

Desempeño RSSI de nodos sensores LoRa, BLE y WiFi en un sistema IoT interoperable.

RSSI performance of sensor nodes LoRa BLE and WiFi in an interoperable IoT system.

Octavio José Salcedo-Parra¹, Nelson Giovanni Agudelo-Cristancho²

¹Universidad Nacional de Colombia, Bogota - Colombia, ²Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, Bogota - Colombia
ORCID: ¹[0000-0002-0767-8522](https://orcid.org/0000-0002-0767-8522), ²[0000-0002-1247-7696](https://orcid.org/0000-0002-1247-7696)

Recibido: 27 de enero de 2021.

Aceptado: 14 de abril de 2021.

Publicado: 01 de mayo de 2021.

Resumen- En este artículo se muestra el proceso de diseño e implementación de un sistema de interoperabilidad para IoT Internet de las Cosas. Integra en un procesador, sistema embebido Raspberry Pi3 la interconexión con los estándares IEEE 802.15.4 - LoRa, IEEE 802.15.1 - Bluetooth LE (BLE) e IEEE 802.11.a, b, g - Wifi. Este conjunto de estándares corresponde a los más utilizados en sistemas IoT. El sistema embebido se configura como un dispositivo IoT hub en la plataforma Azure, maneja una arquitectura modelo vista controlador, el sistema de almacenamiento y visualización es de tipo web. Se visualiza la respuesta de la variable de cada nodo sensor bajo el concepto de tiempo real, junto con la ubicación y el indicador de intensidad de señal recibida (RSSI). Se muestran los resultados de las pruebas de cobertura en ambientes externos e internos. El alcance máximo es de 313 metros en la interoperabilidad LoRa y LTE, BLE 22 metros, WiFi 44 metros. El perímetro de cobertura máxima es de 979 metros BLE 70 metros WiFi 136 metros.

Palabras clave: IOT, cobertura, interoperabilidad, interconexión, RSSI.

Abstract— This paper shows the process of designing and implementing an interoperability system for the Internet of Things IoT. Integrates in a processor (embedded system Raspberry Pi3), the access interconnection to the standards IEEE 802.15.4 - LoRa, IEEE 802.15.1 - Bluetooth LE (BLE) and IEEE 802.11.a, b, g - Wifi. This set of standards corresponds to the most used in IoT systems. The embedded system is configured as an IoT hub device on the Azure platform, it handles a model view controller architecture, the storage and display system is of the web type. The response of the variable of each sensor node is displayed under the concept of real time, together with the location and the received signal strength indicator (RSSI). The results of the coverage tests in external and internal environments are displayed. The maximum range is 313 meters in LTE and LoRa interoperability, LTE and BLE 22 meters, LTE and WiFi 44 meters. The maximum coverage perimeter is 979 meters, BLE 70 meters, WiFi 136 meters.

Keywords: IOT, Azure, coverage, interoperability, interconnection, RSSI.

*Autor para correspondencia.

Correo electrónico: ngagudeloc@correo.udistrital.edu.co (Nelson Giovanni Agudelo Cristancho).

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad de Santander.

Este es un artículo bajo la licencia CC BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Como citar este artículo: O. J. Salcedo-Parra y N. G. Agudelo-Cristancho, "Desempeño RSSI de nodos sensores LoRa, BLE y WiFi en un sistema IoT interoperable", *Aibi revista de investigación, administración e ingeniería*, vol. 9, no. 2, pp. 19-32, 2021, doi: [10.15649/2346030X.905](https://doi.org/10.15649/2346030X.905)

I. INTRODUCCIÓN

En IoT, el mensaje de los nodos sensores debe entregarse instantáneamente entre los nodos vecinos de la red habilitada para IoT y para que esto suceda, los nodos sensores deben estar en un rango de transmisión adecuado determinado generalmente por el nivel de RSSI por sus siglas en inglés Received Signal Strength Indicator. Una revisión de literatura revela que no se han realizado muchos trabajos relacionados al concepto de IoT y la exploración de sus aplicaciones. La idea principal de Internet de las cosas es interconectar múltiples dispositivos electrónicos analógicos y digitales, de naturaleza homogénea y heterogénea, para que puedan entregar de manera eficiente la información. IoT es considerado un concepto en rápida evolución. [1]. El Internet de las cosas (Internet of Things) es cada vez más relevante y se refiere a la interconexión de miles de millones de dispositivos inteligentes. El número cada vez mayor de dispositivos IoT con características heterogéneas requiere que las redes futuras evolucionen para proporcionar una nueva arquitectura que soporte el aumento esperado en la generación de datos, así como el almacenamiento. El rendimiento de una arquitectura podría centrarse en dos parámetros latencia y tráfico de red. [2]

El concepto de interoperabilidad se ha definido como "la capacidad de dos o más sistemas o componentes para intercambiar información y utilizar la información que se ha intercambiado" [3]. Las tecnologías de (IoT) Internet de las cosas en la última década han madurado tanto en hardware como de software para la implementación a gran escala, de igual forma ocurre con el concepto de ciudades inteligentes. Los elementos activos de IoT son esenciales para las implementaciones de Smart City. Un marco para Smart City funcional en tiempo real de las TIC son las eficaces (API) application program interface utilizadas para interactuar entre aplicaciones, servicios y dispositivos. Las API ayudan a construir la interoperabilidad funcional entre muchos sistemas. La visualización y almacenamiento de datos se puede recopilar de varias plataformas, servicios en la nube y aplicaciones de usuario final. [4]

JavaScript es uno de los lenguajes de programación más utilizado para el desarrollo de APIs, permite crear múltiples interactividades como en [5] para lograr los comentarios en línea traducción y realimentación en tiempo real. Debido a que JavaScript es un lenguaje de programación de toma de decisiones, podemos controlar los atributos de HTML y CSS para hacer una página web flexible e inteligente. La incorporación responsiveWeb, en ambientes de tipo web proporciona a los usuarios un entorno que admite interacciones distribuidas utilizando plataformas web sobre dispositivos móviles. [6] Las aplicaciones de JavaScript se usan ampliamente en diversos escenarios, incluyendo las aplicaciones web cliente, aplicaciones móviles y aplicaciones del lado del servidor. Debido a su soporte multiplataforma, Javascript se ha convertido en la tecnología central de las plataformas web como redes sociales. [7]

PostgreSQL es un sistema de base de datos de código abierto desarrollado por la Universidad de California, Berkeley. PostgreSQL es una de las principales bases de datos relacionales del mundo y se usa ampliamente en muchos campos. PostgreSQL se basa en un modelo de datos relacionales que sigue el estándar internacional SQL. PostgreSQL combina las capacidades operativas de los lenguajes de consulta estructurados con las capacidades de procesamiento de datos de los lenguajes de procedimiento para soportar de manera eficiente el acceso y almacenamiento de datos a gran escala. PostgreSQL está escrito en C y utiliza un modelo multiproceso para soportar un alto acceso concurrente y eficiente. Se puede aplicar una plataforma de servicio de big data, al sistema de red para resolver mejor los problemas de almacenamiento, cálculo y análisis de datos masivos en tiempo casi real. [8] El modelo de nube por servicio brinda al usuario la oportunidad de utilizar los recursos del proveedor. También lo conocemos como un modelo de distribución Service Delivery Model de computación en la nube. Comprende los tres pilares básicos SaaS, PaaS e IaaS. Para este caso (PaaS), Platform as a Service es principalmente para desarrolladores que implementan sus propias soluciones de software. El objetivo principal de los entornos preconfigurados es facilitar la creación de nuevas aplicaciones, pero también simplificar su implementación en la producción junto con el mantenimiento durante el tiempo de ejecución. Estos entornos ayudan a eliminar la necesidad de comprar por separado middleware o software de prestación de servicios [9]. Un ejemplo de plataforma en la nube como servicio (PaaS) es Heroku. Heroku se caracteriza por que admite varios lenguajes de programación que se utilizan para el modelo de implementación de aplicaciones web, se basa en un sistema de contenedor administrado con servicios de datos integrados y un ecosistema para implementar y ejecutar aplicaciones modernas. [10]

Los mayores proveedores de plataformas en la nube de Internet de las cosas (IoT) son Microsoft Azure, Amazon Web Services y Google Cloud. Estas tres compañías son reconocidas como las más importantes acordaron unirse al dominio de IoT y concentrarse en mejorar los servicios en sus plataformas de IoT. Microsoft Azure tiene muchas herramientas, especialmente herramientas de visualización de datos, el estudio descrito en [11] argumentó que Microsoft Azure y AWS eran las plataformas líderes en el mercado y en una situación en la que el usuario estaba interesado en la analítica, la visualización, el almacenamiento y el monitoreo de datos además de la mensajería en la nube del dispositivo, Microsoft Azure era la mejor opción, ya que tenía más opciones que las otras dos.

WebSocket es un protocolo para tiempo real, es ligero y permite una comunicación confiable y rápida entre dos clientes. El trabajo [12] mostró un método que puede reproducir video remoto con menos de 2 segundos de retraso en la red 4G / LTE, utilizando una conexión confiable de conectores web o WebSocket entre las dos partes. sin embargo, si las condiciones de calidad de la red se reducen la latencia aumenta.

En este artículo se describe la implementación de un sistema de interoperabilidad entre redes celulares y tecnologías inalámbricas utilizadas en entornos IoT, inicialmente se presenta el marco teórico seguido de la metodología o procedimientos posteriormente resultados, análisis e interpretación y finalmente la propuesta de solución y mejoras, conclusiones y recomendaciones.

