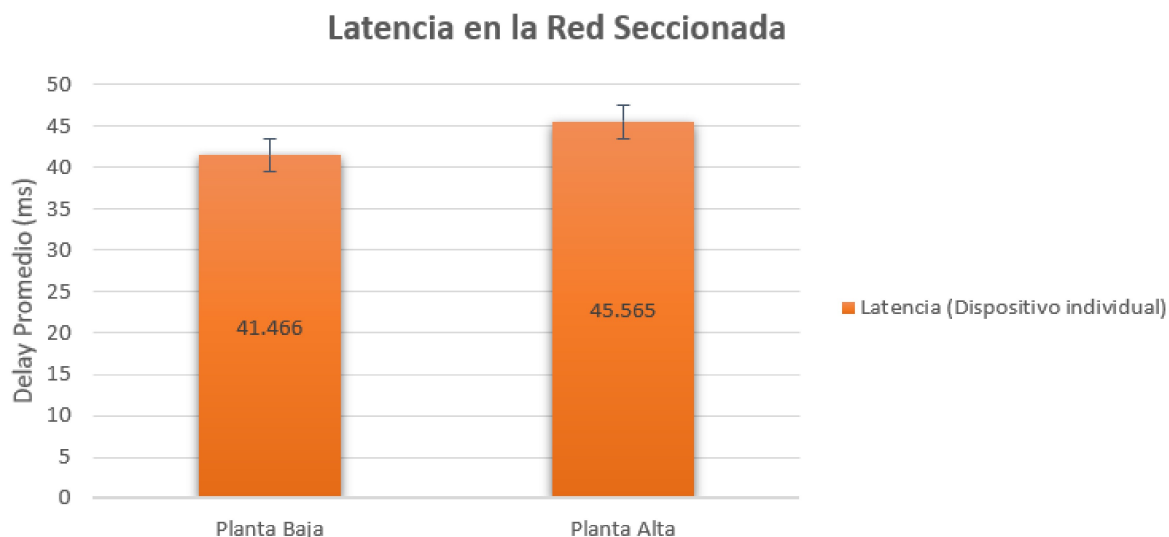


Figura 5.8: Comportamiento de la Latencia: Control de un periférico, Red Seccionada.

La figura anterior entrega un valor de 41.466 [ms] de retardo para la planta baja en el proceso de comunicación entre el dispositivo de Amazon Alexa y el periférico controlado, y un total de 45.565 [ms] para la planta alta en el mismo proceso. Al igual que los casos anteriores, se obtiene una pequeña diferencia en los valores medidos entre plantas, teniendo un mayor *delay* para la planta alta.

Con respecto a los efectos del seccionamiento de la red, es necesario denotar los siguientes resultados. En la planta baja, para una Red No Seccionada, se calcula un *delay* de 76.789 [ms]. Por lo tanto, los resultados entregan una reducción en la latencia de alrededor de 46.02 %, siendo esta una mejora sustancial en términos de latencia, que a pesar de que, para el usuario, dicha mejora en la latencia es prácticamente imperceptible, para los efectos del rendimiento de la red representa una descongestión notoria. Por otra parte, para una Red No Seccionada en la planta alta de la edificación, se calcula una latencia de 78.562 [ms]. En base a esto, se calcula una reducción de la latencia del 42.11 %, siendo esta una mejora notoria y acorde al resultado anterior.

Prueba 4: Comunicación y control hacia un grupo de dispositivos, Red Seccionada.

Al igual que la prueba número 2, se realiza el proceso de captura de tráfico y lectura del retardo en la red hacia un grupo de dispositivos, con el objetivo de medir el retardo en la red utilizando el mecanismo descrito al inicio de la presente sección. En la Figura 5.9 se ilustra el retardo general en la red para el caso planteado.

Nuevamente, con respecto a los efectos del seccionamiento de la red, es necesario denotar los siguientes resultados cuando se ha ejecutado un proceso de control sobre un grupo de dispositivos inteligentes. En la planta baja, para una Red No Seccionada, se calcula un *delay* de 112.23 [ms]. Para una Red Seccionada, el *delay* se reduce a un valor de 67.338 [ms], es decir, alrededor de un 39.78 %, siendo esta una mejora

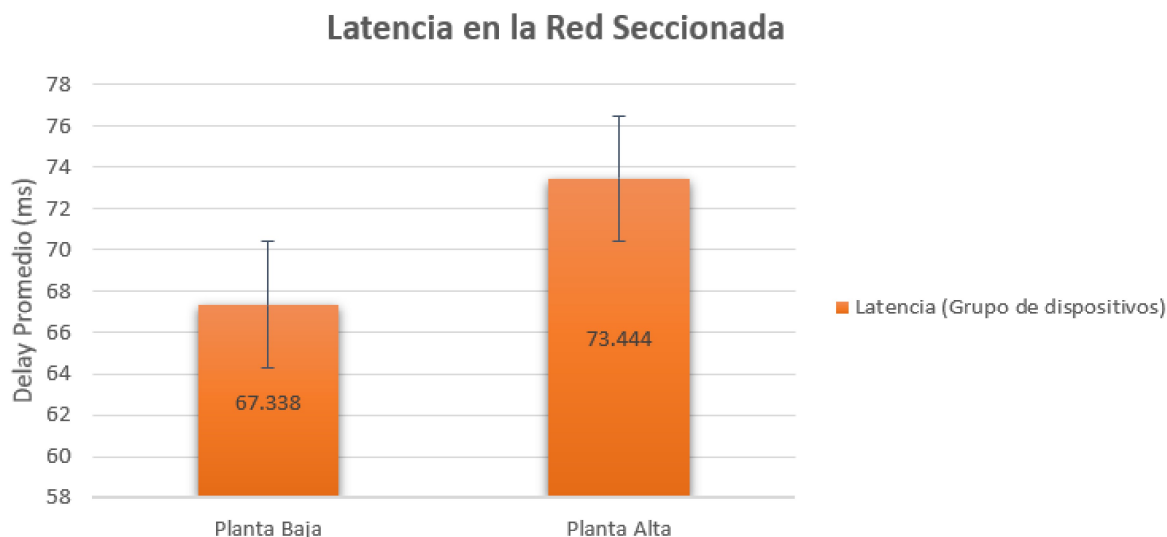


Figura 5.9: Comportamiento de la Latencia: Control de un grupo de periféricos, Red Seccionada.

sustancial en términos de latencia. Por otra parte, para una Red No Seccionada en la planta alta de la edificación, se calcula una latencia de 112.95 [ms], y para una Red Seccionada dicha latencia se reduce a 73.444 [ms], es decir, una mejora del 34.97%. En base a esto, se establece que se obtiene una ligera mejora acorde al resultado anterior.

5.3.2. Medición de latencia en la red LCN

En el presente apartado se procede a realizar las pruebas experimentales en la edificación que se encuentra funcionando bajo la normativa LCN, con el fin de obtener el comportamiento de la latencia bajo distintos escenarios de operación. Es necesario mencionar que el mecanismo seguido para cumplir con el objetivo planteado es similar al que se ha seguido en la medición de latencia en la red de bajo costo, debido a las propiedades del proceso de comunicación de LCN a nivel de capa 3.

