



**Diseño e implementación de un sistema de hogar inteligente heterogéneo de bajo costo que integre
nodos IoT basados en FPGA, microcontrolador y nodos comerciales**

Montenegro Almeida, Alex Fernando

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

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

Ing. Ramos Vargas, Pablo Francisco, PhD

30 de enero del 2023

Informe de originalidad

NOMBRE DEL CURSO

Tesis Alex Montenegro



NOMBRE DEL ALUMNO

ALEX FERNANDO MONTENEGRO ALMEIDA

NOMBRE DEL ARCHIVO

ALEX FERNANDO MONTENEGRO ALMEIDA - Trabajo de titulación del estudiante Alex Montenegro

SE HA CREADO EL INFORME

30 ene 2023

Resumen

| | | |
|--------------------------------------|---|-------|
| Fragmentos marcados | 9 | 0,8 % |
| Fragmentos citados o entrecorillados | 3 | 0,3 % |

Coincidencias de la Web

| | | |
|-------------------------|---|-------|
| naylampmechatronics.com | 4 | 0,4 % |
| cdtecnologia.net | 2 | 0,3 % |
| educarex.es | 1 | 0,1 % |
| mcielectronics.cl | 1 | 0,1 % |
| mifactura.digital | 1 | 0,1 % |
| qrodatecuenta.com | 1 | 0,1 % |
| aliexpress.com | 1 | 0,1 % |
| espe.edu.ec | 1 | 0,1 % |

1 de 12 fragmentos

Fragmento del alumno MARCADO

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones Ing. Ramos Vargas, Pablo Francisco, PhD

Mejor coincidencia en la Web

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica Y Telecomunicaciones Ing. Lara Cueva, Román Alcides PhD 21 de enero del 2022 Dedicatoria

1 Implementación de una red de sensores inalámbricos para la
 ... <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/28385/1/T-ESPE-019153.pdf>

2 de 12 fragmentos



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación: **"Diseño e implementación de un sistema de hogar inteligente heterogéneo de bajo costo que integre nodos IoT basados en FPGA, microcontrolador y nodos comerciales"** fue realizado por el señor **Montenegro Almeida, Alex Fernando**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 30 de Enero del 2022



Ing. Ramos Vargas, Pablo Francisco, PhD

C. C 1712447976



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

Responsabilidad de Autoría

Yo, **Montenegro Almeida, Alex Fernando**, con cédula de ciudadanía n°1724872245, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Diseño e implementación de un sistema de hogar inteligente heterogéneo de bajo costo que integre nodos IoT basados en FPGA, microcontrolador y nodos comerciales** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 30 de Enero del 2022

Montenegro Almeida, Alex Fernando

C.C.: 1724872245



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones

Autorización de Publicación

Yo **Montenegro Almeida, Alex Fernando**, con cédula de ciudadanía n°1724872245, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Diseño e implementación de un sistema de hogar inteligente heterogéneo de bajo costo que integre nodos IoT basados en FPGA, microcontrolador y nodos comerciales** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 30 de Enero del 2022

Montenegro Almeida, Alex Fernando

C.C.: 1724872245

Dedicatoria

Dedico este trabajo de titulación a mis padres por todo el esfuerzo que han hecho para que nunca me falte nada, por ayudarme día tras día a ser una mejor persona y apoyarme incondicionalmente ante cualquier circunstancia. Siempre he apreciado todos los valores y enseñanzas que me han brindado, los quiero mucho.

Alex F. Montenegro Almeida

Agradecimiento

Quiero agradecer a mi familia ya que son la principal fuente de motivación para superarme y alcanzar mis metas. Gracias por estar siempre presentes cuando los necesito, aconsejarme y brindarme todo su apoyo. Especialmente agradezco a mis padres por todo su cariño y sus cuidados, por confiar en mí y siempre demostrarme su amor.

Alex F. Montenegro Almeida

Índice de Contenido

| | |
|---|----|
| Dedicatoria | 6 |
| Agradecimiento | 7 |
| Resumen | 21 |
| Abstract..... | 22 |
| Capítulo I: Introducción..... | 23 |
| Antecedentes..... | 23 |
| Justificación | 24 |
| Objetivos | 31 |
| <i>Objetivo General</i> | 31 |
| <i>Objetivos Específicos</i> | 31 |
| Alcance | 31 |
| Metodología | 32 |
| Capítulo II: Marco Teórico y Trabajos Relacionados..... | 33 |
| Internet of Things..... | 33 |
| <i>Concepto de las 3C en IoT</i> | 34 |
| Comunicación | 34 |
| Costo..... | 34 |
| Control | 35 |
| <i>Ventajas IoT</i> | 35 |
| Recopilación de datos | 35 |
| Interacción con el cliente | 35 |

| | |
|--|-----------|
| Reducción del desperdicio de datos..... | 35 |
| Optimización | 35 |
| <i>Desventajas IoT</i> | <i>35</i> |
| Flexibilidad | 35 |
| Seguridad | 36 |
| Privacidad..... | 36 |
| Complejidad | 36 |
| Objeto inteligente | 36 |
| <i>Elementos de un nodo inteligente</i> | <i>37</i> |
| Sensores..... | 37 |
| Actuadores | 37 |
| Memoria..... | 38 |
| Unidad de procesamiento | 39 |
| Unidad de comunicación | 39 |
| Fuente de alimentación..... | 39 |
| <i>Nodos basados en microcontrolador y FPGA.....</i> | <i>40</i> |
| <i>Tendencias de los dispositivos inteligentes</i> | <i>42</i> |
| Red IoT | 43 |
| <i>Tipos de redes IoT.....</i> | <i>44</i> |
| <i>Dispositivos en una red IoT</i> | <i>46</i> |
| <i>Red de sensores inalámbricos.....</i> | <i>47</i> |
| <i>Red centralizada vs descentralizada</i> | <i>49</i> |

| | |
|--|----|
| Arquitectura IoT | 49 |
| <i>Paradigmas de computación</i> | 50 |
| Edge Computing..... | 50 |
| Cloud Computing | 50 |
| Fog Computing..... | 51 |
| Mist Computing | 51 |
| <i>Arquitecturas comunes en IoT</i> | 51 |
| Arquitectura básica de IoT de tres capas | 51 |
| Arquitectura oneM2M | 51 |
| Arquitectura del Foro Mundial de Internet de las Cosas | 52 |
| Estándares en IoT | 52 |
| Tecnologías para la conectividad | 54 |
| Tecnologías para la comunicación | 56 |
| <i>Protocolos de infraestructura</i> | 57 |
| <i>Protocolos de descubrimiento</i> | 58 |
| <i>Protocolos de datos</i> | 58 |
| <i>Protocolos de identificación</i> | 59 |
| <i>Protocolos para la gestión de dispositivos</i> | 60 |
| <i>Protocolos semánticos</i> | 61 |
| Interoperabilidad en IoT | 61 |
| <i>Frameworks</i> | 62 |
| Aplicaciones de IoT..... | 63 |

| | |
|---|-----------|
| Smart Home..... | 64 |
| <i>Dispositivos en hogares inteligentes.....</i> | <i>65</i> |
| <i>Asistente de voz digital.....</i> | <i>66</i> |
| <i>Apps para un hogar inteligente.....</i> | <i>67</i> |
| <i>Smart home hubs.....</i> | <i>67</i> |
| Trabajos relacionados | 67 |
| Capítulo III: Diseño e Implementación del Sistema | 74 |
| Diagrama general | 74 |
| Implementación del servidor | 75 |
| <i>Descripción de los elementos del servidor.....</i> | <i>75</i> |
| Home Assistant..... | 75 |
| Raspberry Pi 3 Modelo B | 76 |
| Dispositivos inteligentes desarrollados | 77 |
| <i>Nodo cámara inteligente</i> | <i>77</i> |
| Passive Infrared sensor (PIR) | 78 |
| ESP32-CAM | 79 |
| <i>Nodo control remoto IR genérico.....</i> | <i>81</i> |
| ESP-01 | 82 |
| Receptor IR..... | 83 |
| Transmisor IR..... | 83 |
| <i>Nodo de notificaciones.....</i> | <i>85</i> |
| DFPlayer Mini | 86 |

| | |
|--|------------|
| Amplificador PAM8610 | 87 |
| Parlantes (Sutinna Portable TV Speaker)..... | 87 |
| <i>Nodo de control por movimiento.....</i> | <i>88</i> |
| MPU6050..... | 89 |
| <i>Nodo de control de acceso</i> | <i>91</i> |
| RFID RC522 | 92 |
| LCD 16x2..... | 93 |
| PIC16F877A | 94 |
| <i>Nodo control de riego</i> | <i>95</i> |
| NodeMCU..... | 96 |
| AHT10 | 97 |
| GY-302..... | 98 |
| Sensor de humedad de suelo capacitivo v1.2 | 99 |
| <i>Pantalla WT32.....</i> | <i>100</i> |
| WT32-SC01 | 101 |
| <i>Nodo de sensores I2C.....</i> | <i>102</i> |
| TCS34725..... | 103 |
| GY-63 MS5611 | 104 |
| <i>Nodo detector de gases</i> | <i>106</i> |
| MQ-2..... | 107 |
| <i>Nodo control de iluminación</i> | <i>109</i> |
| Spartan Edge Accelerator Board | 110 |

| | |
|---|-----|
| Implementación nodos comerciales..... | 114 |
| <i>Interruptor inteligente</i> | 114 |
| <i>Foco inteligente</i> | 115 |
| <i>Enchufe inteligente</i> | 116 |
| Conexión a la nube..... | 118 |
| <i>Asistente de voz</i> | 118 |
| Google Home Mini..... | 118 |
| <i>Nombre de dominio</i> | 119 |
| <i>Cloudflare Tunnel</i> | 119 |
| <i>Seguridad</i> | 120 |
| <i>Enlace con Google Home</i> | 121 |
| Capítulo IV: Pruebas y Resultados..... | 122 |
| Consumo de energía..... | 122 |
| <i>Autonomía nodo de control por movimiento</i> | 123 |
| Prueba de carga..... | 124 |
| <i>Prueba de carga en la red interna</i> | 124 |
| <i>Prueba de carga en la red externa</i> | 128 |
| Prueba de rendimiento del protocolo MQTT..... | 130 |
| Rendimiento del servidor..... | 131 |
| Prueba de sonido del nodo de notificaciones..... | 132 |
| Análisis de costos..... | 134 |
| <i>Nodo cámara inteligente</i> | 134 |

| | |
|---|------------|
| <i>Nodo control remoto IR genérico.....</i> | <i>135</i> |
| <i>Nodo de notificaciones.....</i> | <i>136</i> |
| <i>Nodo de control por movimiento.....</i> | <i>136</i> |
| <i>Nodo de control de acceso</i> | <i>137</i> |
| <i>Nodo control de riego</i> | <i>138</i> |
| <i>Nodo de sensores I2C.....</i> | <i>139</i> |
| <i>Nodo detector de gases</i> | <i>140</i> |
| <i>Nodo control de iluminación</i> | <i>141</i> |
| <i>Sistema de hogar inteligente</i> | <i>142</i> |
| | |
| Conclusiones..... | 144 |
| Recomendaciones..... | 146 |
| Trabajos futuros..... | 146 |
| Bibliografía | 147 |
| Apéndices..... | 155 |

Índice de Tablas

| | |
|--|-----|
| Tabla 1 <i>Comparación entre FPGA y microcontrolador</i> | 41 |
| Tabla 2 <i>Desafíos en aplicaciones</i> | 64 |
| Tabla 3 <i>Configuración MQTT de las cámaras</i> | 79 |
| Tabla 4 <i>Configuración MQTT nodo control IR</i> | 84 |
| Tabla 5 <i>Configuración MQTT nodo de notificaciones</i> | 87 |
| Tabla 6 <i>Configuración MQTT nodo de control por movimiento</i> | 90 |
| Tabla 7 <i>Configuración MQTT nodo control de acceso</i> | 94 |
| Tabla 8 <i>Configuración MQTT nodo control de riego</i> | 99 |
| Tabla 9 <i>Configuración MQTT nodo de sensores I2C</i> | 105 |
| Tabla 10 <i>Configuración MQTT nodo detector de gases</i> | 108 |
| Tabla 11 <i>Configuración MQTT nodo control de iluminación</i> | 113 |
| Tabla 12 <i>Consumo de energía nodos desarrollados</i> | 123 |
| Tabla 13 <i>Informe prueba de carga red interna utilizando JMeter</i> | 125 |
| Tabla 14 <i>Informe prueba de carga red externa utilizando JMeter</i> | 128 |
| Tabla 15 <i>Throughput de los topics</i> | 131 |
| Tabla 16 <i>Costo nodo cámara</i> | 135 |
| Tabla 17 <i>Costo nodo control remoto IR genérico</i> | 135 |
| Tabla 18 <i>Costo nodo de notificaciones</i> | 136 |
| Tabla 19 <i>Costo del nodo de control por movimiento</i> | 137 |
| Tabla 20 <i>Costo nodo control de acceso</i> | 138 |
| Tabla 21 <i>Costo nodo control de riego</i> | 139 |
| Tabla 22 <i>Costo nodo de sensores I2C</i> | 140 |
| Tabla 23 <i>Costo nodo detector de gases</i> | 140 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 24 <i>Costo PCB pulsadores</i> | 141 |
| Tabla 25 <i>Costo PCB focos</i> | 141 |
| Tabla 26 <i>Costo nodo control de iluminación</i> | 142 |
| Tabla 27 <i>Costo total sistema</i> | 143 |

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 <i>Arquitectura de integración nodos IoT</i> | 30 |
| Figura 2 <i>Diagrama de Venn IoT</i> | 34 |
| Figura 3 <i>Relación entre sensor y actuador</i> | 38 |
| Figura 4 <i>Tipos de redes</i> | 45 |
| Figura 5 <i>Protocolos usados en sistemas IoT</i> | 54 |
| Figura 6 <i>Dominios de aplicación IoT</i> | 63 |
| Figura 7 <i>Diagrama sistema de Smart Home</i> | 74 |
| Figura 8 <i>Logo de Home Assistant</i> | 76 |
| Figura 9 <i>Raspberry Pi 3 Modelo B</i> | 76 |
| Figura 10 <i>Diagrama de bloques nodo cámara</i> | 77 |
| Figura 11 <i>Conexiones nodo cámara</i> | 78 |
| Figura 12 <i>Sensor PIR</i> | 78 |
| Figura 13 <i>ESP32-CAM</i> | 79 |
| Figura 14 <i>Prototipos nodo cámara</i> | 80 |
| Figura 15 <i>Interfaz gráfica de las cámaras</i> | 80 |
| Figura 16 <i>Notificaciones nodo cámara</i> | 81 |
| Figura 17 <i>Diagrama de bloques nodo control IR</i> | 81 |
| Figura 18 <i>Esquemático nodo control IR</i> | 82 |
| Figura 19 <i>ESP-01</i> | 83 |
| Figura 20 <i>Receptor IR</i> | 83 |
| Figura 21 <i>Transmisor IR</i> | 84 |
| Figura 22 <i>Prototipo nodo control IR</i> | 84 |
| Figura 23 <i>Interfaz gráfica nodo control IR</i> | 85 |

| | |
|---|-----|
| Figura 24 Diagrama de bloques nodo de notificaciones..... | 86 |
| Figura 25 Esquemático nodo de notificaciones | 86 |
| Figura 26 DFPlayer Mini..... | 87 |
| Figura 27 Prototipo nodo de notificaciones..... | 88 |
| Figura 28 Interfaz gráfica nodo de notificaciones | 88 |
| Figura 29 Diagrama de bloques nodo de control por movimiento | 89 |
| Figura 30 Esquemático nodo de control por movimiento..... | 89 |
| Figura 31 MPU6050 | 90 |
| Figura 32 Prototipo nodo de control por movimiento | 90 |
| Figura 33 Interfaz gráfica nodo de control por movimiento..... | 91 |
| Figura 34 Diagrama de bloques nodo control de acceso..... | 91 |
| Figura 35 Esquemático nodo control de acceso | 92 |
| Figura 36 RFID RC522..... | 93 |
| Figura 37 LCD 16x2 | 93 |
| Figura 38 PIC16F877A | 94 |
| Figura 39 Prototipo nodo control de acceso..... | 95 |
| Figura 40 Notificaciones nodo control de acceso | 95 |
| Figura 41 Diagrama de bloques nodo control de riego | 96 |
| Figura 42 Esquemático nodo control de riego | 96 |
| Figura 43 NodeMCU V2 ESP8266 | 97 |
| Figura 44 AHT10..... | 98 |
| Figura 45 BH1750..... | 98 |
| Figura 46 Capacitive Soil Moisture Sensor v1.2 | 99 |
| Figura 47 Prototipo nodo control de riego | 100 |

| | |
|---|-----|
| Figura 48 <i>Interfaz gráfica nodo control de riego</i> | 100 |
| Figura 49 <i>WT32-SC01</i> | 101 |
| Figura 50 <i>Interfaz nodo pantalla táctil WT32</i> | 101 |
| Figura 51 <i>Interfaz gráfica nodo pantalla WT32 en Home Assistant</i> | 102 |
| Figura 52 <i>Diagrama de bloques nodo de sensores I2C</i> | 102 |
| Figura 53 <i>Esquemático nodo de sensores I2C</i> | 103 |
| Figura 54 <i>TCS34725</i> | 104 |
| Figura 55 <i>GY-63 MS5611</i> | 104 |
| Figura 56 <i>Prototipo nodo de sensores I2C</i> | 105 |
| Figura 57 <i>Interfaz gráfica nodo de sensores I2C</i> | 106 |
| Figura 58 <i>Diagrama de bloques nodo detector de gases</i> | 106 |
| Figura 59 <i>Esquemático nodo detector de gases</i> | 107 |
| Figura 60 <i>Relación concentración de gas y voltaje de salida sensor MQ-2</i> | 108 |
| Figura 61 <i>Prototipo nodo detector de gases</i> | 108 |
| Figura 62 <i>Interfaz gráfica nodo detector de gases</i> | 109 |
| Figura 63 <i>Diagrama de bloques nodo control de iluminación</i> | 109 |
| Figura 64 <i>SEA board</i> | 110 |
| Figura 65 <i>Esquemático PCB Pulsadores</i> | 111 |
| Figura 66 <i>Esquemático PCB Focos</i> | 112 |
| Figura 67 <i>Prototipo nodo control de iluminación</i> | 113 |
| Figura 68 <i>Interfaz gráfica nodo control de iluminación</i> | 114 |
| Figura 69 <i>Interruptor Inteligente</i> | 115 |
| Figura 70 <i>Foco Inteligente</i> | 115 |
| Figura 71 <i>Smart Plug</i> | 116 |

| | |
|---|-----|
| Figura 72 <i>Implementación dispositivos inteligentes comerciales</i> | 117 |
| Figura 73 <i>Interfaz gráfica dispositivos inteligentes comerciales</i> | 117 |
| Figura 74 <i>Google Home Mini</i> | 118 |
| Figura 75 <i>Dominio</i> | 119 |
| Figura 76 <i>Cloudflare Tunnel</i> | 120 |
| Figura 77 <i>Medición con USB tester</i> | 122 |
| Figura 78 <i>Usuarios activos a lo largo del tiempo</i> | 126 |
| Figura 79 <i>Tiempo de respuesta a lo largo del tiempo en la red interna</i> | 127 |
| Figura 80 <i>Tiempo de respuesta a lo largo del tiempo en la red externa</i> | 129 |
| Figura 81 <i>Número de mensajes por topic en MQTT Explorer</i> | 130 |
| Figura 82 <i>Métricas del servidor</i> | 132 |
| Figura 83 <i>Niveles de intensidad del sonido</i> | 133 |
| Figura 84 <i>Medición con la aplicación Sonómetro</i> | 134 |

Resumen

El Internet de las cosas (IoT) permite la comunicación entre seres humanos y cosas a través de una red global, siendo una de sus principales aplicaciones el hogar inteligente (Smart home), que brinda comodidad, seguridad y eficiencia energética a los usuarios. En Ecuador, pocas empresas ofrecen soluciones orientadas al hogar inteligente, siendo uno de los principales factores a considerar el alto costo. Por esta razón, solo un grupo reducido de la población dispone de este servicio. En el presente trabajo de titulación se plantea el diseño, implementación e integración de diferentes nodos IoT siguiendo la tendencia de Smart Home mediante el uso de sensores, actuadores, placas de desarrollo y nodos comerciales propietarios. Todos se conectan mediante el protocolo MQTT y un dashboard implementado en la plataforma de automatización Home Assistant. De esta manera, se pretende contribuir a la masificación del uso de IoT a nivel doméstico, encontrando soluciones de bajo costo, fácil implementación y bajo consumo energético. Los dispositivos inteligentes implementados se basan en una tarjeta electrónica que tiene como elemento principal un microcontrolador o una FPGA, siendo el uso de ésta última, una nueva tendencia en el mercado. Sin embargo, existen muy pocos fabricantes que desarrollan tarjetas basadas en FPGA, y por ende existe una cantidad limitada de librerías y ejemplos para poder explotar las tarjetas de desarrollo. De allí que, la principal contribución del presente trabajo de titulación es la integración de este tipo de nodos a una red de hogar inteligente. El trabajo tuvo un gran componente de investigación y programación en lenguaje VHDL y C, para poder desarrollar la aplicación sobre la FPGA y su interacción con el módulo WIFI/Bluetooth de la tarjeta. Una vez integrados todos los nodos, se realizaron pruebas de rendimiento que demuestran que el tiempo de respuesta promedio en la red interna y externa es aceptable, brindando una buena experiencia al usuario. Por otro lado, el consumo energético del sistema es muy bajo por lo que es aconsejable su implementación a nivel doméstico, ya que los beneficios de ahorro de energía son considerables.

Palabras clave: hogar inteligente, nodo IoT, sistema embebido, integración.

Abstract

The Internet of Things (IoT) allows communication between humans and things through a global network, being one of its main applications the smart home, which provides comfort, security and energy efficiency to users. In Ecuador, very few companies offer IoT services, being one of the main factors to consider the high cost. For this reason, only a small group of the population benefit from this service. In the present work, it is proposed the design, implementation and integration of different IoT nodes following the Smart Home trend, by means of sensors, actuators, development boards and commercial nodes. All of them are interconnected through the MQTT protocol and a dashboard made in Home Assistant automation platform. In this way, it is intended to contribute to the widespread use of IoT at the domestic level, finding low-cost solutions, easy implementation and low energy consumption. The implemented smart devices are based on a development board whose main component is a microcontroller or an FPGA, being the use of the FPGA a new trend in the market. However, there are very few manufacturers that develop boards based on FPGA, a therefore there is a limited number of libraries and examples to exploit the development boards. Hence, the main contribution of this work is the integration of this type of nodes to a smart home network. The work had a large research component as well as programming in VHDL and C language, in order to development the FPGA's application and its interaction with the WIFI/Bluetooth module of the board. Once the nodes were integrated, performance tests were carried showing that the average response time in the internal and external network is acceptable, providing a good user experience. On the other hand, the energy consumption of the system is very low, so its implementation at domestic level is advisable, since the energy saving benefits are significant.

Key words: smart home, IoT node, embedded system, integration.

Capítulo I: Introducción

Este capítulo ofrece una visión general y presenta los principales elementos a considerar del trabajo de titulación: “Diseño e implementación de un sistema de hogar inteligente heterogéneo de bajo costo que integre nodos IoT basados en FPGA, microcontrolador y nodos comerciales”.

Antecedentes

Internet nació en Estados Unidos alrededor de los años 60 en un ambiente militar, con la finalidad de progresar en las comunicaciones y conectividad entre los diferentes organismos estatales, para luego extenderse al ámbito académico; esta red de computadoras se denominaba ARPANET (Advanced Research Projects Agency Network). En 1982 estudiantes de informática de la Universidad Carnegie Mellon, utilizando ARPANET, desarrollaron un programa para monitorear el estado de una máquina expendedora de bebidas, el cual podía ser utilizado por cualquier persona que esté conectada a la red de la universidad, logrando una mayor comodidad en los usuarios.

Tim Berners Lee escribió tres tecnologías esenciales de la web actual: el lenguaje de marcado de hipertexto (HTML), el identificador uniforme de recursos (URI) y el protocolo de transferencia de hipertexto (HTTP). Además, fue pionero en la creación de navegadores, servidores y páginas web. De esta manera en 1994 logró fundar la comunidad internacional destinada al desarrollo de estándares web abiertos denominada World Wide Web Consortium (W3C), sentando las bases de Internet (Sharma, Shamkuwar y Singh, 2019).

En la década de los 90 se creó el primer dispositivo IoT (Internet of Things), era una tostadora conectada al computador mediante cables, la cual podía ser controlada a través de Internet. Años siguientes en la Universidad de Cambridge se realizó el monitoreo del funcionamiento de una cafetera a través del envío de imágenes. La finalidad del control de los electrodomésticos era mejorar la eficiencia energética y brindar una mayor comodidad. A finales de esta década, Kevin Ashton en su presentación sobre la vinculación de RFID en la cadena de suministro con Internet acuñó el término de IoT.

A partir de los años 2000 se usaba de manera más frecuente la expresión de Internet de las Cosas en revistas científicas importantes y se realizaban varias reuniones para el intercambio de conocimiento, aumentando cada vez más las expectativas. Se consideraba que esta tendencia contribuiría al desarrollo de una red dinámica completamente innovadora, es así que alrededor de 2009, la cantidad de cosas en Internet superó al número de personas conectadas, demostrando que era una tecnología disruptiva y emergente que se encontraba en aumento.

Uno de los ámbitos que abarca IoT es la tecnología enfocada al hogar, denominada Smart Home, concepto revolucionario, basado en otorgar un mayor control y facilidad en las tareas domésticas de manera tecnológica e intuitiva, ofreciendo comodidad, seguridad y eficiencia energética a los usuarios.

Justificación

Internet ha evolucionado y de acuerdo con Cisco Systems, se pueden destacar cuatro fases que han tenido gran impacto en la sociedad: conectividad, transformación del proceso empresarial, digitalización colaborativa e Internet de las Cosas. El hecho de estar conectado, no aplica exclusivamente a dispositivos electrónicos como: computadoras, teléfonos y servidores, ya que los sensores y actuadores están integrados en una gran cantidad de objetos físicos. Por esta razón, IoT plantea que los objetos se encuentren conectados e identificados de manera única, permitiendo la comunicación entre humanos y cosas a través de una red global. Cuando los objetos pueden percibir el entorno y comunicarse, se convierten en herramientas capaces de comprender la complejidad y responder a ella con rapidez (Madakam, Ramaswamy y Tripathi, 2015).

Smart home o casa inteligente es una vivienda que permite el control, supervisión y acceso remoto a los principales aparatos y servicios eléctricos, mediante una red de comunicaciones, por lo tanto, un hogar inteligente debe contener tres elementos: la red interna, el control inteligente y la automatización del hogar (Jiang, Liu y Yang, 2004). Esta tecnología ofrece varios beneficios, entre los que destacan:

- Comodidad: Algunas tareas diarias se realizan solas o con comandos de voz, tales como el control de calefacción, refrigeración, ventilación, dispositivos multimedia, entre otros. Lo cual permite a una persona gozar de bienestar y poder descansar de una mejor manera.
- Seguridad: Las personas alcanzan un mayor nivel de seguridad a través de cámaras, sensores de movimiento, tarjetas de acceso, etc.; pueden estar enlazadas a compañías de seguridad.
- Eficiencia energética: El control de los electrodomésticos, sistemas de iluminación y climatización, ayudan en gran medida a mejorar la gestión del consumo diario de energía en el hogar.

Gracias a los avances en el sector de las telecomunicaciones en la última década, el desarrollo y la investigación en el ámbito de Smart Home se ha encaminado hacia la computación ubicua, refiriéndose a la integración de dispositivos inteligentes en la vida diaria de las personas, centrándose en la gestión de sistemas heterogéneos y la interoperabilidad de los mismos. Existen estándares y diferentes tipos de software (middlewares) que permiten la comunicación y gestión de datos en aplicaciones distribuidas, con diferentes reglas para la transmisión de información entre varias entidades que conforman los sistemas heterogéneos en un entorno doméstico inteligente. Por ejemplo, hay middlewares como: Jini, UPnP y HAVi para conectar los sistemas de entretenimiento en casa, mientras que la tecnología X10 y LonWorks son adecuadas para la automatización del hogar y los sistemas de vigilancia. Las diversas especificaciones y middlewares están caracterizando a Smart Home como un entorno de uso intensivo de datos, lo que da lugar a dos grandes problemas operativos:

- La existencia de un gran número de sistemas heterogéneos que cubran todas las funcionalidades del hogar inteligente. La gestión de estos sistemas resulta difícil y contribuye al incremento de gateways residenciales con respecto al número de sistemas conectados.

- La interoperabilidad: Debido a las diferencias en los sistemas operativos, el lenguaje de programación y el hardware. Esta capacidad de los sistemas se basa en brindar interconectividad e interoperación, refiriéndose a la ejecución de tareas de manera conjunta (Perumal, Abd y Chui, 2008).

Para tratar los problemas mencionados anteriormente, existen tecnologías y lenguajes que ofrecen ayuda en la gestión de sistemas heterogéneos, por ejemplo: Common Object Request Broker Architecture (CORBA), el modelo de objetos de componentes de Microsoft (COM), .NET Framework, Sun's Java Enterprise y varios servicios web basados en el lenguaje de marcado extensible (XML).

Algunos de los sistemas de hogar inteligente que se tienen en la actualidad utilizan la tecnología de interconexión inalámbrica Wi-Fi, la cual puede venir integrada en una tarjeta de desarrollo y a su vez ser empleada como servidor web para controlar y supervisar el hogar, mediante los diferentes sensores y actuadores. Un ordenador de bajo coste como la Raspberry Pi se utiliza comúnmente como servidor HTTP, para acceder a su interfaz mediante una aplicación móvil o navegador web. Existen sistemas de monitorización y control de electrodomésticos que mediante un gateway recolectan datos que serán almacenados en un servidor en la nube. Se han propuesto sistemas de hogar inteligente con ZigBee, la cual se basa en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal; los sensores y actuadores se pueden conectar mediante esta red inalámbrica gracias a un smart socket, que puede ser controlado a distancia por la red. En resumen, existen varios sistemas de Smart Home basados en microcontroladores, que mediante una interfaz web y plataformas DIY (do-it-yourself), permiten al usuario crear sus propias aplicaciones de hogar inteligente mediante el uso de varios mecanismos como SMS (Short Message Service), Bluetooth, Wi-Fi, ZigBee, sistema de marcación por tonos DTMF (Dual-Tone Multi-Frequency), todas estas tecnologías tienen un mismo objetivo en Smart home, ser un sistema rápido, fácil de instalar, con un alto rendimiento y de bajo coste.

Existen protocolos de comunicación empleados en IoT, tales como: el Protocolo de Aplicación Restringida (CoAP) basado en UDP (User Datagram Protocol), Message Queue Telemetry Transport (MQTT) basado en TCP (Transmission Control Protocol), MQTT-SN (MQTT for Sensor networks) basado en UDP, entre otros, que se despliegan en diferentes capas del modelo TCP/IP.

MQTT es uno de los protocolos estandarizados por el proyecto de asociación global oneM2M y ETSI. Está basado en mensajería ligera, posee una cabecera reducida y proporciona una alta eficiencia de comunicación para el IoT. Trabaja con un enrutamiento por nombres y evita el ruteo a través de direcciones IP para los flujos de tráfico del sistema. Es un servicio de mensajería con el modelo publicador/suscriptor, en donde los clientes intercambian datos con un bróker o servidor centralizado, las colas de envío y recepción de datos son organizadas por asuntos o topics. Los clientes pueden publicar un mensaje en un determinado asunto o recibir información de los temas a los que se encuentran suscritos. Con respecto a su funcionamiento, el cliente inicia una conexión TCP/IP con el servidor, el cual mantiene un registro de los clientes conectados, considerando que la conexión se mantiene abierta hasta que el cliente la finaliza. Este protocolo maneja un ancho de banda reducido, se puede implementar el cliente MQTT en dispositivos con poca memoria y permite cifrar los datos, brindando seguridad a sus usuarios.

En la integración de un sistema Smart Home se puede emplear un dashboard o cuadro de mando, generando una interfaz de usuario que permita supervisar e interactuar con los dispositivos conectados a través de gráficos, tablas y otros elementos, gestionando y obteniendo una perspectiva del entorno mediante la visualización de los datos obtenidos. El mercado ofrece algunas plataformas de integración para un sistema de hogar inteligente, tales como: Home Assistant, OpenHAB de Mozilla o WebThings, los cuales son de código abierto. Home Assistant es una plataforma de domótica que se ejecuta en Python 3, otorga la posibilidad de rastrear, controlar y automatizar todos los dispositivos del hogar, se suele instalar comúnmente en una Raspberry Pi, Orange Pi Zero o semejantes, centralizando el

control y gestionando de manera modular todos los nodos del sistema, ya que se integra con distintos servicios y protocolos, entre los cuales se encuentra MQTT.