II. MARCO TEÓRICO

El despliegue de sistemas de comunicaciones móviles de segunda y tercera generación, 2G y 3G en el país es muy alto, sin embargo, el interés de muchos organismos de investigación se enfoca hacia sistemas futuros independientes como 5G y LTE. Con la tecnología 4G, una gama de nuevos servicios y modelos están disponibles. Estas interfaces de servicios y modelos necesitan ser analizadas y evaluadas con los sistemas de comunicación celular existentes los cuales se clasifican de acuerdo a la generación. [13]. Las redes celulares de primera generación fueron sistemas analógicos básicos diseñados para comunicaciones de voz. Posteriormente Se realizó un cambio a los primeros servicios de datos y se mejoró la eficiencia espectral en los sistemas 2G haciendo uso de modulaciones digitales y acceso múltiple por división de tiempo o división de código. Las redes de tercera generación 3G introdujeron el acceso a Internet de alta velocidad, capacidades de transmisión de video y audio altamente mejoradas mediante el uso de tecnologías como el acceso múltiple por división de código de banda ancha (W-CDMA) y el

acceso a paquetes de alta velocidad (HSPA) el cual pretende ampliar y mejorar el rendimiento de las redes de telecomunicaciones móviles convencionales 3G que utilizan protocolos WCDMA. Un estándar mejorado de 3GPP (3G Partnership Project), HSPA +, se lanzó a fines de 2008 con la posterior utilización mundial a partir de 2010. HSPA ha sido implementado en más de 150 países por más de 350 proveedores de servicios de comunicaciones en múltiples bandas de frecuencia. Las nuevas aplicaciones y los nuevos sistemas se implementan para mejorar las características de los métodos actuales y así reemplazar las técnicas existentes, pero sin perder la compatibilidad con los sistemas de generaciones anteriores, como son las que se originan luego de la tercera generación denominadas B3G o 4G. [14]. Técnicamente, 4G significa un único entorno integrado, basado en IP para todas las necesidades de telecomunicaciones incluyendo voz, vídeo, medios de radiodifusión, Internet y por lo tanto las aplicaciones orientadas a IoT que utilizan redes alámbricas. Los usuarios son el foco central de 4G y como foco central los usuarios por medio de terminales inteligentes pueden obtener desde un acceso sencillo de banda ancha hasta una serie de servicios que tengan en cuenta sus preferencias personales [15].

a. Comunicaciones inalámbricas

I. Wifi 802.11B/G/N

Con el continuo desarrollo de aplicaciones sobre el protocolo IP el uso de redes WIFI se está volviendo cada vez más usual. Los denominados puntos de acceso WIFI (AP) se ha convertido en nodos clave para fortalecer la seguridad de los datos y el control de acceso al usuario. El punto de acceso WIFI sirve como un nodo de reenvío intermedio, inicialmente puede adquirir todos los datos para la interacción del usuario, y de otro lado, los puntos de acceso WIFI se conectan al ISP permitiendo que los usuarios accedan o no a la red. De esta manera son la primera barrera para controlar el acceso de usuarios malintencionados a la red y son una base importante para el control de acceso [16]. El concepto de IoT requiere que los dispositivos estén conectados a internet. La nueva era de Internet de las cosas (IoT) que se refería a objetos identificables de forma única y se representaba en una estructura "similar a Internet", ha jugado un papel importante en nuestra vida diaria en términos de inteligencia y automatización como formas convenientes. Al establecer una conectividad IoT como sistema inteligente para vincular objetos a la red de internet se está generando un gran volumen de datos que necesitan gestión y control, a medida que avanza la tecnología el sistema de gestión y automatización de IoT presenta nuevas aplicaciones y se aplica en muchas infraestructuras básicas como los sistemas de medición de sensores, gestión de electricidad, gas y agua según la conveniencia de individuos y organizaciones. [17].

II. Bluetooth ble IEEE 802.15.1

Los dispositivos (Bluetooth low Energy) BLE se incluyen en el estándar Bluetooth desde la especificación Bluetooth 4.0 y define dos topologías de red diferentes para transmitir datos: conexión y difusión. Debido a sus características, cada topología es apropiada para determinar casos de uso con diferentes fortalezas y debilidades. Las versiones posteriores de BLE (4.1, 4.2 y 5.0) mantienen estas topologías y las mejoran permitiendo la combinación de diferentes roles. Sin embargo, estas últimas versiones mejoradas no se implementan en la mayoría de los dispositivos IoT. Razón por la cual si se tiene la intención de trabajar aplicaciones de tipo IoT es recomendable el uso de dispositivos de tipo BLE 4.0. Las topologías disponibles en el estándar BLE son Connection topology y Broadcast topology. [18].

III. LoRa IEEE 802.15.4

Con el creciente interés en IoT, se están desarrollando diversas tecnologías orientadas a abordar los requisitos para la integración de dispositivos inteligentes con el propósito de un bajo consumo de energía y una cobertura de señal de área amplia. Algunas de las tecnologías LPWAN todavía están en desarrollo, sin embargo, tecnologías como LoRa y SigFox ya están ampliamente disponibles en el mercado. Con respecto a la operación de bajo costo, las redes basadas en LoRa presentan una ventaja sobre las redes basadas en SigFox, considerando la necesidad de una suscripción SigFox para cada dispositivo, lo que resulta en gastos de funcionamiento para cada dispositivo conectado. Sin embargo, las redes LoRa necesitan configurar una red propietaria como lo sugiere [19], en una solución para la evaluación de una red de Smart City. Se ha realizado una gran cantidad de trabajo desde la década de 1960 para comprender la propagación de ondas de radio en el entorno forestal y urbano. Es posible presenciar la ruptura total del enlace de comunicación debido a factores externos. Se necesita mucha más investigación, especialmente para el trabajo empírico específico del sitio y aquellos que limitan la aplicación práctica del trabajo de investigación existente, como se describe en [20] el cual se orienta a la transmisión en áreas de entorno forestal.

b. Interconectividad entre redes

Con el uso generalizado de los teléfonos inteligentes el tráfico de datos móviles está creciendo exponencialmente. Este hecho plantea un reto importante en términos de capacidad para los operadores móviles, cuyas infraestructuras no son capaces de soportar todo el tráfico adicional generado por los usuarios de este tipo de dispositivos IP. Alternativas emergentes actualmente se consideran como parte de la evolución 5G (quinta generación) de la red que incluyen la migración del tráfico de datos móviles de la infraestructura del operador a los dispositivos de los usuarios offloading. Aprovechando las capacidades de conexión de los actuales Smartphones para transmitir los datos mediante comunicaciones dispositivo a dispositivo (D2D), comunicaciones máquina a máquina (M2M) y la integración de las comunicaciones celulares, WiFi y ad-hoc. El acceso inalámbrico debe incluir servicios a cualquier objeto que se pueda vincular a una conexión. Este concepto a menudo se conoce como "la Internet de las cosas (IoT)". Dispositivos tales como medidores inteligentes de servicios, señalización digital, sistemas de info-entretimiento en vehículos, redes de sensores WSN (Wireless Sensor Network), redes móviles (LTE), migraciones 5G y protocolos deben analizar la compatibilidad de tecnologías orientados al IoT. [21]. El documento [22] presenta la estructura básica de un sistema IoT y se describe una gran cantidad de tipos de sensores y de posibles aplicaciones de interconectividad además el artículo permite analizar el gran potencial que tienen las aplicaciones de tipo IoT. Describe diferentes aplicaciones de sensores y sugiere que tipo de aplicación de IoT es recomendada para cada tipo de sensor.

III. METODOLOGÍA O PROCEDIMIENTOS

Este trabajo consiste en el diseño, la construcción y la evaluación de un sistema de interoperabilidad entre redes celulares e inalámbricas de tipo IoT. La metodología se compone de cuatro fases. Inicialmente un diseño conceptual, una segunda fase con el diseño funcional, La fase número tres comprende la implementación y configuración del sistema y finalmente la fase de validación y pruebas. En la Figura 1. Se describen las fases metodológicas utilizadas para el sistema de interoperabilidad propuesto.

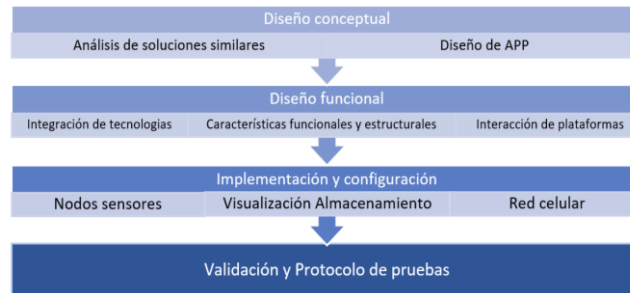


Figura 1: Desde arriba hacia abajo, fases de la metodología propuesta para el desarrollo del sistema y estudio de interoperabilidad.

Fuente: Elaboración propia.

a. *Diseño conceptual*

El prototipo funcional es un desarrollo tecnológico que pretende generar nuevas ideas de investigación en el área de IoT. Debe permitir que tecnologías emergentes puedan interoperar, solucionar necesidades puntuales y ayudar a orientar desarrollos tecnológicos que requieran telecomunicaciones inalámbricas en ambientes de usuario final en hogares y empresas.

1. Análisis de soluciones similares

En el proceso de diseño debe intervenir la búsqueda de desarrollos similares encaminados al desarrollo de la vigilancia tecnológica de la solución. En el artículo [23] se presenta la simulación necesaria para la implementación de una red de sensores inalámbricos de tipo IoT utilizando la tecnología 6LoWPAN. El nodo sensor de la WSN está compuesto por un módulo de detección, algoritmos de procesamiento, y elementos de comunicación. Las redes de sensores inalámbricos WSN por sus siglas en inglés Wireless Sensor Networks, presentan la tendencia de integrarse a IoT, con el objetivo de interoperar con tecnologías de comunicación heterogéneas. Actualmente el acceso a Internet por parte de WSN, tiene dos formas de integrarse a una red IoT, la primera consiste en una conexión de una WSN independiente y un acceso a Internet a través de una única pasarela, comúnmente denominada Gateway que utiliza generalmente una tecnología celular, La segunda forma, se basa en una red híbrida, formada por redes independientes, donde cada nodo sensor puede acceder a Internet.