Con el objetivo de interceptar el tráfico enviado y recibido por los equipos LCN, nuevamente se procede a utilizar Wireshark, en su modo promiscuo, opción que permite capturar todo el tráfico circundante en la red. Cabe mencionar que el analizador de red se encuentra corriendo en un equipo personal considerado como el elemento controlador del sistema LCN, siendo este un dispositivo que se encuentra conectado directamente al gateway del LCN PKE, por lo que todo el tráfico generado por los periféricos y controladores pasa por dicho elemento en cada uno de los eventos.

Finalmente, una vez que se han realizado las configuraciones respectivas para acceder a dicho elemento y ejecutar Wireshark, se procede a realizar la medición de la latencia en la red. En la Figura 5.10 se observa un ejemplo de captura de paquetes en la red LCN.

Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
3.5996951	192.168.18.149	192.168.18.30	TCP	62	60569 → 4114 [PSH, ACK] Seq=1 Ack=1 Win=510 Len=8
3.599339	192.168.18.30	192.168.18.149	TCP	60	4114 → 60569 [ACK] Seq=1 Ack=9 Win=457 Len=0
5.133658	192.168.18.30	192.168.18.149	TCP	98	4114 → 60569 [PSH, ACK] Seq=1 Ack=9 Win=457 Len=44
5.179385	192.168.18.149	192.168.18.30	TCP	54	60569 → 4114 [ACK] Seq=9 Ack=45 Win=509 Len=0
27.466891	192.168.18.30	192.168.18.149	TCP	68	4114 → 60569 [PSH, ACK] Seq=45 Ack=9 Win=457 Len=14
27.510872	192.168.18.149	192.168.18.30	TCP	54	60569 → 4114 [ACK] Seq=9 Ack=59 Win=509 Len=0
27.513273	192.168.18.30	192.168.18.149	TCP	64	4114 → 60569 [PSH, ACK] Seq=59 Ack=9 Win=457 Len=10
27.557286	192.168.18.149	192.168.18.30	TCP	54	60569 → 4114 [ACK] Seq=9 Ack=69 Win=509 Len=0
27.560889	192.168.18.30	192.168.18.149	TCP	68	4114 → 60569 [PSH, ACK] Seq=69 Ack=9 Win=457 Len=14
27.605477	192.168.18.149	192.168.18.30	TCP	54	60569 → 4114 [ACK] Seq=9 Ack=83 Win=509 Len=0
31.848915	192.168.18.30	192.168.18.149	TCP	68	4114 → 60569 [PSH, ACK] Seq=83 Ack=9 Win=457 Len=14
31.904623	192.168.18.149	192.168.18.30	TCP	54	60569 → 4114 [ACK] Seq=9 Ack=97 Win=509 Len=0
32.897012	192.168.18.30	192.168.18.149	TCP	78	4114 → 60569 [PSH, ACK] Seq=97 Ack=9 Win=457 Len=24
32.950491	192.168.18.149	192.168.18.30	TCP	54	60569 → 4114 [ACK] Seq=9 Ack=121 Win=509 Len=0
32.956799	192.168.18.30	192.168.18.149	TCP	68	4114 → 60569 [PSH, ACK] Seq=121 Ack=9 Win=457 Len=1
33.012357	192.168.18.149	192.168.18.30	TCP	54	60569 → 4114 [ACK] Seq=9 Ack=135 Win=509 Len=0
33.609654	192.168.18.149	192.168.18.30	TCP	62	60569 → 4114 [PSH, ACK] Seq=9 Ack=135 Win=509 Len=8
33.612377	192.168.18.30	192.168.18.149	TCP	60	4114 → 60569 [ACK] Seq=135 Ack=17 Win=457 Len=0
35.304606	192.168.18.30	192.168.18.149	TCP	98	4114 → 60569 [PSH, ACK] Seq=135 Ack=17 Win=457 Len=
35.359582	192.168.18.149	192.168.18.30	TCP	54	60569 → 4114 [ACK] Seq=17 Ack=179 Win=509 Len=0
36.829370	192.168.18.30	192.168.18.149	TCP	78	4114 → 60569 [PSH, ACK] Seq=179 Ack=17 Win=457 Len=
36.879337	192.168.18.149	192.168.18.30	TCP	54	60569 → 4114 [ACK] Seq=17 Ack=203 Win=509 Len=0
37.012221	192.168.18.30	192.168.18.149	TCP	68	4114 → 60569 [PSH, ACK] Seq=203 Ack=17 Win=457 Len=
37.067286	192.168.18.149	192.168.18.30	TCP	54	60569 → 4114 [ACK] Seq=17 Ack=217 Win=509 Len=0
40.816447	192.168.18.30	192.168.18.149	TCP	78	4114 → 60569 [PSH, ACK] Seq=217 Ack=17 Win=457 Len=
40.868769	192.168.18.149	192.168.18.30	TCP	54	60569 → 4114 [ACK] Seq=17 Ack=241 Win=509 Len=0

Figura 5.10: Captura de paquetes mediante Wireshark, Red LCN.

El mecanismo para el cálculo de la latencia en la red LCN se describe a continuación. Considerando que el equipo LCN-PKE es el elemento central de la arquitectura, la teoría con respecto al proceso de comunicación en capa de transporte indica que el protocolo implementado entre la topología y la interacción de equipos es TCP y, como ya se ha mencionado, dicho protocolo provee información acerca del RTT o Round Trip Time, siendo este el tiempo necesario para que los datos viajen dentro de una solicitud de red desde el punto de partida hasta su destino y viceversa.

De esta manera, en concordancia con las pruebas realizadas en el sistema domótico de bajo costo, se logra obtener la latencia de un grupo determinado de paquetes implicados en el proceso de comunicación, generando datos estadísticos que permitan comprender el comportamiento de la latencia en la red. Nuevamente, se detalla que es necesario dividir para 2 el valor obtenido de RTT para todo el grupo de paquetes medidos.

Al igual que su contra parte de bajo costo, el proceso estadístico utilizado para el análisis de los datos obtenidos a partir de las pruebas en el sistema LCN, indica claramente que **los conjuntos de datos generados se ajusta a una distribución de probabilidad normal**, alrededor de su media respectiva y la desviación estándar para cada experimento.

Para este caso, se procede a realizar un total de 2 pruebas para la red LCN, con el fin de observar el comportamiento de la latencia bajo distintos escenarios de operación, los cuáles se describen a continuación:

1. Prueba 1: Comunicación y control hacia un solo dispositivo. En esta prueba se busca analizar el comportamiento de latencia de la red LCN al ejecutar una acción sobre un único dispositivo.
2. Prueba 2: Comunicación y control hacia un grupo de dispositivos. Con este experimento se busca tener resultados de latencia de la red LCN al realizar una acción sobre un grupo de dispositivos.

En este punto es necesario destacar el hecho de que, como se ha mencionado anteriormente, en la red LCN no fue necesario realizar el proceso de seccionamiento de la red, lo que ha implicado que se realicen únicamente un total de 2 escenarios de operación para obtención de latencia en la red, en contraste con el total de 4 pruebas realizadas en la red de bajo costo.

Prueba 1: Comunicación y control hacia un solo dispositivo.

A continuación, en la Figura 5.11 se ilustra la gráfica de la latencia en la red proporcionada por el software Wireshark con respecto al proceso de comunicación entre el concentrador LCN-PKE y un dispositivo periférico (encendido de una luminaria).