Dentro del universo de nodos IoT, se puede clasificar entre los nodos basados en: microcontrolador y FPGA (Field-programmable gate array); los primeros son los más comunes debido a que son baratos, versátiles y fáciles de usar, sin embargo, un microcontrolador tiene como principal elemento un procesador, por lo cual, realizan sus tareas ejecutando instrucciones de manera secuencial, lo que significa que sus operaciones se encuentran limitadas ya que la funcionalidad deseada debe adaptarse a las instrucciones disponibles y al hecho de que no es posible realizar múltiples tareas de procesamiento en simultáneo. Mientras que los segundos representan una solución prometedora ya que explotan el paralelismo inherente de la FPGA (se pueden leer varios sensores al mismo tiempo) y además brindan una mayor confiabilidad y disponibilidad, puesto que, al ser el control basado en hardware, existe una menor probabilidad de que el sistema se detenga y se mejora la velocidad de respuesta del dispositivo. Adicionalmente, la FPGA tiene una mayor cantidad de pines de entrada-salida, lo que permitiría conectar varios sensores y actuadores en un mismo nodo; de esta manera se podría reemplazar varios nodos basados en microcontrolador.

En lo referente al uso de las nuevas tecnologías a nivel local, según el Instituto nacional de estadísticas y censos, el porcentaje de hogares con acceso a internet en el Ecuador es de 53.2% en el año 2020, registrando un aumento del 7.7% con respecto a 2019. Por lo cual, en el país se habla de mejorar la conectividad lo antes posible, fomentando la tecnología y la cultura digital (INEC, 2021).

En el Ecuador existe un grupo reducido de empresas que ofrecen servicios de Internet de las Cosas a nivel gubernamental y empresarial, ya que al ser un área que recién está implementándose y estandarizándose en el país, no existe un amplio desarrollo y despliegue de las tecnologías IoT. Con respecto al Smart Home, uno de los principales factores a considerar es el alto costo de la

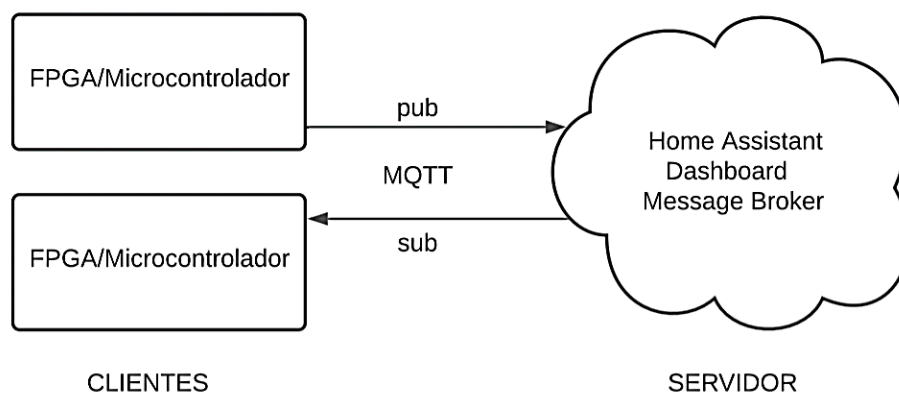
implementación de este tipo de soluciones, ocasionando que sólo cierto grupo de la población disponga de este servicio.

Convertir una casa en un hogar inteligente sería de mucha utilidad en Ecuador, sobre todo en el campo de la eficiencia energética, ya que en el país no se tiene una cultura de ahorro de recursos. Gracias a un hogar inteligente se podría optimizar el consumo eléctrico de una vivienda; esto aplicado masivamente en hogares, oficinas y espacios públicos podría llegar a disminuir la demanda nacional, lo que aliviaría los problemas de escasez de energía en tiempos de sequía.

En el presente trabajo de titulación se plantea el diseño, implementación e integración de diferentes nodos IoT siguiendo la tendencia de Smart Home, con el uso de sensores, actuadores, placas de desarrollo y nodos comerciales propietarios, mediante el protocolo MQTT y un dashboard (HomeAssistant) como se aprecia en la Figura 1. El principal objetivo es la masificación del uso de IoT a nivel doméstico encontrando soluciones de bajo costo y fácil implementación. Cabe recalcar que el uso de nodos IoT basados en FPGA es una tendencia nueva ya que existen muy pocos fabricantes que los desarrollan. De allí que, la principal contribución del presente trabajo es la integración de este tipo de nodos a una red Smart Home. Al ser productos nuevos, existen pocos ejemplos y librerías desarrolladas para poder explotar las tarjetas de desarrollo basadas en FPGA para IoT. Por tanto, este trabajo tiene un importante componente de investigación, programación en lenguaje VHDL y C para el desarrollo de la aplicación sobre la FPGA, interacción con el módulo WIFI/Bluetooth de la tarjeta; e incluso la utilización de IP Cores. Otro aporte significativo de esta tesis es la comparación de costos, desempeño y consumo de energía del sistema.

Figura 1

Arquitectura de integración nodos IoT



Dos de los nodos basados en FPGA que se pueden emplear son:

- **Seeed Spartan Edge Accelerator Board:** Es una placa de desarrollo Xilinx Spartan Field Programmable Gate Array, puede funcionar de manera independiente y con Arduino como un FPGA Shield. Incluye el System on Chip (SoC) inalámbrico ESP32 de Espressif Systems para conectividad Wi-Fi de 2.4 GHz y Bluetooth 4.1. Además, posee una amplia gama de periféricos e interfaces, entre los cuales se encuentran: un acelerómetro de 6 ejes, un convertidor analógico-digital de 8 bits, dos LED RGB, una interfaz Mini HDMI, dos interfaces Grove y una interfaz serial de cámara CSI (Seeed Studio, 2019).
- **Arduino MKR Vidor 4000:** Tiene la sencillez de uso de Arduino y trabaja con los chips reprogramables más potentes, denominados FPGA. El microcontrolador de la placa es un SAMD21 Cortex-M0 de 32 bits de bajo consumo con arquitectura ARM (Advanced RISC Machine), al igual que en las otras placas de la familia Arduino MKR. La conectividad WiFi y Bluetooth se realiza con el módulo de radio u-blox NINA-W102, un chipset de baja potencia que opera en el rango de 2.4GHz conforme a los estándares IEEE 802.11 b/g/n y la comunicación segura está garantizada gracias al chip de cifrado ATECC508 (Arduino, 2021).

Objetivos

Objetivo General

- Diseñar e implementar un sistema de hogar inteligente heterogéneo de bajo costo que integre nodos IoT basados en FPGA, microcontrolador y nodos comerciales.

Objetivos Específicos

- Determinar la importancia del IoT enfocado al Smart Home, los tipos de nodos y software que se emplean en un sistema de hogar inteligente mediante un estudio de los conceptos y del estado del arte.
- Integrar nodos comerciales con nodos desarrollados en base a chips, sensores y actuadores en un sistema Smart Home por medio de la comunicación MQTT de los diferentes nodos con el servidor.
- Explicar la funcionalidad de los nodos IoT y determinar el desempeño del sistema a través de pruebas de rendimiento.
- Determinar el consumo de energía de los nodos desarrollados en base a chips, sensores y actuadores con la ayuda de dispositivos de medición.
- Comparar los costos de los nodos desarrollados en base a chips, sensores y actuadores con dispositivos IoT comerciales mediante una revisión del precio de los productos en el mercado ecuatoriano.

Alcance

El presente trabajo de titulación propone la construcción de un marco teórico sólido sobre el IoT enfocado al Smart Home, los tipos de nodos y software que existen para su integración. El desarrollo de un sistema de Smart Home funcional conformado por varios tipos de nodos basados en

microcontrolador y FPGA, en el cual se realizará un análisis de costes, consumo de energía y desempeño del sistema.

Metodología

Para la realización del trabajo de titulación es necesario conocer en profundidad el Internet de las Cosas, para enfocarse en una de sus aplicaciones como lo es Smart Home. Para esto, se realizará una investigación de los diferentes tipos de nodos IoT y software que faciliten el control de los dispositivos inteligentes para monitorear, controlar, automatizar y optimizar las tareas del hogar. Una vez adquirida la información necesaria, se procederá con el diseño del sistema Smart Home, se establecerá el tipo y número de nodos a usar, los sensores y actuadores que tendrá cada uno, además de la determinación del software para la integración del sistema. Se procederá a conseguir los materiales necesarios, para implementarlos e integrarlos en un solo sistema de hogar inteligente, el cual constará de varios tipos de nodos, tales como: comerciales, basados en microcontrolador y FPGA. Cuando ya se encuentre el sistema funcional, se realizará una comparación de costos, pruebas de rendimiento y un análisis del consumo de energía.

Este capítulo inicial brinda un panorama general del trabajo de titulación mediante un planteamiento ordenado del tema. En el capítulo II, se presentan los conceptos, estándares y tecnologías relacionadas con el IoT y Smart Home, así como los trabajos relevantes sobre esta temática que se encuentran en la literatura.

Capítulo II: Marco Teórico y Trabajos Relacionados

Este capítulo proporciona la fundamentación teórica para entender de mejor manera la tendencia de IoT y una de sus aplicaciones como lo es Smart Home, establece las características generales de los nodos basados en microcontrolador y FPGA, además de presentar los trabajos relacionados.

Internet of Things

IoT es un sistema conformado por un conjunto de objetos físicos que poseen la capacidad de interactuar con el entorno y que pueden ser identificados de manera única para transferir datos en una red de comunicación como Internet. Su propósito es mejorar la calidad de vida de las personas (Motlagh, Mohammadrezaei, Hunt y Zakeri, 2020).

Un sistema de Internet de las Cosas genera flujo de información entre varios dispositivos, por lo cual, resulta esencial establecer una red de comunicación eficiente y confiable para la transmisión de datos unidireccional o bidireccional entre las diferentes entidades dependiendo de su aplicación. Los sistemas permiten implementar múltiples aplicaciones y de toda clase, por ejemplo: automatización del hogar, monitoreo de órganos humanos, análisis del estado de los cultivos, etc.

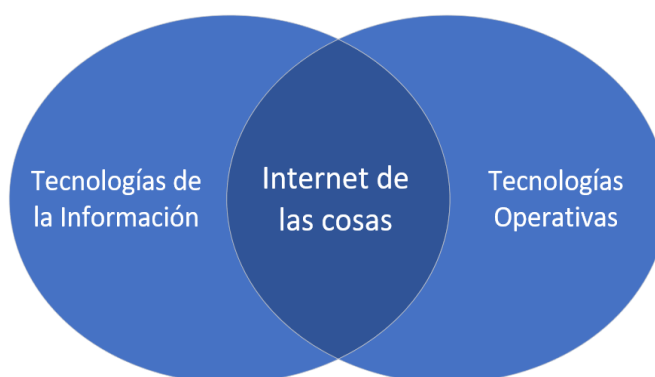
Internet of Things proporciona un nuevo dominio de aplicaciones y servicios, sus esfuerzos están encaminados en brindar una era en donde las entidades físicas y digitales se comuniquen sin inconvenientes, para convertirse en una tendencia popular en diferentes sectores. El diagrama que se observa en la Figura 2, representa dos conjuntos diferentes: Tecnologías de la información (TI) y Tecnologías operativas (TO), su intersección da lugar a lo que se denomina IoT.

El campo de TI controla la conectividad de los dispositivos y el flujo de datos dentro de la red, está integrado por: bases de datos, servidores y aplicaciones. Por otra parte, TO se enfoca en operaciones industriales, de fabricación y en instalaciones para controlar y supervisar procesos físicos. Anteriormente se pensaba que estos conceptos eran opuestos, independientes y no resultaba factible

que trabajen mutuamente, sin embargo, Internet de las Cosas combina el mundo de TI y TO en uno solo, planteando la interconexión entre varias cosas mediante una red global.

Figura 2

Diagrama de Venn IoT



Nota. Tomado de *Venn diagram* (p.7), por Alam et al., 2020.

Cabe recalcar que los portátiles, PCs, smartphones, servidores o tablets no se consideran dispositivos IoT, ya que no se suelen utilizar para recopilar datos o controlar dispositivos físicos (Sheng-Lung Peng, Souvik Pal, 2019).

Concepto de las 3C en IoT

Comunicación. Hace referencia al intercambio de datos entre dispositivos conectados a Internet, lo que permite la integración de sistemas y la interacción con las personas. Otorga varias facilidades, por ejemplo: los sensores en un hospital pueden monitorear el estado de salud de un paciente para ser interpretados y ayudar a emitir un diagnóstico. En la industria del transporte se puede realizar un seguimiento en tiempo real de la carga y el estado de la misma. En la casa ayuda a tener un mayor control de los electrodomésticos (Alam et al., 2020).

Costo. La cantidad de dinero se reduce gracias a la tendencia del Internet de las Cosas. En el ámbito industrial donde se utiliza una gran cantidad de maquinaria y se pretende que estas trabajen por largos periodos de tiempo y sin errores, resulta esencial el uso de sensores inalámbricos que ayuden a

monitorear el estado y rendimiento de los equipos, ya que una falla puede representar grandes pérdidas para la empresa. Existen diferentes tipos de sensores que pueden brindar la oportunidad de abaratar costos, no solo en el ámbito industrial sino en todos los campos.

Control. Proceso que permite obtener información precisa de lo que está pasando en el entorno. Se encuentra íntimamente relacionado con la automatización de actividades que conforman un proceso, brindando mayor seguridad y comodidad a los usuarios, ya que toda su ejecución se puede monitorear de forma remota y si ocurre algún evento desafortunado puede ser atendido de manera inmediata gracias a los mensajes de alerta (Sheng-Lung Peng, Souvik Pal, 2019).

Ventajas IoT

Recopilación de datos. IoT supera los límites de la recolección de datos ya que se despliega precisamente donde las personas quieren analizar y obtener información de su entorno.

Interacción con el cliente. Está asociada con la experiencia de usuario, se ofrece una colaboración efectiva para satisfacer las expectativas del cliente.

Reducción del desperdicio de datos. Hace referencia a la organización de información para los usuarios. En IoT se puede obtener una gran cantidad de datos del entorno en tiempo real, por lo cual, resulta fundamental ordenarlos de manera clara y concisa, para obtener una mejor visualización e interpretación de resultados.

Optimización. IoT permite intercambiar datos de manera rápida y eficaz a través de los diferentes protocolos de comunicación, mejorando el uso de los dispositivos ya que solo se utilizan los recursos necesarios.

Desventajas IoT

Algunos de los problemas a considerar en la tendencia de IoT son:

Flexibilidad. Se refiere a la integración entre dispositivos que manejan diferentes tecnologías para formar un solo sistema funcional.

Seguridad. IoT funciona sobre una red de dispositivos con conexión a Internet, los cuales presentan ciertos inconvenientes en las medidas de seguridad, haciéndolos vulnerables a diversos tipos de ataques.

Privacidad. Internet de las Cosas puede proporcionar información personal de carácter confidencial sin la participación activa de los clientes.

Complejidad. El diseño, mantenimiento y uso de múltiples tecnologías en los sistemas IoT resulta problemático y complicado para las organizaciones que prestan este servicio.

Objeto inteligente

Anteriormente varios investigadores trabajaron en el uso de la tecnología como un medio para la comunicación entre personas, es así que nace el concepto de computación ubicua, la cual se basa en incorporar medios o herramientas tecnológicas para satisfacer las necesidades cotidianas de los seres humanos.

Hoy en día el foco de interés es la comunicación inteligente, definida como toda interacción entre objetos o personas con la capacidad de juzgar su contexto y estado, pero hay que tener en cuenta que dicha comunicación es factible si el entorno también es inteligente. Esto se puede lograr mediante la combinación heterogénea de objetos integrados con: sensores, actuadores, área de visualización y capacidad computacional.

Un entorno IoT se encuentra conectado a través de una red global y conformado por objetos inteligentes que actúan como fuentes de información digital. Daniel Thalmann y Marcelo Kallman dan a conocer el concepto de objeto inteligente como cualquier cosa con la capacidad de especificar sus interacciones, a través de la detección, computación y comunicación tanto a corta como a larga distancia de forma inalámbrica (Alam et al., 2020).

Haciendo una analogía entre IoT y el cuerpo humano, se puede decir que los objetos inteligentes se asemejan a las células, dado que son el componente básico, cumplen sus funciones y

contribuyen al correcto desempeño de todo un sistema. Un nodo o dispositivo inteligente es el bloque básico en el Internet de las Cosas que forma parte de una red inteligente, donde se puede recolectar, procesar y analizar una gran cantidad de datos, con la finalidad de obtener información útil para el usuario. Esta tecnología posee un enorme potencial, ya que puede transformar un objeto ordinario en un dispositivo inteligente e interactivo.

Elementos de un nodo inteligente

Sensores. Estos dispositivos se asemejan a los órganos de los sentidos de las personas ya que pueden interactuar con el entorno y realizar una detección visual, física o audible. Esto se realiza con la finalidad de enviar un mensaje al cerebro para la toma de decisiones. En un objeto inteligente los sensores que se encuentran integrados permiten detectar y medir cantidades físicas del ambiente, posteriormente se convierten en una representación digital para ser procesada por alguna unidad computacional, donde se efectúa una transformación de los datos para ser empleados por otros nodos. Existen varios sensores en el mercado para medir las diversas cantidades físicas que se encuentran presentes en el entorno.

Actuadores. Un objeto inteligente puede contener varios sensores o actuadores, dependiendo de la aplicación a la que ha sido destinado. Los actuadores se encuentran estrechamente vinculados con los sensores, como se aprecia en la Figura 3, en donde se distinguen cuatro etapas:

1. Los sensores capturan datos del mundo físico para medir las variables físicas deseadas.

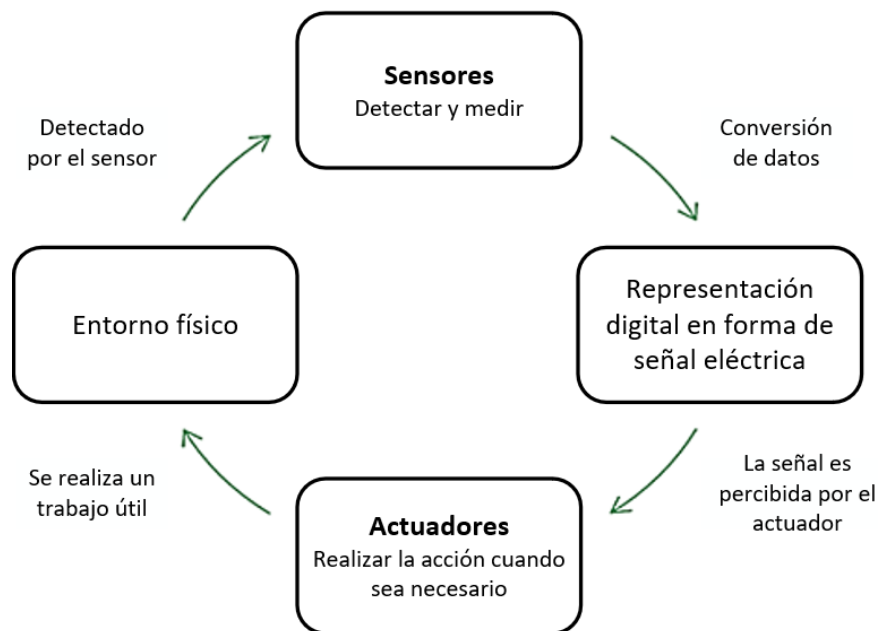
Los datos capturados son procesados para obtener una representación digital de la señal eléctrica.

2. Los actuadores reciben una señal de control previamente procesada, con la finalidad de ejecutar alguna acción.
3. El actuador ejecuta la acción deseada sobre el entorno físico.

Se puede entender de mejor manera esta relación con un ejemplo. Se tiene un tanque de agua marcado con un nivel, para lo cual se debe emplear un sensor, la bomba de agua se enciende cuando el líquido se encuentra por debajo de este nivel, por lo tanto, es necesario un controlador para que discrimine cuando el agua se encuentre por debajo del nivel marcado y un actuador para encender la bomba. Los actuadores son elementos de activación que convierten la energía en movimiento giratorio, lineal u oscilatorio; se pueden clasificar en función de varios parámetros (Perros, 2021).

Figura 3

Relación entre sensor y actuador



Nota. Tomado de *Relationship between sensor and actuator* (p.10), por Alam et al., 2020.

El encendido y apagado de un equipo se controla mediante un actuador. IoT es una mezcla de varios elementos de sensado, procesamiento y activación, en donde sensores y actuadores se complementan mutuamente para obtener un sistema funcional en el ámbito del Internet de las Cosas.

Memoria. Los nodos inteligentes pueden ser:

- Virtuales: Hace referencia a todo lo intangible, como el software.

- Físicos: Comprende los objetos del mundo real, con existencia y propiedades físicas como forma, tamaño, color, densidad, entre otras.

Los dispositivos inteligentes tanto virtuales como físicos poseen un identificador único o dirección para el envío y recepción de datos, para esto es necesario tener cierta capacidad de comunicación y procesamiento, de esta manera el nodo puede ser descubierto en la red para aceptar y responder mensajes, descubrir servicios y gestionar la red (Perros, 2021). Todas estas funciones requieren un espacio de memoria el cual varía según la aplicación. La memoria es fundamental en el almacenamiento de datos, para su posterior procesamiento, análisis y obtención de información para la toma de decisiones.

Unidad de procesamiento. Algunas de sus características son:

- Sirve para recopilar, procesar y analizar los datos capturados.
- Emplea señales de control para activar los actuadores, acorde a las necesidades de la aplicación.
- Controla el sistema de comunicación y energía de un dispositivo inteligente.
- El tipo de unidad de procesamiento puede variar según el uso al que se le quiera destinar.
- El microcontrolador es el más conocido gracias a su tamaño, simplicidad, consumo energético, costo y flexibilidad.

Unidad de comunicación. Todos los nodos tienen la necesidad de comunicarse ya sea con otros objetos inteligentes o con su entorno, para lo cual resulta fundamental que se puedan conectar a la red mediante la unidad de comunicación, siguiendo un conjunto de reglas o protocolos para el intercambio de información (Alam et al., 2020). Esta unidad puede permitir la comunicación por cable o de manera inalámbrica, esta última es la que predomina en IoT debido a su fácil implementación y costo.

Fuente de alimentación. Existen varios elementos que conforman un dispositivo inteligente, los cuales necesitan de energía para poder funcionar. La unidad de comunicación representa el mayor

consumo energético en un nodo IoT, además para elegir correctamente una fuente de alimentación hay que considerar el lugar, área de implementación, el cambio entre el modo activo y suspensión de los dispositivos, accesibilidad, criticidad de la información y la fuente de energía como baterías, energía solar o eólica, ya que si se toma en cuenta las condiciones del entorno se puede elegir una fuente adecuada para una determinada aplicación.

Nodos basados en microcontrolador y FPGA

La electrónica ha presentado una gran evolución desde la época en la cual se usaba un solo dispositivo semiconductor para controlar el flujo de corriente eléctrica denominado BJT (Bipolar Junction Transistor) hasta el uso de dispositivos lógicos basados en una gran cantidad de compuertas lógicas que se unen de acuerdo a la programación del usuario. Con el avance de la tecnología de miniaturización, fue posible integrar millones de transistores en un solo chip para aumentar las funciones y mejorar el rendimiento de los aparatos electrónicos. Esto dio lugar a la aparición de la Unidad Central de Procesamiento (CPU) que constituye el cerebro del dispositivo y se encarga de ejecutar un programa específico. En la actualidad, dicha unidad es el elemento central de dispositivos inteligentes como los microcontroladores.

El término microcontrolador es muy conocido en el mundo de los circuitos y la electrónica, ya que es usado por la mayoría de dispositivos que necesitan comunicarse con un computador, su estructura se compara a la de una PC básica, porque dentro de un chip tiene elementos como CPU, memoria de programa, memoria de datos, buses de comunicaciones, puertos, entre otros. Por otro lado, un componente que ha ido ganando espacio en el mundo de la electrónica es la FPGA (Field Programmable Gate Array), que es un circuito integrado que contiene una gran cantidad de puertas lógicas, las cuales se configuran eléctricamente dependiendo de la tarea que se quiera realizar (Seng et al., 2021). En la Tabla 1 se presenta una comparativa con las características más relevantes de estos elementos.

Tabla 1*Comparación entre FPGA y microcontrolador*

| Parámetros | FPGA | Microcontrolador |
|---------------------------|---|---|
| Flexibilidad | Son más flexibles, permiten la reprogramación del firmware y el hardware. | Solo permiten la reprogramación del firmware. |
| Procesamiento | Paralelo | Secuencial |
| Consumo de energía | Mayor | Menor |
| Costo | Mayor | Menor |
| Programación | Es más complicado y toma más tiempo. | Es fácil y toma menos tiempo. |
| Diseño de hardware | Complejo | Simple |
| Arquitectura | Se basa en LTU (Look-Up Tables) | Basado en un procesador |

Nota. Recuperado de *FPGA vs Microcontroller Comparison*, por HardwareBee, 2021,

(<https://hardwarebee.com/fpga-vs-microcontroller-what-to-choose>).

Los microcontroladores son herramientas fáciles de programar, depurar y diseñar que tienen un bajo costo de implementación. Sin embargo, su procesamiento es secuencial y tienen poca flexibilidad, lo que los hace menos potentes. En cambio, una FPGA es capaz de realizar el procesamiento de forma paralela en aplicaciones que requieren mayor velocidad de procesamiento o potencia, gracias a los bloques de lógica configurables. Además, permiten la reprogramación de firmware y hardware (Pujari et al., 2015). Estos circuitos integrados pueden ser utilizados de forma independiente o en conjunto aprovechando las ventajas que ofrece cada uno, creando sistemas avanzados y robustos.

En el ámbito de IoT, los microcontroladores son ampliamente utilizados en los dispositivos inteligentes, ya que permiten procesar datos y realizar funciones de control de manera local, reduciendo la cantidad de datos que se transmiten por la red. Pueden conectarse a Internet e integrarse con sensores u otros dispositivos, además son económicos y presentan un bajo consumo de potencia. La tendencia actual de algunos fabricantes es la implementación de una FPGA en diseños complejos de

nodos IoT que requieren una mayor capacidad de procesamiento y flexibilidad para adaptarse de mejor manera a las necesidades que presentan los entornos de Internet de las Cosas.

Tendencias de los dispositivos inteligentes

Los objetos inteligentes poseen varias características, las cuales pueden variar con el pasar del tiempo para llevar al mundo hacia un futuro inteligente. Algunas tendencias que se pueden inferir en IoT son:

- Reducción de tamaño: El proceso de miniaturización permite crear nodos IoT más pequeños, compactos y portátiles, mejorando los aspectos de funcionalidad, rendimiento y rentabilidad de los dispositivos.
- Mayor potencia de procesamiento: La potencia en un procesador ha aumentado con el pasar del tiempo, dotando de mejores características a los nodos IoT como velocidad, capacidad de memoria, compatibilidad con otros componentes, seguridad, etc. Es así que cada vez se aumenta la complejidad y capacidad de conexión de los dispositivos inteligentes.
- Menor consumo energético: Los elementos electrónicos pueden ser activos o pasivos, su gran diferencia radica en el hecho de que los componentes pasivos no necesitan de una fuente externa para su funcionamiento y tienen la capacidad de almacenar energía en forma de corriente o voltaje. Por esta razón, elementos como los sensores se están convirtiendo en pasivos y los componentes con fuente de alimentación externa se están diseñando con el criterio de que la batería perdure durante varios años sin necesidad de reemplazarla.
- Mejora en la comunicación: Se realizan esfuerzos por mejorar la velocidad y el alcance de las tecnologías inalámbricas, además del desarrollo de protocolos especializados para el intercambio de datos en las diferentes aplicaciones del Internet de las Cosas.

Las tendencias anteriormente mencionadas marcarán la pauta para el desarrollo de nodos sofisticados en un futuro próximo, capaces de realizar un mayor número de trabajos, con mayor eficiencia y mejor comunicación entre todos los dispositivos que puedan conformar un sistema IoT.

Red IoT

Como la mayoría de las redes de conmutación de paquetes, una red de Internet de las Cosas consta de dos tipos de dispositivos:

1. Puntos finales o hosts: Son el origen o destino de mensajes. En IoT estos son sensores, actuadores, controladores y aplicaciones que realizan el procesamiento para la toma de decisiones.
2. Enrutadores: Se encargan de la propagación de los datos a través de Internet. Admite varios hosts y les proporciona capacidad de enrutamiento.

Estos dispositivos trabajan en conjunto para establecer sistemas de comunicación con transmisores y receptores conectados mediante enlaces. Dependiendo de la naturaleza del canal los enlaces pueden ser:

- Alámbricos: Hace referencia a la propagación guiada, la cual emplea generalmente: conductores de cobre trenzados, cables coaxiales y fibras ópticas. Algunas de las características a tener en cuenta son la tasa de transmisión, inmunidad a la interferencia electromagnética (EMI) y el costo.
- Inalámbricos: Se encuentran asociados con la propagación libre de las ondas electromagnéticas entre antenas a través del agua, la atmósfera terrestre y el espacio libre.

En el marco de IoT los enlaces se eligen de acuerdo al costo y tiempo de implementación. Es así que los enlaces inalámbricos son los más comunes gracias a que no requieren mayores cambios de infraestructura que pueden llegar a ser costosos y tardar mucho tiempo en desplegarse. Cabe recalcar

que los escenarios con propagación guiada que aprovechan el cableado eléctrico también tienen cierto grado de popularidad (Herrero, 2020).

Dependiendo de la aplicación, el área de implementación y el escenario se tienen diversos factores limitantes como la potencia de transmisión, ancho de banda y costo. Además, resulta importante considerar el ruido del canal, ya que la señal llega al receptor atenuada y con ruido, por lo cual es necesario estimar la relación señal a ruido (SNR). El teorema de la capacidad del canal establece que una SNR alta significa tasas de transmisión más altas, ya que presentan una relación directamente proporcional. Cabe recalcar que la velocidad de transmisión no tiene errores si se emplea el mecanismo de codificación de canal adecuado (Pattar, Buyya, Venugopal, Iyengar y Patnaik, 2018). En el contexto de Internet de las Cosas esto se considera un reto, debido que se trata de conservar la vida útil de la fuente de alimentación, lo cual implica una potencia de señal baja, al igual que la SNR y tasa de transmisión.

Tipos de redes IoT

En las redes de Internet de las Cosas se establecen enlaces alámbricos e inalámbricos en donde la conectividad IP es primordial. Existen dos ambientes familiares para la comunicación entre dos hosts:

1. Comunicación de un solo salto: Puede ser un sensor que intercambia información directamente con una aplicación.
2. Comunicación de varios saltos: Los puntos finales se comunican indirectamente ya que se emplean dispositivos intermedios para el reenvío de paquetes.

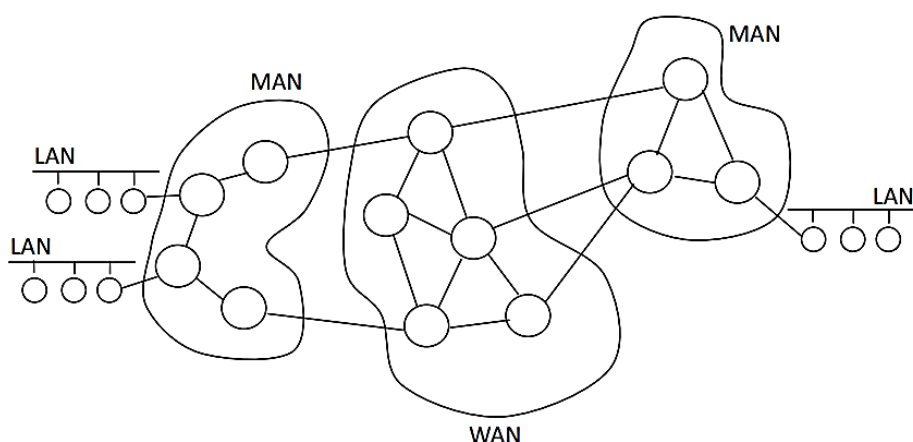
Las redes se pueden clasificar bajo el criterio del área que cubren, como se aprecia en la Figura 4, se tienen tres tipos de redes:

1. Local Area Network (LAN): La red de área local puede ser desplegada en una oficina, laboratorio o edificio, no depende de la infraestructura de comunicación de terceros para tener un buen servicio y de alta velocidad.