El concepto de sensores inteligentes es necesario en la detección de variables en tiempo real para aplicaciones de IoT, por ejemplo, el índice de contaminantes, el trabajo [24] se propone en la ciudad de Bangkok. En este diseño se plantea la adopción de sensores LPWAN para monitorear la contaminación del aire a través de la red NB-IoT.

La interoperabilidad en una red LoRa WAN y BLE se plantea en el trabajo de [25]. Este trabajo propone una nueva arquitectura de red dual de radio para IoT utilizada en el monitoreo de la vida silvestre, se logra un control más amplio sobre el equilibrio entre el consumo de energía y el alcance. Los resultados de la evaluación indican que la red dual propuesta supera a los sistemas tradicionales que utilizan un solo tipo de radio transceptor, es decir, LoRa o BLE. En promedio, se redujo el consumo de energía de LPWAN (LoRa WAN) hasta en un 97%. La arquitectura mejoró el tiempo de vida de la red hasta en un 99% para varias tasas de tráfico de paquetes en la red. La interoperabilidad entre las tecnologías inalámbricas es necesaria para aplicaciones de tipo IoT en el trabajo [26], se describe la implementación de las tecnologías inalámbricas (BLE) Bluetooth Low Energy y ZigBee, se propone un Gateway o puerta de enlace desarrollado para la interconexión de estas dos tecnologías orientado a una aplicación de tipo IoT que permita reducir costos, energía y latencia, la interoperabilidad es importante para la adopción a gran escala de IoT. La tarea principal de IoT es recopilar datos de detección mediante los dispositivos conectados y el envío al servidor web. Los protocolos ZigBee se utilizan para crear un entorno de red con nodos sensores que tienen una velocidad de datos baja y los protocolos BLE utilizados para recopilar esta información y transmitirla a velocidades de datos más altas.

Los resultados de implementación de la tecnología inalámbrica LoRa se presentan en el trabajo [27] se analiza el rendimiento de la tecnología teniendo en cuenta la cobertura en ambientes cerrados y abiertos modificando los parámetros de configuración de acuerdo a cada condición, Los resultados concluyen que en los ambientes cerrados el rendimiento depende tanto de la distancia del Gateway como de la estructura de los elementos de encerramiento; en espacios abiertos la distancia es de 12 a 330 metros, teniendo el Gateway en un espacio cerrado.

En [28] se propone un LoRa WAN modificado, basado en redes mesh y TEDS. La red de mesh mejora la cobertura y facilita la implementación. Con los TEDS, se reduce la tasa de colisión en la red especialmente para los sistemas que tienen muchos nodos finales y necesitan recopilar datos controlados por eventos. En particular, es adecuado para sistemas de medición remota de agua y gas que funcionan con una batería, sistemas simulados que requieren capacidades casi en tiempo real y sistemas de control de iluminación vial que requieren una respuesta rápida de muchos nodos.

Una solución para monitoreo ambiental de forma portátil se describe en [29]. Un nodo de sensor IoT portátil para aplicaciones de seguridad llamado WE-Safe. El objetivo de WE-Safe es proporcionar alertas tempranas para las personas que trabajan en entornos extremos y hostiles. En el documento [30] se presenta un desarrollo basado en sensores de detección de contaminación del aire los cuales son procesados por un microcontrolador y enviados a un sitio web mediante la comunicación inalámbrica NB-IoT el sistema se diseñó para ciudades inteligentes en

Tailandia, el sitio web visualiza la gráfica del índice de calidad del aire y presenta resultados de las variables mediante los sensores configurados. El trabajo de [31] se describe la implementación de un sistema que utiliza un microprocesador específicamente el STM32F103RCT6, el microprocesador interactúa con el puerto serie en el cual está conectado el sensor de gas electroquímico realizando un envío constante de datos. El sistema puede aportar datos como temperatura, humedad y material particulado PM2.5. La conectividad se implementa mediante el módulo NB-IoT o el módulo GPRS, los datos con marca de tiempo se pueden cargar en tiempo real. En el documento [32], se realiza la medición de RSSI en un LoRa GW para áreas interiores, suburbanas y urbanas cuando el transmisor LoRa está en una ubicación interior o en un vehículo aéreo no tripulado (UAV). Para un entorno interior LoRa GW puede recibir paquetes si se coloca en la línea de vista en el edificio. Para el entorno suburbano, la altura del dron y la orientación de la antena juegan un papel crucial en el RSSI.

En el libro [33] capítulo 6 se presenta una solución inalámbrica zigbee aplicada a un sistema de energía solar de tipo SCADA para monitoreo de variables de interés, se compone de un sistema de almacenamiento, un sistema de visualización y una red de sensores y actuadores. El proceso de interconexión entre la red inalámbrica y el servidor hace posible la adquisición, el procesamiento y la caracterización de señales entregadas al servidor.

El trabajo de [34] se desarrolló para describir un sistema que propone la trazabilidad de la información y un sistema de recolección automática basado en IoT. La adquisición se compone principalmente de terminales de detección por RFID, una estructura de tipo bus y un sistema de cómputo para la administración. Los resultados indican que los sistemas de tipo IoT mejoran significativamente las capacidades de gestión de calidad y seguridad de los productos.

En el libro [35] capítulo 4 se plantea un sistema de tipo IoT para el monitoreo de variables de interés fundamentado en un microprocesador GHI, referencia G120, 32 bits, de tipo ARM Cortex-M3. La solución contiene un sistema de almacenamiento, de generación de reportes y de visualización basado en la interoperabilidad entre sensores conectados directamente a la tarjeta electrónica y tres tecnologías; satelital, celular de tercera generación y WiFi, El sistema solo provee un backend para posibilitar la creación de múltiples frontend. Los sistemas interoperables deben orientarse a proporcionar servicios de soporte entre ellos, la conectividad y la compatibilidad son conceptos más básicos que el de interoperabilidad esta deducción se plantea como base en el trabajo de [36], el cual realiza un análisis comparativo del estado de la técnica en los modelos encontrados y marcos de arquitectura existentes, además describe los requisitos de la interoperabilidad para la movilidad eléctrica, su estructura se origina del modelo de arquitectura Smart Grid.

La red de sensores de área corporal (BASN) bajo el marco de IoT se ha aplicado ampliamente para el monitoreo ubicuo de la salud, en el trabajo [37] se presenta el sistema WISE (sistema de monitoreo de salud basado en la nube de IoT), para monitoreo de la salud en tiempo real. WISE adopta el marco BASN (red de sensores de área corporal). La mayoría de los sistemas de monitoreo de salud requieren un teléfono inteligente como puerta de enlace de procesamiento, visualización y transmisión de datos. Mientras que en WISE los datos recopilados de BASN se transmiten directamente a la nube.

2. Diseño de APP

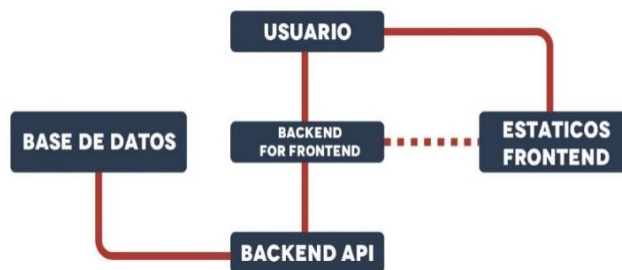


Figura 2: Diseño APP basado en la tendencia que presentan las webs apps modernas.
Fuente: Elaboración propia.

El diseño conceptual propuesto se basa en las apps modernas. Las APP modernas tienen una tendencia a modificar los componentes propios del sistema, encauzadas a encontrar el mejor desempeño en sus plataformas. Para el desarrollo del sistema, el diseño conceptual propuesto se puede observar en la figura 2. El diseño propuesto para la implementación está compuesto por el backend, el cual, gestiona la unidad de procesamiento y la unidad de almacenamiento de datos recopilados. Una API que permite la interfaz con otras aplicaciones y el frontend vista al navegador. El reto más difícil de los sistemas de IoT consiste en orientarse al concepto de gestión en “tiempo real” aunado a la implementación necesaria para la interoperabilidad de múltiples tecnologías.

Para el desarrollo del sistema, el tráfico de datos provenientes del hardware debe enfocarse a tiempo real, en la figura 3 se muestra el diseño propuesto para el flujo de datos hacia el servidor implementado. El servidor se desarrolló en node.js, por lo cual se debe incorporar el concepto de websocket (conector web) mediante la librería de javascript denominada socket.io, la cual, se selecciona por apuntar a aplicaciones web en tiempo real y porque permite la comunicación bidireccional entre el cliente que se ejecuta en el navegador y un servidor en la nube.



Figura 3: Tráfico de datos a la web mediante conectores web.
Fuente: Elaboración propia.

b. *Diseño funcional*

Teniendo en cuenta que este sistema pretende la integración de tecnologías emergentes encaminadas a IoT se propone desarrollar el procesamiento principal desde un sistema embebido basado en la arquitectura de microprocesador para la interacción con el usuario mediante un sistema operativo.