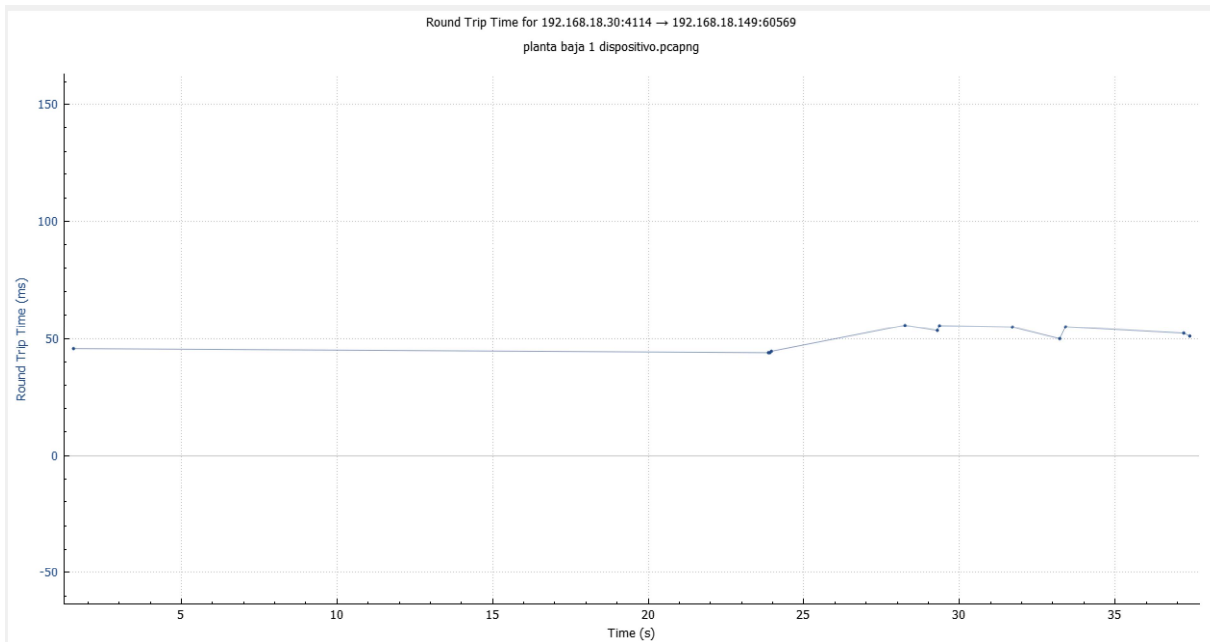


Figura 5.11: Comportamiento de la Latencia: Control de un periférico.

Como se observa en la Figura 5.11, el comportamiento de la latencia en la red es prácticamente lineal, teniendo una ligera variación, casi imperceptible, en ciertos paquetes. La razón de la obtención de estos valores se da debido a la naturaleza de la topología de la red LCN la cual, como se ha mencionado, es una topología de tipo bus. Considerando también el hecho de que toda la red es cableada y dedicada para cada proceso en el plano de datos, es evidente que la magnitud de la latencia será mucho menor en comparación con los resultados generados en las pruebas efectuadas en la edificación con el sistema domótico de bajo costo.

De esta manera, en la Figura 5.12 se observa el análisis estadístico de la comparación en el retardo de la red realizando un proceso de interacción desde la aplicación móvil de LCN, tanto en la planta alta como en la planta baja, medido en milisegundos. En los resultados se nota claramente que existe un menor retardo de transmisión en la planta baja en comparación con la planta alta. Al observar los intervalos de confianza, calculados con un 95 % de confiabilidad, se puede notar que la variación del *delay* o jitter es muy bajo y por lo tanto casi despreciable.

Prueba 2: Comunicación y control hacia un grupo de dispositivos.

De igual manera, en la Figura 5.13 se observa la gráfica del comportamiento del RTT en la red LCN.

Ahora, en la Figura 5.14 se presenta el análisis estadístico de la comparación en el retardo de la red realizando un proceso de comunicación y control hacia un grupo de dispositivos periféricos mediante la interacción del usuario con la aplicación de LCN, tanto en la planta alta como en la planta baja, medido en milisegundos.

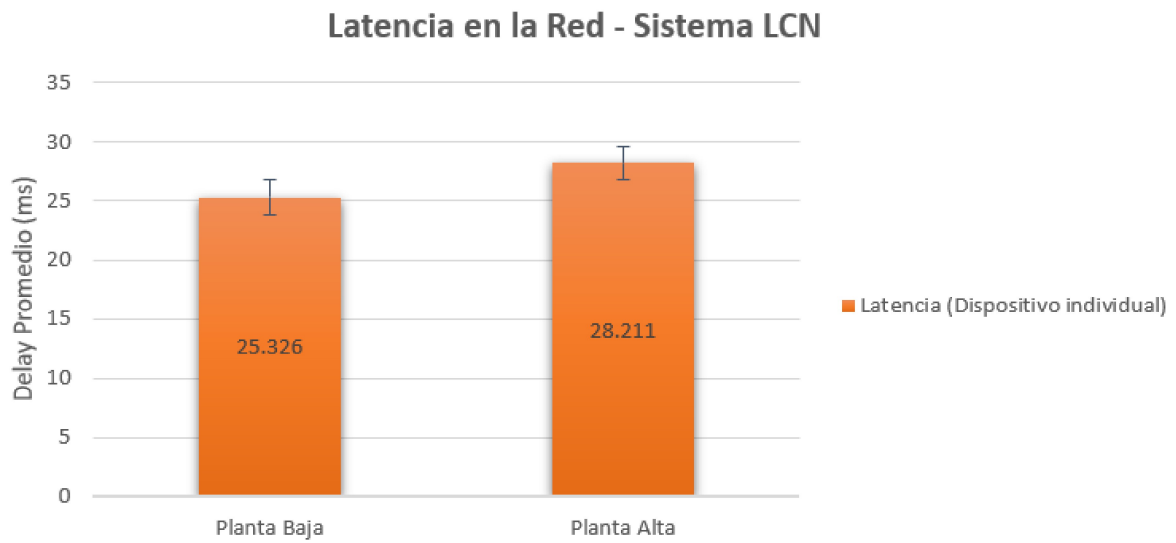


Figura 5.12: Comportamiento de la Latencia: Control de un periférico, Red LCN.