2. Metropolitan Area Network (MAN): El tamaño de una red de área metropolitana se encuentra entre una WAN y una LAN, se basa en comunicación de terceros para poder operar y alcanza velocidades más altas que una red WAN.
3. Wide Area Network (WAN): La red de área amplia depende de la infraestructura de terceros para su funcionamiento ya que ocupa una región geográfica extensa. Su rendimiento suele ser menor si se compara con una LAN.

Figura 4

Tipos de redes



Nota. Tomado de *Network classification* (p.24), por R. Herrero, 2020.

En la red de acceso de IoT comúnmente los dispositivos interactúan con un enrutador o puerta de enlace, el cual funciona como límite entre el acceso y el núcleo. La red central generalmente es una red IP que otorga conectividad a las aplicaciones que se alojan en la nube.

La mayoría de las redes de Internet de las Cosas se dividen en subtipos de LAN de baja velocidad, debido a que se trata de prolongar al máximo la vida útil de las baterías empleadas en los distintos nodos. Algunos de los subtipos a tener en cuenta son:

- Home Area Network (HAN): La red de área doméstica permite la comunicación en una casa o edificio.

- Personal Area Network (PAN): Las redes de área personal otorgan un área de cobertura pequeña con una baja velocidad de transmisión. En IoT se emplean WPAN (Wireless Personal Area Network) debido a las facilidades que presentan los enlaces inalámbricos.
- Body Area Network (BAN): Las redes de área corporal tienen una menor cobertura que las redes PAN ya que están basadas en el uso de dispositivos portátiles pequeños e implantes, usados generalmente en aplicaciones de salud y estado físico.

Las redes WAN también son usadas en el contexto de IoT, pero se denominan LPWAN o WAN de bajo consumo, se caracterizan por ser inalámbricas y enfocarse en extender la vida útil de la fuente de alimentación.

Dispositivos en una red IoT

Internet de las Cosas se basa en la interacción con el mundo físico a través de dispositivos como controladores, actuadores, sensores y gateways. Todos estos forman parte de un sistema más grande, con memoria limitada, complejidad computacional, fuente de alimentación, procesador y conexión en red.

Los procesadores en el marco de IoT son computadoras integradas o sistemas embebidos con un bajo consumo de energía, arquitectura del conjunto de instrucciones reducida y complejidad computacional limitada, que a pesar de todas sus restricciones permiten el procesamiento en tiempo real. La mayoría de procesadores integrados incluyen interfaces de entrada/salida que son de fácil acceso mediante pines en un SoC (System on chip) y SoM (System on module), permitiendo comunicaciones punto a punto y de bus entre periféricos. Algunas de las interfaces son:

- Serial Peripheral Interface (SPI): La interfaz periférica serial permite la comunicación en serie entre un maestro y varios esclavos de manera simple y rápida.

- Inter-Integrated Circuit (I2C): La interfaz del circuito inter-integrado posee una arquitectura de bus con mayor complejidad, permite una comunicación bidireccional entre maestro y esclavos, pero con una menor velocidad de transmisión.
- Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (UART): El transmisor-receptor asíncrono universal es una interfaz genérica y confiable para el envío y recepción de datos mediante un enlace en serie. Engloba los estándares ampliamente conocidos como RS-232 y RS-485.
- Joint Test Action Group (JTAG): Permite probar circuitos, examinarlos y controlar el estado de un procesador embebido. Existe una nueva alternativa denominada Serial Wire Debug (SWD) con las mismas funcionalidades y un menor número de pines.

En IoT varios procesadores integrados poseen interfaces ADC (Analog to Digital Converter) y DAC (Digital to Analogue Converter) para trabajar con señales analógicas y digitales, además incluyen puertos de entrada/salida de propósito general (GPIO) empleados para escribir y leer señales digitales e interactuar con sensores y actuadores (Nayak, Ray y Ravichandran, 2021).

Los dispositivos que forman parte de la red de acceso son los sensores, actuadores y controladores, mientras que las aplicaciones se encuentran en la red central (Core Network). Las puertas de enlace o gateways son dispositivos lógicos que sirven de interfaz entre ambas redes, por lo cual es necesaria una mayor complejidad computacional con mejores procesadores embebidos, que tengan la potencia suficiente para interactuar al mismo tiempo con varios nodos y enrutar el tráfico de la red.

Red de sensores inalámbricos

Una red de sensores inalámbricos (WSN Wireless Sensor Network) hace referencia a un gran número de dispositivos inalámbricos capaces de medir magnitudes físicas del entorno e interactuar con una aplicación para dar seguimiento a ciertos fenómenos físicos que ocurren en el medio. Tanto IoT como WSN dependen del control de los sensores para tener un funcionamiento adecuado y eficiente.

Las redes WSAN (Wireless Sensor and Actuation Network) tienen todas las características de WSN, pero además realizan la actuación y la toma de decisiones de manera manual o automática. Es considerada como la predecesora de una red de Internet de las Cosas moderna, ya que posee todos los elementos para conformar este tipo de sistemas: sensores, actuadores, controladores, red de comunicación, gateway y un mecanismo de procesamiento central como una aplicación. Al comparar ambas redes se puede encontrar como elemento diferenciador el hecho de que en WSAN se despliegan una mayor cantidad de sensores y actuadores, ya que son redes más densas.

La preservación de la vida útil de las fuentes de alimentación como la batería es una prioridad en WSN ya que emplean varias formas de compensación energética, las principales son:

- Velocidad de transmisión baja.
- Ciclos de trabajo para reducir el procesamiento.
- Menor potencia de transmisión por el enrutamiento de múltiples saltos.
- Menor complejidad computacional.

Con respecto a la gestión de datos, se puede establecer, consultar y almacenar la configuración del equipo, datos recopilados de los sensores y la información de activación. Se tiene una alta disponibilidad debido a la distribución de la base de datos entre múltiples entidades que permiten el procesamiento en red. Generalmente estas redes tienen una baja latencia, bajas tasas de transmisión y alta eficiencia energética, optimizando el uso del canal inalámbrico.

El principio básico de una red de sensores inalámbricos es reducir la cantidad de tráfico generado en cada dispositivo con el objetivo de que todos los sensores/actuadores compartan el medio, se trata de encontrar equilibrio entre la potencia de transmisión y la complejidad computacional con una capacidad de procesamiento adecuada, pero debido a su naturaleza propietaria WSN ha tenido

varios problemas. Una solución fue la estandarización de protocolos por la tendencia de IoT, que otorga una nueva manera de traspasar barreras (Herrero, 2020).

Red centralizada vs descentralizada

Una red centralizada se basa en un servidor central, el cual procesa los datos provenientes de los usuarios finales. Con la tendencia de IoT comienza a aumentar el número de dispositivos conectados a Internet, por consiguiente, existe una mayor transferencia de datos que dejó en evidencia a los sistemas centralizados debido a su falta de robustez y rapidez para el procesamiento de datos en tiempo real demandado por las aplicaciones de Internet de las Cosas. Para la evolución de esta tecnología es necesaria la implementación de una red descentralizada que utilice varias entidades para distribuir las cargas de trabajo, en la actualidad es posible tener esta red gracias al poder de cómputo de los microprocesadores que ofrecen un rendimiento más que adecuado para las diversas aplicaciones de IoT.

Arquitectura IoT

En el mundo de IoT existen varios desafíos, uno de ellos es la complejidad al diseñar o planificar toda la red para una aplicación de Internet de las Cosas, se suelen emplear una gran cantidad de dispositivos heterogéneos para capturar y analizar los datos con el fin de obtener información para los usuarios. Generalmente los dispositivos que componen la red se encuentran conectados a una puerta de enlace que permite la comunicación con otros equipos, servicios y aplicaciones que pueden estar alojadas en la nube. Por tal razón, se considera necesario diseñar un flujo de proceso para desarrollar una solución de IoT.

Una arquitectura hace referencia a la estructura, incluye los aspectos físicos (sensores, actuadores) y virtuales (servicios, protocolos). Por el momento no se ha aceptado una única arquitectura por las comunidades técnicas de manera universal, por lo cual se tienen varias arquitecturas propuestas por investigadores y grupos técnicos, que pueden ser aplicables.

Un enfoque modular con una arquitectura de varias capas permite una mejor comprensión del funcionamiento de todos los componentes de manera independiente, antes de integrarlos en un solo sistema, permitiendo una mejor gestión de la complejidad que presentan las soluciones IoT.

Los equipos que funcionan de manera inalámbrica requieren formas más seguras de autenticación, prevención de intrusos y cifrado, ya que los modelos convencionales de Tecnologías de la Información resultan vulnerables a los nuevos ataques presentes en redes IoT, debido a que los dispositivos finales generalmente son sensores inalámbricos que funcionan en bandas sin licencia, siendo visibles para cualquier persona con los equipos adecuados para analizar el espectro. Otro aspecto importante a considerar es el manejo de una gran cantidad de datos; la arquitectura debe estar enfocada en filtrar y reducir el envío de datos innecesarios para tener una red rápida y confiable. Las redes TI manejan altas velocidades de transmisión y poseen unidades de procesamiento potentes, lo cual no ocurre en IoT, por este motivo se necesitan nuevas tecnologías capaces de cumplir con las limitaciones presentes en las redes de Internet de las Cosas.

Paradigmas de computación

Edge Computing. Existe un gran número de nodos IoT situados en el borde de la red o cerca de la fuente de datos, provocando que el ancho de banda en algunos casos resulte insuficiente para la enorme cantidad de datos que deben ser procesados en la nube. Por esta razón, la computación en la frontera trata de acercar la informática, el filtrado y almacenamiento de datos a los dispositivos de borde, en busca de evitar los problemas de latencia, mejorar el rendimiento de la aplicación, realizar un procesamiento local, reducir gastos, mejorar la privacidad y seguridad.

Cloud Computing. La computación en la nube es un modelo simple utilizado para centralizar el procesamiento de datos. Los nodos únicamente necesitan conectarse a una aplicación centralizada en la nube, donde se realiza la supervisión, procesamiento y análisis de datos. Pero en un escenario a mayor escala, con más dispositivos inteligentes y por ende una mayor cantidad de datos, se puede llegar a

saturar este espacio, es por esto que se busca minimizar latencia, ancho de banda y aumentar la eficiencia, realizando el procesamiento de datos más cerca de los nodos IoT.

Fog Computing. Se basa en la descentralización de la gestión de datos, mediante la distribución del procesamiento entre la nube y los dispositivos de borde, disminuyendo la cantidad de datos enviados a la nube. Fog Computing o computación en la niebla tiene nodos con capacidad informática de almacenamiento y conectividad de red, como enrutadores, conmutadores, servidores y puertas de enlace, permitiendo un mejor control y análisis debido a que se encuentran más cerca del punto final.

Mist Computing. También denominada computación de neblina, va más allá que Fog Computing llevando el procesamiento al extremo de una red IoT, directamente en los nodos finales donde se encuentran integrados los sensores; gracias al avance de la tecnología estos equipos son capaces de realizar cálculos básicos y un análisis ligero para la toma inicial de decisiones. Una de las mayores ventajas de este tipo de computación es que el procesamiento se realiza en tiempo real, sin latencia.

Arquitecturas comunes en IoT

Arquitectura básica de IoT de tres capas. Toda la arquitectura se simplifica en tres capas:

- Percepción: Dispositivos que interactúan con el entorno como sensores y actuadores.
- Red: Los nodos se conectan en red y los datos se enrutan a la siguiente capa.
- Aplicación: Se encarga del procesamiento de datos, análisis y almacenamiento.

Arquitectura oneM2M. El comité técnico M2M (machine to machine) junto al Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones y otras instituciones llevaron a cabo la arquitectura oneM2M, la cual establece una capa de servicios comunes integrada en los nodos finales, permitiendo así la transferencia de datos con los servidores de aplicaciones. Se divide en tres capas: aplicación, servicios y red, las cuales se enfocan en resolver problemas de interoperabilidad, provocados por la variedad de dispositivos, métodos de acceso y sistemas operativos.

- Aplicación: Brinda conectividad entre dispositivos y aplicaciones.
- Servicios: Ofrece las funciones que necesita la aplicación.
- Red: Engloba a todos los equipos de comunicación y redes.

Arquitectura del Foro Mundial de Internet de las Cosas. IoT World Forum (IoTWF) propone siete capas con funciones puntuales, centrándose en la seguridad, computación de borde, almacenamiento y accesibilidad. Estas son:

1. Colaboración y procesos: Personas y procesos empresariales.
2. Aplicación: Informes, análisis y control.
3. Abstracción de datos: Agregación y acceso.
4. Acumulación de datos: Almacenamiento.
5. Edge computing: Análisis y transformación de datos.
6. Conectividad: Comunicación y procesamiento.
7. Dispositivos físicos y controladores: Cosas.

Todas las arquitecturas permiten una mejor gestión de datos y plantean soluciones a las restricciones de IoT. Existen varias características que comparten los modelos como la interconexión de nodos finales, las redes y aplicaciones que administran el sistema.

Estándares en IoT

Internet de las Cosas es un sistema que implementa varias tecnologías guiadas por estándares que son desarrollados por entidades reguladoras como IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), IETF (Internet Engineering Task Force), ETSI (European Telecommunications Standards Institute), NIST (National Institute of Standards and Technology), OneM2M, ISO (International Organization for Standardization), entre otras.

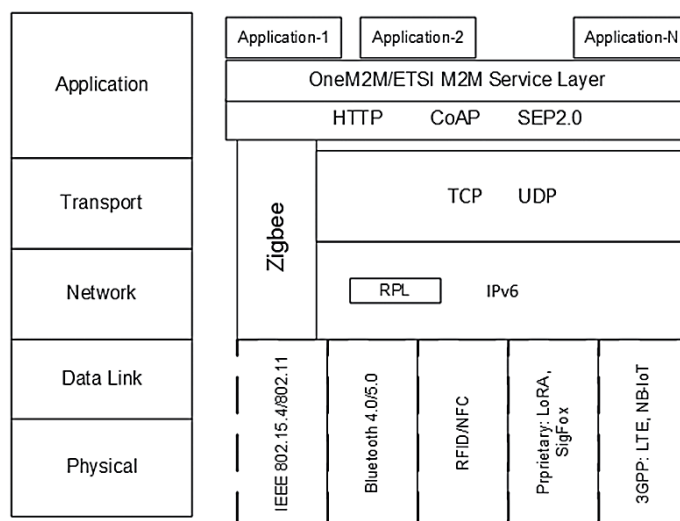
En 2012 se lanzó oneM2M, una iniciativa basada en publicar varias especificaciones técnicas para guiar el desarrollo de tecnologías enfocadas en IoT. Las especificaciones e informes técnicos desarrollados hasta ahora son: arquitectura de servicio de alto nivel, interfaces, protocolos abiertos, modelos de información, funciones de gestión de datos, requisitos para servicios comunes, interoperabilidad y configuración de pruebas.

Existen varias entidades que desarrollan nuevos estándares, en el marco de IoT se emplean varias tecnologías, por lo cual es indispensable que diferentes protocolos funcionen adecuadamente entre sí. En la Figura 5 se muestran los protocolos comunes de Internet de las Cosas, agrupados según el modelo de referencia OSI (Open Systems Interconnection) y su funcionalidad. La gran mayoría de estándares son abiertos, se encuentran disponibles sin ningún tipo de restricción, permitiendo la interoperabilidad y competencia, ya que los usuarios pueden innovar y crear sus propios servicios en función de las normas presentes en el estándar.

Una de las organizaciones más importantes es IEEE, la cual ha desarrollado varios estándares sobre WPAN, IEEE 802.15.4, WLAN, IEEE 802.11, WWAN y IEEE 802.16. Todas estas especificaciones son aplicables en el área de IoT, además se tienen otros estándares como IEEE 2020 e IEEE 1609, que permiten definir una arquitectura de red inteligente y admitir la conformación de redes IoT vehiculares, respectivamente (Al-Mutawa y Eassa, 2020). Este organismo también se encuentra involucrado con diferentes asociaciones que contribuyen al desarrollo de estándares en el ámbito de Internet de las Cosas, para que alcancen un nivel de madurez tanto en el diseño y la aplicación de este tipo de sistemas.

Figura 5

Protocolos usados en sistemas IoT



Nota. Tomado de *Commonly used protocols used in IoT system designs* (p.20), por J. Khan y M. Yuce, 2021.

Tecnologías para la conectividad

Este tipo de tecnologías pueden ser integradas con los dispositivos de detección, actuación y procesamiento para brindarles conectividad. Actualmente las principales son:

- IEEE 802.15.4: Es un estándar usado ampliamente en las redes de área personal inalámbricas que opera en la banda ISM (Industrial, Scientific and Medical), posee una baja tasa de transmisión de datos para prolongar el tiempo de vida de la fuente de alimentación, por lo tanto, tiene un bajo consumo energético. Combina la técnica de modulación de espectro ensanchado de secuencia directa (DSSS) con la modulación de la señal de ruido pseudoaleatorio, brindando un mayor ancho de banda y con mejor seguridad, además ofrece medidas para mejorar la confiabilidad del enlace prometiendo una alta tolerancia al ruido e interferencia (Madakam et al., 2015).

- Zigbee: Se usa en WPAN con el estándar IEEE 802.15.4 en las capas 1 y 2 del modelo OSI. Se diseñó priorizando el bajo costo y baja potencia en una red de malla, puede implementarse en un rango de 10 a 100 metros y generalmente se usa en aplicaciones de monitoreo y control en las bandas de frecuencia de 2.4 GHz, 902-928 MHz u 868 MHz; tiene una tasa de transmisión de 250 kbps para permitir una comunicación periódica full-duplex.
- ISA100.11A: Es un estándar de comunicación de baja potencia basado en IEEE 802.15.4 y desarrollado por ISA (International Society of Automation) que opera en la banda de 2.4 GHz; posee un cifrado AES (Advanced Encryption Standard) de 128 bits; maneja TDMA (Time-Division Multiple Access) con CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance); tiene soporte para IPv6, UDP y es compatible con IoT.
- RFID: La identificación por radiofrecuencia utiliza lectores y etiquetas con datos codificados digitalmente, los cuales se almacenan en una base de datos una vez que hayan sido leídos. Se asemeja a los códigos de barras con la diferencia que RFID no depende de línea de vista.
- NFC (Near Field Communication): Es un estándar de conectividad de corto alcance con una frecuencia operativa típica de 13.56 MHz, permite comunicaciones punto a punto mediante el principio de inducción magnética.
- Z-Wave: Es un estándar creado por Zensys enfocado en la automatización del hogar que opera en el rango de 800 a 900 MHz con modulación por cambio de frecuencia gaussiana GFSK y codificación de canal Manchester. Es una alternativa de bajo costo y menos compleja que Zigbee, tiene un consumo de energía menor a Wi-Fi y posee un mayor alcance que Bluetooth.
- Sigfox: Protocolo enfocado al bajo consumo, posee un ancho de banda de 192 kHz y tiene el principio de acceso aleatorio para el reenvío de mensajes, lo que reduce los efectos del ruido convirtiéndolo en un estándar resistente a la interferencia. En Europa opera entre 868 y 868.2 MHz, mientras que en otros lugares se emplea frecuencias de 902 y 928 MHz.

- LoRa (Long Range): Tecnología inalámbrica destinada a brindar soluciones en el campo de Internet de las Cosas y M2M, opera en las bandas de frecuencia de 169, 433, 868 y 915 MHz con un ancho de banda de 125 kHz y enlaces de comunicación bidireccionales simétricos; puede alcanzar una cobertura de 15 a 20 km permitiendo la conexión de millones de dispositivos.
- NB-IoT (NarrowBand IoT): Fue desarrollado por 3GPP (Third Generation Partnership Project) con el fin de lograr la interoperabilidad entre sistemas celulares 2G, 3G y 4G, usando la menor cantidad de energía posible. Utiliza OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) aumentando la eficiencia del espectro y la capacidad del sistema con una mayor calidad de servicio y latencias reducidas, además brinda funciones de seguridad como confidencialidad, autenticación e integridad. Cabe recalcar que la transferencia de mensajes grandes no resulta eficiente y los dispositivos son bastante complejos.
- Wi-Fi: También conocido por su estándar IEEE 802.11, es una tecnología inalámbrica para redes LAN que opera en las frecuencias de 2.4 y 5.8 GHz que se subdividen en varios canales. Utiliza la multiplexación TDMA y CSMA/CA para el acceso al canal.
- Bluetooth: Es una tecnología de comunicación inalámbrica de corto alcance y baja potencia que se encuentra definida en el estándar IEEE 802.15.1. Opera en la banda ISM con una frecuencia de 2.4 GHz y un alcance aproximado de 10 metros, para la transmisión de datos utiliza FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) lo que permite reducir la interferencia con otros dispositivos que trabajen a la misma frecuencia.

Tecnologías para la comunicación

Hace referencia al conjunto de estándares encargados de proporcionar comunicación entre nodos IoT, se los puede clasificar en seis grupos: infraestructura, descubrimiento, datos, identificación, gestión de dispositivos y semánticos. Estos protocolos brindan características de gestión de datos, enrutamiento, gestión remota, identificación, gestión de eventos e interoperabilidad.

Protocolos de infraestructura

Este grupo de protocolos dependen de la red y su infraestructura para un funcionamiento adecuado. Las tecnologías más populares en el campo de Internet de las Cosas son:

- Internet Protocol version 6 (IPv6): Fue desarrollado por el IETF debido a la necesidad de escalabilidad masiva y al agotamiento de las direcciones IPv4. Trabaja en la capa de red del modelo de referencia OSI proporcionando direcciones IP de 128 bits, lo que da lugar a un extenso rango de direcciones lógicas.
- Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks (RPL): Protocolo de enrutamiento para redes de baja potencia y con pérdidas, se fundamenta en el enrutamiento por vector de distancia y soporta IPv6.
- IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPAN): Hace referencia a IPv6 sobre redes WPAN de baja potencia, teniendo en cuenta sus limitaciones en cuanto a cobertura, memoria y rendimiento. Es un protocolo sencillo de implementar y puede ser usado en sistemas de bajo costo.
- Micro Internet Protocol (uIP): Es un protocolo de código abierto enfocado en extender las características de la pila de protocolos TCP/IP a microcontroladores de 8 y 16 bits. Es empleado para la conexión en red de dispositivos con un consumo de energía reducido, bajo costo y para su implementación necesita un espacio de memoria pequeño.
- Content-Centric Networking (CCN): También se conoce como redes centradas en la información, redes de datos y redes de publicación-suscripción. Es independiente de requisitos de ubicación, almacenamiento y aplicación. Permite la movilidad y utiliza el almacenamiento en caché para operar dentro de la red. Todas sus características se orientan en mejorar la eficiencia de datos, comunicación, escalabilidad y solidez.

Protocolos de descubrimiento

Este conjunto de protocolos se enfoca en el descubrimiento de direcciones lógicas y servicios.

Los principales son:

- **Physical web:** Es un protocolo que ofrece la capacidad de que los usuarios interactúen con objetos físicos y ubicaciones mediante páginas o aplicaciones web. Para la transmisión de contenido se emplea Bluetooth de baja energía por su ubicuidad, eficiencia y bajo consumo energético.
- **Multicast DNS (mDNS):** El sistema de nombres de dominio multidifusión se asemeja al DNS común y se usa únicamente en redes pequeñas para la resolución de direcciones IP; emplea UDP de multidifusión para resolver nombres de hosts.
- **Universal Plug and Play (UPnP):** Está conformado por un conjunto de protocolos de red orientados al descubrimiento y establecimiento de servicios de comunicación e intercambio de datos. Se usa generalmente para establecer conexiones dinámicas entre dispositivos y plataformas informáticas.

Protocolos de datos

Estos protocolos se encuentran relacionados con el acceso, almacenamiento y distribución de datos en un entorno de Internet de las Cosas. Los más utilizados son:

- **MQTT:** Protocolo de comunicación simple, liviano y confiable basado en publicación-suscripción que brinda una distribución de mensajes de uno a muchos ya que varios clientes se pueden conectar a un servidor; además consume poca energía y maneja un ancho de banda reducido, por lo cual es uno de los más populares en el campo de IoT. Los clientes tienen la capacidad de enviar (publicadores) y recuperar mensajes del servidor (suscriptores). Se fundamenta en el principio de la jerarquía de los temas (topics) y funciona sobre TCP (Lea, 2020).

- MQTT-SN: MQTT para redes de sensores es extremadamente confiable con un bajo uso de ancho de banda, resulta conveniente su implementación en sistemas de bajo consumo y costo.
- CoAP: El protocolo de aplicación restringida se emplea para la transferencia web entre dispositivos y redes restringidas, generalmente con pérdidas y de bajo consumo. Los dispositivos restringidos comúnmente poseen como máximo un procesador de 8 bits y al menos una memoria RAM.
- Extensible Messaging and Presence Protocol (XMPP): Protocolo extensible de mensajería y presencia desarrollado para middlewares enfocados a mensajes XML (Extensible Markup Language). Maneja un intercambio de datos casi en tiempo real, es de código abierto y posee una arquitectura de cliente-servidor.
- SOAP (Simple Object Access Protocol): Se emplea para el intercambio de información en servicios web mediante XML, generando una independencia del lenguaje y plataforma.
- REST (Representational State Transfer): Los servicios web que utilizan este protocolo se conocen como RESTful, no tienen estado y permiten la interoperabilidad entre dispositivos, esto provoca que los sistemas sean escalables, rápidos y confiables. Emplea los métodos HTTP para la transferencia de datos y responde a las solicitudes con una carga útil en formato HTML, XML o JSON (Herrero, 2020).
- WebSocket: Es un protocolo de la capa de aplicación del modelo OSI que soporta canales de comunicación full-duplex mediante una sola conexión TCP; fue creado por IETF y es compatible con HTTP.

Protocolos de identificación

Este conjunto de protocolos se encarga de identificar de manera única a cada dispositivo IoT.

Los más relevantes son:

- Electronic Product Code (EPC): Sistema de identificación de código de producto electrónico, se desarrolló para ser utilizado de manera universal y proporcionar identidades únicas a todos los objetos. Su representación oficial se conoce como URI de identidad pura.
- uCode: Está orientado a la identificación única de objetos a través de etiquetas de 128 bits, no depende de la tecnología ni de la aplicación. Estas etiquetas se las puede clasificar en: impresas, acústicas, RF activas, infrarrojas activas y RFID pasivas.
- Uniform Resource Identifier (URI): Se emplea para reconocer recursos de manera individual mediante cadenas de caracteres, las cuales son consideradas uniformes por un conjunto definido de reglas de sintaxis.

Protocolos para la gestión de dispositivos

La tendencia de IoT provoca que cada vez se desplieguen más nodos alrededor del mundo destinados a diversas aplicaciones. En algunos casos no es posible administrar adecuadamente los equipos, es por esto que se ha trabajado en el desarrollo de protocolos destinados a la gestión remota. Los más conocidos son:

- TR-069: Denominado también informe técnico 069, se basa fundamentalmente en la configuración de dispositivos a través de servidores de configuración automática (ACS) en Internet. Las especificaciones técnicas se centran en la capa de aplicación para la gestión remota de CPE (Customer Premises Equipment) sobre redes IP.
- OMA-DM: Este protocolo fue definido por los grupos de trabajo OMA (Open Mobile Alliance) y DS (Data Synchronization) con el fin de crear especificaciones técnicas para la gestión de dispositivos. DM (Device Management) posee algunas funciones de administración como configuración, actualizaciones, gestión de errores, entre otras que pueden ser implementadas en el extremo de un equipo. Posee un modelo de comunicación de solicitud-respuesta, el

servidor inicia la comunicación con el cliente de manera asíncrona mediante notificaciones SMS (Perros, 2021).

Protocolos semánticos

Este grupo de protocolos está enfocado en el significado y lógica detrás del formato de los datos y la conectividad, son desarrollados para ser modulares y multioperables. Los principales son:

- JSON-LD (JavaScript Object Notation for Linked Data): Protocolo ligero basado en la codificación en JSON de datos vinculados, la representación de los datos resulta bastante comprensible para las personas y es adecuada en ambientes de datos no estructurados y RESTful, los cuales funcionan en la web. Permite la existencia de una red de datos estándar, legible e interoperable.
- Web thing model: Se basa en el intercambio de datos en WoT (Web of Things) entre dispositivos compatibles y con el protocolo web RESTful. La Web de las cosas se enfoca en la transformación de la tradicional Web de páginas, con el objetivo de brindar direcciones URL para los nodos conectados a través de Internet, promoviendo la interoperabilidad.

Interoperabilidad en IoT

Con el crecimiento y popularidad de IoT, existen cada vez más fabricantes y desarrolladores de nodos inteligentes, por lo cual resulta esencial generar soluciones uniformes estandarizadas para que pueda existir una interfaz entre sistemas de hardware, software o middleware que permita la comunicación e intercambio de datos entre dispositivos, sin depender del fabricante, modelo o plataforma (Lea, 2020). La interoperabilidad afronta problemas como:

- La heterogeneidad en los dispositivos debido a los protocolos de comunicación, lenguajes de programación, plataformas de hardware, sistemas operativos, bases de datos, representación de datos y modelos de control.

- La existencia de varias configuraciones de los equipos como la frecuencia, velocidad de transmisión, protocolos, sintaxis, idioma, entre otros.
- La variedad de soluciones para el manejo de datos, aplicaciones y plataformas.
- Las soluciones propietarias que no son económicas ni reutilizables.

Frameworks

Los marcos o entornos de trabajo son un conjunto de conceptos estandarizados, en este caso orientados a resolver inconvenientes relacionados a la interoperabilidad.

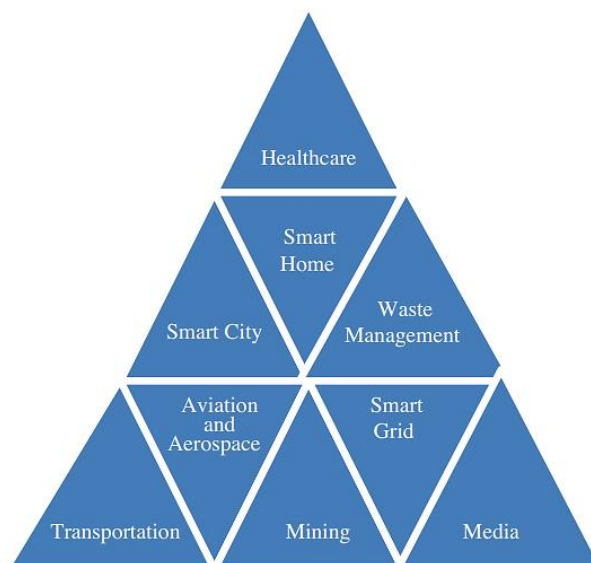
- AllJoyn: Es un software de código abierto basado en un modelo cliente-servidor que permite la interoperabilidad entre dispositivos y aplicaciones mediante el uso de un bus de mensajes D-Bus. Se comunica mediante Wi-Fi y el servidor posee un archivo XML que describe sus capacidades y funcionalidades denominado archivo de introspección.
- IoTivity: Es un framework de código abierto compatible con AllJoyn utilizado en múltiples aplicaciones, emplea CoAP en la capa de aplicación y en la capa de red utiliza la comunicación mediante IP. Las tecnologías de conectividad que se pueden usar en este protocolo son varias como Thread, Z-Wave, Bluetooth, Ethernet, Wi-Fi, entre otras. Permite la comunicación alámbrica e inalámbrica a través de Internet, brindando interoperabilidad entre dispositivos IoT (Nayak et al., 2021).
- HomeKit: Framework desarrollado por Apple que permite la integración con su sistema operativo y se enfoca en la automatización del hogar, ofrece la capacidad a los usuarios de interactuar mediante comandos de voz. Los dispositivos que no pertenecen a HomeKit pueden integrarse por concentradores o puertas de enlace a través de Wi-Fi o Bluetooth.

Aplicaciones de IoT

IoT es una tendencia novedosa basada en una red de objetos inteligentes interconectados, empleada para recopilar datos. Con el pasar del tiempo este modelo tecnológico ha ganado popularidad en varios sectores de la industria, ya que muchas aplicaciones pueden ser diseñadas, desarrolladas e implementadas en función de las características de Internet de las Cosas. Existen planes de desarrollo para que esta tecnología forme parte de la vida diaria de las personas, aumentando el bienestar y simplificando la vida laboral, pero hay que tener en cuenta que su implementación lleva tiempo. Algunas de las áreas más comunes y con mayor relevancia donde se aplica IoT se aprecian en la Figura 6.