1. Análisis de características funcionales y estructurales.

- Evaluación y selección de arquitectura y plataformas
- Incorporación de compatibilidad con dispositivos móviles.
- El sistema debe capturar e interpretar los datos necesarios
- Implementación de la función de almacenamiento en la nube.
- Visualización de variables de manera gráfica en tiempo real.

2. Diseño de integración de tecnologías.

, el diseño utilizado está basado en un sistema operativo Linux operando en un dispositivo embebido raspberry, en donde se implementó el backend y el frontend para facilitar la visualización y la comunicación con los sistemas inalámbricos como lo muestra la figura 4, sin embargo aunque el desempeño es mejor en la visualización, en el proceso de almacenamiento la aplicación web presentó inestabilidad y sobrecalentamiento a partir del minuto siete de funcionamiento realizando gestión de lecturas cada segundo en cada tecnología.

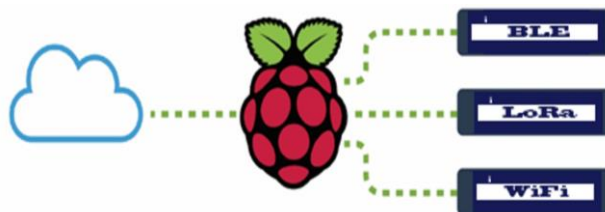


Figura 4: Tecnologías inalámbricas IoT.
Fuente: Elaboración propia.

3. Diseño de interacción de plataformas.

El prototipo propuesto debe interconectar las tecnologías celulares que proporcionan el acceso a la plataforma WEB y las tecnologías inalámbricas WiFi, LoRa y BLE, desde el proceso de interconexión y finalmente de interoperabilidad tanto de tecnologías como de aplicaciones, el diseño propuesto se visualiza en la figura 5. La interacción con los nodos sensores se realiza por las interfaces propias del sistema embebido, para el estándar IEEE 802.15.1 se establece una comunicación desde la interfaz bluetooth del sistema de control y el nodo sensor que implementa bluetooth low energy 4.0 (BLE), Para el estándar IEEE 802.15.4 se interactúa desde el puerto USB de la raspberry a un módulo que implementa la tecnología LoRa, y finalmente el estándar IEEE 802.11 se interconecta desde la interfaz WiFi del sistema embebido y un módulo que implementa el estándar IEEE 802.11 b/g/n.

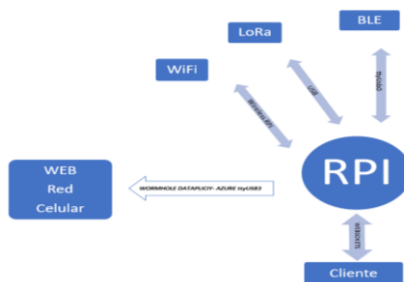


Figura 5: Diseño funcional para interconexión de plataformas.
Fuente: Elaboración propia.

c. *Implementación y configuración*

El primer paso para la implementación, es la selección del sistema de control de hardware, se evaluaron microcontroladores y sistemas embebidos de 8, 16 y 32 bits, sobre los cuales se implementaron servicios web para interacción a través de métodos post y get con HTML y CSS, buscando la gestión y la lectura de puertos en este primer paso de evaluación se validó como mejor opción un sistema embebido Raspberry PI3 con sistema operativo raspbian.

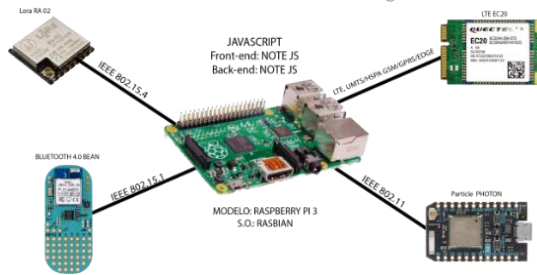


Figura 6: Proyección para interconexión de tecnologías IoT.
Fuente: Elaboración propia.

La interacción de hardware para el sistema de interoperabilidad LoRa, Bluetooth LE 4.0 BLE, WiFi y LTE, se puede ver en la Figura 6. En esta se visualiza la Raspberry PI 3 como módulo de gestión y control de hardware principal que intercambia datos con los dispositivos seleccionados para cada estándar.



Figura 7: Hardware de sistema de interoperabilidad implementado.
Fuente: Elaboración propia.

1. Red celular

La conexión a redes de largo alcance es necesaria para lograr la interacción con los dispositivos y los servidores de datos para efectos de monitoreo y análisis [38]. El circuito integrado de referencia EC20 de Quectel *Wireless Solutions*, implementa GSM, GPRS, UMTS, HSPA, LTE y GNSS de múltiples constelaciones [39]. En el sistema implementado, opera vía USB por la interfaz ttyUSB3, se gestiona por consola mediante el envío de comandos AT, la configuración del módulo quectel proporciona una dirección IP cuando se conecta a internet. Los picos de corriente para el funcionamiento del módulo celular hacen necesaria una fuente adicional de 500 mA, y requiere una antena de tipo celular para mejorar el indicador de calidad de servicio CSQ, estabilizar la recepción y entrega de datos, incorpora un led RGB, el cual cambia de color a verde cuando la red está disponible para establecer una conexión, como se muestra en la figura 8.



Figura 8: Módulo celular para puerta de enlace Gateway.
Fuente: Elaboración propia.

La interfaz a las redes celulares hace parte del funcionamiento de la puerta de enlace o Gateway, el sistema de alimentación es autónomo, se fundamenta en paneles solares y baterías recargables, El sistema de control dispone de una pantalla táctil para la supervisión y puesta en marcha del sistema, como se muestra en la figura 7. El módulo GNSS provee las coordenadas de geoposicionamiento y con el API de Google Maps se puede visualizar la ubicación del sistema como se muestra en la figura 9.



Figura 9: Vista de consumo API Google Maps.
Fuente: Elaboración propia.

2. Nodo sensor BLE IEEE 802.15.1

Los dispositivos (Bluetooth low Energy) BLE se incluyen en el estándar Bluetooth IEEE 802.15.1 desde la especificación Bluetooth 4.0 y pueden tener dos topologías de conexión. En la primera topología de conexión dos dispositivos BLE pueden establecer una conexión para intercambiar datos de forma permanente y periódica, se utilizan dos roles en esta topología: maestro y esclavo. Es posible conectar un dispositivo maestro con hasta 8 dispositivos esclavos en una topología estrella. Esta topología permite el flujo de datos en ambas direcciones, los dispositivos esclavos proporcionan características de notificación e indicación para enviar datos al maestro. La segunda topología es denominada de difusión, un dispositivo BLE puede usar paquetes de publicidad para transmitir datos a cualquier dispositivo BLE en modo de exploración ubicado dentro de su rango de cobertura. En esta topología se definen dos roles: emisor y receptor. Debido a la naturaleza de esta topología, el intercambio de datos es unidireccional [18]. En el desarrollo del sistema, se configura el periférico de comunicación Bluetooth integrado en la raspberry como dispositivo maestro, se estableció conectividad, tráfico de datos bidireccional, control y lectura de dispositivos, el módulo implementado como esclavo es el LightBlue Been LBM 313, fabricado en Minneapolis por la empresa punchthrough durante las pruebas se mostró robusto, estable y de muy bajo consumo energético, su alimentación se realiza desde 2,1v hasta 3.3v, se incorpora una batería de LiPo 3,7 v, regulada a 2,8v y un sistema de carga por celda solar de 300mA - 5V. Se utiliza una librería de node.js denominada been.js para realizar el control del dispositivo.

3. Nodo sensor WiFi 802.11B/G/N.

El punto de acceso WIFI sirve como un nodo de reenvío intermedio. Inicialmente puede adquirir todos los datos para la interacción del usuario. Y de otro lado, los puntos de acceso WIFI se conectan al ISP permitiendo que los usuarios accedan a la red [16]. En el desarrollo la interfaz de conexión inalámbrica WiFi integrada en la raspberry se desempeña como enrutador de tráfico de datos y se configura mediante las tablas de enrutamiento para establecer una conexión entre dispositivos conectados a una red local LAN y la red WAN. El dispositivo WiFi seleccionado se apoya en la plataforma de particle, ofrece un circuito integrado basado en la arquitectura WICED de Cypress, se denomina Photon comercialmente, se enmarca en la familia de Particle Photon, combina un microcontrolador STM32 ARM Cortex M3 con el chip Wi-Fi BCM43362. La implementación de la comunicación con este dispositivo requiere de la configuración de las características propias del estándar IEEE 802.11 así como las iptables tablas de enrutamiento en el sistema operativo para esta preparación se toma como base el trabajo [40].

4. Nodo Sensor LoRa IEEE 802.15.1

La propagación del estándar LoRa a 433MHz se ubica en la banda de Ultra Alta Frecuencia (UHF) y se detalla en el estándar IEEE 802.15.1. [20]. La tecnología LoRa se implementó, utilizando los transeptores SX1278 teniendo en cuenta que funcionan en un rango espectral libre, manejan un bajo consumo de energético y un bajo costo, cuentan con el módem de largo alcance LoRa® que proporciona comunicación de espectro extendido de ultra largo alcance e inmunidad a la interferencia. La tecnología se impulsa con el uso de la técnica de modulación LoRa patentada de Semtech, la cual puede lograr una sensibilidad de más de -148dBm utilizando un cristal y otros componentes complementarios como antenas de propagación, las antenas de propagación utilizadas en el desarrollo son molex de tipo flex para 433 Mhz.