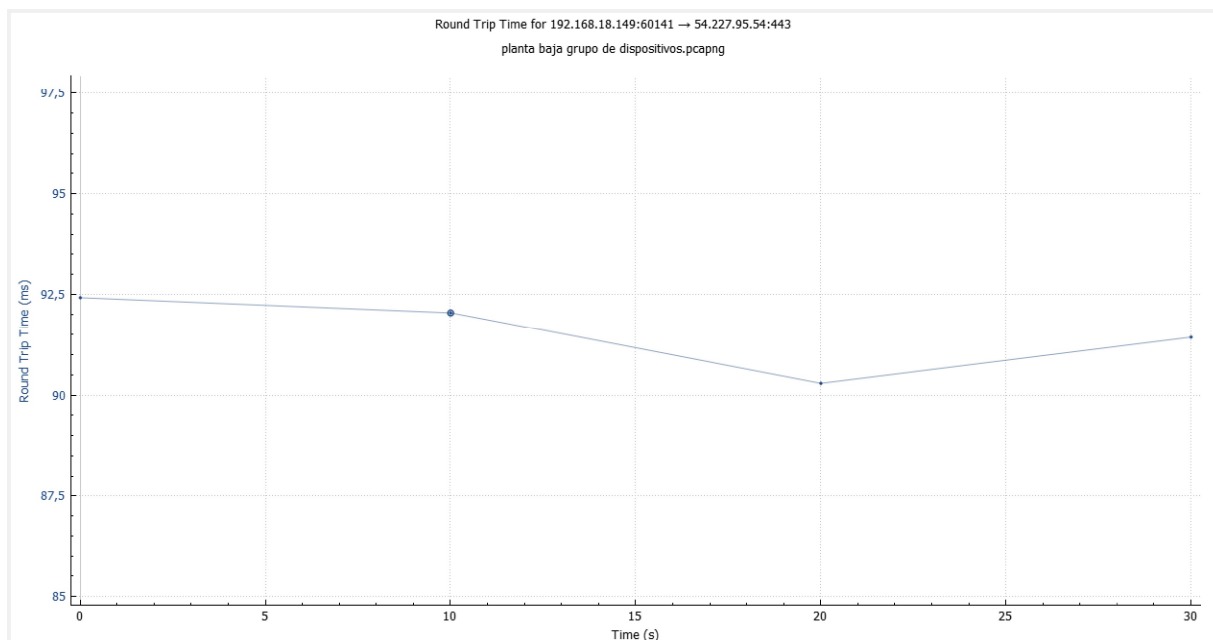


Figura 5.13: Comportamiento de la Latencia: Control de un grupo de periféricos, Red LCN.

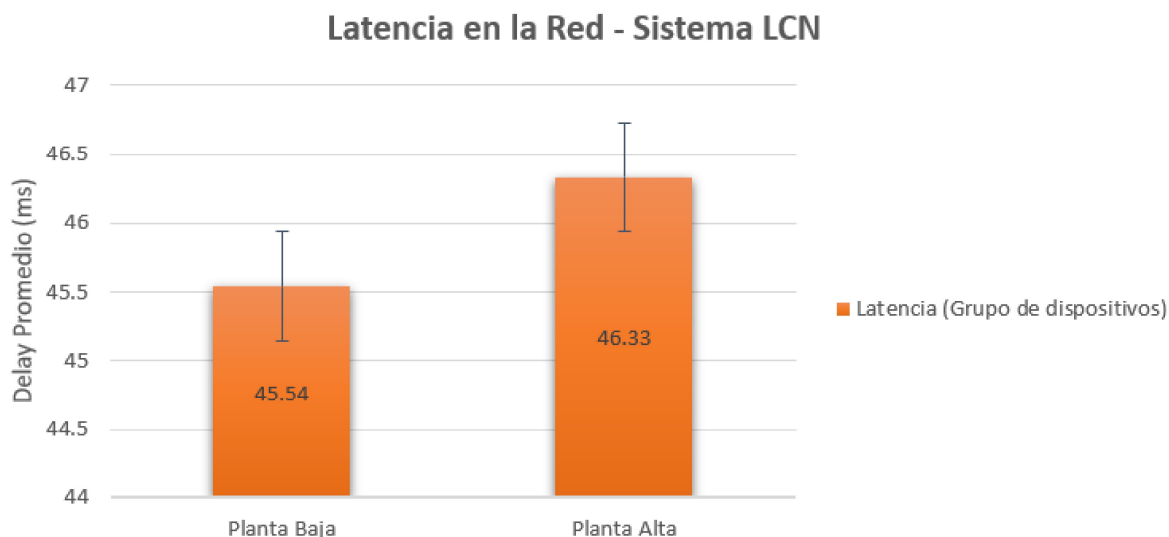


Figura 5.14: Comportamiento de la Latencia: Control de un grupo de periféricos, Red LCN.

En este punto es necesario denotar que el retardo en el proceso de comunicaciones ha aumentado ligeramente en comparación con los resultados obtenidos en la prueba 1, donde se realiza el encendido de un solo periférico para cada una de las plantas. En este caso llegamos a obtener una latencia de alrededor de 45.54 [ms] para la planta baja, y un valor de latencia de alrededor de 46.33 [ms] para la planta alta.

5.3.3. Tabulación de resultados y comparativa.

Finalmente, en la Tabla 5.10 se presentan todos los resultados obtenidos a través de la serie de experimentos realizados en las secciones anteriores, con el fin de generar una comparativa objetiva de los niveles de latencia en la red para cada escenario de operación descrito.

Tabla 5.10: Niveles de Latencia en la Red.

	Latencia Red Bajo Costo		Latencia Red LCN	
	Planta Baja	Planta Alta	Planta Baja	Planta Alta
Red No Seccionada Dispositivo Individual	76.789 [ms]	78.562 [ms]	25.326 [ms]	28.211 [ms]
Red No Seccionada Grupo de Dispositivos	112.23 [ms]	116.95 [ms]	45.54 [ms]	46.33 [ms]
Red Seccionada Dispositivo Individual	41.466 [ms]	45.565 [ms]	-	-
Red Seccionada Grupo de Dispositivos	67.338 [ms]	73.444 [ms]	-	-

Como se puede observar en la Tabla 5.10, el comportamiento de la latencia para el sistema LCN es superior al desempeño del sistema de bajo costo, considerando toda la serie de experimentos que se han desarrollado a lo largo de la sección. Cabe mencionar que los valores nulos que se exponen en la tabla anterior corresponden al hecho de que para la latencia en la Red LCN no se ha requerido realizar un seccionamiento de la red, dado que el sistema dispone de elementos independientes para toda la topología y no interfiere con ningún dispositivo o elemento externo.

Tomando el valor de la latencia de la red de bajo costo, con una magnitud de 76.789 [ms] para la planta baja mediante el control de un dispositivo individual, y realizando una comparación con los 25.326 [ms] de valor de latencia para la planta baja en la red LCN, se observa que existe una disminución de latencia del 67.01 % de la red LCN frente a la red de bajo costo. Este porcentaje proporciona una capacidad de reacción mucho más alta frente a eventos y mejora de manera notable la eficiencia de la red.

Por otra parte, considerando el valor de la latencia de la red de bajo costo, con una magnitud de 78.562 [ms] para la planta alta mediante el control de un dispositivo individual, y realizando una comparación con los 28.211 [ms] de valor de latencia para la planta alta en la red LCN, se observa que existe una disminución de latencia del 64.09 % de la red LCN frente a la red de bajo costo. Igual al caso anterior, de una manera objetiva, se establece que este porcentaje de mejora es evidente y genera un rendimiento general de la red mucho más aceptable.

El tercer punto de comparación corresponde a tomar el valor de la latencia de la red de bajo costo, con una magnitud de 112.23 [ms] para la planta baja mediante el control de un grupo de dispositivos, y realizando una comparación con los 45.54 [ms] de valor de latencia para la planta baja en la red LCN, se observa que existe una disminución de latencia del 59.42 % de la red LCN frente a la red de bajo costo. Dicho valor demuestra que el manejo de un grupo de dispositivos por parte de la red LCN es mucho más eficaz que su contra-parte de bajo costo.

Finalmente, con respecto a el valor de la latencia de la red de bajo costo, con una magnitud de 116.95 [ms] para la planta alta mediante el control de un grupo de dispositivos, y realizando una comparación con los 46.33 [ms] de valor de latencia para la planta alta en la red LCN, se observa que existe una disminución de latencia del 60.38 % de la red LCN frente a la red de bajo costo. Frente a este resultado, de manera objetiva se menciona que este porcentaje de mejora es evidente y destaca a la red LCN frente a un evento de control de un grupo de dispositivos.