Figura 6

Dominios de aplicación IoT



Nota. Tomado de *Domains supported by IoT* (p.5), por Alhafidh y Allen, 2016.

Internet de las Cosas se puede integrar a una variedad de aplicaciones, ofreciendo una gran cantidad de oportunidades en la industria, pero también surgen retos que deben ser atendidos para que este modelo tecnológico siga creciendo. Algunos de los desafíos varían dependiendo del campo de aplicación como se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2*Desafíos en aplicaciones*

| Aplicaciones/Retos | Seguridad | Aspectos legales y sociales | Gran escala | Privacidad | Confiabilidad | Heterogeneidad |
|--------------------------------|------------------|--|------------------------|-------------------|----------------------|-----------------------|
| Sistema de cuidado de la salud | X | X | X | X | X | X |
| Ciudad inteligente | X | X | - | X | X | X |
| Hogar inteligente | - | - | - | - | X | X |
| Video vigilancia | X | - | - | - | X | X |
| Movilidad Inteligente | X | - | - | - | X | X |
| Energía y red inteligente | X | X | - | X | X | X |
| Logística inteligente | - | X | X | X | - | - |
| Monitorización del ambiente | X | - | X | - | X | X |

Nota. Recuperado de *Challenges in applications* (p.39), por Alam et al., 2020.

Smart Home

El concepto de hogar inteligente puede comprender el control centralizado de sistemas de aire acondicionado, iluminación, seguridad, electrodomésticos y otros equipos con el fin de ofrecer una mayor comodidad, eficiencia energética y seguridad (El-Azab, 2021). Los objetos inteligentes pueden ser controlados mediante comandos de voz o de forma remota por aplicaciones. Existen tres elementos para tener la mejor experiencia y gozar de todas las características que ofrece un hogar inteligente, estas son:

1. Dispositivos domésticos inteligentes.

2. Hubs o asistentes de voz digitales.
3. Apps con acceso online.

Existe todavía el pensamiento de que los objetos domésticos inteligentes no son importantes ya que realizan la automatización de tareas que una persona las puede realizar fácilmente, pero hay que tener en cuenta que esta forma de pensar se asemeja a la primera aparición del control remoto, por lo cual se espera que los hogares inteligentes se vuelvan comunes como el control de una televisión (Wilson et al., 2017).

Dispositivos en hogares inteligentes

A medida que las personas se percatan de la relevancia de un hogar inteligente, surgen nuevos fabricantes y se incrementa la gama de dispositivos. Algunos de los equipos que se tiene actualmente son:

- **Sistemas de iluminación inteligente:** Incluye focos inteligentes y un puente conectado al enrutador controlados mediante una app, control remoto o asistente de voz. Estos sistemas poseen varias configuraciones para que el usuario pueda tener el mayor control a tal punto de poder crear efectos artísticos.
- **Termostatos inteligentes:** Son empleados en los sistemas de calefacción para ajustar la temperatura, encender o apagar el equipo según la conveniencia del usuario, permite ahorrar dinero ya que se tiene un mejor control del sistema.
- **Sistemas de seguridad inteligentes:** Mediante una aplicación se tiene la capacidad de controlar y supervisar cámaras y demás elementos implementados en el sistema.
- **Cerraduras inteligentes:** Son un importante elemento en la seguridad del hogar, pueden funcionar con tarjetas de acceso, aplicaciones, llaveros, comandos de voz o mediante una clave.

- Cámaras inteligentes: Se pueden emplear para monitorear cierta habitación dentro de la vivienda o el exterior de la misma.
- Enchufes inteligentes: Brinda un mayor control del encendido y apagado de los equipos del hogar.
- Limpiadores robóticos: Se enfocan en la automatización de las tareas de limpieza en la vivienda.

Los dispositivos empleados en Smart Home pueden emplear diferentes formas de comunicación inalámbrica como Zigbee, Z-Wave y Bluetooth, pero la más popular es Wi-Fi. Si una de estas tecnologías llega a fallar, los equipos pueden operar de manera manual hasta que el sistema pueda funcionar adecuadamente (Marikyan et al., 2019). Otros dispositivos domésticos inteligentes que se pueden encontrar son: teteras, persianas, acondicionadores de aire y humidificadores inteligentes.

Asistente de voz digital

Representa un elemento importante para la automatización del hogar, se compone de un altavoz autónomo para interactuar con el usuario y utiliza la conexión Wi-Fi para brindar información desde la nube. Algunas de las funcionalidades que se pueden destacar son: contar un chiste, reproducir música, noticias actuales y el control de los objetos domésticos inteligentes. Los asistentes de voz más conocidos son:

- Google Home y el Asistente de Google.
- Amazon Echo y Alexa.
- Apple HomePod y Siri.

Cabe recalcar que existen dispositivos domésticos inteligentes que no permiten su control por comandos de voz, pero actualmente la compatibilidad con estos asistentes es un factor clave a tener en cuenta por los fabricantes.

Apps para un hogar inteligente

Una app permite controlar los dispositivos inteligentes del hogar mediante una interfaz sencilla, puede ser utilizada tanto dentro como fuera de la vivienda. Ofrece una gran variedad de funcionalidades dependiendo del equipo, así como:

- Escenas predeterminadas.
- Temporizadores para la activación o desactivación en determinados momentos.
- Creación de rutinas personalizadas.
- Encendido y apagado de los dispositivos.

Smart home hubs

Un asistente de voz digital puede funcionar como un hub ya que trabaja como un concentrador para controlar varios dispositivos domésticos inteligentes (Choi et al., 2021). Sin embargo, existen hubs dedicados exclusivamente a conectar y controlar los equipos del hogar, sin la funcionalidad del manejo por comandos de voz.

Trabajos relacionados

En el trabajo presentado por López (2022) se diseñó e implementó un sistema Smart Home basado en IoT para monitorear ciertas variables meteorológicas y controlar de forma remota dispositivos como luces, termostato, alarma, e incluso un huerto gracias al uso de nodos inteligentes que tienen como componente principal placas de desarrollo Arduino. En la implementación se desarrolló un prototipo que permite comprobar las funcionalidades del sistema, el mismo que opera mediante la red WiFi para que los dispositivos se conecten a la plataforma de IoT Cloud. El sistema permite el control mediante comandos de voz ya que se integró el servicio de Amazon Alexa, además tiene acceso a la red Sigfox para enviar datos a la plataforma ThingSpeak y a un servidor privado. Una de las limitaciones que presenta la plataforma IoT Cloud son las pocas funcionalidades e integraciones que

ofrece su plan gratuito, por lo cual resulta necesario contratar una suscripción de pago para extender sus características. Por otro lado, la red Sigfox puede ser empleada como una alternativa en caso de no existir WiFi en el lugar.

(Mayub et al., 2019) implementó un sistema de hogar inteligente utilizando la red inalámbrica mediante los protocolos REST y MQTT para controlar la iluminación, aire acondicionado y la puerta de garaje del hogar. Los dispositivos IoT se basan en las placas de desarrollo ESP8266 y Raspberry Pi que permiten un control físico y remoto del sistema mediante una interfaz de usuario e incluso un chatbot. Con respecto a la programación de los nodos, se utilizó el entorno de Arduino para la programación del ESP8266 y el lenguaje de Python para la Raspberry Pi. Además del uso de PHP y JavaScript para la programación en la plataforma de código abierto m-Platform, donde se desarrolló la aplicación web.

El trabajo (Goud & Sivakami, 2019) plantea el uso del servicio web IFTTT (IF This, Then That) junto con la plataforma Google Assistant para controlar los nodos basados en placas NodeMCU. La plataforma de Google permite controlar una gran cantidad de dispositivos, incluso con comandos de voz; además, con la implementación de IFTTT y el protocolo MQTT se puede eliminar la necesidad de un servidor externo. El sistema desarrollado es de bajo costo y se puede mejorar, incluyendo tecnologías como la inteligencia artificial y machine learning.

Los autores (Isyanto et al., 2020) proponen el diseño e implementación de una aplicación de Smart Home con comandos de voz mediante la aplicación de Google Assistant disponible para teléfonos inteligentes. Google Assistant emplea comandos de voz sencillos para controlar los diferentes nodos del sistema, pero hay que tener en cuenta que se necesita una buena conexión a Internet y pronunciar correctamente los comandos para que no exista ningún problema de funcionamiento. La finalidad de este proyecto es ayudar a las personas discapacitadas a mejorar su calidad de vida en el hogar mediante el control por comandos de voz de dispositivos como: televisores, luces y ventiladores; las anomalías

físicas limitan las actividades que puede realizar una persona por esto se emplea un control por comandos de voz que ofrece una mayor comodidad para los usuarios.

El trabajo de Camarena (2019) propone la instalación de un sistema de hogar inteligente con la ayuda de plataformas de software libre. Los protocolos de comunicación que se utilizaron son: ZigBee para los nodos inteligentes de la marca Xiaomi y MQTT para los dispositivos Sonoff basados en el chip ESP8266, cabe recalcar que es necesario el cambio de firmware a Tasmota en los nodos de la marca Sonoff. La integración del sistema se realiza mediante la plataforma openHAB, consiguiendo un sistema que mejora la calidad de vida de las personas en el hogar.

(Quimiz & Trujillo, 2022) desarrollaron un prototipo de sistema de seguridad inteligente con las tecnologías del Internet de las Cosas y el Sistema Global de Comunicaciones Móviles mediante una de las placas de desarrollo más accesibles del mercado por su precio y funcionalidad en el sector de IoT como lo es Arduino. Los principales componentes del sistema son: sensor PIR, buzzer, relé, LCD, teclado 4x4, cámara IP, baterías y paneles solares como su fuente de energía, mientras que para su operación y monitoreo se realizó una página web con MongoDB como sistema de base de datos y NodeJS para el desarrollo de la plataforma.

Los autores (Chávez & Velecela, 2021) implementaron un sistema de hogar inteligente enfocado a la seguridad, confort y eficiencia energética. El protocolo de comunicación de red empleado fue KNX, el cual se basa en el modelo OSI y en la pila de comunicaciones del EIB (European Installation Bus). Entre los elementos utilizados destacan los sensores de: ruptura de vidrios o cristales, movimiento, inundación, magnético y crepuscular para detectar la intensidad de luz.

(Cornel-Cristian et al., 2019) presentan la implementación del protocolo MQTT en un sistema domótico inteligente con el objetivo de analizar las ventajas y limitaciones de este protocolo de comunicación. Los nodos del sistema se desarrollaron con las placas Wemos D1 mini basadas en el chip ESP8266, sensores de temperatura y humedad, e interruptores relés para controlar el apagado y

encendido de diferentes electrodomésticos. El sistema consta de dos Raspberry Pi 3B+, una es utilizada como servidor para el protocolo MQTT y en la otra se instala la plataforma de código abierto OpenHAB, la cual tiene la capacidad de integrar diferentes dispositivos mediante dicho protocolo. La herramienta utilizada para verificar el funcionamiento del sistema se denomina MQTT Explorer, con la cual se aprecia el historial de los mensajes enviados. La implementación de este sistema permite demostrar la viabilidad del protocolo MQTT para una comunicación bidireccional entre los nodos inteligentes de manera rápida y segura. Además, resalta el hecho de que el sistema depende del bróker MQTT, el cual representa un punto crítico de falla.

En el trabajo desarrollado por (YALÇINKAYA et al., 2020) se puso a prueba el protocolo de comunicación MQTT en distintos escenarios para determinar si es adecuado implementarlo en un sistema de Smart Home, se colocaron varios sensores y actuadores como nodos IoT para comprobar el desempeño de MQTT. Los resultados obtenidos fueron que el sistema con todos los publicadores y suscriptores conectados funciona correctamente, pero si la aplicación móvil se ejecuta en una red distinta a la que se encuentran conectados los dispositivos IoT evidencia problemas de retraso en el sistema.

(Moreno Hernández, 2020) implementó un sistema de hogar inteligente para la detección de fugas de gas (MQ-135), alerta de incendios (KY-026), automatización del riego de plantas (sensor capacitivo de humedad del suelo V1.2) y el monitoreo de temperatura y humedad (DHT11). Se utilizó el ESP32 para el desarrollo de los diferentes nodos IoT por su bajo costo y consumo de energía, así como el protocolo de comunicación MQTT por su bajo coste computacional y simpleza. Toda la lógica del sistema se manejó mediante Node-RED.

En el artículo de (MacHeso et al., 2021) se presenta una automatización de Smart Home utilizando como nodo IoT un NodeMCU ESP8266 y un sensor de temperatura y humedad DHT 22. Se

utilizó Node-RED como herramienta de programación instalada sobre una Raspberry Pi 3B+, y el bróker MQTT open source Mosquitto para el protocolo de comunicaciones.

La investigación llevada a cabo por Cabrera (2019) examina el uso de la plataforma de código abierto Home Assistant en una Raspberry Pi, integrando varios dispositivos inteligentes de diferentes fabricantes. El estudio concluye que Home Assistant es una plataforma adecuada para la integración de dispositivos inteligentes en el hogar, ya que ofrece características de automatización, instalación de paquetes con funcionalidades adicionales (add-ons) como Mosquitto broker, ESPHome, Node-RED y un lenguaje de serialización de datos sencillo (YAML), además de contar con una buena documentación y una activa comunidad de usuarios.

En el artículo de (Blacio et al., 2021) se propone un sistema de automatización de hogar inteligente basado en la tendencia de IoT, teniendo en cuenta las problemáticas como la interoperabilidad, altos costos y el uso inadecuado del sistema. Emplea una Raspberry Pi como servidor, en la cual se encuentra instalado el software de Home Assistant que permite controlar remotamente los dispositivos con una interfaz gráfica amigable. Los nodos se basan en las placas de desarrollo NodeMCU ESP8266 que junto con los asistentes virtuales pretenden mejorar la experiencia del usuario con el sistema. Este trabajo presenta una arquitectura viable, de bajo costo y escalable para un sistema heterogéneo de hogar inteligente.

En el trabajo de (Chimbolema, 2020) se implementó un sistema de control domótico con IoT y realidad aumentada. Los dispositivos utilizados fueron: focos y enchufes inteligentes de la marca Nexxt, los cuales pueden ser controlados mediante el asistente de voz de Google Home y la aplicación móvil para Android que permite visualizar objetos en 3D desarrollada con la herramienta Unity. El servidor se implementa en una Raspberry Pi3 B+ con el sistema operativo de Home Assistant, el cual presentó buenos resultados en cuanto al procesamiento de datos y conectividad, además permite gestionar de mejor manera los nodos IoT y el protocolo MQTT gracias a la herramienta Node-Red.

En el artículo (Pooja et al., 2019) se detalla el desarrollo de un hogar inteligente de bajo costo basado en FPGA, con el fin de superar las barreras de los microprocesadores y microcontroladores ya que una FPGA es más flexible, puede mejorar la eficiencia energética y reducir costos. Se utilizó tecnología SMS y la red GSM para la comunicación entre dispositivos. El sistema se diseñó empleando VHDL en Xilinx en una FPGA Spartan-6, teniendo como ventaja el paralelismo que resulta útil a medida que se conecta un mayor número de cargas y aumenta la complejidad computacional.

(Hua, 2020) desarrolló un sistema de hogar inteligente basado en una FPGA (Artix-7), la cual realiza el procesamiento de los datos para transmitirlos y visualizarlos en un equipo terminal mediante una interfaz. El sistema puede realizar tareas de forma simultánea, disminuyendo el tiempo de ejecución de las mismas y mejorando la experiencia de usuario. Se utilizaron sensores de luz y temperatura para recopilar datos del entorno mediante Bluetooth, por lo que una mejora propuesta es la implementación del sistema a través de una red WiFi para mejorar la distancia de transmisión de los dispositivos inalámbricos.

En el artículo (Hijazi et al., 2021) se realizó una prueba de estrés del protocolo MQTT en una red IoT privada para analizar las propiedades de rendimiento, tales como: delay, jitter, pérdida de paquetes y throughput en distintos escenarios. Con las pruebas realizadas se pudo demostrar que MQTT funciona de manera perfecta, confiable y en tiempo real para una pequeña cantidad de mensajes, pero pierde su eficiencia cuando la carga de la red es muy alta. Este protocolo ofrece tres niveles de calidad de servicio: a lo sumo una vez (QoS0), al menos una vez (QoS1) y exactamente una vez (QoS2). En un sistema en tiempo real los resultados obtenidos fueron que el nivel de QoS no afecta al retardo y QoS1 es la mejor opción en cuanto a rendimiento y pérdida de paquetes. Por otro lado, en un escenario que no es en tiempo real, QoS0 tiene menor retardo y QoS2 posee el mejor desempeño en cuanto al throughput y la pérdida de paquetes. Con respecto al jitter los sistemas en tiempo real presentan los mejores resultados.

En el presente trabajo de titulación se plantea el diseño e implementación de un sistema heterogéneo de hogar inteligente para lograr una masificación del uso de IoT a nivel doméstico mediante soluciones de bajo costo. La principal contribución de esta tesis es el desarrollo de un nodo basado en FPGA, ya que al ser una tendencia nueva existen pocos ejemplos y librerías. Otro aporte significativo es el análisis de desempeño y consumo de energía del sistema. En el capítulo III se presenta el diseño y la implementación de los nodos IoT comerciales y desarrollados en una red Smart Home mediante el protocolo MQTT.

Capítulo III: Diseño e Implementación del Sistema

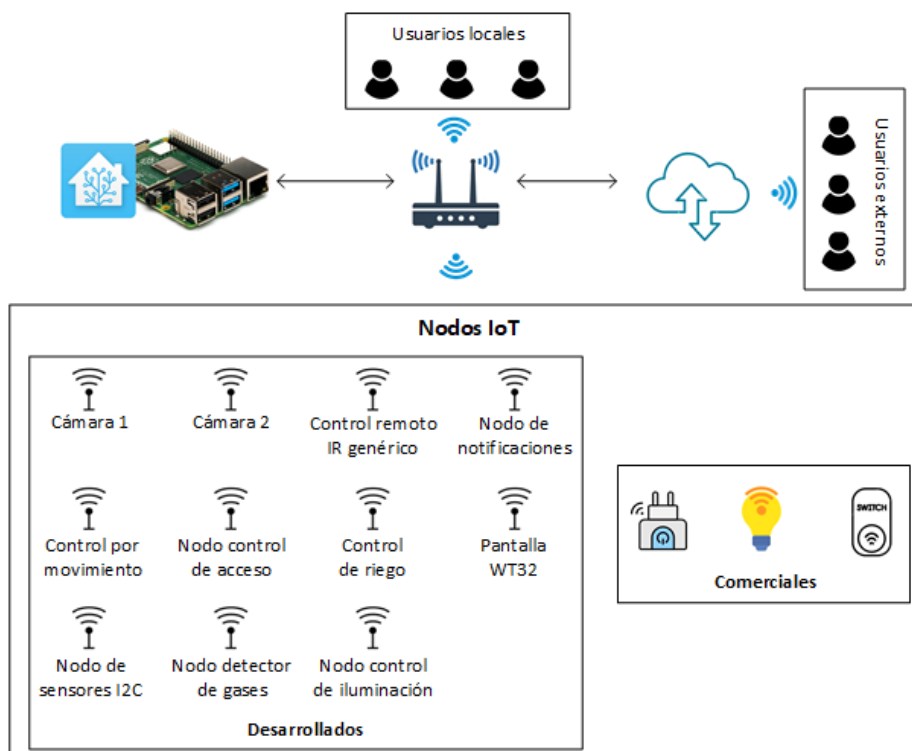
En este capítulo se presenta el diseño, las características y funcionalidades del sistema de hogar inteligente, además de las especificaciones e implementación de cada uno de los nodos y el proceso de conexión del servidor con la nube para brindar acceso al usuario fuera de la red local.

Diagrama general

En la Figura 7 se observa el diagrama general del sistema heterogéneo de hogar inteligente. Como componente principal se tiene un servidor local implementado en una Raspberry Pi 3 con la plataforma de automatización Home Assistant. El servidor está conectado al router de la casa por medio de un cable de RJ45. De esta manera queda armada la red para que los nodos IoT funcionen inalámbricamente y puedan ser controlados mediante una interfaz de usuario de manera local o desde una red externa.

Figura 7

Diagrama sistema de Smart Home



Implementación del servidor

Existen cuatro opciones de instalación de Home Assistant: Operating System, Container, Supervised y Core, de las cuales la primera ofrece una mayor facilidad y mejores características siendo éste instalado en la Raspberry Pi 3 Modelo B de 64 bits. Dentro del sistema se puede realizar varias integraciones, una de las más importantes, es la de Mosquitto bróker, en donde se configura el puerto, nombre de usuario y contraseña para la comunicación mediante el protocolo MQTT con los diferentes nodos.

Descripción de los elementos del servidor

Home Assistant. Es un software gratuito de código abierto escrito en Python 3 para la automatización del hogar que opera como un sistema de control central de dispositivos domésticos inteligentes, priorizando el control local y la privacidad (Jiménez, 2020). Los archivos de configuración de los distintos componentes y entidades que conforman el sistema se encuentran en el formato de serialización de datos YAML (Yet Another Markup Language).

Esta plataforma brinda varias alternativas para controlar a los dispositivos inteligentes, entre las que destacan el control por interfaz gráfica y comandos de voz. Esta última se puede realizar con la ayuda de un asistente virtual como Google Assistant o Alexa (Sánchez, 2021).

La principal ventaja de este sistema es que cuenta con muchas integraciones, por lo que se puede conectar con casi cualquier dispositivo inteligente, ya sea de forma nativa (MQTT, Bluetooth, Zigbee) o por una integración personalizada. Una vez integrados los nodos IoT se pueden establecer las automatizaciones que el usuario desee.

Se basa en tres reglas para el control del sistema:

- **Trigger:** Permite lanzar la nueva regla.
- **Condition:** Son las condiciones que permiten ejecutar la regla.

- **Action:** Acción que realiza la regla.

Además, permite el uso de scripts para extender la funcionalidad de la plataforma.

Figura 8

Logo de Home Assistant



Nota. Tomado de *Logo*, por Home Assistant, 2022, (<https://www.home-assistant.io>).

Raspberry Pi 3 Modelo B. Es una computadora de placa reducida que cuenta con 40 pines que pueden ser configurados como entradas o salidas digitales a los que se pueden conectar diferentes elementos (Figura 9). Tiene un procesador ARM Cortex-A53 de 64 bits y 4 núcleos que funcionan a 1,2GHz, aumentando su potencia y velocidad si se lo compara con anteriores versiones de esta placa. Además, agrega conectividad inalámbrica: IEEE 802.11.b/g/n en la banda de 2.4 GHz, Bluetooth 4.1 y un puerto Ethernet que puede alcanzar una tasa de transmisión de 100 Mbps. Incluye una ranura en la cual se puede incorporar un medio de almacenamiento como una tarjeta de memoria SD, misma que resulta esencial para su funcionamiento (UNIT Electronics, 2020).

Figura 9

Raspberry Pi 3 Modelo B



Nota. Tomado de *Raspberry Pi 3 Modelo B*, por UNIT Electronics, 2020, (<https://uelectronics.com/producto/raspberry-pi-3-modelo-b>).

Dispositivos inteligentes desarrollados

A continuación, se describe los nodos inteligentes desarrollados en el presente trabajo de titulación. El código de programación de todos los nodos desarrollados para el sistema de hogar inteligente se encuentra en el Apéndice 1.

Nodo cámara inteligente

Este nodo está concebido como parte del sistema de seguridad al hogar, el cual consta de dos cámaras con las mismas características y funcionalidades. Este dispositivo inteligente emplea la placa de desarrollo ESP32-CAM y un sensor PIR para detectar movimiento. Desde la interfaz se puede visualizar el video en tiempo real, controlar la activación del flash de la cámara y enviar notificaciones al mail del usuario. El contenido del mensaje es una foto tomada en el instante que se detecta movimiento que a su vez se guarda en la memoria microSD. Además, se envía una notificación accionable a todos los celulares que tengan instalada la aplicación del sistema a través de la cual se puede activar una alarma.

Figura 10

Diagrama de bloques nodo cámara

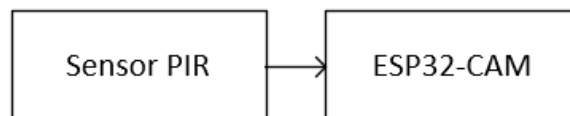
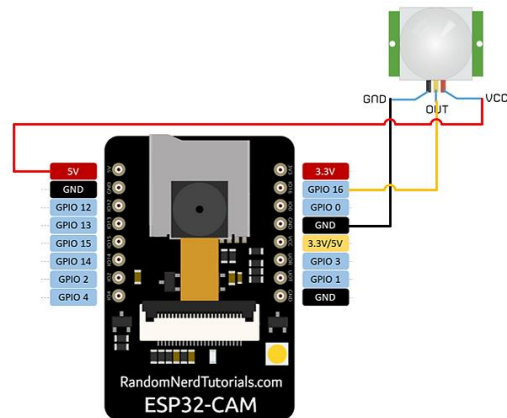


Figura 11*Conexiones nodo cámara*

Passive Infrared sensor (PIR). El sensor PIR, pirólico o pasivo infrarrojo es llamado así debido a que no emite radiaciones, únicamente las recibe. Es un sensor óptico que se emplea para detectar el movimiento de personas en especial en sistemas de iluminación automatizados. Estos dispositivos reaccionan ante determinadas fuentes de energía tales como el calor del cuerpo humano o animales, ya que reciben la variación de las radiaciones infrarrojas del entorno (Adafruit Industries, 2022).

Figura 12*Sensor PIR*

Nota. Tomado de *Motion Detector HC-SR501*, por CorpShadow, 2022, (<https://corpshadow.biz/odroid/motiondetector>).

ESP32-CAM. Es una placa de desarrollo basada en el microcontrolador ESP32. Tiene un módulo de cámara integrado con una resolución de 1080p (1920x1080 píxeles) o inferior. Este dispositivo se puede usar en múltiples proyectos mediante la programación en el entorno Arduino. También ofrece una conectividad Wifi y Bluetooth, pines de entrada/salida GPIO y una conexión para la tarjeta microSD que puede ser utilizada como dispositivo de almacenamiento para fotos o videos (Ai-Thinker Technology, 2021).

Figura 13

ESP32-CAM



Nota. Tomado de *ESP32-CAM*, por Pascual, 2022, Programar fácil (<https://programarfácil.com/esp32/esp32-cam>).

Tabla 3

Configuración MQTT de las cámaras

| Topic | Publicador | Suscriptor |
|----------------------------|------------|------------|
| CAM/01/FLASH | - | X |
| CAM/01/NOTIFICATION | - | X |
| CAM/01/PIR | X | - |
| CAM/02/FLASH | - | X |
| CAM/02/NOTIFICATION | - | X |
| CAM/02/PIR | X | - |

Figura 14

Prototipos nodo cámara

**Figura 15**

Interfaz gráfica de las cámaras

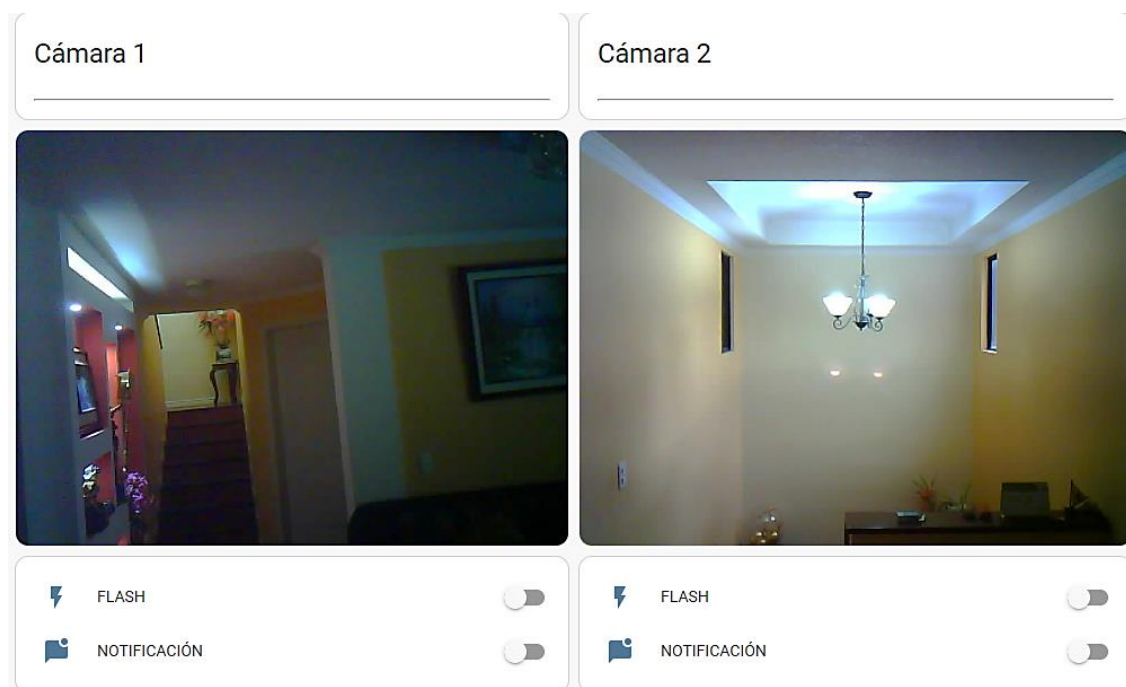
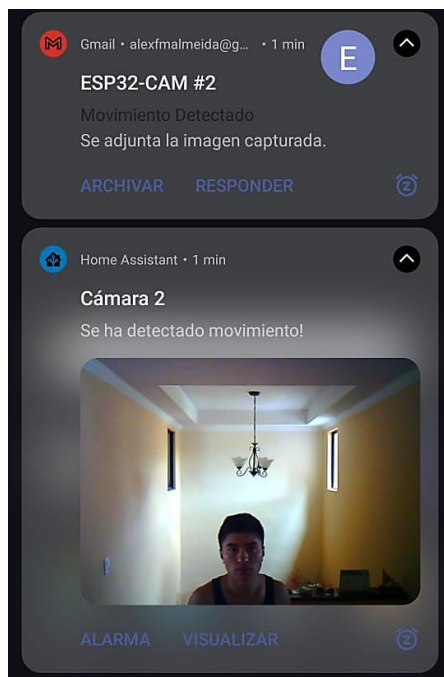


Figura 16

Notificaciones nodo cámara



Nodo control remoto IR genérico

Este nodo IoT está ideado para controlar diferentes electrodomésticos que tengan control remoto con tecnología IR. Está compuesto por un módulo ESP-01, al cual se conecta un receptor IR, así como tres transmisores IR para tener una mayor área de cobertura. Previamente, se necesita configurar los botones del control remoto mediante el receptor para poder operar los aparatos desde la interfaz de Home Assistant.