5. Visualización y Almacenamiento

El creciente interés en utilizar la Web como plataforma para compartir datos ha motivado la investigación sobre la publicación y el consumo de datos. [41] Se implementa como principal lenguaje de programación node.js inspirado en javascript, el sistema operativo instalado es Linux raspbian, la interacción de hardware se logra mediante el uso de web sockets para la comunicación a través de periféricos mediante la librería sockets.io, como en el trabajo [42]. Las aplicaciones de JavaScript se basan en un motor de JavaScript engine para ejecutar su lógica central y en módulos de interfaz de usuario (UI). Módulos puente proporcionan APIs de JavaScript con recursos del sistema, de esta forma el código JavaScript puede invocar código de otros lenguajes nativos para acceder a los recursos de otros sistemas [7]. En el sistema desarrollado se consume la API de particle para la tecnología WiFi y la de Google maps. Inicialmente se optó por una solución en la cual el backend y el frontend estén conectados continuamente, se implementó el requerimiento de un modelo concurrente de un solo hilo, que funciona en sistemas embebidos. El modelo concurrente cliente servidor en el proceso de visualización presentó resultados positivos en cuanto a latencia, sin embargo, en el momento de realizar el proceso de almacenamiento de datos presentó sobre calentamiento en el procesador e inestabilidad en la aplicación web a partir de aproximadamente siete minutos de operación, visualizando y almacenando los datos de los tres nodos sensores cada segundo. La configuración definitiva de mejor rendimiento se logró sobre la plataforma de Azure con el dispositivo de control configurado como un IoT hub, se realizó el almacenamiento en la nube, y se obtuvo estabilidad en la aplicación, la arquitectura se visualiza en la figura 10.

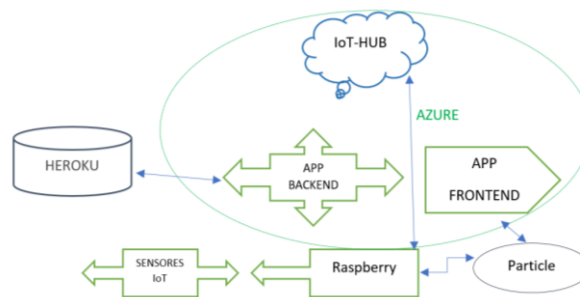


Figura 10: Arquitectura general de la aplicación implementada.
Fuente: Elaboración propia.

IV. RESULTADOS ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN

Un sitio web puede ser alojado en un servidor y proporcionar servicios solicitados por los clientes. Los servidores web constan de un sistema operativo, una página web y un espacio de memoria, los clientes pueden acceder a un servidor web a través de una salida a Internet [43] y varios clientes frontend pueden conectarse al servidor backend al mismo tiempo, con muchos sistemas integrados y vinculados [44]. La vista del frontend del sistema sobre un dispositivo móvil y un equipo de cómputo se visualiza en la figura 11.

Para verificar el funcionamiento se ingresa al navegador y se ubica la aplicación web situada en el dominio (https://interopview.azurewebsites.net/), La aplicación muestra los niveles de iluminación medido de forma paralela en las tres tecnologías, así como los valores de RSSI y CSQ.



Figura 11: Vista de frontend de la aplicación WEB desarrollada.
Fuente: Elaboración propia.

Durante la validación del prototipo se observa que las plataformas de cloud computing como Azure permiten una gestión eficiente de las arquitecturas IoT y la interconexión con servicios web lo que representa el concepto de interoperabilidad en aplicaciones. Las redes LoRa ofrecen flexibilidad en un espectro libre, bajo costo (5 usd) aproximadamente cada dispositivo de radio y un bajo consumo energético. El sistema desarrollado permite su implementación en áreas urbanas rurales y difícil acceso por tener autonomía energética y la futura adopción de nuevas tecnologías, servicios y plataformas.

a. Protocolo de pruebas

1. Desempeño outdoor ambiente urbano

Se propone una prueba de funcionamiento en espacio abierto en una zona urbana para analizar el comportamiento del indicador RSSI, teniendo en cuenta un escenario urbano con obstáculos para analizar la cobertura de cada solución. La puerta de enlace se encuentra elevada a 7,7 metros indoor, separada del espacio abierto por un vidrio de 7 milímetros hacia el norte de la toma de datos, los nodos sensores están elevados del suelo aproximadamente un metro. La figura 12 muestra los niveles de RSSI en dBm de cada tecnología en el punto inicial de la prueba (RSSI: WiFi: -53 dBm, LoRa: -78 dBm, BLE: -67 dBm) separadas 0,3 metros cada nodo de la puerta de enlace o Gateway

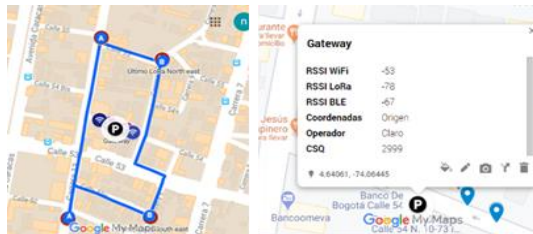


Figura 12: Ubicación de sistema nodos y condiciones de la pasarela.
Fuente: Elaboración propia.

La ruta propuesta para la realización de las pruebas se describe en la figura 12 en los puntos A y B con los nodos sensores de cada tecnología. Las condiciones de calidad de la señal del Gateway son: CSQ: 29.99 dBm, operador: claro, red celular conectada: LTE, las coordenadas de longitud y latitud que detallan la ubicación geográfica del punto se pueden visualizar en la figura 12. Para esta prueba se tomaron 176 datos. La información relevante para el análisis es la que describe la ubicación de cada nodo sensor además del indicador de fuerza de la señal RSSI de cada uno en cada punto.

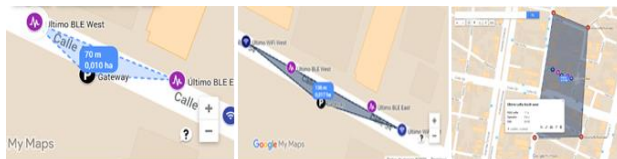


Figura 13: Cobertura de cada tecnología calculada con coordenadas.
Fuente: Elaboración propia.

La prueba consiste en ubicar los puntos de envío de información más alejados, en el caso de la tecnología BLE se encontraron dos puntos de máxima distancia de transmisión de datos con el nodo sensor desplazado hacia el oriente 20 metros y posteriormente al occidente 16 metros, los puntos de máximo alcance se ubicaron en el mapa de la figura 13, con los marcadores “Último BLE”. Los datos de RSSI para el punto de

entrega del último dato al oriente son: (RSSI: WiFi: -66 dBm, LoRa: -94 dBm, BLE: -91 dBm). Las distancias relacionadas en el mapa, requieren un ajuste debido a la elevación del Gateway, La diferencia en el eje z corresponde 6,7 metros, este ajuste se puede realizar con la ecuación 1.

$$h^2 = a^2 + b^2$$

Ecuación 1 Cálculo de distancia máxima de BLE.

Para el cálculo de la distancia máxima del dispositivo BLE a representa la elevación del Gateway, b representa la distancia calculada desde las coordenadas satelitales y h la distancia aproximada del nodo sensor a la puerta de enlace de esta manera en la ecuación $h^2 = (6,7m)^2 + (20m)^2$ para la distancia oriental, el resultado de la ecuación $h = 21,09$ m y $h^2 = (6,7m)^2 + (16m)^2$ para la distancia occidental, el resultado de la ecuación $h = 17,33$ m. Los ángulos se pueden calcular con las ecuaciones 2 y 3.

$$\varphi = \arcsin(a/h)$$

Ecuación 2 Cálculo de ángulo de triángulo formado.

$$\theta = \arcsin(b/h)$$

Ecuación 3 Cálculo de ángulo de triángulo formado.

Para el caso específico los ángulos corresponden a $\varphi=18,52^\circ$ y $\theta=71,50^\circ$ BLE Oriental y $\varphi=22,72^\circ$ y $\theta=67,52^\circ$ BLE occidental, el cálculo perimetral para la tecnología BLE se realiza con la ecuación 4, la ecuación 5 se puede utilizar para calcular el área de cobertura y la ecuación 6 para determinar los ángulos formados.

$$P = a + b + c$$

Ecuación 4 cálculo de perímetro de cobertura máxima

$$A = \frac{ah}{2}$$

Ecuación 5 Cálculo de Área de cobertura máxima

$$h = b \sin \varphi = c \sin \theta$$

Ecuación 6 Cálculo de ángulos de Área de cobertura máxima de BLE

El perímetro y el área calculada para la tecnología BLE corresponde a $P=70$ m, $A = 99,87 m^2$ y los ángulos calculados de la zona de cobertura corresponden a $\alpha = 141,3752^\circ$, $\theta = 21,5422^\circ$ $\varphi = 17,0826^\circ$. Realizando los ajustes correspondientes a las longitudes calculadas por elevación de Gateway de acuerdo a la ecuación 1 y la ecuación 2 se obtiene que el perímetro, el área y los ángulos $P = 72,42$ m, $A = 151,14 m^2$, y ángulos $\alpha = 124,2011^\circ$, $\theta = 30,8656^\circ$, $\varphi = 24,9333^\circ$. Para la tecnología WiFi el punto máximo al oriente fue de 33 metros, hacia occidente de 35 metros son identificados con los marcadores de color azul en la figura 13, los valores de RSSI corresponden a WiFi: -74 dBm y LoRa: -101 dBm y hacia occidente, WiFi: -76 dBm y LoRa: -102 dBm, la cobertura es de 136 metros.

Tabla 1: Distancias y ángulos calculados para cada punto máximo.

Punto	RSSI dBm	Distancia (m)	Ajuste (m)	Área (m ²)	Perímetro (m)	α°	θ°
Noroccidente	-113	189	189,12	633,15	384,82	2,03	87,96
Nororiente	-112	168	168,13	562,8	342,83	2,28	87,75
Suroriente	-113	193	193,12	646,55	392,82	1,99	87,98
Suroccidente	-114	205	205,11	686,75	416,81	1,87	88,12

Fuente: Elaboración propia.