Por lo tanto, en este capítulo se concluye que la latencia en la red LCN es altamente eficiente en comparación con los valores de la latencia medidos en la edificación con un sistema domótico de bajo costo. Esto se da debido a las características intrínsecas de cada una de las topologías, y considerando los factores físicos y lógicos de cada sistema expuestos anteriormente. De esta manera, se genera un mejor rendimiento de la red para la topología LCN. No obstante, considerando las magnitudes de latencia obtenidos y mostrados en la Tabla 5.10, dichos niveles mejorados en milisegundos no

representan un gran impacto en la calidad de experiencia de los usuarios, los cual es un tema que se abordará en la siguiente sección.

5.4. Evaluación subjetiva y QoE

El desarrollo de la sección actual tiene como fin realizar un complemento a las pruebas objetivas realizadas anteriormente mediante la ejecución de experimentos para evaluar la calidad subjetiva de los dos escenarios domóticos empleados: LCN y sistema automatizado de bajo costo. Para cumplir con el objetivo planteado, es necesario tomar en cuenta que la opinión de un espectador puede verse afectada por factores tales como: el escenario o el ambiente, el estado de ánimo y el nivel de interacción con la escena (nivel de concentración requerido, atención visual). Una medida subjetiva tendrá mayor fiabilidad si el ambiente donde se realiza la prueba es confortable y no existen elementos que generen distracción.

5.4.1. Calidad de experiencia para el sistema de bajo costo

Con el objetivo de obtener una medición de la Calidad de Experiencia percibida hacia la Red de Bajo Costo, se procede a realizar una encuesta sobre un grupo definido de usuarios, los cuales han asignado una puntuación entre una escala del 1 al 5, en donde 1 representa la peor QoE, y 5 una QoE totalmente eficiente.

Luego, a partir de la puntuación asignada por cada sujeto, se realiza un promedio y se redondea al entero más cercano para hacer uso de la escala de la Tabla 5.11.

Tabla 5.11: Escala para valoración subjetiva.

Valoración	Etiqueta
5	Excelente
4	Bueno
3	Regular
2	Deficiente
1	Malo

De esta manera, a continuación se presenta la Tabla 5.12 obtenida a través de la entrevista personal en 3 pruebas en distintos instantes de tiempo hacia el grupo de 4 usuarios de la Red de Bajo Costo.

Tabla 5.12: Valoración subjetiva para cada usuario - red de bajo costo.

No. de Prueba	Sujeto 1	Sujeto 2	Sujeto 3	Sujeto 4	Promedio	Valoración final
1	3	3	2	4	3	Regular
2	4	3	5	4	4	Bueno
3	4	4	5	4	4	Bueno

De esta manera, se obtiene una calificación de **Regular** para el sistema domótico de bajo costo.

5.4.2. Calidad de experiencia para el sistema LCN

El siguiente paso consiste en constatar la Calidad de Experiencia percibida por los usuarios de la edificación en la que se encuentra funcionando la arquitectura del sistema domótico LCN.

Siguiendo la metodología implementada en el experimento realizado para el sistema de bajo costo, se procede a realizar una encuesta sobre un grupo definido de usuarios, los cuales han asignado una puntuación entre una escala del 1 al 5, en donde 1 representa la peor QoE, y con un valor de 5 una QoE totalmente eficiente. Luego, a partir de la puntuación asignada por cada sujeto, se realiza un promedio y se redondea al entero más cercano para hacer uso de la escala de la Tabla 5.11.

Entonces, a continuación se presenta la Tabla 5.13 obtenida a través de la entrevista personal en 3 pruebas en distintos instantes de tiempo hacia el grupo de 4 usuarios de la Red de Bajo Costo.

Tabla 5.13: Valoración subjetiva para cada usuario - Red LCN.

No. de Prueba	Sujeto 1	Sujeto 2	Sujeto 3	Sujeto 4	Promedio	Valoración final
1	4	3	4	5	4	Bueno
2	4	5	4	5	4	Bueno
3	5	5	4	4	4	Bueno

De esta manera, se obtiene una calificación de **Bueno** para el sistema domótico de LCN.

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

- El presente trabajo de titulación desarrolla la planificación, instalación y comparación de dos sistemas de automatización de viviendas, pudiendo obtener las principales diferencias entre el uso de una marca reconocida y con licencia, dedicada a las soluciones domóticas, como lo es LCN (*Local Control Network*), e implementar soluciones de bajo costo, adquiriendo dispositivos inteligentes y vinculándolos a un asistente virtual de voz, en este caso Amazon Alexa, para que sirva como controlador.
- El objetivo primordial de realizar una comparativa exhaustiva entre dos sistemas domóticos diferenciados ha sido cumplido a cabalidad mediante la realización de una serie de estudios experimentales ejecutados sobre dos edificaciones similares, simulando escenarios de operación que permitieron controlar los distintos parámetros de funcionamiento de cada arquitectura y generaron la posibilidad de realizar análisis estadísticos capaces de brindar información basada en la eficiencia en los cuatro ejes fundamentales de la domótica.
- Los resultados de la presente investigación, tanto objetivos como subjetivos, han establecido un punto de referencia y comparación de manera esquematizada sobre el cual un usuario regular puede acceder para tener la capacidad de discernir la información aquí expuesta y encontrarse en la capacidad de tomar una decisión acertada acerca del mejor sistema domótico en base a sus requerimientos, conociendo las diferencias esenciales entre cada uno de ellos, así como también sus ventajas y desventajas respectivas en aspectos esenciales tales, tanto técnicos, económicos y funcionales.
- Se ha cumplido exitosamente con el objetivo de poner en marcha los sistemas domóticos en dos viviendas de la ciudad de Cuenca con los requisitos de automatizar el encendido, apagado y control de brillo de las luminarias, disminución del consumo de potencia en *stand-by* de algunos dispositivos, manejo de cámaras remotas y la implementación de un sistema de monitoreo y visualización.
- Si bien las tecnologías implementadas tienen numerosas diferencias tanto en su funcionamiento, modo de instalación y configuración, el fin con que han sido creadas satisface las necesidades del usuario, ambas soluciones brindan una interacción amigable e intuitiva y tiene respuestas rápidas a las peticiones, sin embargo también comparten desventajas como el hecho de tener que recordar todos los nombres de dispositivos, áreas, escenarios, palabras claves o incluso gestos para respuestas específicas del sistema.