Figura 17

Diagrama de bloques nodo control IR

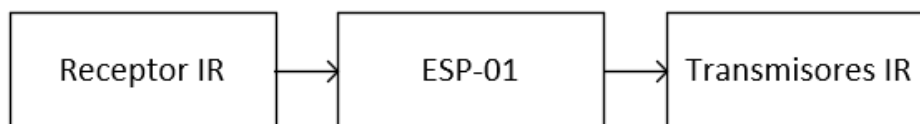
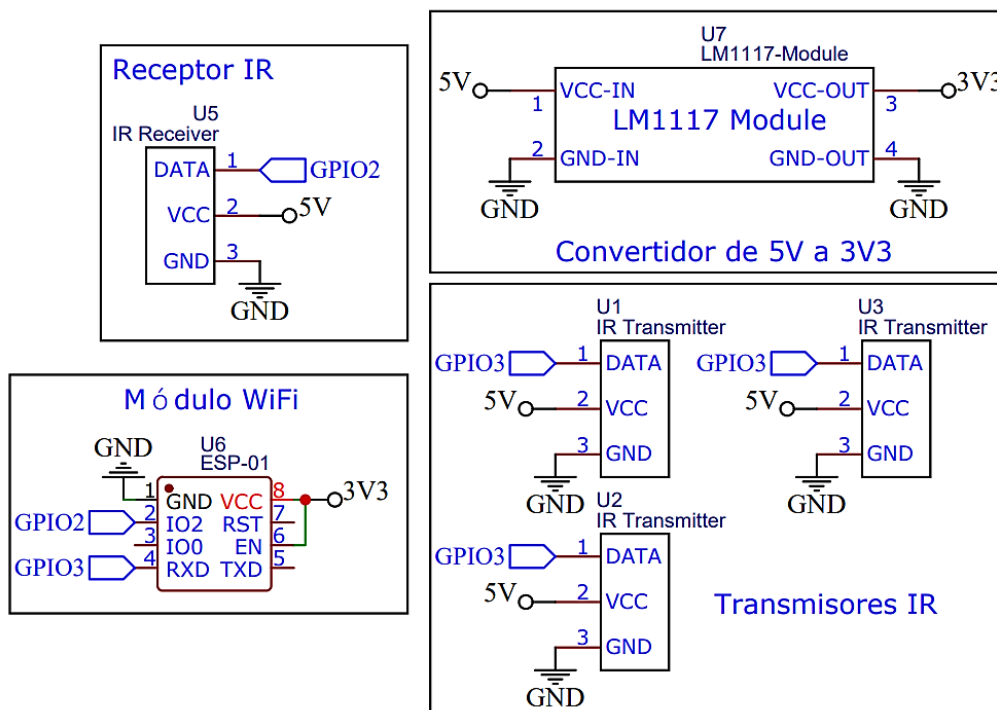
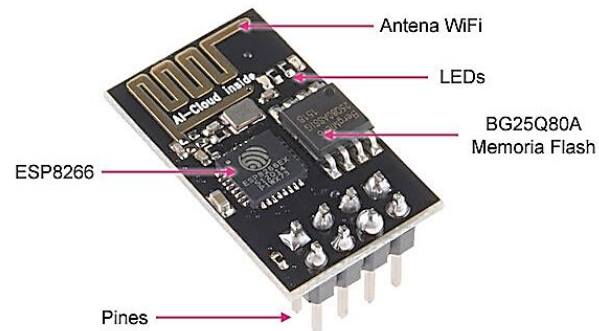


Figura 18

Esquemático nodo control IR



ESP-01. Es un transceptor WiFi basado en el ESP8266 que permite dotar de conectividad inalámbrica a cualquier dispositivo inteligente como un microcontrolador que trabaja en modo stand alone. Trabaja con una tensión de 3.3V y está basado en el SoC ESP8266, un chip altamente integrado compuesto por un potente procesador con arquitectura de 32 bits y conectividad Wifi que puede operar en 2 modos: Estación, en donde el módulo se conecta a la red WiFi que elija el usuario; o Punto de acceso, el cual se usa para crear una red propia en el chip y así conectarse directamente (AI-Thinker, 2015).

Figura 19*ESP-01*

Nota. Tomado de *ESP-01 la placa microcontroladora, por Programar fácil, 2022,*

(<https://programarfacil.com/podcast/como-configurar-esp01-wifi-esp8266>).

Receptor IR. Es un módulo inalámbrico con un fotodiodo u otro elemento sensible a la luz que capta señales infrarrojas emitidas por un control remoto de un electrodoméstico mediante línea de vista (Cable Wholesale, 2022).

Figura 20*Receptor IR*

Nota. Tomado de *Infrared Receiver Module IR For Arduino, por Makers Hut, 2021,* (<https://makers-hut.com/product/infrared-receiver-module-ir-for-arduino>).

Transmisor IR. El transmisor infrarrojo es un diodo emisor de luz que emite radiaciones infrarrojas invisibles al ojo humano, lo cual lo diferencia de un LED normal. Este sensor transmite datos

digitales (lógicos 1 y 0) en forma de luz infrarroja con una respuesta muy buena y estable, en luz ambiente o en completa oscuridad (techzeero, 2018).

Figura 21

Transmisor IR



Nota. Tomado de *IR transmitter*, por techzeero, 2018, (<https://techzeero.com/sensors-modules/ir-sensor>).

Tabla 4

Configuración MQTT nodo control IR

| Topic | Publicador | Suscriptor |
|---------------------|------------|------------|
| ESP01/IR/SAMSUNG/TV | - | X |
| ESP01/IR/NEC/TV | - | X |
| ESP01/IR/RX | X | - |

Figura 22

Prototipo nodo control IR



Figura 23*Interfaz gráfica nodo control IR****Nodo de notificaciones***

Este dispositivo inteligente permite al usuario escuchar ciertos anuncios provenientes de otros nodos IoT que se encuentran integrados en el sistema tales como: detección de gas, alarma, activación bomba de agua, timbre de puerta principal y mensaje de bienvenida del sistema de acceso. Permite controlar el volumen desde la interfaz de usuario y reproducir canciones guardadas en la memoria microSD del dispositivo.

Figura 24

Diagrama de bloques nodo de notificaciones

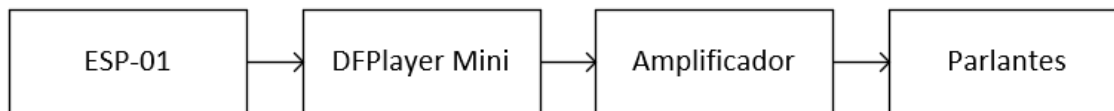
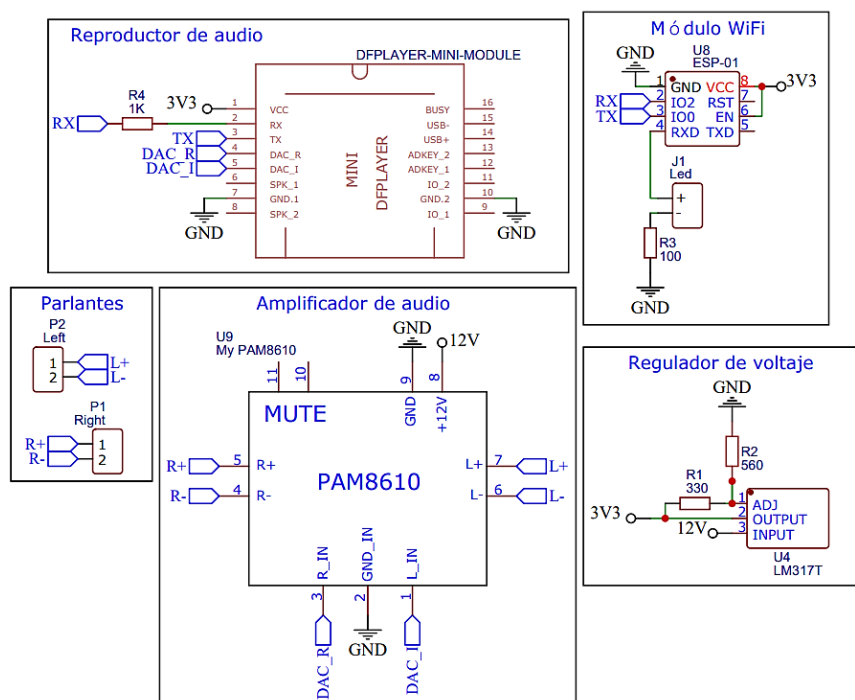
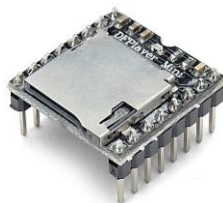


Figura 25

Esquemático nodo de notificaciones



DFPlayer Mini. Esta placa es un pequeño reproductor de audio MP3 con amplificador integrado, utilizada para controlar la reproducción de archivos que se encuentran almacenados en una tarjeta de memoria Micro SD. Tiene dos modos de operación: el primero funciona de forma autónoma mediante la conexión de pulsadores; mientras que, el segundo emplea una comunicación serial para conectarse a cualquier microcontrolador con los pines TX/RX. Este módulo dispone de un amplificador de audio integrado que permite una conexión directa a un altavoz de 4 u 8 Ohm con una potencia de hasta 3 vatios. Los formatos de audio que soporta son: WAV, MP3 y WMA (DFRobot, 2019).

Figura 26*DFPlayer Mini*

Nota. Tomado de *DFPlayer - A Mini MP3 Player*, por DFRobot, 2019,

(https://wiki.dfrobot.com/DFPlayer_Mini_SKU_DFR0299).

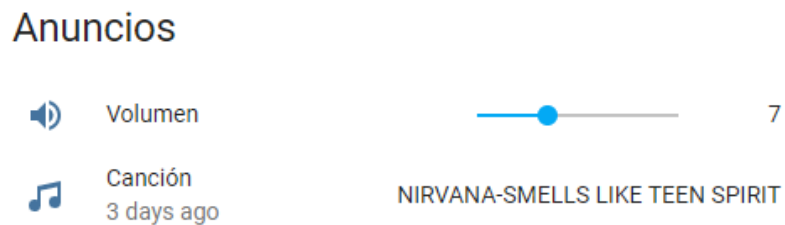
Amplificador PAM8610. Es un amplificador de audio estéreo de clase D que proporciona hasta 10 vatios de potencia de salida por canal en una carga de 8 ohmios. Es conocido por su alta eficiencia (90% o superior), THD+N (Total Harmonic Distortion plus Noise) menor al 0,1% y baja EMI (Electromagnetic Interference). Tiene un tamaño compacto, lo que lo hace idóneo para aplicaciones portátiles y sistemas de audio pequeños con buena calidad de audio (Power Analog Microelectronics, 2008).

Parlantes (Sutinna Portable TV Speaker). Son dos altavoces de 8 ohmios con una potencia nominal de 10 W.

Tabla 5

Configuración MQTT nodo de notificaciones

| Topic | Publicador | Suscriptor |
|------------------------|------------|------------|
| ESP01/DFPLAYER/ALARMA | - | X |
| PIC/TIMBRE | - | X |
| PIC/ACCESO | - | X |
| ESP01/DFPLAYER/BOMBA | - | X |
| ESP01/DFPLAYER/GAS | - | X |
| ESP01/DFPLAYER/VOL | - | X |
| ESP01/DFPLAYER/CANCION | X | X |

Figura 27*Prototipo nodo de notificaciones***Figura 28***Interfaz gráfica nodo de notificaciones****Nodo de control por movimiento***

Este dispositivo IoT es un control remoto por movimiento en forma de cubo, que en este trabajo se lo ha vinculado al nodo de notificaciones para su control. Permite realizar 4 acciones: subir volumen, bajar volumen, retroceder a la canción anterior y pasar a la siguiente canción. Cada acción está sujeta a un giro del cubo: arriba, abajo, izquierda y derecha respectivamente. Esto gracias a que tiene incorporado un acelerómetro y giroscopio. Además, permite medir la temperatura al tener integrado un sensor MPU6050.

Figura 29

Diagrama de bloques nodo de control por movimiento

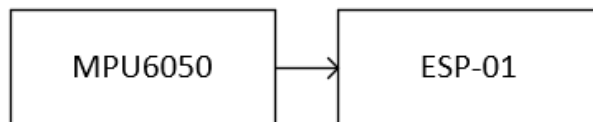
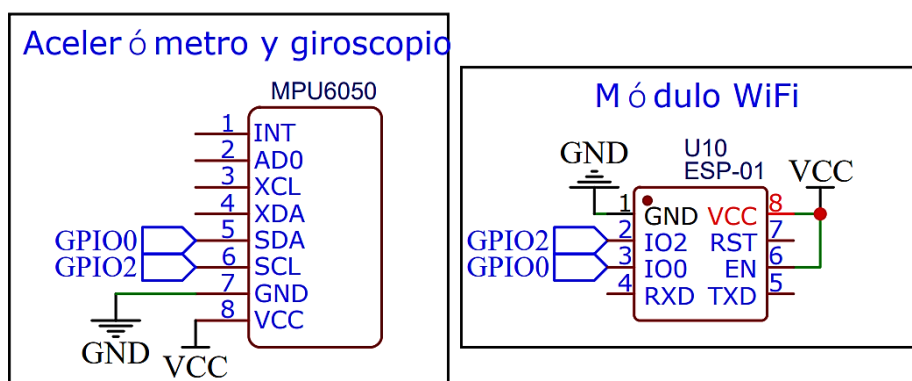


Figura 30

Esquemático nodo de control por movimiento



MPU6050. Es una unidad de medición inercial o IMU (Inertial Measurement Unit) que permite determinar las aceleraciones lineales y angulares en los tres ejes del espacio. Tiene 6 grados de libertad, ya que combina un acelerómetro y giroscopio de 3 ejes cada uno. Este sensor es regularmente utilizado en navegación, goniometría (medición de ángulos), estabilización, entre otros. La comunicación de este módulo se realiza mediante I2C con los pines SCL y SDA, los cuales tienen una resistencia pull-up para conectar directamente al microcontrolador (InvenSense, 2013).

Figura 31*MPU6050*

Nota. Tomado de *MPU6050*, por Xukyo, 2020, AranaCorp (<https://www.aranacorp.com/es/usando-un-modulo-mpu6050-con-arduino>).

Tabla 6

Configuración MQTT nodo de control por movimiento

| Topic | Publicador | Suscriptor |
|------------------------|------------|------------|
| ESP01/DFPLAYER/VOL/DEC | X | - |
| ESP01/DFPLAYER/VOL/INC | X | - |
| ESP01/MPU6050/TEMP | X | - |
| ESP01/DFPLAYER/CANCION | X | - |

Figura 32

Prototipo nodo de control por movimiento

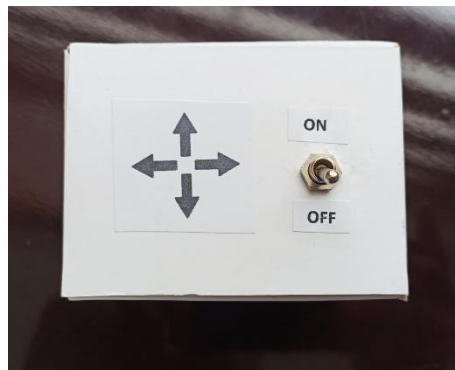
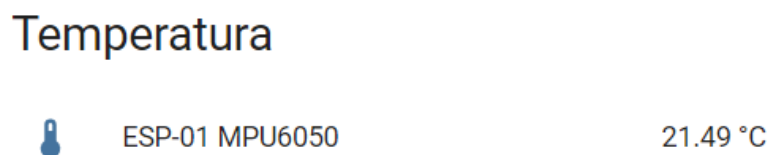


Figura 33

Interfaz gráfica nodo de control por movimiento



Nodo de control de acceso

Este dispositivo inteligente fue concebido para demostrar la posibilidad de transformar cualquier microcontrolador (en este caso un PIC) en un dispositivo IoT. Tiene implementada una aplicación de control de acceso, que permite únicamente el ingreso al domicilio, de las personas que porten las tarjetas o llaveros RFID registrados en el sistema. Consta de una pantalla LCD para mostrar los diferentes mensajes y un timbre para los visitantes. Además, envía notificaciones de los diferentes eventos a los dispositivos móviles que tengan instalada la aplicación Home Assistant.

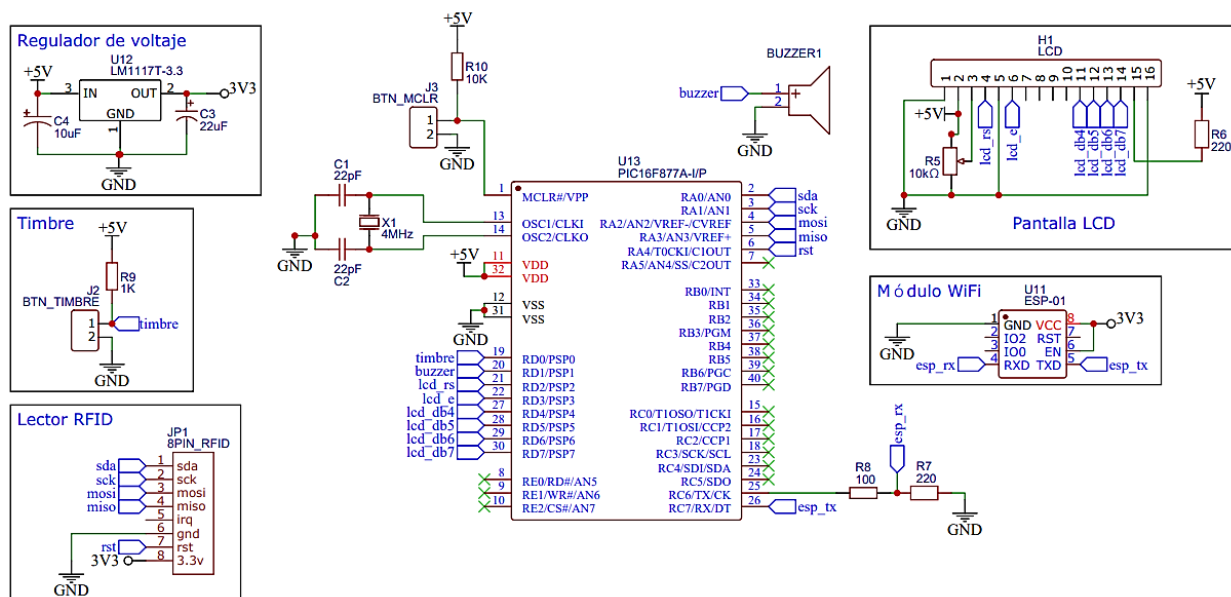
Figura 34

Diagrama de bloques nodo control de acceso



Figura 35

Esquemático nodo control de acceso



RFID RC522. Conocido por su abreviación Radio Frequency IDentification, son sistemas capaces de reconocer a un objeto a través de un identificador único por medio de la radiofrecuencia. Su principio de funcionamiento consiste en pasar un TAG cerca de un lector RFID para el envío de información.

Los TAGs vienen en diferentes modelos como: tarjetas, llaveros o etiquetas adhesivas; tienen internamente una antena y un microchip, lo que permite realizar todo el proceso de comunicación.

Este módulo utiliza un sistema de modulación y demodulación de 13.56 MHz que es la frecuencia característica de la tecnología RFID. El receptor RFID implementa las interfaces: SPI, I2C y UART para comunicarse con otros dispositivos (NXP Semiconductors, 2007).

En la actualidad, están teniendo bastante acogida en sistemas de seguridad, acceso de personal, identificación, logística de productos, llaves de puertas eléctricas, entre otras aplicaciones.

Figura 36*RFID RC522*

Nota. Tomado de *Módulo SunFounder para Arduino*, por Amazon, 2022, (https://m.media-amazon.com/images/I/71wuC+BKB4L._AC_SL1500_.jpg).

LCD 16x2. Es una pantalla de cristal líquido delgada y plana, con una luz de fondo para proporcionar iluminación a cada uno de los píxeles dispuestos en una rejilla rectangular. Este componente cuenta con 2 filas y 16 columnas que se utilizan para presentar cualquier tipo de información que desee el usuario, misma que puede contener los 240 símbolos alfanuméricos frecuentes como signos de puntuación, números, caracteres especiales, letras mayúsculas y minúsculas incluyendo 16 caracteres adicionales que el usuario puede definir, teniendo un total de 256 símbolos. La conexión de este dispositivo se puede realizar mediante un bus de datos de 8 o 4 bits y es compatible con varias plataformas (Keyestudio, 2021).

Figura 37*LCD 16x2*

Nota. Tomado de *Ks0061*, por Keyestudio, 2021,

(https://wiki.keyestudio.com/Ks0061_keyestudio_1602_I2C_Module).

PIC16F877A. Es uno de los microcontroladores más populares en el mercado debido a su flexibilidad y bajo costo. Gracias a su tecnología de memoria flash el usuario puede programar el dispositivo las veces que desee lo que contribuye a la rápida realización de distintas aplicaciones. Posee un total de 40 pines y su voltaje de funcionamiento se encuentra en el rango de 2 a 5.5V. Tiene una memoria EEPROM de 256 bytes para guardar datos de manera permanente y una CPU de 8 bits capaz de ejecutar instrucciones a una frecuencia de hasta 20MHz (Microchip, 2003).

Figura 38

PIC16F877A



Nota. Tomado de *Microcontrolador Pic16f877a*, por MV Electrónica, 2022, (<https://mvelectronica.com/producto/microcontrolador-pic16f877a>).

Tabla 7

Configuración MQTT nodo control de acceso

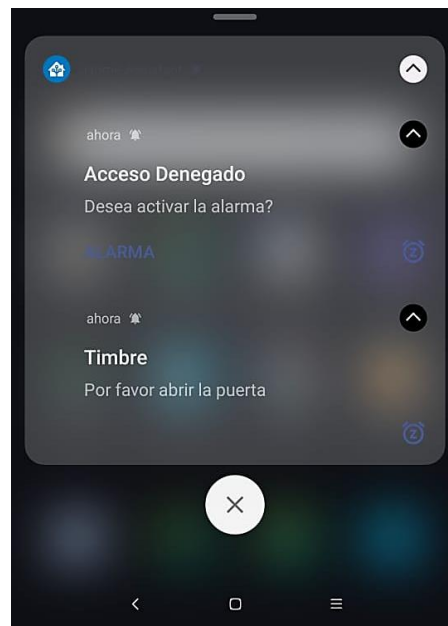
| Topic | Publicador | Suscriptor |
|------------|------------|------------|
| PIC/ACCESO | X | - |
| PIC/TIMBRE | X | - |

Figura 39

Prototipo nodo control de acceso

**Figura 40**

Notificaciones nodo control de acceso



Nodo control de riego

El nodo control de riego permite conocer los valores de temperatura, humedad, luminosidad, humedad del suelo y estado de la bomba de agua, mismos que se pueden visualizar en la interfaz gráfica

de Home Assistant. Uno de los actuadores de este dispositivo es la bomba de agua, la cual se activa o desactiva automáticamente dependiendo del porcentaje de humedad del suelo.

Figura 41

Diagrama de bloques nodo control de riego

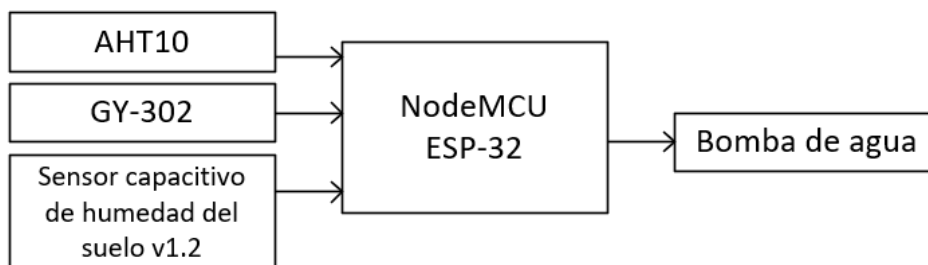
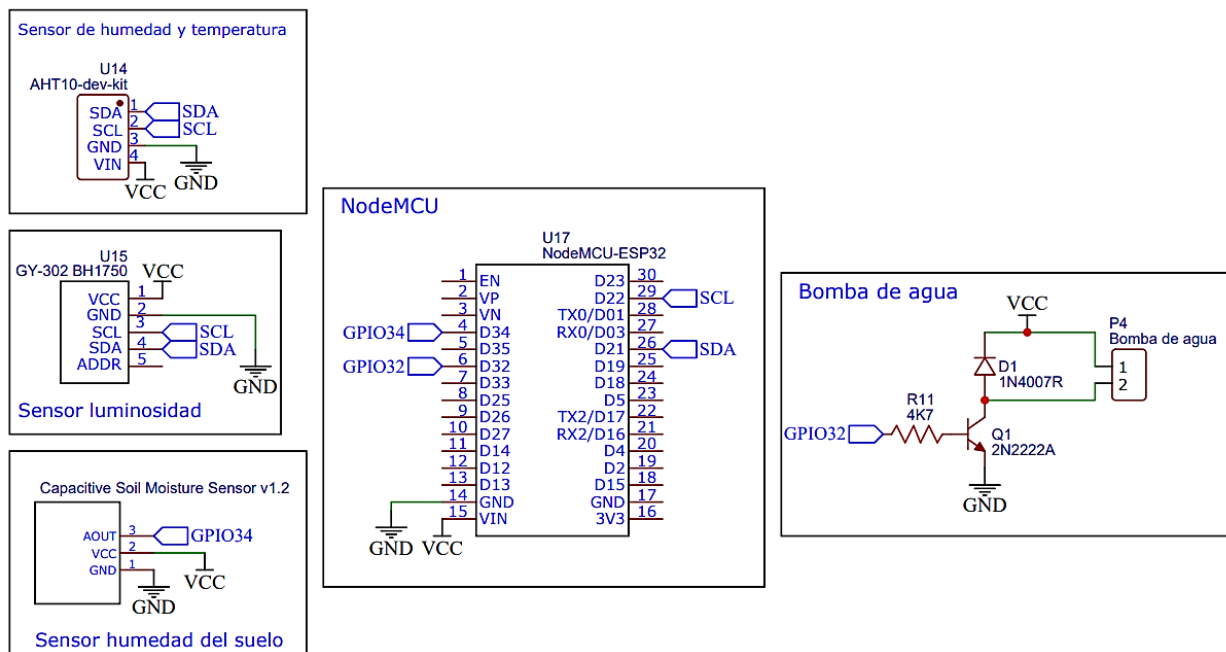


Figura 42

Esquemático nodo control de riego



NodeMCU. Es una placa de desarrollo de bajo costo con hardware y software abiertos que facilita la programación de un microcontrolador (mCU). Una de sus características más importantes es que ofrece conexión a internet mediante WiFi, de modo que permite desarrollar aplicaciones de IoT

mediante Arduino IDE (Integrated Development Environment) o con programación en LUA. Este kit de desarrollo puede emplear los SoC: ESP8266 y ESP32, este último brinda mejores características de conectividad y procesamiento computacional, por lo cual es considerado como la evolución del ESP8266.

Con respecto a su CPU, el circuito integrado ESP8266 tiene un procesador de un solo núcleo con arquitectura RISC de 32 bits que opera a una frecuencia de 80 MHz, pero puede llegar hasta 160 MHz. Por otro lado, el ESP32 posee una CPU de 32 bits con doble núcleo y arquitectura RISC que puede alcanzar una frecuencia de 240 MHz (Espressif Systems, 2022). De esta manera, se evidencia que las características de esta placa pueden variar de acuerdo a la versión que se esté utilizando.

A nivel de conectividad permite utilizar diversos protocolos de comunicación inalámbrica como: WiFi, Bluetooth y BLE. Este módulo puede alimentarse directamente del puerto micro-USB o utilizando una fuente externa de 5V o 3V ya que posee un regulador de voltaje integrado. Además, incluye una gran cantidad de periféricos para la conexión con los diferentes dispositivos (Naylamp Mechatronics, 2021).

Figura 43

NodeMCU V2 ESP8266



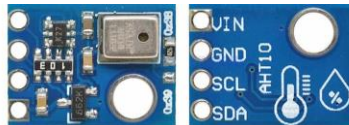
Nota. Tomado de *NodeMCU v2 ESP8266 WiFi*, por Naylamp Mechatronics, 2021, (<https://naylampmechatronics.com/espressif-esp/153-nodemcu-v2-esp8266-wifi.html>).

AHT10. Es un sensor de bajo costo, versátil y pequeño con buen rendimiento y estabilidad en ambientes hostiles. Permite realizar mediciones de humedad y temperatura, de modo que, es

ampliamente utilizado para el control de estas variables meteorológicas. Además, viene integrado con un regulador de voltaje de 3.3V y una interfaz I2C para la comunicación con algún kit de desarrollo (Art of Circuits, 2022).

Figura 44

AHT10

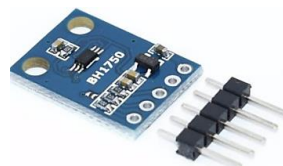


Nota. Tomado de *AHT10 High-Precision Digital Temperature & Humidity Sensor Module*, por Art of Circuits, 2022, (<https://artofcircuits.com/product/aht10-high-precision-digital-temperature-humidity-sensor-module>).

GY-302. Es un módulo sensor de intensidad luminosa basado en el chip BH1750, que a diferencia del LDR, es digital y emplea la unidad de medida estándar del nivel de iluminación: el Lux (lumen/m²). Tiene alta precisión y un rango configurable entre 1 - 65535 lx. Cuenta con un convertidor analógico/digital (ADC) de 16 bits y un regulador para el voltaje de alimentación. Este dispositivo usa el protocolo I2C para interactuar con las placas de desarrollo con capacidad de seleccionar entre dos direcciones. Las aplicaciones que se le pueden dar a este módulo van desde el control de intensidad lumínica para pantallas hasta mediciones de luz ambiental (ROHM Semiconductor, 2011).

Figura 45

BH1750



Nota. Tomado de *Módulo Sensor De Intensidad Luminosa Bh1750*, por UNIT Electronics, 2021, (<https://uelectronics.com/producto/gy-302-modulo-sensor-de-intensidad-luminosa-bh1750>).

Sensor de humedad de suelo capacitivo v1.2. El sensor capacitivo analógico mide los niveles de humedad del suelo, como su nombre lo indica, mediante detección capacitiva, la cual varía en función del contenido de agua presente en el suelo y se convierte en voltaje en un rango de 1.2V a 3.0V. La ventaja de este sensor es que está elaborado con un material resistente a la corrosión que le da una larga vida útil (How To Electronics, 2022).

Figura 46

Sensor de humedad de suelo capacitivo v1.2

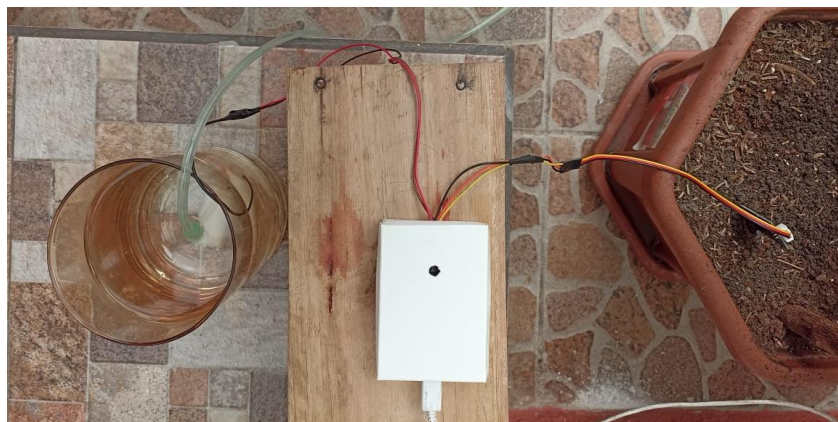
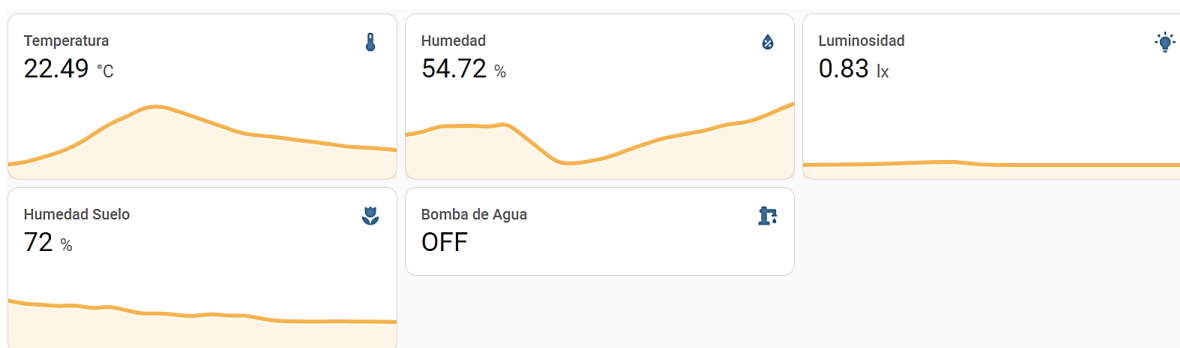


Nota. Tomado de *Capacitive Soil Moisture Sensor v1.2*, por How To Electronics, 2022, (<https://how2electronics.com/interface-capacitive-soil-moisture-sensor-arduino>).

Tabla 8

Configuración MQTT nodo control de riego

| Topic | Publicador | Suscriptor |
|--------------------------|------------|------------|
| ESP32/HUERTO/TEMPERATURA | X | - |
| ESP32/HUERTO/HUMEDAD | X | - |
| ESP32/HUERTO/LUMINOSIDAD | X | - |
| ESP32/HUERTO/SUELO | X | - |
| ESP01/DFPLAYER/BOMBA | X | - |

Figura 47*Prototipo nodo control de riego***Figura 48***Interfaz gráfica nodo control de riego***Pantalla WT32**

Este dispositivo es una pantalla táctil RGB tipo TFT LCD (Thin-Film Transistor Liquid Crystal Display) con una resolución de 320x240 píxeles que permite visualizar los datos de los sensores conectados a los diferentes nodos tales como: sensores I2C, detector de gases y control de riego. Además, brinda la posibilidad de controlar los dispositivos inteligentes comerciales mediante la interfaz desplegada en la pantalla táctil.