De las ecuaciones 1 a la 6, se resuelve que: $h^2 = (6,7m)^2 + (33m)^2$ para la distancia oriental el valor es: $h = 33,67$ metros, y $h^2 = (6,7m)^2 + (35m)^2$ para la distancia occidental es $h = 35,64$ metros. El perímetro y el área corresponden a $P = 135$ m, $A = 194,53m^2$, los ángulos calculados corresponden a $\alpha = 160,3149^\circ$, $\theta = 10,1349^\circ$ $\varphi = 9,5502^\circ$. Realizando los ajustes para el perímetro y área: $P = 136,31$ m, $A = 297,10m^2$, y los ángulos $\alpha = 14,4087^\circ$ $\theta = 15,2717^\circ$ $\varphi = 150,3197^\circ$. Para incluir la diferencia de alturas entre el nodo sensor y la pasarela es necesario separar la forma en cuatro triángulos distribuidos desde el origen hacia el norte, sur, oriente y occidente. De la ecuación 1 a la 5 se tiene el cálculo de ajuste para cada forma y los ángulos para cada triángulo, los resultados se muestran en la tabla 1. Mediante las ecuaciones 1 y 6 se realizan los ajustes para cálculo de área perímetro y ángulos. Los resultados se presentan en la tabla 2.

Tabla 2: Distancias y ángulos calculados para cada zona de cobertura.

Punto	Base (m)	A (m)	b (m)	Perímetro (m)	Área (m ²)	α°	θ°	γ°
Norte	122	189,	168,	479,25	10088	39,38	79,6	60,98
		12	13		,37	69	287	44
Sur	155	193,	205,	553,23	14171	45,68	63,0	71,24
		12	11		,96	91	675	34
Oriente	325	193,	168,	686,25	12777	128,0	24,0	27,88
		12	13		,06	917	257	27
Occidente	377	205,	189,	771,23	10854	145,9	17,7	16,30
		11	12		,88	671	276	52

Fuente: Elaboración propia.

La tecnología LoRa presentó cuatro puntos de máxima transmisión desde la pasarela El primer punto se ubica al noroccidente a 189 metros, el segundo punto al nororiente a 168 metros, el tercer punto 193 metros al suroriente y el cuarto a 205 metros al suroccidente. Los datos de RSSI para los puntos de entrega de último dato de la tecnología LoRa son: al noroccidente RSSI -113 dBm, nororiente RSSI -112 dBm, suroriente RSSI -113 dBm y suroccidente RSSI -114 dBm.

La figura obtenida de cobertura para la tecnología LoRa es de 979 metros y es un rectángulo de lados no uniformes identificado y medido por coordenadas satelitales como se observa en la figura 13. En la base de datos se almacenaron registros indeterminados provenientes del nodo sensor de la tecnología LoRa equivalentes al 20.59%, como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3: Porcentaje de datos indeterminados en tecnología LoRa.

RSSI	False	True	Total
-113\ r	4	15	19
-114\ r	2	6	8
-115\ r	1	6	7
Total	7	27	34
Porcentaje	20,59%	79,41%	100,00%

Fuente: Elaboración propia.

2. Desempeño indoor.

Para la realización de pruebas en ambientes cerrados se propone ubicar un edificio de 5 pisos que cuente con un punto físico en común en cada piso. Este punto físico en común debe tener la posibilidad de la ubicación de los nodos sensores de las tecnologías propuestas con el objetivo de observar el valor de RSSI frente a los obstáculos verticales y horizontales en ambientes cerrados. El espacio de pruebas seleccionado no es cerrado totalmente, presenta obstáculos verticales, pero tiene ventanas al exterior lo cual representa obstáculos horizontales de vidrio de 0.8 mm de espesor, exceptuando el nivel 1 en el que los obstáculos horizontales son paredes de 10 centímetros. Se ubican inicialmente los nodos sensores separados 0.6 metros cada uno de la puerta de enlace y se coloca en funcionamiento el sistema.

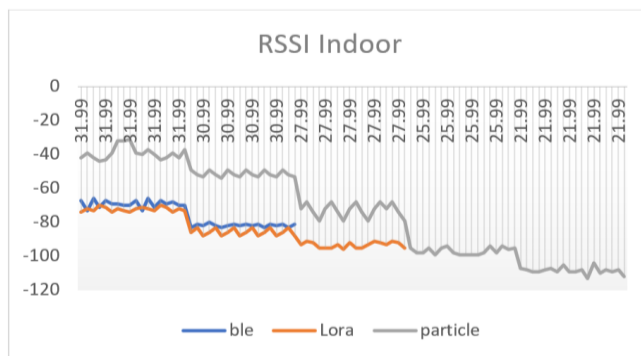


Figura 14: Comportamiento del RSSI y CSQ de las tecnologías inalámbricas en espacios cerrados. Fuente: Elaboración propia.

El almacenamiento se realiza en tiempo real y está disponible en una base de datos de tipo web para el análisis posterior, para el caso particular de las pruebas indoor de alcance se utilizaron 484 registros que contienen la información de cada tecnología. Para cada nivel se tomaron en promedio 18 registros, la altura de cada nivel es de 215 cm, cada obstáculo horizontal es de 21 centímetros representados en una placa de concreto de separación de niveles, la distancia total corresponde a 236 cm, el comportamiento de las señales se muestra en la figura 14. La información adquirida durante la prueba de la tecnología LTE del indicador de CSQ se muestra en la figura 15.

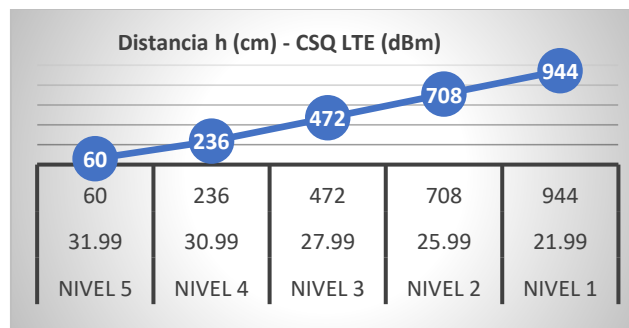


Figura 15: Comportamiento del RSSI y CSQ de tecnologías inalámbricas en espacios cerrados frente a obstáculos y distanciamiento. Fuente: Elaboración propia.

V. PROPUESTA DE SOLUCIÓN O MEJORAS

En los datos almacenados durante la prueba de alcance para la tecnología LoRa se encontraron registros con valor (indeterminado) no valido, recibidos en valores de RSSI por encima de 113 dBm, para solucionar los registros con valores indeterminados existen 2 opciones eliminar el registro o corregir el registro, de esta manera se realizan tres propuestas de solución: La primera propuesta es ubicar un punto de envío y

recepción de datos máximo de RSSI = -110 dBm. La segunda propuesta se fundamenta en el porcentaje encontrado equivalente al 20,59% de datos que se recibieron como caracteres no válidos, se plantea entonces desarrollar un algoritmo de validación en el sistema de procesamiento de datos antes del envío de mensajes a la nube, complementado con un algoritmo de retransmisión de datos perdidos en un time stamp de por lo menos $\tau = T_0/5$, cuando el nivel de RSSI esté por debajo de los -110 dBm, apoyados en que el carácter no válido corresponde a aproximadamente el 21 % de los datos, buscando consolidar los mensajes con datos válidos en los tiempos requeridos por el sistema. Esta solución implicaría aumentar el procesamiento en el nodo sensor y en el Gateway por lo tanto se incrementaría el consumo energético en los nodos y la pasarela. La tercera propuesta es realizar el tratamiento de corrección de registros sobre una gran cantidad de datos mediante técnicas de machine learning para clean data en la plataforma Web.

El lenguaje de programación más representativo en la implementación es node.js y se eligió por ser un lenguaje modular que permite un fácil escalamiento y reutilización de código, adicionalmente tiene las prestaciones de otros lenguajes de programación como php para la gestión de bases de datos, durante el desarrollo se implementó el cliente, el servidor y el almacenamiento de forma local y la aplicación presentó inestabilidad a partir de los 7 minutos de funcionamiento siendo necesaria la migración de todos los servicios a la nube, de esta manera se recomienda para aplicaciones similares la utilización de servicios contratados en la nube y mejorar las características de los servidores contratados de acuerdo a la necesidad de escalabilidad del sistema.

La tecnología BLE está limitada por el número de puertos disponibles en la puerta de enlace, por lo que se propone el diseño y la implementación de topologías de red que mejoren la escalabilidad de esta tecnología.

Para el desarrollo de redes sobre la tecnología LoRa 433Mhz se propone trabajar en diseñar o adoptar una topología de red, en esquemas de direccionamiento para mejorar el comportamiento de la tecnología en redes de múltiples nodos sensores y la seguridad de la información.

VI. CONCLUSIONES

El perímetro que se puede cubrir mediante la tecnología LoRa con cuatro nodos sensores es de aproximadamente 979 metros, calculados mediante las coordenadas de georreferenciación. Con dos receptores BLE máximo 70 metros y con dos nodos sensores de WiFi 136 metros.

La tecnología BLE permite un alcance máximo desde la puerta de enlace de 22 metros, WiFi 44 metros y LoRa 313 metros, en un ambiente urbano, abierto, almacenando y visualizando cada segundo.

Las soluciones de tipo cloud computing son las más apropiadas para este desarrollo, la escogencia de la arquitectura fue la eficiencia, la escalabilidad y la relación costo-beneficio. El costo de la implementación de todos los servicios tuvo un valor de 17 USD siendo una aplicación con fines académicos.