- A nivel económico LCN presenta su mayor desventaja, ya que es una tecnología dedicada y tiene licencia para su uso, configuración y monitorización. Es por esto que su costo es al menos 17 veces más elevado que las soluciones *Do It Yourself*. En este apartado, es posible darse cuenta de que LCN puede funcionar de una manera muy confiable como red domótica, sin embargo, su potencial puede ser aprovechado para la inmótica, su bus de datos y modo de configuración permiten que grandes edificaciones puedan ser automatizadas eficientemente, en estos casos la inversión es justificada.
- Al comparar las tecnologías en el ámbito de ahorro energético se puede ver otro punto a favor de las soluciones de bajo costo; como es de esperarse los dispositivos inteligentes (de ambas marcas) tienen un consumo en *stand-by* ya que deben estar atentos a cualquier solicitud del sistema domótico, por ello se ha medido la potencia requerida por todo el sistema, obteniendo que la red manejada por Alexa tiene un consumo inferior a la mitad del que consume la red LCN, sin embargo, ninguno de los dos sistemas contrarresta el consumo necesario para su funcionamiento con las técnicas para brindarle al usuario un ahorro de energía.
- Un aspecto importante a considerar en la elección de un sistema domótico por parte de un usuario es el de latencia en la red. Los resultados que han arrojado las pruebas experimentales objetivas realizadas en cada una de las instalaciones, tanto LCN como de bajo costo, han demostrado que las magnitudes del nivel de latencia son considerablemente despreciables para aplicaciones cotidianas que se puedan dar en un hogar automatizado con acciones como encendido de luminarias, control de elementos de potencia, monitoreo de elementos de seguridad, etc. No obstante, dicho panorama puede cambiar cuando los requerimientos del usuario son centrados en procesos que requieran un monitoreo constante como, por ejemplo, aplicaciones médicas en las que un usuario depende de su sistema domótico para enviar información crítica de su salud hacia un servidor ubicado en un centro de control, en donde sería estrictamente necesario un sistema con la menor latencia posible. En dicho caso, la latencia en la red sería un aspecto primordial, en donde los resultados aquí expuestos demuestran que la red LCN opera de una manera mucho más eficiente, teniendo en promedio un 60% menos de latencia en cada escenario de operación.
- Las pruebas experimentales objetivas han entregado información concreta acerca del comportamiento y rendimiento de la red en base a distintos aspectos técnicos fundamentales para un sistema domótico. Sin embargo, es necesario considerar de igual importancia a los resultados subjetivos presentados en el documento actual. Entonces, examinando los resultados subjetivos generados por los distintos grupos de usuarios hacia los sistemas domóticos domiciliarios LCN y de bajo costo, notamos una calidad de experiencia bastante similar, es decir, la percepción de funcionamiento de cada sistema no difiere en un nivel suficiente para justificar la notable diferencia de precios entre cada sistema. No obstante, se ha denotado que la arquitectura LCN es de alta disponibilidad, poniendo en

evidencia los problemas de recursos de la red de bajo costo para mantener un funcionamiento sin cortes y la falta de mecanismos para solventar los eventos de desconexión frente a problemas externos tales como cortes en el servicio de internet y la saturación de equipos en la red de área local del domicilio. Sin embargo, debido a que dichos eventos son ocasionales, se recalca el hecho de que los usuarios de la red de bajo costo han denotado una calidad de experiencia semejante a los usuarios de su contraparte LCN, siendo esta una línea de equiparación importante para la elección de un sistema u a otro.

- Las soluciones de bajo costo analizadas en este trabajo de investigación tienen ciertas vulnerabilidades y desventajas, una de ellas son las restricciones de región, Alexa no tiene desbloqueadas todas *skills*, esto repercute en que no se pueda vincular directamente un Smart TV al sistema domótico, es necesario recurrir a más dispositivos como el *fire stick*. También se puede mencionar sus vulnerabilidades de seguridad, el asistente virtual no reconoce una voz en especial, únicamente convierte los comandos en texto para convertirlos en acciones, esto hace posible que cualquier persona desconfigure ciertas preferencias o en casos más extremos se pueda ingresar remotamente y dar indicaciones a Alexa.

6.2. Recomendaciones

Con la implementación práctica de los sistemas domóticos se han tenido algunos inconvenientes que pueden ser solucionados con una buena planificación inicial siguiendo ciertas recomendaciones que se muestran a continuación:

- La implementación de la domótica en una vivienda debe estar considerada desde el momento de la construcción. Si se desea automatizar un domicilio ya construido se debe optar por las tecnologías de bajo costo que comprometen de una manera casi nula la estructura, en caso de utilizar un bus como medio de transmisión se deberá considerar costos de mano de obra ya que el bus debe ir conjuntamente con el cableado eléctrico que, por lo general, no es de fácil acceso.
- En la configuración de los dos sistemas se debe asignar nombres a cada nodo, grupo o escena, estos deben ser fáciles de recordar e intuitivos. Se presentarán varios casos en que los nombres deberán ser cada vez más específicos para identificar correctamente a los nodos, como por ejemplo *luz pasillo entrada*, estos nombres son más intuitivos que el uso de números, como *luz 4* ya que el usuario debe memorizar la relación del número con la ubicación. Los nombres específicos también son de ayuda para la reconfiguración o la programación de escenas y eventos.
- Para las soluciones de bajo costo es preferible el uso de una misma marca de dispositivos, ya que cada fabricante cuenta con aplicaciones para la respectiva configuración. Si bien el asistente de voz Alexa es compatible con varias marcas, el uso variado de estas representará un mayor número de aplicaciones necesarias en el teléfono móvil, con todos los permisos que implican. Una solución es

utilizar aplicaciones que permiten la configuración de dispositivos de ciertas marcas, como *Smart Life* la cual puede vincularse fácilmente con Alexa.

- El uso de sistemas de seguridad (cámaras, cerraduras, alarmas) compatible con Alexa no es recomendable, ya que estoy agregando vulnerabilidades, cualquier persona puede desactivar estos sistemas con un simple comando de voz.

6.3. Trabajos futuros

Este proyecto ha permitido dar un primer vistazo a las principales diferencias en la implementación práctica de dos tipos de sistemas domóticos, utilizando tecnologías dedicadas al uso domótico y soluciones de bajo costo que integran asistentes de voz y dispositivos WiFi y ZigBee de fácil integración, sin embargo, en el estudio de *benchmarking* existen varias líneas de investigación que quedan abiertas. A continuación se presentan ciertos trabajos que pueden ser desarrollados en un futuro con el fin de generalizar las distintas tecnologías domóticas existentes con sus ventajas y desventajas sobre otras apoyándose en los 4 pilares de la domótica. Estos trabajos son:

- Analizar los sistemas domóticos ampliando las funcionalidades y dispositivos que interactúan dentro de la red en viviendas con más prestaciones.
- Comparar los resultados obtenidos con sistemas domóticos dedicados de libre acceso, como KNX, e implementaciones de bajo costo con dispositivos ZigBee.
- Realizar un estudio de *benchmarking* de sistemas que utilicen los tres medios de transmisión mencionados: líneas eléctricas, línea de bus y comunicaciones inalámbricas.

Bibliografía

- [1] F Chan, K Núñez, E Torres, J Ortegón, O Aguilar, and H Toral. Análisis de sensibilidad al ruido en un sistema de comunicación sobre línea eléctrica para aplicaciones en domótica empleando el protocolo x-10. *Ingeniería*, 15(3):147–156, 2011.
- [2] Issendorff KG. *LCN Local Control Network*. Werk Rethen, 2010.
- [3] Amazon. About the real-time communication interface, 2022. Accedido el 16 de Agosto de 2022.
- [4] Home Assistant. Integration architecture, 2021. Accedido el 7 de Agosto de 2022.
- [5] Hugo Martín Domínguez and Fernando Sáez Vacas. *Domótica: Un enfoque sociotécnico*. Fundación Rogelio Segovia para el desarrollo de las Telecomunicaciones, 2006.
- [6] Héctor Santos Senra. Diseño e implementación de un sistema domótico basado en raspberry pi. B.S. thesis, 2017.
- [7] Javier Barrio Ruiz. Sistema domótico abierto de bajo coste para la mejora de la eficiencia energética. B.S. thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2017.
- [8] Henry Camó Cojóm. Sistema domótico como aplicación a la eficiencia energética para gestionar el uso de la energía eléctrica en los hogares. B.S. thesis, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2015.
- [9] Gonzalo B Asencio, JM Maestre, Juan M Escano, C Martín Macareno, MA Molina, and Eduardo F Camacho. Interoperabilidad en sistemas domóticos mediante pasarela infrarrojos-zigbee. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 8(4):397–404, 2011.
- [10] Luis Felipe Falconí Cepeda and Carlos Ramiro Jimenez Yedra. Estudio e implementación de domótica activado por comandos de voz y comunicación en zigbee. B.S. thesis, 2010.
- [11] MA Dávila, JF Pérez, W Mantilla, and JE Moreno. Diseño de una red inalámbrica con tecnología zigbee para la implementación de un sistema domótico. *Revista De Ciencia E Ingeniería Del Instituto Tecnológico Superior De Coatzacoalcos*, 3:415–420, 2016.
- [12] Alvaro Andrés Malave Ochoa, Gabriel Favian Rosas Vargas, and Jeison Alexis Ortiz Bautista. Análisis y comparación entre una casa convencional y una con sistema de domótica. *Revista convicciones*, 1(1):24–29, 2014.
- [13] ESTEBAN ADRIÁN FARFÁN REA. *Diseño de un sistema domótico para facilitar la interacción de personas con discapacidad a través de interfaces remotas y mandos por voz*. PhD thesis, UNIVERSIDAD DE CUENCA, 2016.