La programación de este dispositivo se realizó mediante una integración de Home Assistant denominada openHASP, ya que permite desarrollar interfaces de usuario personalizadas para pantallas

táctiles mediante el protocolo MQTT y simplifica la sincronización con las entidades del sistema para que puedan ser empleadas en la interfaz.

WT32-SC01. Es una placa de desarrollo altamente integrada y de bajo consumo de energía que incluye una pantalla táctil LCD. Tiene un módulo de ESP32-WROVER-B con Flash SPI de 4MB y PSRAM de 8MB lo que le permite manejar protocolos de conectividad inalámbrica tales como: 802.11b/g/N en la banda de 2.4GHz, Bluetooth V4.2 BR/EDR y el estándar BLE. También tiene puertos de expansión para poder conectar otros dispositivos electrónicos (Wireless-Tag Technology, 2019).

Figura 49

WT32-SC01



Nota. Tomado de *Wireless-Tag WT32-SC01*, por openHASP, 2022, (<https://openhasp.haswitchplate.com/0.6/devices/wt32-sc01>).

Figura 50

Interfaz nodo pantalla táctil WT32

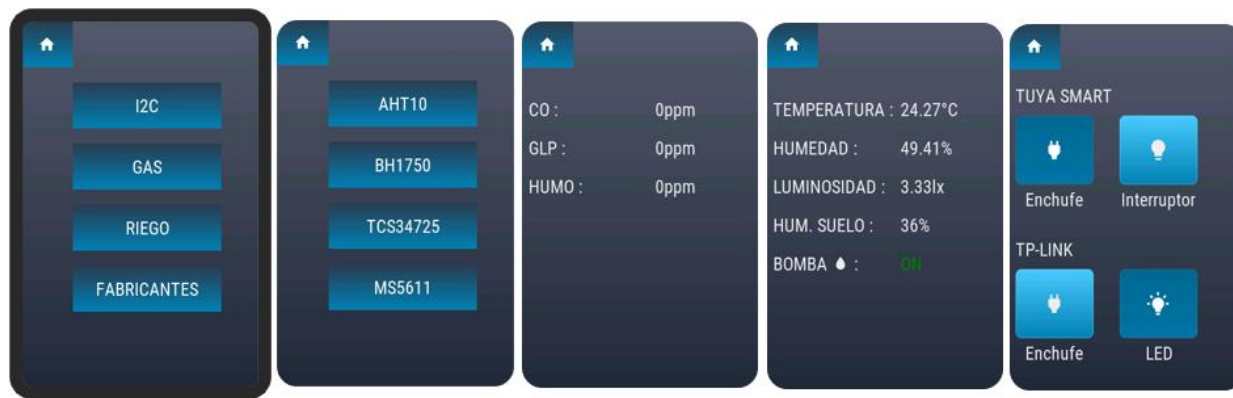


Figura 51

Interfaz gráfica nodo pantalla WT32 en Home Assistant



Nodo de sensores I2C

Este dispositivo IoT tiene conectado varios sensores que funcionan mediante la interfaz I2C, mismos que pueden medir: humedad, temperatura, luminosidad, presión, temperatura de color, porcentaje de los colores RGB y de luz blanca. Todos estos valores se pueden visualizar en la interfaz de Home Assistant.

Figura 52

Diagrama de bloques nodo de sensores I2C

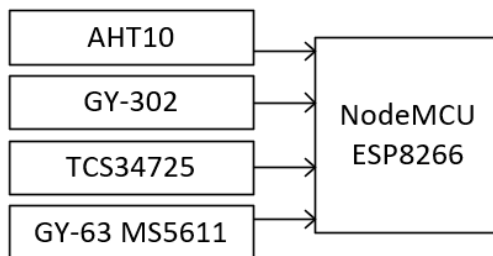
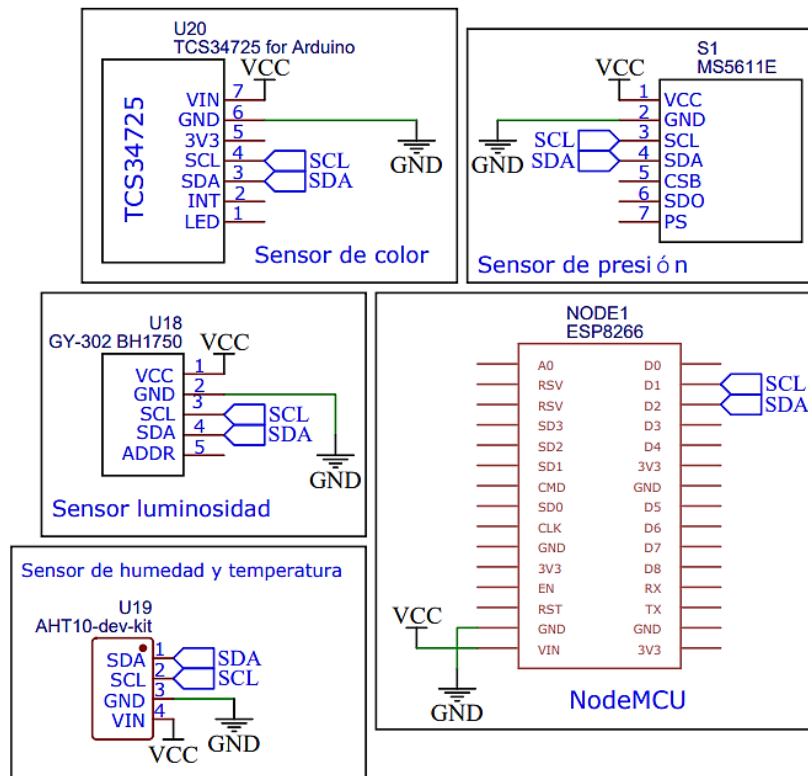
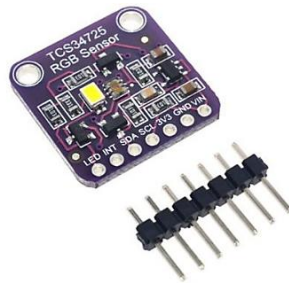


Figura 53

Esquemático nodo de sensores I2C



TCS34725. Es un sensor de reconocimiento de color que funciona con I2C capaz de distinguir luz blanca y RGB (Red-Green-Blue). Cuenta con un filtro de señales IR (Infrarrojo) para brindar mayor sensibilidad y asegurar la detección de los colores sin interferencia, de esta manera las lecturas corresponden al color real o visible dado que los humanos no observan el espectro IR. Tiene incluido un regulador de voltaje, por lo que se puede usar tanto a 3.3V como a 5V y un led de luz neutra para iluminar la superficie que se desea medir (UNIT Electronics, 2022).

Figura 54*TCS34725*

Nota. Tomado de *Módulo Sensor de Reconocimiento de Color RGB TCS34725*, por UNIT Electronics, 2022, (<https://uelectronics.com/producto/modulo-sensor-de-reconocimiento-de-color-rgb-tcs34725>).

GY-63 MS5611. Es un módulo sensor de altura y presión de alta precisión con interfaz de bus SPI e I2C que se puede utilizar en muchas aplicaciones como: altímetros portátiles, controles de juegos, navegación en interiores, entre otras. Este sensor de presión barométrica está optimizado para altímetros y variómetros con una resolución de altitud de 10 cm. Incluye un sensor de presión de alta linealidad y potencia ultra baja, así como un ADC de 24 bits con coeficientes internos calibrados de fábrica. Proporciona un valor digital preciso de presión y temperatura de 24 bits con diferentes modos de operación que permiten al usuario optimizar la velocidad de conversión y el consumo de corriente (TE Connectivity, 2017).

Figura 55*GY-63 MS5611*

Nota. Tomado de *Sensor de presión atmosférica GY-63 MS5611-01BA03*, por C&D TechNologia, 2022, (<https://cdtechnologia.net/sensores/2205-sensor-de-presion-atmosferica-ms5611.html>).

Tabla 9

Configuración MQTT nodo de sensores I2C

| Topic | Publicador | Suscriptor |
|------------------------------|------------|------------|
| ESP8266/BH1750/Luminosidad | X | - |
| ESP8266/AHT10/Temperatura | X | - |
| ESP8266/AHT10/Humedad | X | - |
| ESP8266/MS5611/Temperatura | X | - |
| ESP8266/MS5611/Presion | X | - |
| ESP8266/TCS34725/Rojo | X | - |
| ESP8266/TCS34725/Verde | X | - |
| ESP8266/TCS34725/Azul | X | - |
| ESP8266/TCS34725/Claro | X | - |
| ESP8266/TCS34725/Luminosidad | X | - |
| ESP8266/TCS34725/Temperatura | X | - |

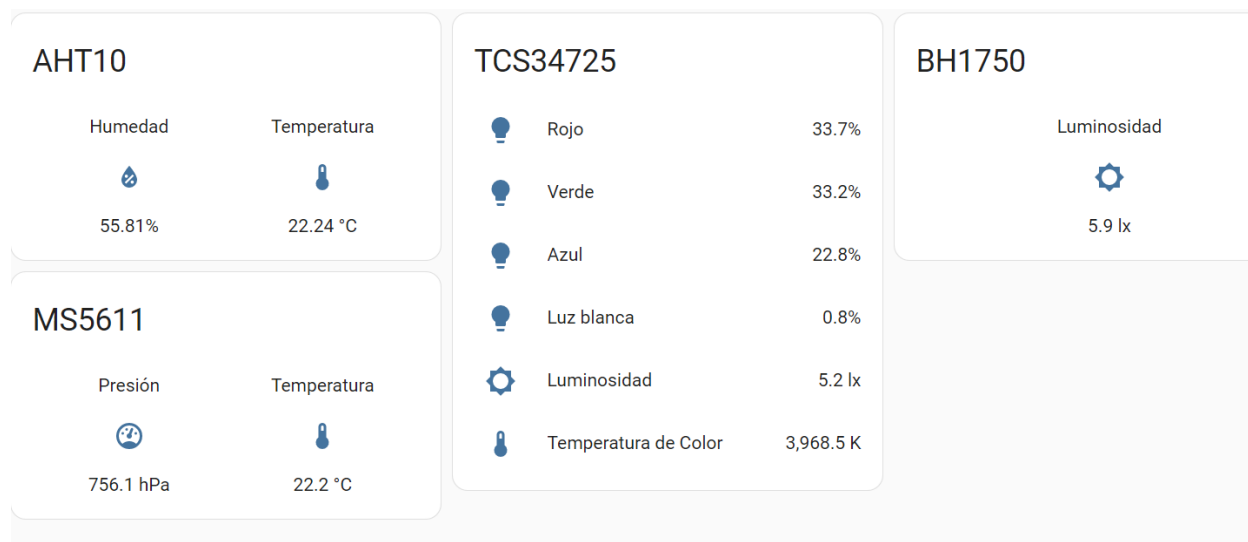
Figura 56

Prototipo nodo de sensores I2C



Figura 57

Interfaz gráfica nodo de sensores I2C



Nodo detector de gases

Este nodo IoT mide la presencia de: monóxido de carbono, gas licuado del petróleo y humo en ppm. Si detecta la presencia de cualquiera de estos elementos envía un mensaje mediante MQTT para que se reproduzca en el nodo de notificaciones el aviso correspondiente.

Figura 58

Diagrama de bloques nodo detector de gases

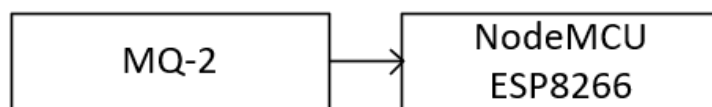
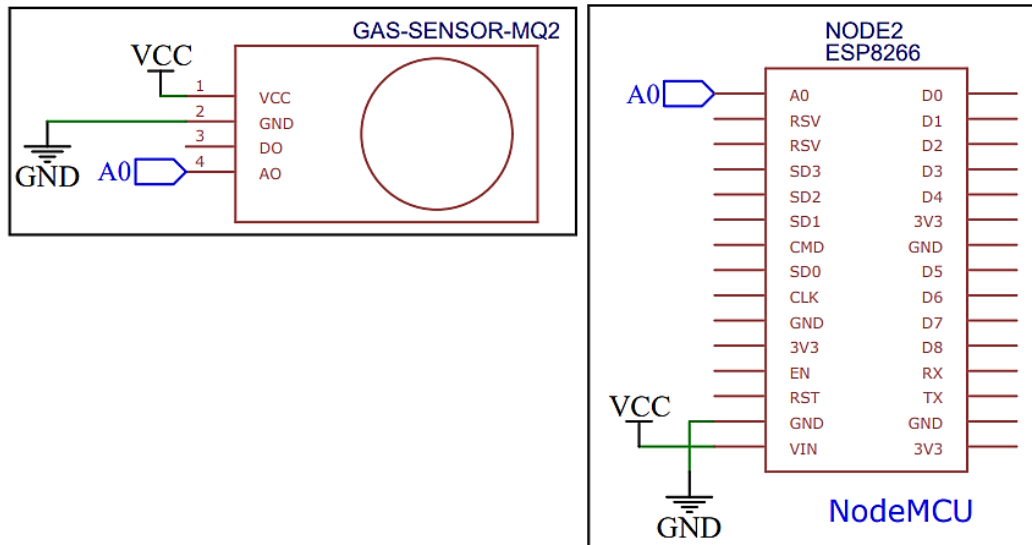


Figura 59

Esquemático nodo detector de gases



MQ-2. Es un sensor electrónico de gas de tipo semiconductor de óxido metálico, también denominado quimiorresistor, ya que emplea una resistencia que varía con la presencia de gas y puede medir su concentración, ya sea LPG (Liquefied petroleum gas), propano, hidrógeno, metano, alcohol, monóxido de carbono y humo en un intervalo de 200 a 10000 partes por millón (ppm), esto lo hace gracias a un divisor de voltaje que se encuentra en este sensor, mismo que cuenta con un voltaje de operación de 5V.

Ofrece un indicador binario para la presencia de gases combustibles y un voltaje de salida analógico para obtener la concentración en el aire. La calibración de este dispositivo se puede realizar a través de un potenciómetro que permite ajustar su sensibilidad (Last Minute Engineers, 2022).

Figura 60

Relación concentración de gas y voltaje de salida sensor MQ-2



Nota. Tomado de *MQ2 Gas/Smoke Sensor*, por Last Minute Engineers, 2022,

(<https://lastminuteengineers.com/mq2-gas-senser-arduino-tutorial>).

Tabla 10

Configuración MQTT nodo *detector de gases*

| Topic | Publicador | Suscriptor |
|--------------------|------------|------------|
| ESP01/DFPLAYER/GAS | X | - |
| ESP8266/MQ2/LPG | X | - |
| ESP8266/MQ2/CO | X | - |
| ESP8266/MQ2/SMOKE | X | - |

Figura 61




Prototipo nodo *detector de gases*



Figura 62

Interfaz gráfica nodo detector de gases

Sensor MQ-2

| | | |
|---|--------------------------|-------|
|  | Monóxido de carbono | 0 ppm |
|  | Gas licuado del petróleo | 0 ppm |
|  | Humo | 0 ppm |

Nodo control de iluminación

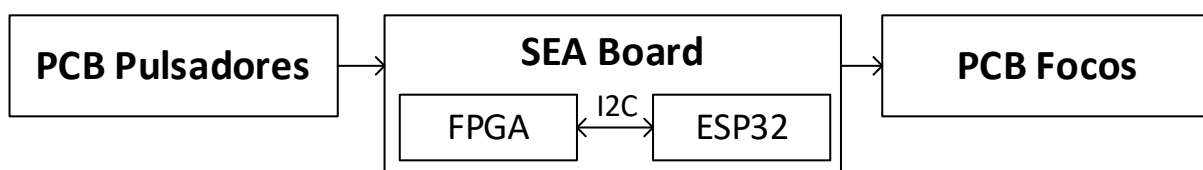
Una de las principales contribuciones de este trabajo de titulación es la integración de un nodo que incorpora una FPGA. Este dispositivo inteligente emplea la Spartan Edge Accelerator Board como placa de desarrollo con una FPGA XC7S15FTGB196 independiente con 20 puertos de entrada/salida para el control de 10 focos y 10 interruptores. El apagado y encendido de las luces se puede realizar mediante la interfaz Home Assistant o con los pulsadores, los cuales incorporan tres funcionalidades:

- 1 pulsación: Cambia el estado del foco de apagado a encendido o viceversa.
- 2 pulsaciones: La luz se enciende durante 5 segundos y se apaga automáticamente.
- 3 pulsaciones: El foco se prende por un intervalo de 30 segundos y se apaga automáticamente.

Además, permite monitorear la temperatura con Home Assistant gracias al sensor que viene integrado en la FPGA.

Figura 63

Diagrama de bloques nodo control de iluminación

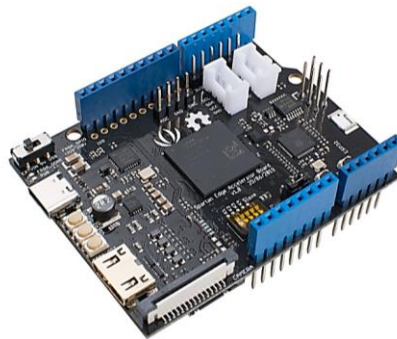


Spartan Edge Accelerator Board. SEA Board es una placa de desarrollo FPGA liviana basada en el chip Xilinx Spartan-7 que se puede usar como Arduino shield con 10 puertos de entrada/salida para controlar los diferentes tipos de componentes o como una placa de desarrollo FPGA independiente con 20 puertos de entrada/salida. El chip ESP32 incorporado habilita las tecnologías: 802.11 b/g/n 2.4GHz y Bluetooth 4.1 con BLE. Posee los módulos: ADC y DAC de 8 bits, acelerómetro y giroscopio de 6 ejes, 2 LEDs RGB y botones (Seeed Studio, 2021).

La placa SEA cuenta con dos elementos fundamentales: una FPGA y un ESP32. La FPGA permite la programabilidad y un procesamiento en paralelo de alta velocidad. El ESP32 proporciona conectividad inalámbrica y se encarga de la comunicación con otros dispositivos a través de la red. Estos componentes pueden comunicarse entre sí mediante diversas interfaces, como SPI, I2C o UART. En este caso se realizó la implementación con I2C, lo que permite combinar las capacidades de estos elementos.

Figura 64

SEA board



Nota. Tomado de *Spartan Edge Accelerator Board*, por Seeed Studio, 2021,

(<https://wiki.seeedstudio.com/Spartan-Edge-Accelerator-Board>).

Figura 65

Esquemático PCB Pulsadores

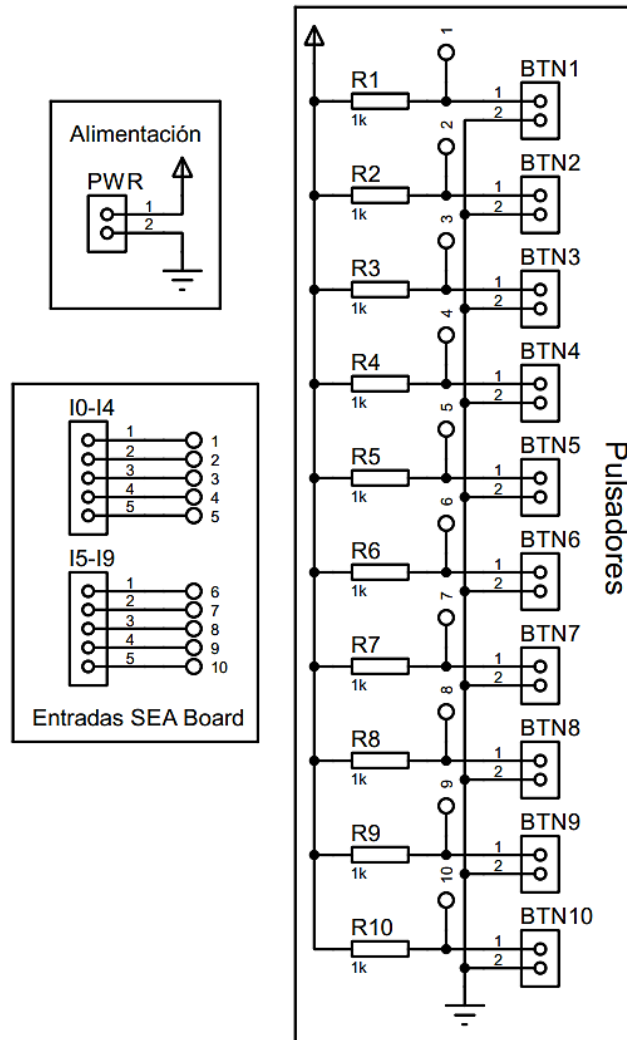


Figura 66

Esquemático PCB Focos

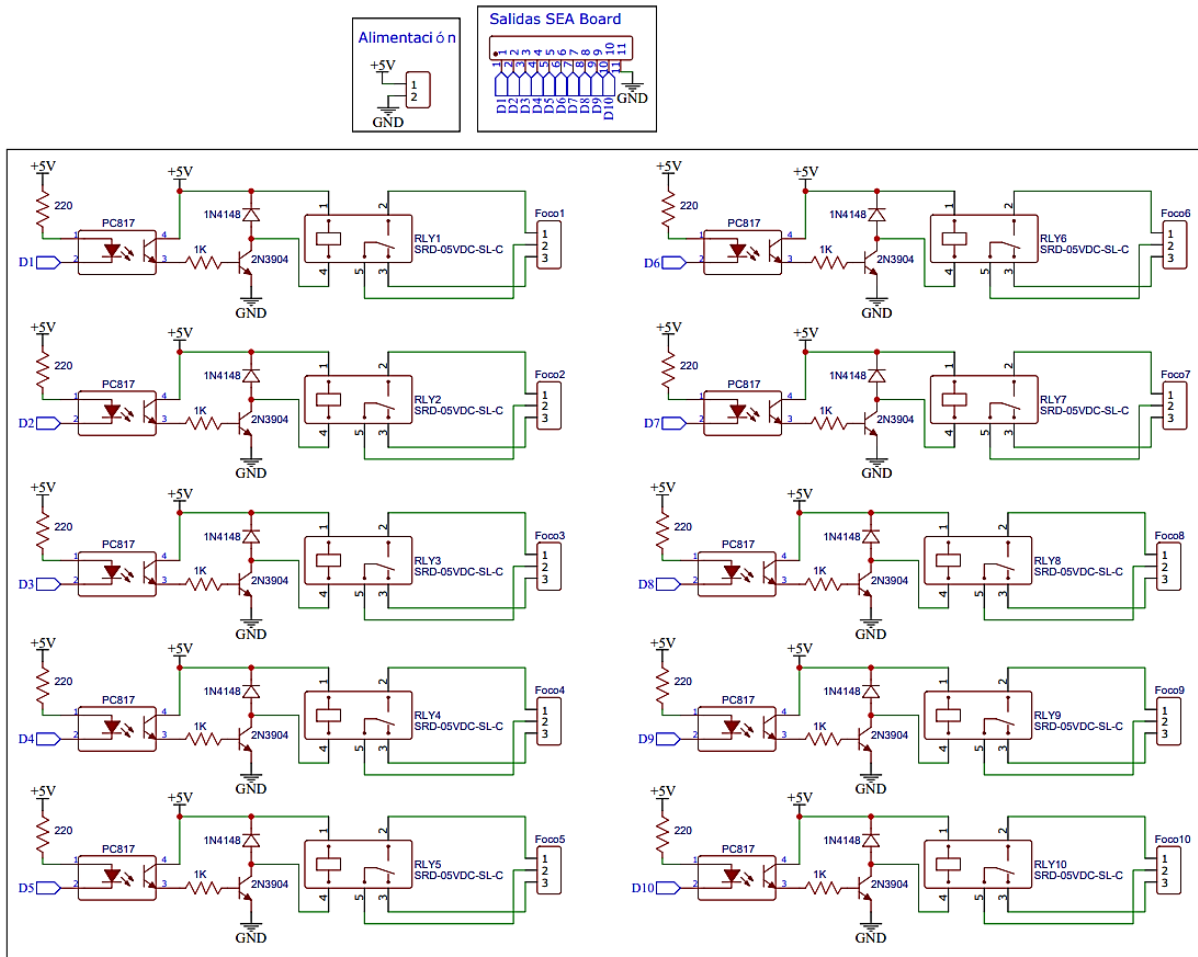


Tabla 11

Configuración MQTT nodo control de iluminación

| Topic | Publicador | Suscriptor |
|------------|------------|------------|
| FPGA/RELE0 | X | X |
| FPGA/RELE1 | X | X |
| FPGA/RELE2 | X | X |
| FPGA/RELE3 | X | X |
| FPGA/RELE4 | X | X |
| FPGA/RELE5 | X | X |
| FPGA/RELE6 | X | X |
| FPGA/RELE7 | X | X |
| FPGA/RELE8 | X | X |
| FPGA/RELE9 | X | X |
| FPGA/TEMP | X | - |

Figura 67

Prototipo nodo control de iluminación

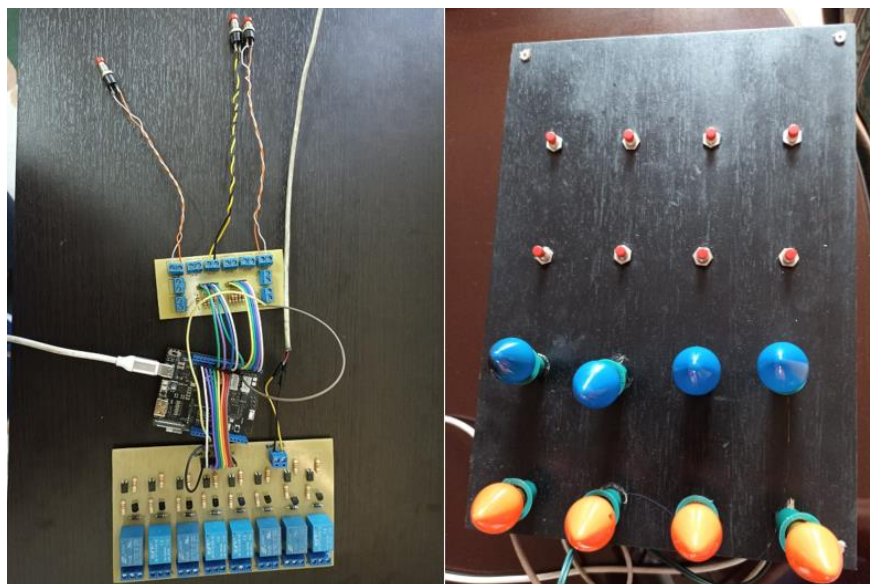


Figura 68

Interfaz gráfica nodo control de iluminación

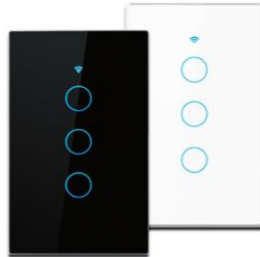


Implementación nodos comerciales

Los nodos comerciales empleados en el sistema fueron de la marca Tuya Smart y TP-Link, ya que permiten integrar sus dispositivos inteligentes con Home Assistant para poder controlarlos mediante la interfaz gráfica. Los nodos IoT utilizados fueron:

Interruptor inteligente

Es un dispositivo que se asemeja a un interruptor tradicional ya que su diseño es similar y se implementan en los mismos lugares. Permite la automatización de luces y un mayor ahorro de energía en el hogar, esta automatización es posible mediante la conexión a internet (Electricista Juárez, 2021).

Figura 69*Interruptor Inteligente*

Nota. Tomado de *Interruptor de pared con control por voz*, por Ali Express, 2022,

(<https://es.aliexpress.com/item/1005004541211287.html>).

Foco inteligente

Los focos inteligentes son bombillas LED capaces de comunicarse con otros dispositivos dentro del hogar a través de internet o bluetooth y cuyas funciones son controladas a través de: asistentes de voz digital, aplicaciones de celular o IFTTT (If this then that). Estos dispositivos representan un excelente recurso para programar el encendido o apagado en horarios determinados. Se puede encontrar 2 tipos de conexión: directamente al wifi doméstico o mediante un hub que funciona como mediador entre la conexión WiFi y el dispositivo (Aei Soluciones Técnicas, 2021).

Figura 70*Foco Inteligente*

Nota. Tomado de *Focos inteligentes*, por Aei Soluciones Técnicas, 2021,

(<https://info.aei.mx/blog/qu%C3%A9-son-y-c%C3%B3mo-funcionan-los-focos-inteligentes>).

Enchufe inteligente

También llamados Smart Plugs son dispositivos que se conectan al enchufe de la luz normal sin la necesidad de tener que montarlos dentro de la instalación eléctrica del hogar. Permiten controlar cualquier artefacto eléctrico que se encuentren conectados a ellos, incluso cuando la persona no esté en la habitación o dentro de la casa mediante conexión remota y WiFi. Este tipo de dispositivos requieren de una toma a tierra.

Figura 71

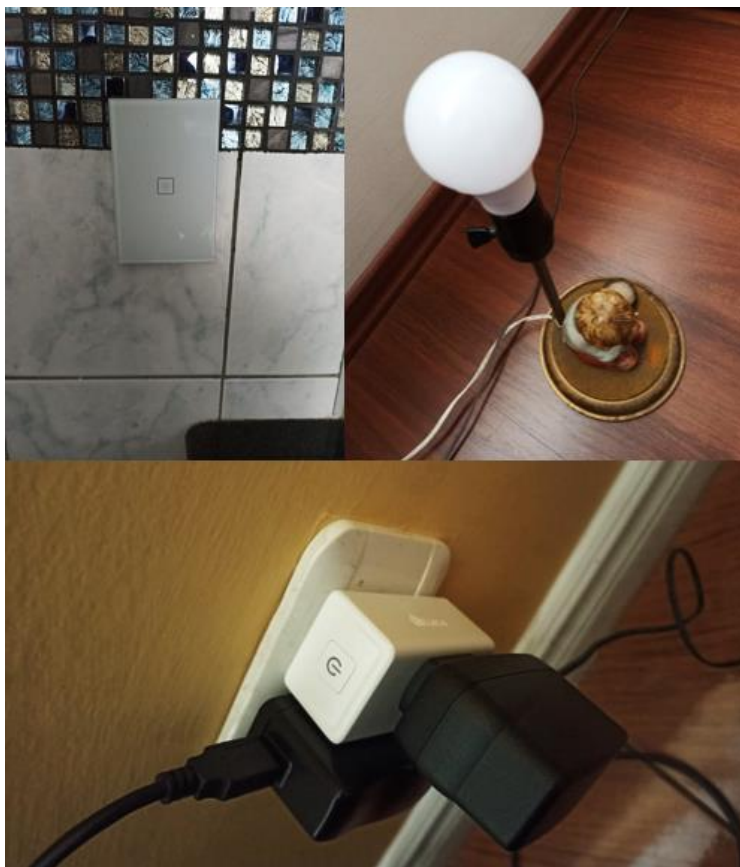
Smart Plug



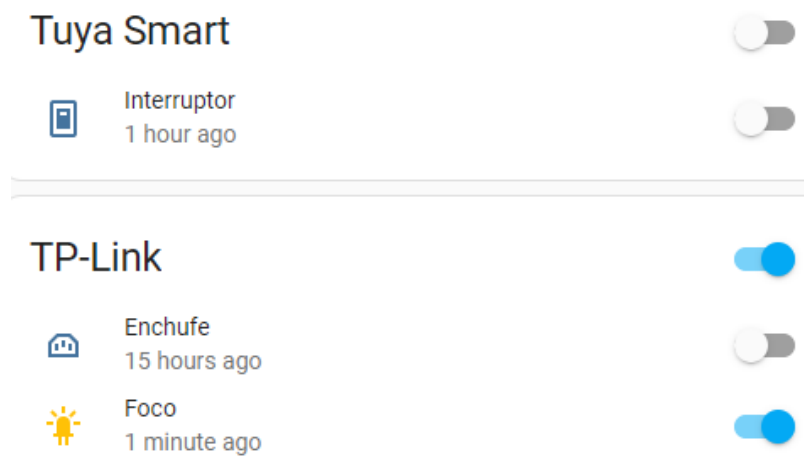
Nota. Tomado de *Enchufe individual*, por IlexaTech, 2022, (<https://homelife.mx/lexatech/enchufes>).

Figura 72

Implementación dispositivos inteligentes comerciales

**Figura 73**

Interfaz gráfica dispositivos inteligentes comerciales



Conexión a la nube

La manera más sencilla de realizar una conexión remota y segura es mediante Nabu Casa, el cual es un proyecto realizado por el fundador de Home Assistant. Se puede contratar este servicio mediante el pago de una suscripción anual o mensual, en donde el dinero sirve como aporte para el desarrollo del sistema de código abierto Home Assistant que no tiene costo si funciona de manera local.