La arquitectura cliente servidor sobre un dispositivo embebido de control “Raspberry PI3” reduce tiempos de entrega y pérdida de paquetes lo que representa un desempeño mejor en la visualización, sin embargo, para este caso no tuvo buena respuesta en procesos de almacenamiento, debido a que la aplicación web presentó inestabilidad y sobrecalentamiento a partir del minuto siete de funcionamiento realizando gestión de lecturas cada segundo en cada nodo sensor.

Los sistemas de tipo IoT son soluciones que evolucionan de acuerdo a las necesidades de usuario final. De acuerdo a los resultados se concluye que no hay una tecnología mejor que otra, se debe emplear la más apropiada de acuerdo a la necesidad puntual frente a los factores de distancia, calidad y cantidad de información.

Los modelos de negocio de las empresas que diseñan e implementan sistemas IoT, junto a las empresas de software, se están orientando a prestación de servicios de visualización, almacenamiento y análisis de datos en la nube.

Los servicios web permiten al usuario desarrollar aplicaciones de consumo web, mediante frontend propio y backend contratado, así como backend propio y frontend contratado.

La tecnología WiFi implementada presenta la más alta latencia por necesitar realizar una ruta adicional hasta el servidor de partición (fabricante), vale la pena esta ruta adicional pues, aunque la latencia aumenta, la seguridad para el nodo también aumenta al igual que la versatilidad en las aplicaciones en la nube, razón por la cual se muestra como la más segura, Además por estar sobre el protocolo IP el número de nodos sensores dependen del direccionamiento planteado por el administrador de la solución IoT.

VII. RECOMENDACIONES

En este trabajo se diseñó e implementó un sistema de interoperabilidad para redes inalámbricas el cual apunta a desarrollos de tipo IoT, los dispositivos involucrados cuentan con la seguridad ofrecida por el fabricante, pero en despliegues que requieran una gran cantidad de nodos sensores y combinación de grandes redes de diversas tecnologías se debe analizar el desarrollo de métodos de detección de malware como lo plantea el trabajo de [45] el cual indica que los dispositivos IoT se basan en arquitecturas de CPU, incluso en hardware con recursos limitados, como los sistemas operativos basados en Unix. Junto con este cambio, los dispositivos IoT se están convirtiendo en un objetivo favorito de los atacantes debido a la falta de diseño o implementación de seguridad, por lo cual se recomienda trabajar en seguridad para sistemas IoT.

En el libro [35] capítulo 4 se plantea un sistema de IoT para monitoreo de variables de interés sin embargo la visualización en tiempo real no es tan efectiva, especialmente si se opta por la red satelital, la cual entrega sus variables a la plataforma web backend en un formato XML que es desfragmentado y entregado al frontend, este proceso aumenta la latencia, pero mejora la cobertura al incorporar dos tecnologías de largo alcance. Podría ser una solución más recomendada en ambientes rurales y de difícil acceso, pero para una reducida cantidad de datos transmitidos, de esta manera se recomienda implementar una tecnología de acuerdo a las necesidades puntuales del proyecto.

En el desarrollo de las pruebas de cobertura se tuvo en cuenta el trabajo [27]. Pero se complementó realizando pruebas con el Gateway en ambientes internos y externos, dotando el Gateway de autonomía para poder desplazarse y comparando el rendimiento de tecnologías. Se recomienda analizar las soluciones existentes para buscar realizar aplicaciones con nuevas características o combinar varias tecnologías y diversos fabricantes, adoptar una única tecnología generalmente no permite crear conceptos diferenciados.

La infraestructura del Internet de las cosas (IoT) se ha ampliado constantemente para incluir interacciones de usuario más inteligentes y efectivas. Conjuntos individuales de datos IoT pueden ser combinados con contenidos adicionales de manera distribuida y eficiente para ser utilizados en aplicaciones de usuario final. El documento de [46] propone una arquitectura para combinar la interfaz de realidad aumentada AR con IoT buscando una experiencia de compra mejorada. De esta manera es posible generar nuevas aplicaciones sobre IoT combinando nuevos conceptos se recomienda proponer trabajos futuros orientados a realidad virtual, aumentada y mixta sobre IoT.

Durante el desarrollo del sistema se pudo observar la importancia de los radiadores para sistemas IoT en el trabajo de [47] se propone un diseño eficiente de antenas compactas que funcionan en múltiples bandas adecuadas para Internet de las cosas (IoT). De acuerdo a la necesidad de interconexión de tecnologías que proponen los sistemas interoperables es interesante trabajar en el diseño y la implementación de antenas que resuenen en varias bandas apuntando a la versatilidad de los sistemas IoT.

El Internet de las cosas (IoT) se despliega ampliamente en los últimos años, lo que hace que la generación de información aumente de forma exponencial, haciendo que los sistemas de almacenamiento de datos de los sistemas IoT colapsen. En el trabajo [48] se menciona la necesidad de solucionar la problemática de procesamiento y almacenamiento de datos que presentaran los sistemas IoT. Razón por la cual se recomienda explorar soluciones que apunten a conceptos de limpieza de datos (Data cleaning) y minería de datos (data mining), implementados sobre sistemas y dispositivos IoT.

La siguiente generación de comunicaciones celulares 5G aunado al despliegue masivo de (IoT) Internet de las Cosas, requiere un filtrado de datos antes de almacenar en la nube, además inicia a ser vulnerable a ataques de enrutamiento debido a su infraestructura dinámica, serán necesarios nuevos recursos informáticos y la heterogeneidad de los sensores móviles razón por la cual se recomienda trabajar en el concepto de cognitive IoT.

VIII. REFERENCIAS

- [1] S. Chaudhary, R. Johari, R. Bhatia, K. Gupta, and A. Bhatnagar, "CRAIoT: Concept, Review and Application(s) of IoT," Proc. - 2019 4th Int. Conf. Internet Things Smart Innov. Usages, IoT-SIU 2019, pp. 13–16, 2019, doi: 10.1109/IoT-SIU.2019.8777467.
- [2] I. Miladinovic and S. Schefer-Wenzl, "NFV enabled IoT architecture for an operating room environment," IEEE World Forum Internet Things, WF-IoT 2018 - Proc., vol. 2018-Janua, pp. 98–102, 2018, doi: 10.1109/WF-IoT.2018.8355128.
- [3] S. F. Geraci, F. Katki, L. McMonegal, B. Meyer, J. Lane, P. Wilson, J. Radatz, M. Yee, H. Porteous, 610-1990 - IEEE Standard Computer Dictionary: A Compilation of IEEE Standard Computer Glossaries. IEEE, 1991.
- [4] M. Pradhan, "Interoperability for Disaster Relief Operations in Smart City Environments," IEEE 5th World Forum Internet Things, WF-IoT 2019 - Conf. Proc., pp. 711–714, 2019, doi: 10.1109/WF-IoT.2019.8767169.
- [5] Y. W. Luo, "The effect of using JavaScript and HTML to implement an E-learning web sites as a remedial teaching aid on English underachievers at Universities of Science and Technology," 40th Int. Conf. Comput. Ind. Eng. Soft Comput. Tech. Adv. Manuf. Serv. Syst. CIE40 2010, pp. 1–7, 2010, doi: 10.1109/ICCIE.2010.5668450.
- [6] F. Albertos-Marco, J. A. Gallud, and V. M. R. Penichet, "A study on how users perceive distributed interactions on web applications," IEEE Access, vol. 6, pp. 57389–57399, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2873678.
- [7] J. Mao et al., "Detecting Malicious Behaviors in JavaScript Applications," IEEE Access, vol. 6, pp. 12284–12294, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2795383.
- [8] C. Rong, W. Bin, and C. Yang, "Design of heterogeneous Data SQL access scheme based on postgresQL," 2019 IEEE 3rd Int. Conf. Electron. Inf. Technol. Comput. Eng. EITCE 2019, pp. 1520–1524, 2019, doi: 10.1109/EITCE47263.2019.9094863.
- [9] L. Bordak, "Cloud computing security," ICETA 2019 - 17th IEEE Int. Conf. Emerg. eLearning Technol. Appl. Proc., pp. 87–92, 2019, doi: 10.1109/ICETA48886.2019.9040043.
- [10] B. H. Lee, E. K. Dewi, and M. F. Wajdi, "Data security in cloud computing using AES under HEROKU cloud," 2018 27th Wirel. Opt. Commun. Conf. WOCC 2018, pp. 1–5, 2018, doi: 10.1109/WOCC.2018.8372705.
- [11] S. Muhammed, "Comparison of the IoT Platform Vendors , Microsoft Azure , Amazon Web Services , and Google Cloud , from Users ' Perspectives," pp. 1–4, 2020.
- [12] B. M. Tabari, J. Habibi, A. Shamsaie, A. Mazloumi, and P. Beheshti, "Low latency live video streaming on android devices using web-socket," 8th Int. Conf. Comput. Commun. Netw. Technol. ICCCNT 2017, 2017, doi: 10.1109/ICCCNT.2017.8204035.
- [13] T. S. Rappaport et al., "Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work!," IEEE Access, vol. 1, pp. 335–349, 2013, doi: 10.1109/ACCESS.2013.2260813.
- [14] A. H. Khan, M. A. Qadeer, J. A. Ansari, and S. Waheed, "4G as a Next Generation Wireless Network," 2009 Int. Conf. Futur. Comput. Commun., pp. 334–338, 2009, doi: 10.1109/ICFCC.2009.108.
- [15] a. Jayanthiladevi, H. M. Premlatha, and G. M. K. Nawaz, "Analysis study of seamless integration and intelligent solution in any situation by the future advanced mobile universal systems 4G - (FAMOUS 4G)," 2013 Int. Conf. Emerg. Trends VLSI, Embed. Syst. Nano Electron. Telecommun. Syst. ICEVENT 2013, no. Famous 40, 2013, doi: 10.1109/ICEVENT.2013.6496551.
- [16] T. Liu and Y. Wen, "WIFI security certification through device information," Proc. - 2018 Int. Conf. Sens. Networks Signal Process. SNSP 2018, pp. 302–305, 2019, doi: 10.1109/SNSP.2018.00065.
- [17] W. Hlaing, S. Thepphaeng, V. Nontaboot, N. Tangsunantham, T. Sangsuwan, and C. Pira, "Implementation of WiFi-Based single phase smart meter for internet of things (IoT)," 2017 Int. Electr. Eng. Congr. iEECON 2017, no. March, pp. 8–10, 2017, doi: 10.1109/IEECON.2017.8075793.
- [18] C. Garrido-Hidalgo, D. Hortelano, L. Roda-Sanchez, T. Olivares, M. C. Ruiz, and V. Lopez, "IoT Heterogeneous Mesh Network Deployment for Human-in-the-Loop Challenges Towards a Social and Sustainable Industry 4.0," IEEE Access, vol. 6, pp. 28417–28437, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2836677.