- [14] Millán R. Huidobro J.M. *Domótica. Edificios Inteligentes*. Craciones Copyright S.L., 2004.
- [15] Ismael Michala. Curso de domótica lcn.
- [16] Jorge Mora García. *Montaje de los cuadros de control y dispositivos eléctricos y electrónicos de los sistemas domóticos e inmóticos*. ELEM0111. IC Editorial, 2018.
- [17] Alfredo Rosado. *Sistemas industriales ditribuidos: Unafilosofía de automatización*. Technical report, Universidad de Valencia, Oct 2009.
- [18] Mario. *Utilizando la red eléctrica para transmitir datos*, 2010. Accedido el 16 de Agosto de 2022.
- [19] Aarón Blázquez. *Transmisión de datos por la red eléctrica*, 2017. Accedido el 16 de Agosto de 2022.
- [20] Claudio Silvano Jara Ferrada. *Arquitectura domótica utilizando dispositivos X10 y comunicación mediante Web Services*. PhD thesis, PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO, 2009.
- [21] *Sistemas domóticos existentes*. Accedido el 16 de Agosto de 2022.
- [22] Alfredo Francés Galiana. *Diseño de una vivienda inteligente. Desarrollo de los proyectos de ICT, domótica y WIFI*. PhD thesis, Universitat Politècnica de València, 2014.
- [23] Fredy Mauricio Hernández Zárate et al. *Implementación del protocolo knx en el diseño de infraestructura eléctrica y domótica para el proyecto casa la roca en el municipio san francisco de sales*.
- [24] Laura Rico Álvarez et al. *Desarrollo de servicio sip para videoportero*. 2019.
- [25] ESPE Armadas. *Diseño e implementación de sistemas de entrenamiento para el laboratorio de domótica del Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad de las Fuerzas*. PhD thesis, Universidad de las Fuerzas Armadas, 2020.
- [26] Ingenium. *Manual técnico de instalación*, 2019. Accedido el 16 de Agosto de 2022.
- [27] Camilo Moreno Serrano, Jhonny Ortiz Mata, Víctor Rea Sánchez, et al. *Diseño y desarrollo de un laboratorio de pruebas basados en smart home aplicando protocolo de comunicación z-wave y estándar 802.11*. *Ecuadorian Science Journal*, 5(4):74–88, 2021.
- [28] Eloy Fabricio Crespo Nath. *Estudio y análisis del protocolo ieee 802.11 ah para el desarrollo del internet de las cosas (iot) en el sector industrial*. 2020.
- [29] JAVIER Moreno and D Ruíz. *Informe técnico: Protocolo zigbee (ieee 802.15. 4). No publicado*, 2007.

- [30] Tibor Moes. ¿qué es el bluetooth y para qué sirve?, 2014. Accedido el 16 de Agosto de 2022.
- [31] Issendorff KG. *LCN Domótica en perfección*. Mikroelektronika GmbH, 2005.
- [32] Rubén Barcelo Armada. Disección y análisis del tráfico de red de amazon alexa. B.S. thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2021.
- [33] UNA GUÍA PARA LA INTEGRACIÓN DE and ASISTENTES COMO ALEXA. Guía de despliegue y uso de asistentes de voz en el hogar del mayor. 2020.
- [34] Manuel Asdrual Montaña Blacio, Johana Elizabeth Briceño Sarmiento, Oscar Geovany Jiménez Sarango, and Edgar Emanuel González Malla. Sistema integral de hogar inteligente basado en home assistant y raspberry pi. *Paúl Baldeón Egas, Grisel Pérez, Julio C. Riascos, Brigitte González, Eduardo José Campechano, Bertha Ulloa Rubio, Ruth Elena Cuasialpud, Cristian Samir Ulloa y Jonnathan Opazo Hernández-Ecuador: Editorial UISRAEL, agosto 2021. 284 páginas; 21, 0 x 29, 7 cm. Libro digital-PDF, page 101, 2021.*
- [35] Carlos Gustavo Tanides. Estimación del consumo y potencial de ahorro en standby residencial para la argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 14, 2010.
- [36] Home Assistant. Lcn, s.f. Accedido el 7 de Agosto de 2022.

A. Anexos

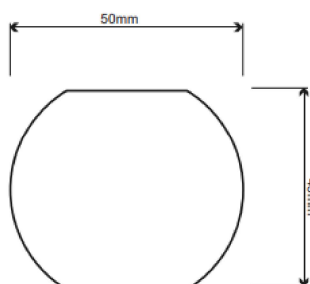
A.1. Datos técnicos de los módulos LCN

A.1.1. Módulo Universal Dimmer y Conmutador para Caja de Empotrar (LCN-UPP)

- Combinación de sensores y actuadores
- 2 Salidas dimerables 230V, 300VA
- Conexión puerto T y puerto I
- Para montaje descentralizado

Dimensiones:

Medidas: Ø 50 mm x 20 mm



Montaje: Descentralizado, en cajas de conexión profundas

Datos Técnicos:

Conexiones:

Alimentación: 230V~ ±15%, 50/60Hz (110AC versión disponible)
 Consumo: < 0,5W
 Bornes: 5 conectores con puntera, 0,75mm²
 Puertos de conexión: Puerto-T y Puerto-I

Salidas electrónicas

Tipo: 2 salidas regulación/conmutación, corte de fase, paso por cero

Resolución: 200 niveles de regulación
 Carga máxima: 300VA por salida a 230V (300W, cosφ=1) en paredes masivas. 150VA si se instala con LCN-FI1 y LCN-NU16.