Existen varias formas gratuitas que permiten al usuario conectarse fuera de la red local con el servidor de Home Assistant, puede ser mediante un túnel, VPN o redirección de puertos en el router. La forma que ofrece más ventajas es mediante un túnel, ya que se puede enlazar con los asistentes de voz como Alexa y Google Home, además de que no existen los problemas de seguridad ni de configuración ligados al CG-NAT o NAT masivo en el caso que se desee realizar una redirección de puertos.

Asistente de voz

Google Home Mini. Es un pequeño altavoz inteligente que funciona con el asistente de Google y puede ser manejado mediante voz para realizar diferentes funciones. Es un dispositivo relevante en un sistema de hogar inteligente que consta de un rápido tiempo de respuesta y una buena calidad de audio facilitando el día a día en el hogar (Beuzeval, 2020).

Figura 74

Google Home Mini



Nota. Tomado de *Google Home Mini*, por Beuzeval, 2020, My Memory

(<https://www.mymemory.co.uk/blog/what-can-the-google-home-mini-do>).

Nombre de dominio

Es único y se utiliza para identificar de mejor manera a cada sitio web. Las organizaciones como ICANN e IANA son las responsables de la regulación de los dominios en internet. Freenom es un registrador autorizado por ICANN, lo cual le permite proveer dominios gratuitos y de pago. Algunas de las extensiones que no tienen costo son: tk, ml, ga, cf y gq con una duración de hasta un año. En este caso el nombre de dominio escogido fue hogarinteligenteha.cf.

Figura 75

Dominio

The screenshot shows the Cloudflare dashboard for the domain hogarinteligenteha.cf. The page title is "Managing hogarinteligenteha.cf". The navigation menu includes "Information", "Upgrade", "Management Tools", and "Manage Freenom DNS". The "Information" tab is active, displaying the following details:

- Domain:** hogarinteligenteha.cf (ACTIVE)
- Registration Date:** 18/11/2022
- Expiry date:** 18/11/2023

Below the domain information, there is a button labeled "« Back to Domains List".

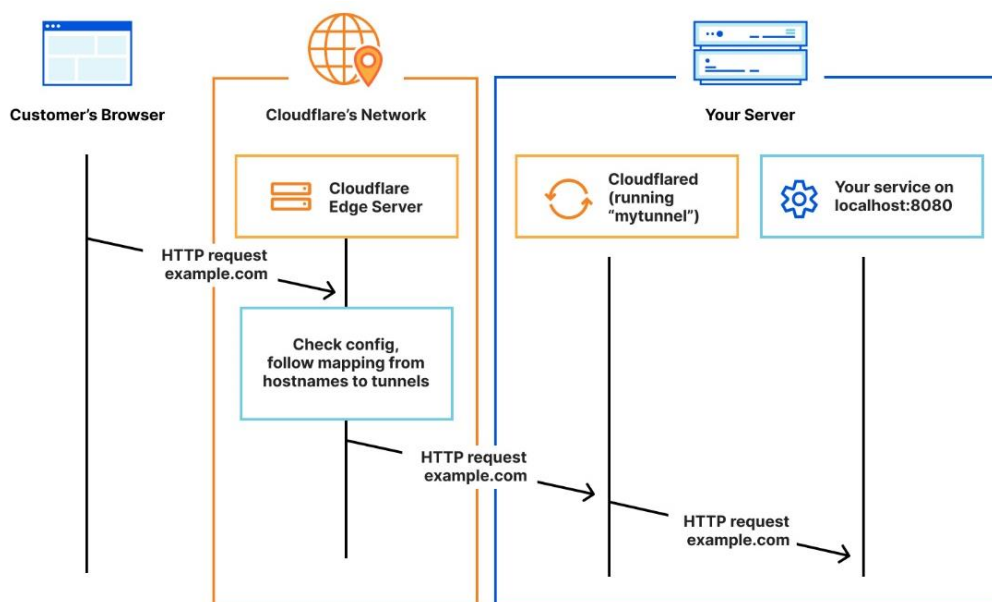
Cloudflare Tunnel

Permite crear un enlace privado desde cualquier servidor directamente con la red de Cloudflare mediante la implementación de un demonio (daemon) ligero en la infraestructura de origen sin necesidad de una dirección IP enrutable públicamente. Esta conexión es segura y únicamente de salida lo que significa que el tráfico que llega al servidor tiene que pasar obligatoriamente por la red de Cloudflare. Cabe señalar que un túnel puede tener varios conectores o procesos.

El demonio, en este caso, fue un proceso que sirve como conector, ya que se encarga de establecer la conexión y enviar el tráfico al centro de datos más cercano de Cloudflare. El túnel, por su parte, fue una conexión saliente y persistente que permite enrutar el tráfico a los registros DNS.

Figura 76

Cloudflare Tunnel



Nota. Tomado de *Cloudflare Tunnel*, por Cloudflare, 2022, (<https://developers.cloudflare.com>).

Seguridad

La seguridad es un aspecto importante que no hay que pasar por alto cuando se tiene acceso al servidor de forma remota. Algunas de las configuraciones básicas que se pueden realizar son:

- Habilitar HTTPS: Encripta el tráfico.
- Contraseñas robustas: Evitar que los ataques de fuerza bruta tengan éxito.
- Doble factor de autenticación.
- Habilitar IP Ban: Cuando un usuario coloca las credenciales incorrectas para ingresar al servidor un cierto número de veces la IP asociada al usuario es baneada o registrada en una lista negra.

Enlace con Google Home

La manera más cómoda y sencilla de realizar este proceso es mediante la suscripción de Nabu Casa, pero también existe una forma gratuita de enlazar Home Assistant con Google Home que requiere mayor conocimiento del usuario para realizar correctamente la configuración. Los requisitos son que Home Assistant debe tener acceso remoto fuera de la red local mediante un nombre de host y certificado SSL. Es necesario realizar ciertas acciones en la plataforma de Google Cloud y en el archivo de Home Assistant configuration.yaml para enlazar las plataformas y sincronizar los dispositivos. Este procedimiento se explica a detalle en la documentación oficial de Home Assistant en el Apéndice 2.

En este capítulo se presentó el diseño y funcionalidad del sistema de hogar inteligente con la implementación de todos los dispositivos que lo componen. En el Capítulo IV se muestran las pruebas y análisis de resultados del sistema implementado.

Capítulo IV: Pruebas y Resultados

En este capítulo se analiza el consumo de energía de los nodos del sistema de hogar inteligente. Se presentan además las características de rendimiento del sistema a través de pruebas de desempeño y se comparan los costos de los nodos desarrollados con los de dispositivos IoT comerciales disponibles en el mercado.

Consumo de energía

El consumo energético hace referencia al gasto de energía eléctrica que se mide en kilovatios por hora [kWh], medida que utiliza la empresa eléctrica para emitir sus facturas. Según la ARCERNR en Ecuador el valor por cada kWh es de 9.2 centavos de dólar. Para determinar la potencia de los nodos desarrollados en base a chips, sensores y actuadores que componen el sistema de hogar inteligente se utilizó un dispositivo de medición USB tester, el cual permite medir voltaje, corriente y potencia de cualquier dispositivo mediante conexión USB.

Figura 77

Medición con USB tester



Los valores de voltaje, corriente y potencia de los diferentes dispositivos IoT desarrollados tienden a variar de acuerdo a la función que estén desempeñando en un tiempo específico, esto se puede ejemplificar de mejor manera con el nodo de la pantalla WT32 ya que su nivel de luminosidad se puede ajustar del 0 al 100%, por consiguiente, también se altera el consumo de corriente. Otro caso es

el nodo control de iluminación tanto de la FPGA y la PCB con relés para controlar los focos, dependiendo de la cantidad de luces encendidas varía la corriente en las placas. Los valores tabulados que se muestran a continuación representan el mayor consumo de corriente que alcanzó determinado dispositivo y su consumo mensual si está encendido todo el tiempo (24 horas al día).

Tabla 12

Consumo de energía nodos desarrollados

| Dispositivo IoT | Voltaje [V] | Corriente [A] | Potencia [W] | Consumo diario [kWh] | Consumo mensual [kWh] | Gasto mensual [USD] |
|--|----------------|------------------|-----------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Nodo cámara 1 | 5.14 | 0.111 | 0.570 | 0.01 | 0.41 | 0.04 |
| Nodo cámara 2 | 4.93 | 0.113 | 0.557 | 0.01 | 0.40 | 0.04 |
| Control remoto IR genérico | 5.06 | 0.078 | 0.394 | 0.01 | 0.28 | 0.03 |
| Nodo control de acceso | 5.05 | 0.082 | 0.414 | 0.01 | 0.30 | 0.03 |
| Nodo control de riego | 4.98 | 0.234 | 1.165 | 0.03 | 0.84 | 0.08 |
| Pantalla WT32 | 5.00 | 0.296 | 1.480 | 0.04 | 1.07 | 0.10 |
| Nodo de sensores I2C | 5.05 | 0.083 | 0.419 | 0.01 | 0.30 | 0.03 |
| Nodo detector de gases | 4.98 | 0.197 | 0.981 | 0.02 | 0.71 | 0.06 |
| Nodo control de iluminación (FPGA) | 5.09 | 0.231 | 1.175 | 0.03 | 0.85 | 0.08 |
| Nodo control de iluminación (PCB Focos) | 5.37 | 0.518 | 2.781 | 0.07 | 2.00 | 0.18 |

De acuerdo a la Tabla 12 el consumo energético de los nodos desarrollados es mínimo, por lo cual resulta viable emplearlos en un sistema de hogar inteligente, brindando comodidad, seguridad y eficiencia energética a los usuarios.

Autonomía nodo de control por movimiento

Este nodo es el único que se alimenta por medio de una batería. Esta batería de litio proporciona un voltaje de 3.7 V y una corriente de 1 A, lo cual brinda una autonomía aproximada de 33

horas de uso con un consumo promedio de corriente de 30 mAh. El tiempo de carga del dispositivo es de alrededor de 3 horas con una alimentación de 5 V mediante el uso de un puerto micro USB.

Prueba de carga

Es una prueba de rendimiento que simula una carga en un sistema o servicio para determinar su capacidad y limitaciones. Indica el comportamiento de alguna aplicación cuando acceden varios usuarios a la vez para mejorar su funcionamiento y estabilidad. Las métricas de rendimiento más importantes que se pueden obtener al realizar una prueba de carga son el tiempo de respuesta, throughput y la tasa de error. La herramienta JMeter de Apache, que es de código abierto, permite hacer este tipo de pruebas.

Prueba de carga en la red interna

Se realizaron un total de 9304 solicitudes HTTP a las 6 rutas del servidor homeassistant.local por el puerto 8123 como se especifica en la Tabla 13. El tiempo promedio de respuesta es de 50 ms y la mediana es de 51 ms. El percentil 99 indica que el 99% de las peticiones tiene un tiempo de respuesta menor a 95 ms. El mínimo y máximo tiempo de respuesta es de 7 ms y 152 ms respectivamente, con un rendimiento de 211.07 peticiones/s. Según la empresa americana Google LLC, se considera que un tiempo medio de respuesta menor a 200 ms es bueno, ya que ofrece una respuesta inmediata al usuario.

Tabla 13

Informe prueba de carga red interna utilizando JMeter

| Rutas | #Muestras | Promedio [ms] | Mediana [ms] | Percentil 99% [ms] | Min [ms] | Max [ms] | Throughput [request/s] |
|--------------|------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------------|
| inicio | 1560 | 51 | 50 | 100 | 7 | 152 | 35.39 |
| cámaras | 1556 | 50 | 51 | 93 | 7 | 130 | 35.36 |
| huerto | 1553 | 50 | 50 | 94 | 7 | 109 | 35.29 |
| ir | 1548 | 51 | 52 | 95 | 7 | 109 | 35.21 |
| sensoresI2C | 1546 | 50 | 50 | 95 | 8 | 114 | 35.15 |
| otros | 1541 | 50 | 51 | 94 | 7 | 119 | 35.08 |
| TOTAL | 9304 | 50 | 51 | 95 | 7 | 152 | 211.07 |

En la Figura 78 se observa el número de usuarios activos a lo largo de 44 segundos que es el tiempo de duración de la prueba. Cada 2 segundos se aumenta un usuario hasta llegar a los 20 usuarios activos que se mantienen durante 4 segundos completando el tiempo total de la prueba.

En la Figura 79 se muestra el aumento del tiempo de respuesta para las diferentes rutas a medida que transcurre el tiempo de la prueba, esto se debe al incremento en el número de usuarios.

Figura 78

Usuarios activos a lo largo del tiempo

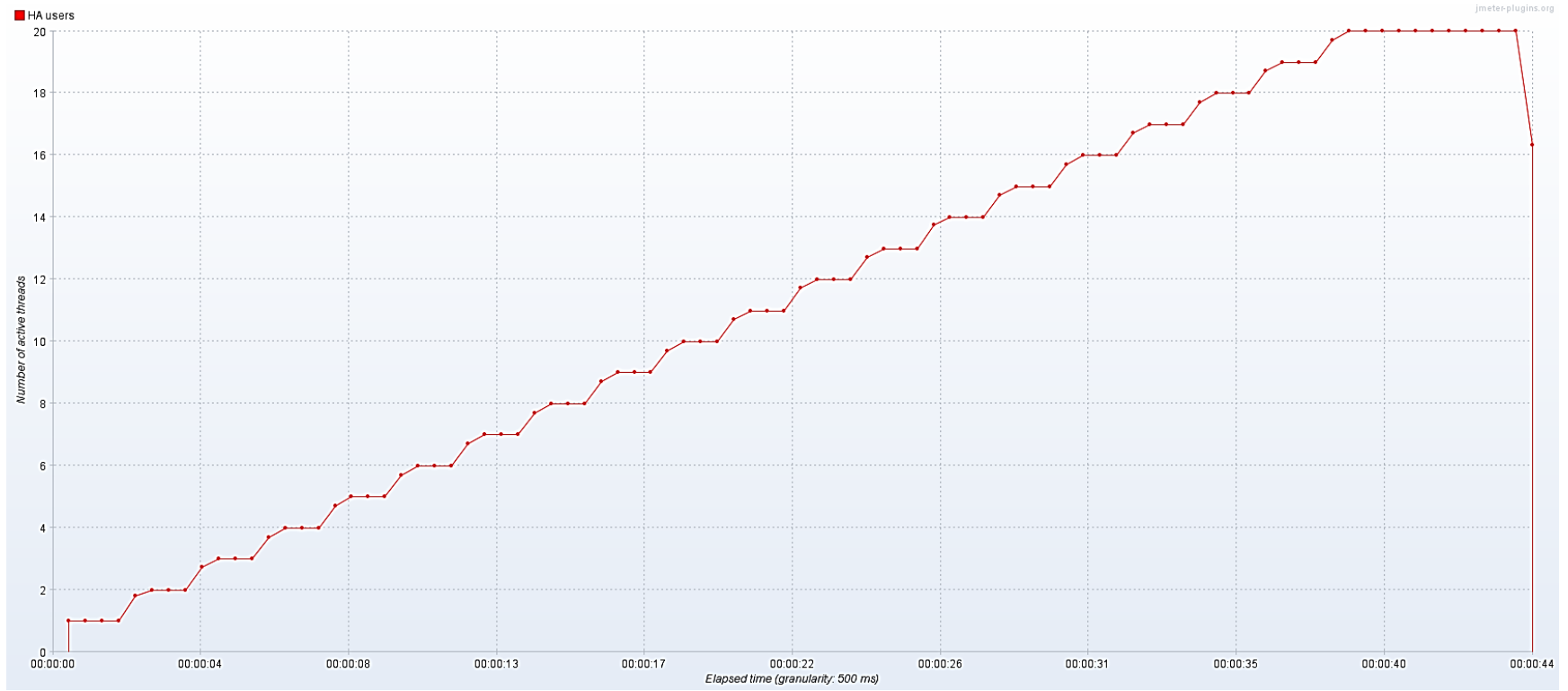


Figura 79

Tiempo de respuesta a lo largo del tiempo en la red interna



Prueba de carga en la red externa

La prueba se realizó a las diferentes rutas del servidor hogarinteligenteha.cf que emplea el protocolo https. Los parámetros como duración y número de usuarios son los mismos que se utilizaron en la red interna y se muestran en la Figura 78.

La prueba de carga tuvo un total de 2498 solicitudes HTTP, un tiempo promedio de respuesta de 196 ms, lo cual se considera bajo entregando una respuesta inmediata al usuario. La mediana indica que el 50% de las peticiones tuvieron un tiempo de respuesta menor a 190 ms y el percentil 99 refleja que el 99% de las solicitudes estuvieron por debajo de 360 ms. Los valores del tiempo de respuesta mínimo y máximo son de 147 ms y 656 ms respectivamente con un rendimiento de 56.57 solicitudes/s.

Tabla 14

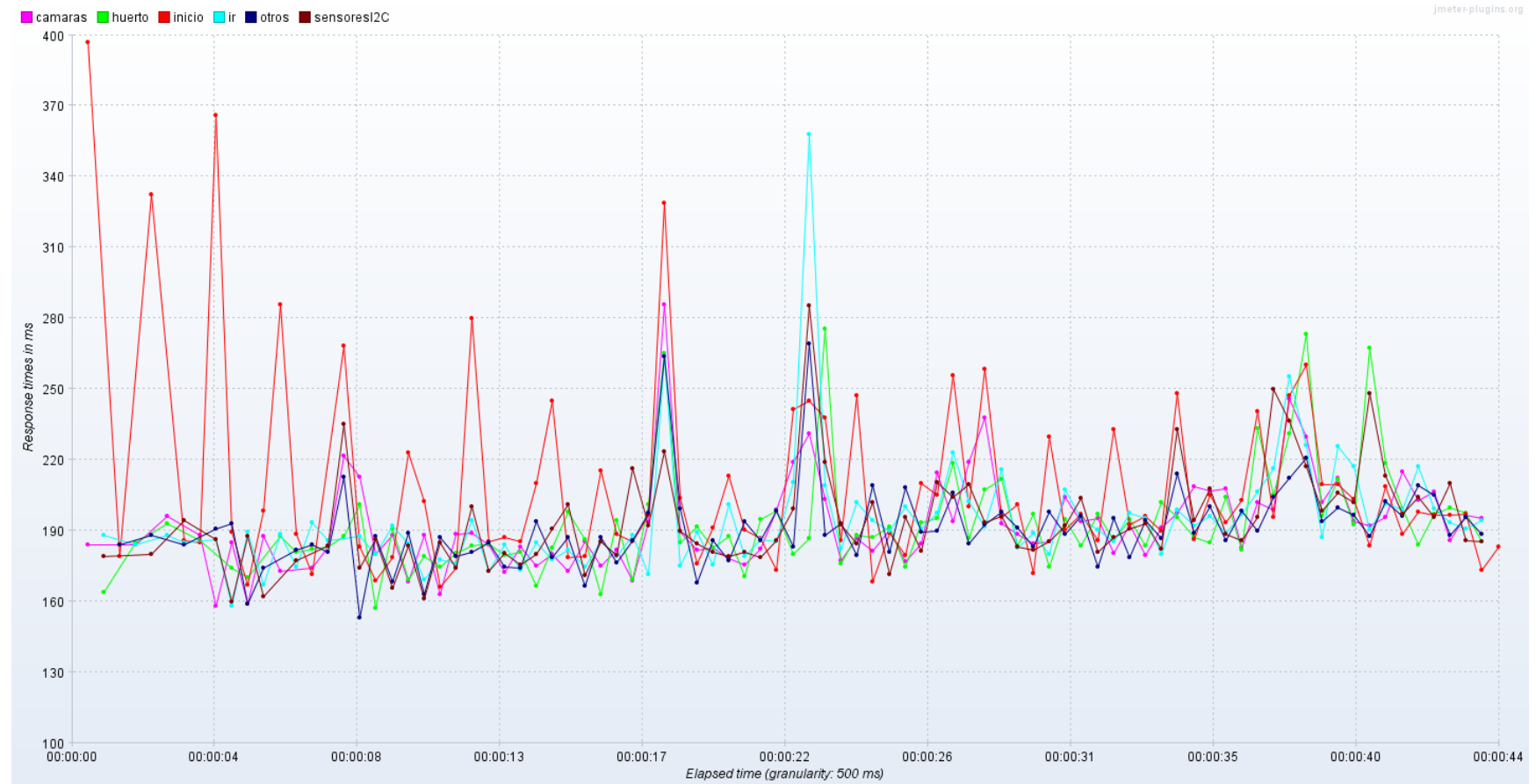
Informe prueba de carga red externa utilizando JMeter

| Rutas | #Muestras | Promedio [ms] | Mediana [ms] | Percentil 99% [ms] | Min [ms] | Max [ms] | Throughput [request/s] |
|--------------|------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------------------|
| inicio | 427 | 205 | 190 | 476 | 152 | 656 | 9.67 |
| camaras | 421 | 195 | 189 | 305 | 153 | 373 | 9.64 |
| huerto | 419 | 195 | 189 | 338 | 152 | 426 | 9.62 |
| ir | 412 | 196 | 191 | 316 | 151 | 359 | 9.51 |
| sensoresI2C | 411 | 195 | 190 | 321 | 147 | 439 | 9.51 |
| otros | 408 | 192 | 190 | 288 | 149 | 369 | 9.50 |
| TOTAL | 2498 | 196 | 190 | 360 | 147 | 656 | 56.57 |

En la Figura 80 se aprecia que el tiempo de respuesta para las diferentes rutas es mayor en la red externa en comparación con la red interna, además se observan ciertos picos en la gráfica lo que demuestra que algunas peticiones tienen un tiempo de respuesta mucho mayor al promedio.

Figura 80

Tiempo de respuesta a lo largo del tiempo en la red externa

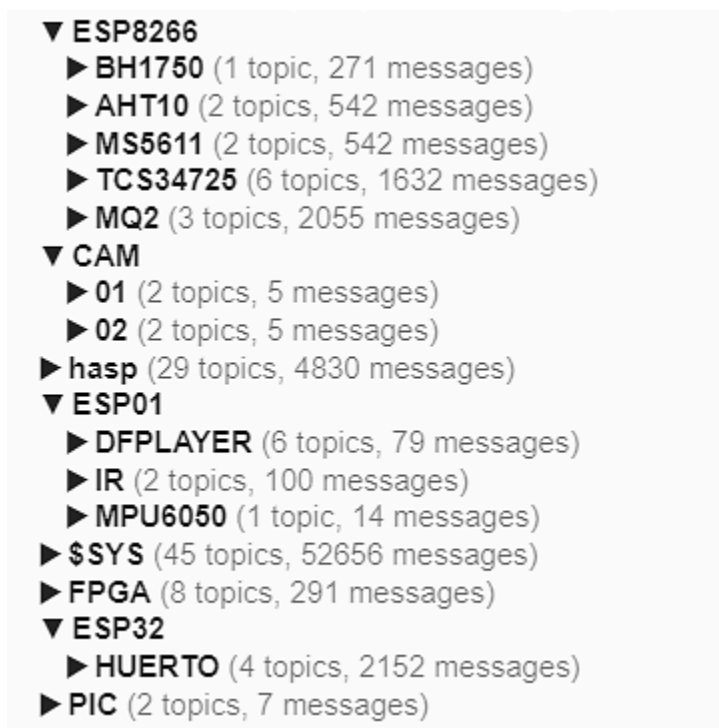


Prueba de rendimiento del protocolo MQTT

La prueba tuvo una duración de 4 horas con 30 minutos, tiempo en el cual se capturó el número de mensajes por tema mediante la herramienta MQTT Explorer. El tema \$SYS/# es implementado por el bróker MQTT para monitorear datos relevantes sobre el mismo intermediario y sus sesiones de publicador/suscriptor. El carácter numeral (#) es un comodín empleado al final de los temas MQTT para expresar varios niveles en los topics.

Figura 81

Número de mensajes por topic en MQTT Explorer



El throughput se calcula como el número de mensajes dividido para el tiempo de duración de la prueba que en este caso es de 4.5 horas. En la Tabla 15 se aprecia que el número de mensajes total del sistema es de 65181 con un rendimiento de 14484.67 mensajes/hora. Los temas que tienen el mayor throughput son \$SYS/# y HASP/# con un rendimiento de 11701.33 y 1073.33 mensajes/hora respectivamente. El topic HASP/# corresponde al nodo pantalla WT32, utilizado para monitorear los

nodos de: sensores I2C, detector de gases y control de riego, además de controlar los dispositivos inteligentes comerciales.

Tabla 15

Throughput de los topics




| Topic | #Mensajes | Throughput [mensaje/h] |
|--------------------|------------------|-----------------------------------|
| ESP8266/BH1750/# | 271 | 60.22 |
| ESP8266/AHT10/# | 542 | 120.44 |
| ESP8266/MS5611/# | 542 | 120.44 |
| ESP8266/TCS34725/# | 1632 | 362.67 |
| ESP8266/MQ2/# | 2055 | 456.67 |
| CAM/01/# | 5 | 1.11 |
| CAM/02# | 5 | 1.11 |
| HASP/# | 4830 | 1073.33 |
| ESP01/DFPLAYER/# | 79 | 17.56 |
| ESP01/IR/# | 100 | 22.22 |
| ESP01/MPU6050/# | 14 | 3.11 |
| FPGA/# | 291 | 64.67 |
| ESP32/HUERTO/# | 2152 | 478.22 |
| PIC/# | 7 | 1.56 |
| \$\$SYS/# | 52656 | 11701.33 |
| Total | 65181 | 14484.67 |

Rendimiento del servidor

Para determinar ciertas métricas de rendimiento del servidor que se encuentra implementado en una Raspberry Pi 3 se utilizó la herramienta System Monitor de Home Assistant, la cual permite medir el porcentaje ocupado de memoria, disco y CPU. El porcentaje de uso del disco es de 19.1% con respecto a la ruta /config que representa toda la configuración del sistema operativo Home Assistant.

Figura 82*Métricas del servidor*

Métricas del servidor

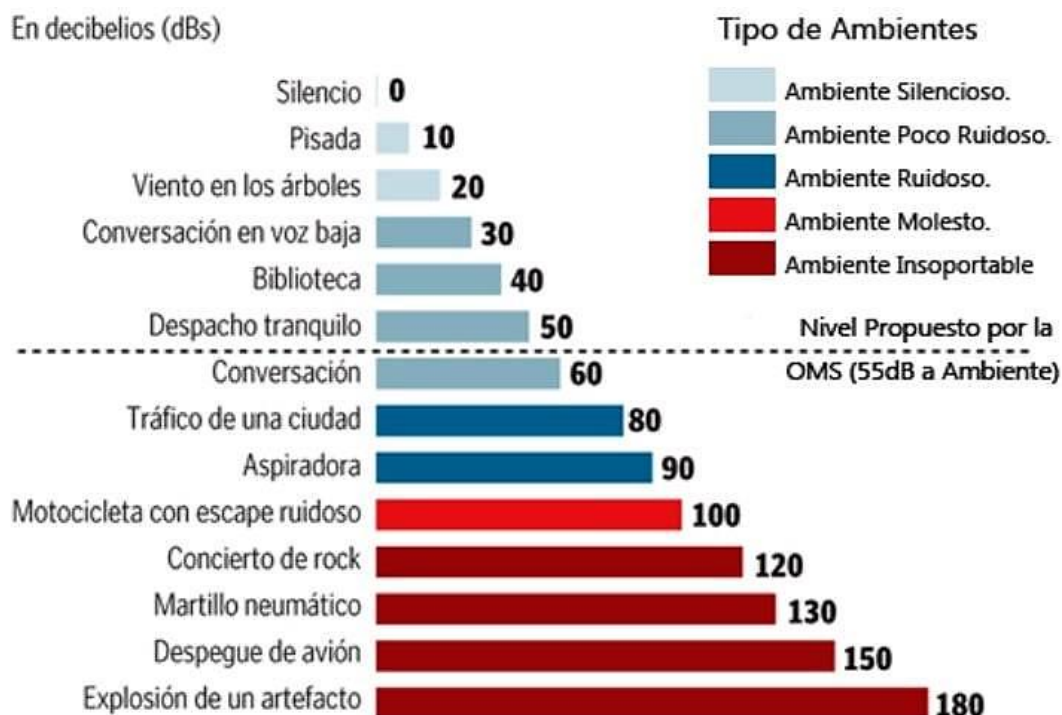
| | | |
|---|----------------------------|-------|
|  | Disk use (percent) /config | 19.1% |
|  | Memory use (percent) | 62.4% |
|  | Processor use | 2% |

Prueba de sonido del nodo de notificaciones

Este dispositivo IoT tiene 20 niveles de volumen para escuchar los diferentes anuncios o canciones. Actualmente existen múltiples aplicaciones capaces de medir los niveles de sonido, una de ellas es Sonómetro de Splend Apps para Android. Esta aplicación es capaz de medir en decibelios [dB] la presión sonora mediante el uso del micrófono interno del celular, proporcionando valores aproximados con referencia al oído humano. En la Figura 83 se muestra una escala de valores en decibelios para comparar con el tipo de ambiente y un sonido distintivo.

Figura 83

Niveles de intensidad del sonido

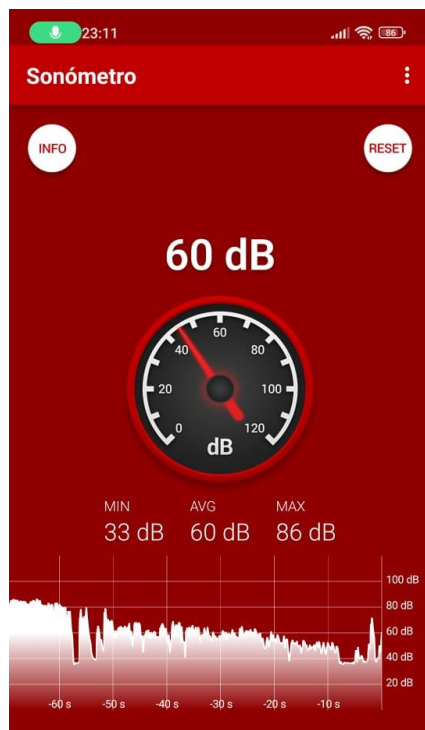


Nota. Tomado de *Niveles de decibelios*, por ALLPE, 2021, (<https://www.allpe.com/acustica/ingenieria-acustica/mediciones-acusticas/a-que-equivalen-los-diferentes-niveles-de-decibelios>).

En la aplicación se visualiza 33 dB como valor mínimo, correspondiente al primer nivel de volumen del dispositivo IoT; un valor máximo de 86 dB que equivale al nivel 20 del nodo y un promedio de 60 dB que corresponde al nivel medio de volumen. Esto quiere decir que cada vez que se aumenta un nivel de audio del dispositivo se estaría incrementando 2.8 dB. El rango de intensidad del sonido del dispositivo inteligente va desde un ambiente poco ruidoso a un ambiente ruidoso que no resulta molesto para el oído de las personas.

Figura 84

Medición con la aplicación Sonómetro



Análisis de costos

Nodo cámara inteligente

Este nodo IoT desarrollado tiene un costo de 35 USD y se lo puede comparar con la cámara de seguridad para interiores TP-Link Tapo C100 V1 que tiene el mismo valor en el mercado ecuatoriano, entre sus características destacan la definición de la cámara de 2 MP, micrófono, visión nocturna y una capacidad de almacenamiento de 128 GB. El dispositivo comercial posee mejores características, pero no cuenta con un sensor de movimiento para detección de intrusos como el nodo desarrollado. Es importante tomar en cuenta que el nodo desarrollado al ser un prototipo tiene un costo más elevado que si se lo produjera masivamente. Para el precio de montaje y programación, la cantidad hace referencia a las horas invertidas para el desarrollo del dispositivo inteligente misma que se aplicará para los demás nodos del sistema.

Tabla 16*Costo nodo cámara*

| Componente | Cantidad | Precio [USD] | Subtotal [USD] |
|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------------|
| Sensor PIR | 1 | 3.00 | 3.00 |
| ESP32-CAM | 1 | 15.00 | 15.00 |
| Conector hembra USB | 1 | 1.00 | 1.00 |
| Carcasa | 1 | 2.00 | 2.00 |
| Montaje | 1 | 6.00 | 6.00 |
| Programación | 2 | 4.00 | 8.00 |
| TOTAL | | | 35.00 |

Nodo control remoto IR genérico

El costo de este dispositivo es de 29 USD y ofrece características similares al control remoto universal smart IR Wifi de Tuya Smart con un valor de 19 USD. La diferencia radica en que el nodo comercial brinda un mayor alcance.