- [19] P. Jörke, S. Böcker, F. Liedmann, and C. Wietfeld, "Urban channel models for smart city IoT-networks based on empirical measurements of LoRa-lmks at 433 and 868 MHz," *IEEE Int. Symp. Pers. Indoor Mob. Radio Commun. PIMRC*, vol. 2017-October, no. Cn I, pp. 1–6, 2018, doi: 10.1109/PIMRC.2017.8292708.
- [20] K. A. Ahmad, M. S. Salleh, J. D. Segaran, and F. R. Hashim, "Impact of foliage on LoRa 433MHz propagation in tropical environment," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1930, no. February, pp. 1–7, 2018, doi: 10.1063/1.5022903.
- [21] D. Río-Jalón, D. A. Chuquín-Vasco, D. J. Paredes Arquiola, and D. N. Lerma-Elvira, "Trabajo Fin de Máster," no. Documento 1, pp. 2011–2012, 2016.
- [22] D. Schrawat and N. S. Gill, "Smart sensors: Analysis of different types of IoT sensors," *Proc. Int. Conf. Trends Electron. Informatics, ICOEI 2019*, no. Icoei, pp. 523–528, 2019, doi: 10.1109/ICOEI.2019.8862778.
- [23] M. Ruiz, E. Alvarez, A. Serrano, and E. Garcia, "The Convergence between Wireless Sensor Networks and the Internet of Things; Challenges and Perspectives: a Survey," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 10, pp. 4249–4254, 2016, doi: 10.1109/TLA.2016.7786301.
- [24] S. Duangsuwan, A. Takarn, R. Nujankaew, and P. Jamjareegulgarn, "A Study of Air Pollution Smart Sensors LPWAN via NB-IoT for Thailand Smart Cities 4.0," 2018 10th Int. Conf. Knowl. Smart Technol. Cybern. Next Decad. KST 2018, pp. 206–209, 2018, doi: 10.1109/KST.2018.8426195.
- [25] E. D. Ayele, K. Das, N. Meratnia, and P. J. M. Havinga, "Leveraging BLE and LoRa in IoT Network for Wildlife Monitoring System (WMS)," 2018 IEEE 4th World Forum Internet Things, pp. 342–348, doi: 10.1109/WF-IoT.2018.8355223.
- [26] T. Rahman and S. K. Chakraborty, "Provisioning technical interoperability within ZigBee and BLE in IoT environment," in 2018 2nd International Conference on Electronics, Materials Engineering and Nano-Technology, IEMENTech 2018, 2018, pp. 1–4, doi: 10.1109/IEMENTECH.2018.8465272.
- [27] A. Zourmand, "Internet of Things (IoT) using LoRa technology," 2019 IEEE Int. Conf. Autom. Control Intell. Syst., no. June, pp. 324–330, 2019.
- [28] J. Y. Kim, "LoRa-based Mesh Network for IoT Applications," 2019 IEEE 5th World Forum Internet Things, pp. 524–527, 2019.
- [29] F. Wu and R. Christoph, "WE-Safe : A Wearable IoT Sensor Node for Safety Applications via LoRa," pp. 144–148, doi: 10.1109/WF-IoT.2018.8355234.
- [30] C. Electrical Engineering/Electronics, IEEE Thailand Section, IEEE Computational Intelligence Society. Thailand Chapter, and Institute of Electrical and Electronics Engineers, "ISCIT 2018 : the 18th International Symposium on Communication and Information Technology : September 26-29, 2018, Sukosol Hotel, Bangkok, Thailand.," 2018 18th Int. Symp. Commun. Inf. Technol., no. Iscit, pp. 313–317, 2018.
- [31] Y. Cheng, X. Xu, Y. Du, P. Guan, S. Liu, and L. Zhao, "Design of Air Quality Monitoring System Based on NB-IoT," 2019 IEEE Int. Conf. Power, Intell. Comput. Syst. ICPICS 2019, pp. 385–388, 2019, doi: 10.1109/ICPICS47731.2019.8942533.
- [32] V. A. Dambal, S. Mohadikar, A. Kumbhar, and I. Guvenc, "Improving LoRa Signal Coverage in Urban and Sub-Urban Environments with UAVs," 2019 Int. Work. Antenna Technol. iWAT 2019, pp. 210–213, 2019, doi: 10.1109/IWAT.2019.8730598.
- [33] E. Rivero and F. Bolaño, "Gestión Del Conocimiento Y Alianzas Estratégicas En Los Procesos De Innovación Tecnológica", 2018.
- [34] L. Liu et al., "Information collection system of duck products based on IoT," *Eurasip J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2018, no. 1, 2018, doi: 10.1186/s13638-018-1144-z.
- [35] S. Issa, E. Robles, and F. González, "Cultura De Innovación Turística: Una Apuesta Para El Cierre De Brechas Sociales Y Tecnológicas", vol. 53, no. 9. 2019.
- [36] B. Kirpes, P. Danner, R. Basmadjian, H. de Meer, and C. Becker, "E-Mobility Systems Architecture: a model-based framework for managing complexity and interoperability," *Energy Informatics*, vol. 2, no. 1, 2019, doi: 10.1186/s42162-019-0072-4.
- [37] J. Wan et al., "Wearable IoT enabled real-time health monitoring system," *Eurasip J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2018, no. 1, 2018, doi: 10.1186/s13638-018-1308-x.
- [38] S. Wang, Y. Hou, F. Gao, and X. Ji, "A novel IoT access architecture for vehicle monitoring system," 2016 IEEE 3rd World Forum Internet Things, WF-IoT 2016, pp. 639–642, 2017, doi: 10.1109/WF-IoT.2016.7845396.
- [39] Quectel, "Quectel EC20," 2012 עלון הנוסע, <https://www.quectel.com/product/ec20r21minipcIe.htm> (accessed Sep. 20, 2006).
- [40] 2019 Haines et al, "Sixfab," *Journal of Chemical Information and Modeling*, 2013. <https://sixfab.com/using-sixfab-raspberry-p-shield-hat-as-a-wi-fi-hotspot-access-point/>.
- [41] H. D. A. do. Santos, M. I. S. Oliveira, G. de F. A. B. Lima, K. M. da Silva, R. I. V. C. Rayelle, and B. F. Lóscio, "Investigations into data published and consumed on the Web: a systematic mapping study," *J. Brazilian Comput. Soc.*, vol. 24, no. 1, 2018, doi: 10.1186/s13173-018-0077-z.
- [42] N. Nikolov and O. Nakov, "Research of Communication Between IoT Cloud Structure, Android Application and IoT Device Using TCP Sockets," 2019 X Natl. Conf. with Int. Particip., pp. 1–4, 2019, doi: 10.1109/electronica.2019.8825568.
- [43] I. Allafi, "Design and Implementation of a Low Cost Web Server Using ESP32 for Real-Time Photovoltaic System Monitoring," pp. 1–5, 2017.
- [44] D. Zhang, S. Lin, Y. Fu, and S. Huang, "The communication system between web application host computers and embedded systems based on Node.JS," *Proc. - 2017 10th Int. Congr. Image Signal Process. Biomed. Eng. Informatics, CISP-BMEI 2017*, vol. 2018-Janua, pp. 1–5, 2018, doi: 10.1109/CISP-BMEI.2017.8302325.
- [45] Q.-D. Ngo, H.-T. Nguyen, L.-C. Nguyen, and D.-H. Nguyen, "A survey of IoT malware and detection methods based on static features," *ICT Express*, no. xxxx, 2020, doi: 10.1016/j.ict.2020.04.005.
- [46] D. Jo and G. J. Kim, "IoT + AR: pervasive and augmented environments for 'Digi-log' shopping experience," *Human-centric Comput. Inf. Sci.*, vol. 9, no. 1, pp. 1–17, 2019, doi: 10.1186/s13673-018-0162-5.
- [47] M. Salucci, N. Anselmi, S. Goudos, and A. Massa, "Fast design of multiband fractal antennas through a system-by-design approach for NB-IoT applications," *Eurasip J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2019, no. 1, 2019, doi: 10.1186/s13638-019-1386-4.
- [48] T. Zhu, J. Wang, S. Cheng, Y. Li, and J. Li, "Retrieving the relative kernel dataset from big sensory data for continuous queries in IoT systems," *Eurasip J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2019, no. 1, pp. 1–14, 2019, doi: 10.1186/s13638-019-1467-4.