Monitorización de temperatura: Si
 Capacidad de sobrecarga: 1kW, máx. 10S
 Potencia disipada: 1% potencia aparente

Carga mínima: - ninguna -

Datos generales

Temperatura de trabajo: -10°C hasta +40°C

Humedad: máx. 80% relativa, sin condensación

Condiciones del entorno: Instalación en base fija de acuerdo a VDE 632, VDE637

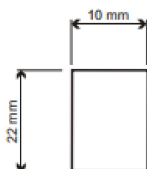
Grado de protección: IP 20 instalado en caja de empotrar

A.1.2. Módulo Universal Dimmer y Conmutador para Carril DIN (LCN-SH)

<p>Dimensiones:</p> <p>Medidas:</p>		<p>Datos Técnicos:</p> <p>Conexiones:</p> <p>Alimentación: 230V~ ±15%, 50/60Hz (110AC versión disponible) Consumo: < 0,5W Terminales: Sin tornillos, máx. 16A, sección 2,5mm² (1,5mm² con puntera) Fusible por salida 3,15AF (monitorización interna) Puertos de conexión: Puerto-T, Puerto-I y Puerto-P</p> <p>Salidas electrónicas</p> <p>Tipo: 2 salidas regulación/conmutación, corte de fase, paso por cero</p> <p>Resolución: 200 niveles de regulación Carga máxima: 300VA por salida a 230V (300W, cosφ=1)</p> <p>Capacidad de sobrecarga: 1kW, máx. 10s Potencia de pérdida: 1% potencia aparente</p> <p>Datos generales</p> <p>Temperatura de trabajo: -10°C hasta +40°C (monitorización interna)</p> <p>Humedad: máx. 80% relativa, sin condensación</p> <p>Condiciones del entorno: Instalación en base fija de acuerdo a VDE 632, VDE637</p> <p>Grado de protección: IP 20 instalado en caja de empotrar</p>
<p>Altura:</p>	<p>66 mm 61 mm sobre el carril DIN</p>	
<p>Espacio necesario:</p>	<p>4 unidades</p>	
<p>Montaje:</p>	<p>REG en carril 35 mm (DIN 50022)</p>	

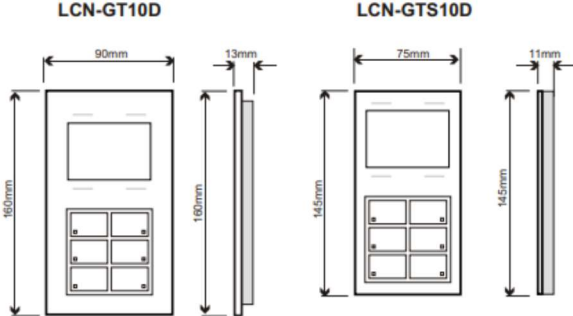
A.1.3. Adaptador para pulsadores convencionales con señal acústica (LCN-T8)

Medidas (W x L x H):	LCN-T8: Conductor:	10 mm x 22 mm x 11 mm 160 mm	Datos Técnicos	
			Conexión Tipo de cable	hilos trenzados 0,75 mm ² , con virola
			Entradas Longitud de conexión:	máx. 0,5 m por entrada
			Instalación Temperatura ambiente: Humedad:	-10 °C hasta +40 °C máx. 80 % rel., sin condensación
			Condiciones del entorno:	Instalación en base fija de acuerdo a VDE 632, VDE 637
			Grado de protección:	IP 20, si se instala en caja profunda

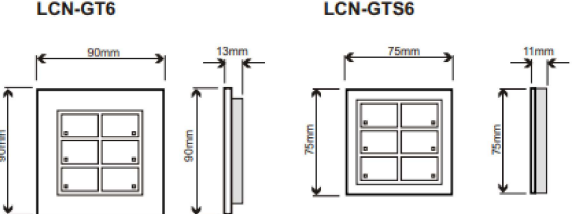
**Montaje:**

Descentralizado, en cajas de empotrar o distribución

A.1.4. Interfaz táctil de cristal con 10 teclas, 6 LED y display de 2,8”(LCN-GT10D)

	<p>Datos Técnicos</p> <p>Conexión Alimentación: Sobre módulo LCN + LCN-NUI Retroiluminación de teclas mediante la fuente de alimentación LCN-NUI</p> <p>Puertos de conexión: Conexión I (a partir de 140719)</p> <p>Teclas Tipo: 4 + 6 teclas capacitivas con LEDs de estado tras de cristal Leyenda: 4 áreas capacitivas digitales a través de LCN-PRO, 6 teclas capacitivas, configurable mediante folio imprimible</p> <p>LEDs Tipo: 6 LEDs de monitorización de variables LCN LEDs Corona®: Luz Corona® (LEDs blanco) controlada a través del comando "brillo del LED"</p> <p>Display Tipo: Display color TFT / Tamaño: 2,8" (71 mm), 320 x 240 pixels Formato: 1 línea para máx. 6 símbolos + 3 líneas de texto, 63 caracteres alternativamente 4 líneas de texto con máx. 63 caracteres, disponible sin barra de herramientas 65.356 colores</p> <p>Colores: 65.356 colores</p> <p>Sensor de temperatura Rango de medición: -10 °C hasta +40 °C Sensibilidad: 0,1°C Precisión: 0,3 °C de entre +15 °C hasta +30 °C</p> <p>Instalación Temperatura ambiente: -10 °C bis +40 °C Humedad: Máx. 80 % relativa, sin condensación Condiciones del entorno: instalación en base fija de acuerdo a VDE 632, VDE 637 Grado de protección: IP 20</p>
<p>Medidas (W x L x H):</p> <p>LCN-GT10D: 90mm x 160mm x 13mm LCN-GTS10D: 75mm x 145mm x 11mm</p>  <p>Montaje: La placa de montaje incluye el adaptador para la instalación</p>	

A.1.5. Interfaz táctil de cristal 6 teclas, 6 LED, sensor de temp., luz corona (LCN-GT6)

	<p>Datos Técnicos</p> <p>Conexión Alimentación: sobre el módulo LCN-NUI opcional para retroiluminación</p> <p>Teclas Tipo: 6 teclas capacitivas con LEDs de estado tras el cristal Leyenda: etiquetas intercambiables</p> <p>LED Tipo: 6 LEDs de monitorización de estado LEDs teclas individuales: 6 LEDs color azul LEDs Corona®: Luz Corona® (LEDs blanco) controlada a través del comando "brillo del LED"</p> <p>Sensor de temperatura Rango de medición: -10 °C hasta +40 °C Sensibilidad: 0,1°C Precisión: 0,3 °C de entre +15 °C hasta +30 °C</p> <p>Instalación Temperatura ambiente: -10°C hasta +40°C Humedad: máx. 80 % relativa, sin condensación Condiciones del entorno: instalación en base fija de acuerdo a VDE 632, VDE 637 Grado de protección: IP 20, instalado en caja de empotrar</p>
<p>Medidas (W x D x H):</p> <p>LCN-GT6: 90 mm x 90 mm x 13 mm LCN-GTS6: 75 mm x 75 mm x 11 mm</p> 	<p>Montaje: Sobre caja de mecanismos mediante la placa de montaje</p>

A.1.6. Módulo acoplador para redes IP (LCN-PKE)

Datos técnicos	
Conexión	
Alimentación:	230 VAC \pm 15 %, 50/60 Hz (110 VAC versión disponible)
Potencia consumida:	< 4 W
Bornes/Tipo de cable:	sin tornillos / max. 2,5 mm ² masivo
Conexión a la red	
LAN:	Rj45
WLAN:	802.11b/g/n, WPA2 encriptado
Instalación	
Temperatura ambiente.:	-10 °C hasta +40 °C
Humedad:	max. 80 % rel., sin condensación
Condiciones del entorno:	Instalación en lugar seco, Instalación de acuerdo al VDE 632, VDE 637
Grado de protección:	LP 20
El módulo LCN-PKE esta aislado galvánicamente con respecto al conector RJ45.	
Medidas (W x L x H): 38 mm x 92 mm x 66 mm	
Altura:	66 mm 61 mm sobre carril DIN
Espacio necesario:	2 TE
Montaje:	Empotrado en Carril DINN 35mm (DIN50022)

A
G