Tabla 17*Costo nodo control remoto IR genérico*

| Componente | Cantidad | Precio [USD] | Subtotal [USD] |
|-----------------------------|-----------------|---------------------|-----------------------|
| Receptor IR | 1 | 2.50 | 2.50 |
| Transmisores IR | 3 | 2.50 | 7.50 |
| Regulador de voltaje LM1117 | 1 | 1.50 | 1.50 |
| Módulo WIFI Esp01 | 1 | 4.50 | 4.50 |
| Conector hembra USB | 1 | 1.00 | 1.00 |
| Carcasa | 1 | 2.00 | 2.00 |
| Montaje | 1 | 6.00 | 6.00 |
| Programación | 1 | 4.00 | 4.00 |
| TOTAL | | | 29.00 |

Nodo de notificaciones

El costo de este dispositivo desarrollado es de 38 USD y no existe un dispositivo inteligente comercial similar en el mercado.

Tabla 18

Costo nodo de notificaciones

| Componente | Cantidad | Precio [USD] | Subtotal [USD] |
|-----------------------------|-----------------|---------------------|-----------------------|
| DFPLAYER MINI MP3 | 1 | 4.00 | 4.00 |
| Módulo WIFI Esp01 | 1 | 4.50 | 4.50 |
| Amplificador PAM8610 | 1 | 3.15 | 3.15 |
| Regulador de voltaje LM317T | 1 | 1.50 | 1.50 |
| Altavoz 8 ohmios 10W | 2 | 6.05 | 12.10 |
| Conector DC005-T20 12V | 1 | 0.75 | 0.75 |
| Carcasa | 1 | 2.00 | 2.00 |
| Montaje | 1 | 6.00 | 6.00 |
| Programación | 1 | 4.00 | 4.00 |
| TOTAL | | | 38.00 |

Nodo de control por movimiento

Este nodo desarrollado tiene un costo de 33 USD. El dispositivo comercial que se asemeja es el Aqara Cube con un precio de 18 USD, cabe recalcar que este producto actualmente no está disponible en Ecuador y que el valor no incluye el envío. El nodo comercial cuenta con la capacidad de personalizar hasta 6 gestos para controlar diferentes dispositivos IoT. Además, utiliza la tecnología Zigbee para la conexión y necesita del AQARA HUB para su funcionamiento. El precio del Aqara M1S Smart Hub es de 50 dólares americanos y no incluye el costo del envío.

Tabla 19

Costo del nodo de control por movimiento

| Componente | Cantidad | Precio [USD] | Subtotal [USD] |
|---------------------------------------|-----------------|---------------------|-----------------------|
| Acelerómetro y Giroscopio MPU6050 | 1 | 4.00 | 4.00 |
| Módulo WIFI Esp01 | 1 | 4.50 | 4.50 |
| Batería litio 3.7 - V 1A | 1 | 10.00 | 10.00 |
| Módulo cargador Baterías litio 03962A | 1 | 1.50 | 1.50 |
| Interruptor de palanca | 1 | 1.00 | 1.00 |
| Carcasa | 1 | 2.00 | 2.00 |
| Montaje | 1 | 6.00 | 6.00 |
| Programación | 1 | 4.00 | 4.00 |
| TOTAL | | | 33.00 |

Nodo de control de acceso

El costo del nodo de control de acceso es de 37.70 USD, se puede comparar con el Timbre Wifi Inteligente de la marca Tuya con un precio de 33 USD. Este dispositivo comercial posee un transmisor y un receptor, ya que al tocar el timbre inalámbrico este transmite mediante el protocolo IEEE 802.11 b/n/g en la banda de 2.4 GHz una señal para el receptor, el cual emite una melodía seleccionable que puede alcanzar una intensidad de 85 dB. Además, incluye la función de alarma inalámbrica pero no posee un lector RFID ni una pantalla de visualización.

Tabla 20*Costo nodo control de acceso*

| Componente | Cantidad | Precio [USD] | Subtotal [USD] |
|-----------------------------|-----------------|---------------------|-----------------------|
| Regulador de voltaje LM1117 | 1 | 1.50 | 1.50 |
| Resistencias | 6 | 0.10 | 0.60 |
| Capacitores | 4 | 0.05 | 0.20 |
| Pulsadores 2 | 2 | 0.20 | 0.40 |
| Lector RFID | 1 | 5.00 | 5.00 |
| Microcontrolador PIC16F877A | 1 | 5.50 | 5.50 |
| Pantalla LCD | 1 | 5.00 | 5.00 |
| Módulo WIFI Esp01 | 1 | 4.50 | 4.50 |
| Buzzer | 1 | 1.00 | 1.00 |
| Oscilador de cristal 4MHz | 1 | 1.00 | 1.00 |
| Conector hembra USB | 1 | 1.00 | 1.00 |
| Carcasa | 1 | 2.00 | 2.00 |
| Montaje | 1 | 6.00 | 6.00 |
| Programación | 1 | 4.00 | 4.00 |
| TOTAL | | | 37.70 |

Nodo control de riego

Este dispositivo IoT desarrollado tiene un costo de 37.85 USD y actualmente no existe en el mercado un dispositivo inteligente comercial que se asemeje.

Tabla 21*Costo nodo control de riego*

| Componente | Cantidad | Precio [USD] | Subtotal [USD] |
|---------------------------------------|-----------------|---------------------|-----------------------|
| Capacitive Soil Moisture Sensor v1.2 | 1 | 2.71 | 2.71 |
| Sensor de luminosidad GY 302 BH1750 | 1 | 3.50 | 3.50 |
| Sensor de humedad y temperatura AHT10 | 1 | 3.00 | 3.00 |
| NODEMCU ESP32 | 1 | 12.90 | 12.90 |
| Bomba de agua de inmersión | 1 | 3.50 | 3.50 |
| Transistor 2N222A | 1 | 0.05 | 0.05 |
| Resistencia | 1 | 0.10 | 0.10 |
| Diodo 1N4007 | 1 | 0.09 | 0.09 |
| Carcasa | 1 | 2.00 | 2.00 |
| Montaje | 1 | 6.00 | 6.00 |
| Programación | 1 | 4.00 | 4.00 |
| TOTAL | | | 37.85 |

Nodo de sensores I2C

El nodo de sensores I2C tiene un costo de 42.78 USD como se aprecia en la Tabla 22. Este dispositivo se puede comparar con el sensor de temperatura y humedad Wifi de la marca Tuya Smart que cuenta con una pantalla LCD para mostrar el valor de los sensores y tiene un precio de 31 USD. La mayor diferencia entre estos dispositivos radica en el número de sensores conectados.

Tabla 22*Costo nodo de sensores I2C*

| Componente | Cantidad | Precio [USD] | Subtotal [USD] |
|---------------------------------------|-----------------|---------------------|-----------------------|
| Sensor de color TCS34725 | 1 | 8.28 | 8.28 |
| Sensor de luminosidad GY 302 BH1750 | 1 | 3.50 | 3.50 |
| Sensor de presión GY-63 MS5611E | 1 | 7.00 | 7.00 |
| Sensor de humedad y temperatura AHT10 | 1 | 3.00 | 3.00 |
| NODEMCU ESP8266 | 1 | 9.00 | 9.00 |
| Carcasa | 1 | 2.00 | 2.00 |
| Montaje | 1 | 6.00 | 6.00 |
| Programación | 1 | 4.00 | 4.00 |
| TOTAL | | | 42.78 |

Nodo detector de gases

El nodo detector de gases tiene un costo de 25.70 USD, se puede comparar con el sensor de gas WiFi inteligente de Tuya Smart con un precio de 20 USD que incluye una sirena para alertar a los usuarios, pero no entrega el valor medido de los gases en ppm como el nodo desarrollado.

Tabla 23*Costo nodo detector de gases*

| Componente | Cantidad | Precio [USD] | Subtotal [USD] |
|-------------------|-----------------|---------------------|-----------------------|
| Sensor MQ2 | 1 | 4.50 | 4.50 |
| NODEMCU ESP8266 | 1 | 9.00 | 9.00 |
| Led | 1 | 0.10 | 0.10 |
| Resistencia | 1 | 0.10 | 0.10 |
| Carcasa | 1 | 2.00 | 2.00 |
| Montaje | 1 | 6.00 | 6.00 |
| Programación | 1 | 4.00 | 4.00 |
| TOTAL | | | 25.70 |

Nodo control de iluminación

El costo del nodo control de iluminación es de 96.42 USD, pero el precio de la tarjeta SEA Board no incluye el envío ya que no está disponible en el mercado ecuatoriano. Este dispositivo desarrollado puede controlar hasta 10 focos, por lo tanto, es comparable al uso de 10 interruptores inteligentes comerciales con un precio total de 185 USD aproximadamente.

Tabla 24

Costo PCB pulsadores

| Componente | Cantidad | Precio [USD] | Subtotal [USD] |
|-------------------|-----------------|---------------------|-----------------------|
| Resistencia | 10 | 0.10 | 1.00 |
| Espadines | 10 | 0.02 | 0.20 |
| Borneras | 11 | 0.25 | 2.75 |
| TOTAL | | | 3.95 |

Tabla 25

Costo PCB focos

| Componente | Cantidad | Precio [USD] | Subtotal [USD] |
|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------------|
| Borneras | 11 | 0.25 | 2.75 |
| Relé 5 VDC | 10 | 0.80 | 8.00 |
| Transistor 2N3904 | 10 | 0.15 | 1.50 |
| Espadines | 11 | 0.02 | 0.22 |
| Diodo 1N4148 | 10 | 0.10 | 1.00 |
| Optoacoplador PC817 | 10 | 0.10 | 1.00 |
| Resistencias | 20 | 0.10 | 2.00 |
| TOTAL | | | 16.47 |

Tabla 26*Costo nodo control de iluminación*

| Componente | Cantidad | Precio [USD] | Subtotal [USD] |
|-------------------|-----------------|---------------------|-----------------------|
| SEA Board | 1 | 50.00 | 50.00 |
| PCB Pulsadores | 1 | 3.95 | 3.95 |
| PCB Focos | 1 | 16.47 | 16.47 |
| Carcasa | 1 | 2.00 | 2.00 |
| Montaje | 2 | 6.00 | 12.00 |
| Programación | 3 | 4.00 | 12.00 |
| TOTAL | | | 96.42 |

Sistema de hogar inteligente

El costo total del sistema es de 692.95 USD, donde se consideran los nodos desarrollados en base a chips, sensores y actuadores, los nodos comerciales y la Raspberry Pi 3 que actúa como servidor. Es importante considerar que los dispositivos inteligentes desarrollados son prototipos, por lo tanto, tienen un costo más alto que si se lo produjera masivamente.

El nodo de la pantalla táctil WT32 no está disponible en Ecuador, por lo cual el valor que se presenta no incluye el envío.

Tabla 27*Costo total sistema*

| Componente | Cantidad | Precio [USD] | Subtotal [USD] |
|------------------------------------|-----------------|---------------------|-----------------------|
| Interruptor inteligente Tuya Smart | 1 | 18.50 | 18.50 |
| Enchufe Inteligente TP link | 1 | 8.00 | 8.00 |
| Foco Inteligente TP Link | 1 | 17.00 | 17.00 |
| Google Home Mini | 1 | 34.00 | 34.00 |
| Raspberry PI 3 | 1 | 175.00 | 175.00 |
| Pantalla Táctil WT32 | 1 | 30.00 | 30.00 |
| Nodo Cámara inteligente | 2 | 35.00 | 70.00 |
| Nodo Control Remoto IR Genérico | 1 | 29.00 | 29.00 |
| Nodo de Notificaciones | 1 | 38.00 | 38.00 |
| Nodo de Control por movimiento | 1 | 33.00 | 33.00 |
| Nodo de Control de Acceso | 1 | 37.70 | 37.70 |
| Nodo Control de Riego | 1 | 37.85 | 37.85 |
| Nodo de Sensores I2C | 1 | 42.78 | 42.78 |
| Nodo Detector de Gases | 1 | 25.70 | 25.70 |
| Nodo Control de iluminación | 1 | 96.42 | 96.42 |
| TOTAL | | | 692.95 |

Una vez realizadas las pruebas y análisis del sistema de hogar inteligente, se presentará las conclusiones y recomendaciones del trabajo realizado.

Conclusiones

- En el presente trabajo de titulación se implementó un sistema de hogar inteligente mediante la integración de nodos desarrollados en base a chips, sensores y actuadores, con nodos comerciales. Los dispositivos inteligentes desarrollados se ajustan de mejor manera a las necesidades del usuario y se basan en dos componentes principales para su procesamiento, como el microcontrolador y la FPGA, brindando una mayor comodidad, seguridad y eficiencia energética en el hogar.
- En el sistema de hogar inteligente fue posible la integración de nodos comerciales con nodos desarrollados basados en microcontrolador y FPGA mediante un protocolo de comunicación rápido, liviano y confiable como lo es MQTT. Para la implementación de este protocolo es necesario que el servidor tenga instalado un sistema operativo como Home Assistant y la integración de Mosquitto bróker.
- El consumo energético anual de los 11 nodos desarrollados es 85.92 kWh lo que representa un gasto de 7.92 USD en Ecuador. El gasto anual de energía de un electrodoméstico como la lavadora es alrededor de 23.46 USD, por lo cual, si se compara con el precio de consumo de los nodos, resulta viable la implementación de estos dispositivos IoT en un sistema de hogar inteligente para brindar comodidad, seguridad y eficiencia energética a los usuarios.
- El costo total del sistema de hogar inteligente es de 692.95 USD, el cual incluye el servidor junto con los dispositivos comerciales y desarrollados. Los nodos comerciales disponibles en el mercado evidencian mejores características tecnológicas que los desarrollados a un precio competitivo. El dispositivo desarrollado que mayor ahorro permite al usuario es el nodo control de iluminación basado en FPGA ya que reemplaza a 10 interruptores o focos inteligentes.
- El nodo basado en FPGA emplea la Spartan Edge Accelerator Board como placa de desarrollo, la cual permite controlar 10 focos y 10 interruptores a través de una interfaz o pulsadores y

monitorear la temperatura con Home Assistant. La placa SEA combina la programabilidad de la FPGA y la conectividad inalámbrica del ESP32 mediante la interfaz de comunicación I2C. En cuanto a su funcionamiento, es necesario realizar la programación de la FPGA en un lenguaje como VHDL y para el ESP32 se puede programar en C++ en el entorno Arduino. El principal aporte de este trabajo es el desarrollo de este nodo, debido a que representó un gran trabajo investigativo para su programación e implementación como dispositivo inteligente en el hogar.

- Las pruebas de carga muestran que el tiempo de respuesta promedio para las solicitudes HTTP en la red interna es de 50 ms y en la red externa es de 196 ms. En ambos casos este tiempo es muy aceptable ya que los usuarios perciben una respuesta inmediata. De acuerdo con Google LLC, un tiempo medio de respuesta menor a 200 ms es adecuado para brindar una buena experiencia de usuario.
- El servidor tiene un porcentaje de uso de disco del 19.1%, lo cual se considera bajo y bueno para el equipo. Esto significa que existe mucho espacio libre en el disco para almacenar datos adicionales, actualizaciones y acomodar el crecimiento del sistema.
- Una utilización de memoria del 62.4% en el servidor se considera moderada. Es importante disponer de algo de memoria no utilizada, ya que permite al sistema operativo almacenar en caché los datos utilizados con más frecuencia, lo que mejora el rendimiento general. Sin embargo, si el uso de la memoria se mantiene constantemente alto (por encima del 80%) y hay escasez de memoria disponible, puede provocar que el sistema se ralentice y cause problemas de rendimiento. En tales casos, puede ser necesario actualizar la memoria u optimizar su uso cerrando las aplicaciones y servicios innecesarios.
- La Raspberry Pi 3 Modelo B que se utiliza como servidor presenta un porcentaje de uso del procesador de 2%, lo que se considera bajo. Esto significa que el procesador tiene mucha capacidad sin utilizar y que hay un gran margen para carga de trabajo adicional, de esta manera

se evita problemas de rendimiento en el futuro. Esta placa de desarrollo evidencia en general un rendimiento adecuado para la implementación de este tipo de sistemas.

Recomendaciones

- Con la finalidad de abaratar los costos en el desarrollo de dispositivos IoT y volver más competitivo el sistema de hogar inteligente es necesario buscar una producción a gran escala y una importación directa de los componentes electrónicos, de esta manera resulta más accesible la implementación de este tipo de sistemas en los hogares ecuatorianos.
- Difundir este tipo de tecnología y los beneficios de su uso en los hogares ecuatorianos mediante la organización de demostraciones y eventos para mostrar las casas inteligentes y sus características, ofrecer incentivos como descuentos y opciones de financiación para fomentar la implementación, además de brindar formación y apoyo a los usuarios sobre cómo utilizar y mantener los hogares inteligentes para automatizar y monitorear la vivienda.

Trabajos futuros

- En un trabajo futuro se podría focalizar en la realización de pruebas de penetración en dispositivos y redes domésticas inteligentes mediante la simulación de ataques reales al sistema para identificar puntos débiles y vulnerabilidades de seguridad. Este enfoque es un método eficaz para verificar la seguridad del sistema y es fundamental para mantener la seguridad y la privacidad de los usuarios de hogares inteligentes.
- Integrar un nodo IoT con redes neuronales que mejore el control de acceso a la vivienda mediante el reconocimiento facial y de voz de los usuarios para brindar mayor seguridad y confort en el hogar. Existen placas de desarrollo que soportan la implementación de este tipo de aplicaciones, realizando procesamiento en el borde, lo que significa que los datos generados se procesan localmente en el dispositivo y en tiempo real.

Bibliografía

- Adafruit Industries. (2022). *PIR Motion Sensor*. <https://learn.adafruit.com/pir-passive-infrared-proximity-motion-sensor>
- Aei Soluciones Técnicas. (2021). *¿Qué son y cómo funcionan los focos inteligentes?*
<https://info.aei.mx/blog/qu%C3%A9-son-y-c%C3%B3mo-funcionan-los-focos-inteligentes>
- AI-Thinker. (2015). *ESP-01 WiFi Module*.
- Ai-Thinker Technology. (2021). *ESP32-CAM camera development board*. <https://docs.ai-thinker.com/en/esp32-cam>
- Alam, M., Shakil, K. A., & Khan, S. (2020). Internet of things (IoT): Concepts and applications. En *Internet of Things (IoT): Concepts and Applications*. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-37468-6>
- Ali Express. (2022). *Interruptor de pared con control por voz*.
<https://es.aliexpress.com/item/1005004541211287.html>
- ALLPE. (2021). *¿A qué equivalen los diferentes niveles de decibelios?*
<https://www.allpe.com/acustica/ingenieria-acustica/mediciones-acusticas/a-que-equivalen-los-diferentes-niveles-de-decibelios>
- Al-Mutawa, R. F., & Eassa, F. A. (2020). A smart home system based on internet of things. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2*.
<https://doi.org/10.14569/ijacsa.2020.0110234>
- Amazon. (2022). *Módulo SunFounder para Arduino*. https://m.media-amazon.com/images/I/71wuC+BKB4L._AC_SL1500_.jpg
- Arduino. (2021). *Arduino MKR Vidor 4000*. <https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-mkr-vidor-4000>

Art of Circuits. (2022). *AHT10 High-Precision Digital Temperature & Humidity Sensor Module*.

<https://artofcircuits.com/product/aht10-high-precision-digital-temperature-humidity-sensor-module>

Beuzeval, A. (2020, julio 10). *What can the Google Home Mini do?*

<https://www.mymemory.co.uk/blog/what-can-the-google-home-mini-do>

Blacio, M. A. M., Sarmiento, J. E. B., Sarango, O. G. J., & Malla, E. E. G. (2021). *Sistema integral de hogar inteligente basado en Home Assistant y Raspberry Pi*.

Cable Wholesale. (2022). *Infrared Emitter, Receivers & Repeaters for Home Theater*.

https://www.cablewholesale.com/support/technical_articles/infrared.php#:~:text=IR%20Receivers%20These%20devices%20pick%20up%20infrared%20signals,the%20remote%20control%20since%20they%20require%20line-of-sight%20transmission.

Cabrera, S. (2019). *Estudio de la plataforma domótica Home Assistant e integración en Raspberry Pi*

[Universidad de Sevilla]. <https://idus.us.es/handle/11441/94281>

Camarena, A. (2019). *Instalación y configuración de un sistema integral de hogar inteligente basado en plataformas de software libre*. Universidad Politécnica de Valencia.

C&D TechNologia. (2022). *Sensor de presión atmosférica GY-63 MS5611-01BA03*.

<https://cdtecnologia.net/sensores/2205-sensor-de-presion-atmosferica-ms5611.html>

Chávez, J., & Velecela, C. (2021). *Diseño e implementación de un sistema Smart Home aplicado en una vivienda en la ciudad de Azogues* [Universidad Politécnica Salesiana].

<https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21434>

Chimbolema, C. (2020). *Control domótico con asistente de voz y realidad aumentada para el Internet de las Cosas* [Universidad Técnica de Machala].

<http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/15887>

- Choi, W., Kim, J., Lee, S. E., & Park, E. (2021). Smart home and internet of things: A bibliometric study. *Journal of Cleaner Production*, 301. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126908>
- Cloudflare. (2022). *Cloudflare Tunnel*. <https://developers.cloudflare.com>
- Cornel-Cristian, A., Gabriel, T., Arhip-Calin, M., & Zamfirescu, A. (2019). Smart home automation with MQTT. *2019 54th International Universities Power Engineering Conference, UPEC 2019 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/UPEC.2019.8893617>
- CorpShadow. (2022). *CorpShadow Biz Store*. <https://corpshadow.biz/odroid/motiondetector>
- DFRobot. (2019). *DFR0299 DFPlayer Mini*. https://wiki.dfrobot.com/DFPlayer_Mini_SKU_DFR0299
- El-Azab, R. (2021). Smart homes: Potentials and challenges. En *Clean Energy* (Vol. 5, Número 2). <https://doi.org/10.1093/ce/zkab010>
- Electricista Juárez. (2021). *Casas inteligentes*. <https://electricistajuarez.com/que-son-los-interruptores-inteligentes/>
- Espressif Systems. (2022). *ESP32 Series Datasheet*.
- Goud, N., & Sivakami, A. (2019). Spectate home appliances by internet of things using mqtt and ifttt through google assistant. *International Journal of Scientific and Technology Research*, 8(10).
- HardwareBee. (2021). *FPGA vs. Microcontroller, what to choose?* <https://hardwarebee.com/fpga-vs-microcontroller-what-to-choose>
- Hasan Alhafidh, B. M., & Allen, W. (2016). Artigo 09- Design and Simulation of a Smart Home managed by an Intelligent Self-Adaptive System. *Int. Journal of Engineering Research and Application*, 6(December).
- Herrero, R. (2020). *Fundamentals of IoT Communication Technologies*.
- Hijazi, G., Habaebi, M. H., Al-Haddad, A., & Zyoud, A. M. (2021). Stress testing MQTT server for private IOT networks. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 67(2). <https://doi.org/10.24425/ijet.2021.135969>

- Home Assistant. (2022). *Logo*. <https://www.home-assistant.io>
- How To Electronics. (2022). *Interface Capacitive Soil Moisture Sensor v1.2 with Arduino*.
<https://how2electronics.com/interface-capacitive-soil-moisture-sensor-arduino>
- Hua, T. (2020). Design and Implementation of Smart Home Control System Based on Fpga. *Frontiers in Educational Research*, 3(13), 68–72.
- INEC. (2021, abril). *Tecnologías de la Información y Comunicación*.
https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_Sociales/TIC/2020/202012_Principales_resultados_Multiproposito_TIC.pdf
- InvenSense. (2013). *MPU-6000 and MPU-6050 Register Map and Descriptions*.
- Isyanto, H., Arifin, A. S., & Suryanegara, M. (2020). Design and Implementation of IoT-Based Smart Home Voice Commands for disabled people using Google Assistant. *Proceeding - ICoSTA 2020: 2020 International Conference on Smart Technology and Applications: Empowering Industrial IoT by Implementing Green Technology for Sustainable Development*.
<https://doi.org/10.1109/ICoSTA48221.2020.1570613925>
- Jiang, L., Liu, D. Y., & Yang, B. (2004). Smart home research. *Proceedings of 2004 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 2. <https://doi.org/10.4018/jaci.2009062203>
- Jiménez, G. (2020). *Monitorización, almacenamiento y tratamiento de datos mediante Home Assistant en un centro de energías renovables* [Universidad Carlos III de Madrid]. <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/32710>
- Keystudio. (2021). *Ks0061 keystudio 1602 I2C Module*.
https://wiki.keystudio.com/Ks0061_keystudio_1602_I2C_Module
- Khan, J., & Yuce, M. (2021). Internet of Things (IoT) Systems and Applications. En *Internet of Things (IoT) Systems and Applications*.

Last Minute Engineers. (2022). *How MQ2 Gas/Smoke Sensor Works? & Interface it with Arduino*.

<https://lastminuteengineers.com/mq2-gas-senser-arduino-tutorial>

Lea, P. (2020). IoT and Edge Computing for Architects. En *Second Edition* (Número March).

lexaTech. (2022). *Enchufes*. <https://homelife.mx/lexatech/enchufes>

López, R. (2022). *Diseño e implementación de un sistema Smart Home basado en IoT* [Universidad de Jaén]. <https://tauja.ujaen.es/handle/10953.1/18044>

MacHeso, P., Manda, T. D., Chisale, S., Dzupire, N., Mlatho, J., & Mukanyiligira, D. (2021). Design of ESP8266 Smart Home Using MQTT and Node-RED. *Proceedings - International Conference on Artificial Intelligence and Smart Systems, ICAIS 2021*.

<https://doi.org/10.1109/ICAIS50930.2021.9396027>

Madakam, S., Ramaswamy, R., & Tripathi, S. (2015). Internet of Things (IoT): A Literature Review. *Journal of Computer and Communications, 03(05)*. <https://doi.org/10.4236/jcc.2015.35021>

Makers Hut. (2021). *Infrared Receiver Module IR For Arduino*. <https://makers-hut.com/product/infrared-receiver-module-ir-for-arduino>

Marikyan, D., Papagiannidis, S., & Alamanos, E. (2019). A systematic review of the smart home literature: A user perspective. *Technological Forecasting and Social Change, 138*.

<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.08.015>

Mayub, A., Fahmizal, Shidiq, M., Oktiawati, U. Y., & Rosyid, N. R. (2019). Implementation smart home using internet of things. *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control), 17(6)*. <https://doi.org/10.12928/TELKOMNIKA.v17i6.11722>

Microchip. (2003). *PIC16F87XA Data Sheet*.

Moreno Hernández, R. (2020). Desarrollo de una aplicación IoT para la gestión de un hogar inteligente mediante el protocolo MQTT y Sistemas en chip (SoC) ESP32. *Universidad Politécnica de Valencia*. <https://riunet.upv.es/handle/10251/152402>

- Motlagh, N. H., Mohammadrezaei, M., Hunt, J., & Zakeri, B. (2020). Internet of things (IoT) and the energy sector. En *Energies* (Vol. 13, Número 2). <https://doi.org/10.3390/en13020494>
- MV Electrónica. (2022). *Microcontrolador Pic16f877a*.
<https://mvelectronica.com/producto/microcontrolador-pic16f877a>
- Nayak, P., Ray, N., & Ravichandran, P. (2021). IoT Applications, Security Threats, and Countermeasures. En *IoT Applications, Security Threats, and Countermeasures*.
<https://doi.org/10.1201/9781003124252>
- Naylamp Mechatronics. (2021). *NodeMCU v2 ESP8266 WiFi*.
<https://naylampmechatronics.com/espressif-esp/153-nodemcu-v2-esp8266-wifi.html>
- NXP Semiconductors. (2007). *MFRC522 Contactless Reader IC*.
- openHASP. (2022, junio 4). *Wireless-Tag WT32-SC01*.
<https://openhasp.haswitchplate.com/0.6/devices/wt32-sc01>
- Pascual, C. (2022). *ESP32 CAM introducción y primeros pasos*. <https://programarfácil.com/esp32/esp32-cam>
- Pattar, S., Buyya, R., Venugopal, K. R., Iyengar, S. S., & Patnaik, L. M. (2018). Searching for the IoT resources: Fundamentals, requirements, comprehensive review, and future directions. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 20(3). <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2825231>
- Perros, H. G. (2021). An Introduction to IoT Analytics. En *An Introduction to IoT Analytics*.
<https://doi.org/10.1201/9781003139041>
- Perumal, T., Ramli, A. R., Leong, C. Y., Mansor, S., & Samsudin, K. (2008). interoperability among heterogeneous systems in smart home environment. *SITIS 2008 - Proceedings of the 4th International Conference on Signal Image Technology and Internet Based Systems*.
<https://doi.org/10.1109/SITIS.2008.94>

- Pooja, P., Saranya, S., Anukovika, R., & Pooja, R. (2019). Cost effective Smart Home based on Fpga. *Think India*, 22(2).
- Power Analog Microelectronics. (2008). *PAM8610 10W Stereo Class-D Audio Power Amplifier with DC Volume Control*. <http://www.poweranalog.com/>
- Programarfacil. (2022). *Guía para configurar un ESP-01*. <https://programarfacil.com/podcast/como-configurar-esp01-wifi-esp8266>
- Pujari, S., Yeotkar, A., Shingare, V., Momin, S., & Kokare, B. (2015). Performance analysis of microcontroller and FPGA based Signal Processing a case study on FIR filter design and implementation. *2015 International Conference on Industrial Instrumentation and Control, ICIC 2015*. <https://doi.org/10.1109/IIC.2015.7150748>
- Quimiz, J., & Trujillo, X. (2022). *Diseño e implementación de un prototipo de sistema de seguridad inteligente basado en tecnología IoT y GSM mediante el uso de energía renovable dentro de un hogar* [Universidad de Guayaquil]. <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/59821>
- ROHM Semiconductor. (2011). *Digital 16bit Serial Output Type Ambient Light Sensor IC*.
- Sánchez, H. (2021). *Integración de un sistema de vigilancia mediante Telegram en Home Assistant* [Universidad Politécnica de Valencia]. <https://riunet.upv.es/handle/10251/174249>
- Seeed Studio. (2019, noviembre 15). *mouser*. <https://www.mouser.ec/new/seeed-studio/seeed-spartan-edge-accelerator/>
- Seeed Studio. (2021). *Spartan Edge Accelerator Board*. <https://wiki.seeedstudio.com/Spartan-Edge-Accelerator-Board>
- Seng, K. P., Lee, P. J., & Ang, L. M. (2021). Embedded intelligence on fpga: Survey, applications and challenges. En *Electronics (Switzerland)* (Vol. 10, Número 8). <https://doi.org/10.3390/electronics10080895>

- Sharma, N., Shamkuwar, M., & Singh, I. (2019). The history, present and future with iot. En *Intelligent Systems Reference Library* (Vol. 154). https://doi.org/10.1007/978-3-030-04203-5_3
- Sheng-Lung Peng, Souvik Pal, L. H. (2019). Principles of Internet of Things (IoT) Ecosystem: Insight Paradigm. En *Intelligent Systems Reference Library* (Vol. 174).
- techzeero. (2018). *IR Sensor*. <https://techzeero.com/sensors-modules/ir-sensor>
- TEConnectivity. (2017). *MS5611-01BA03*.
- UNIT Electronics. (2020). *Raspberry Pi 3 Modelo B*. <https://uelectronics.com/producto/raspberry-pi-3-modelo-b>
- UNIT Electronics. (2021). *Módulo Sensor De Intensidad Luminosa Bh1750*.
<https://uelectronics.com/producto/gy-302-modulo-sensor-de-intensidad-luminosa-bh1750>
- UNIT Electronics. (2022). *Módulo Sensor de Reconocimiento de Color RGB TCS34725*.
<https://uelectronics.com/producto/modulo-sensor-de-reconocimiento-de-color-rgb-tcs34725>
- Wilson, C., Hargreaves, T., & Hauxwell-Baldwin, R. (2017). Benefits and risks of smart home technologies. *Energy Policy*, 103. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.12.047>
- Wireless-Tag Technology. (2019). *WT32-SC01 Datasheet*.
- Xukyo. (2020). *Usando un módulo MPU6050 con Arduino*. <https://www.aranacorp.com/es/usando-un-modulo-mpu6050-con-arduino/>
- YALÇINKAYA, F., AYDİLEK, H., ERTEN, M. Y., & İNANÇ, N. (2020). IoT based Smart Home Testbed using MQTT Communication Protocol. *Uluslararası Muhendislik Arastirma ve Gelistirme Dergisi*.
<https://doi.org/10.29137/umagd.654056>

Apéndices