


Proyecto de ingeniería aplicada

Desarrollo de una plataforma de monitoreo para una red de dispositivos IOT empleando tecnología Lorawan

Development of a web monitoring platform for a network of IOT devices using Lorawan technology

Remmy Ignacio Fuentes Telleria ¹.  Edgar Roberto Ramos Silvestre ². Alexander Otolara Rodriguez³.

¹ Docente del Departamento de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad Privada del Valle, Cochabamba, Bolivia. rfuentest@univalle.edu

² Director del Departamento de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad Privada del Valle, Cochabamba, Bolivia. eramoss@univalle.edu

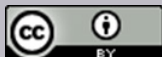
³ Estudiante de la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones, Universidad Privada del Valle, Cochabamba, Bolivia. ora0023088@est.univalle.edu

Citar como: Ramos Silvestre, E. R., Fuentes Telleria, R. I., & Otolara Rodriguez, A. Desarrollo de una plataforma de monitoreo para una red de dispositivos IOT empleando tecnología Lorawan. Journal Boliviano de Ciencias, UNIVALLE, 18(53), 6-25 <https://doi.org/10.52428/20758944.v18i52.227>

Revisado: 08/11/2022
Aceptado: 15/11/2022
Publicado: 30/12/2022

Declaración: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses en la publicación de este documento.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la Creative Commons. Licencia de atribución (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).
Derechos de autor 2022 Remmy Ignacio Fuentes Telleria, Edgar Roberto Ramos Silvestre, Alexander Otolara Rodriguez.



RESUMEN

En la actualidad, la IoT o Internet de las cosas, un concepto tecnológico que ha tomado gran fuerza, permite mitigar problemas en distintos sectores económicos. Con la constante evolución de las tecnologías de comunicación inalámbrica y la creciente tendencia de conectar cualquier elemento a Internet, y también la necesidad presente de tener controlado cualquier entorno en tiempo real, el Internet de las cosas permite brindar soluciones innovadoras utilizando tecnologías y protocolos eficientes y de última generación.

LoRa, es una de las nuevas tecnologías de transmisión inalámbrica en el ámbito IoT, brinda un consumo bastante reducido de energía permitiendo obtener un gran alcance de transmisión que supera a tecnologías como WiFi y redes celulares. Estas características combinadas con la posibilidad actual que se tiene de almacenar y centralizar cantidad de datos en servidores que estén conectados a Internet, permite el desarrollo de sistemas de monitoreo eficientes y robustos. En la presente investigación se realizó el estudio de la tecnología LoRa implementada en una solución IoT de monitoreo remoto, las ventajas que presente su implementación combinada con el uso de un servidor privado virtual y el protocolo estándar para IoT, denominado MQTT.

Palabras clave: IoT, LoRa, Servidores, MQTT, Sistemas de monitoreo.

ABSTRACT

Currently, the IoT or Internet of things, a technological concept that has gained great strength, allows mitigating problems in different economic sectors. With the constant evolution of wireless communication technologies and the growing trend of connecting any element to the Internet, and also the present need to control any environment in real time, the Internet of things allows to provide innovative solutions using efficient technologies and protocols of last generation.

LoRa, is one of the new wireless transmission technologies in the IoT field, provides a fairly low power consumption, allowing a large transmission range to be obtained that exceeds technologies such as WiFi and cellular networks. These characteristics combined with the current possibility of storing and centralizing amounts of data on servers that are connected to the Internet, allows the development of efficient and robust monitoring systems. In the present investigation, the study of the LoRa technology implemented in a remote monitoring IoT solution was carried out, also advantages of its implementation combined with the use of a virtual private server and the standard protocol for IoT, called MQTT.

Keywords: IoT, LoRa, Servers, MQTT, Monitoring systems.

1. INTRODUCCIÓN

En Bolivia, un país en desarrollo tecnológico, los sistemas de monitoreo se han convertido en una herramienta crucial que permite solucionar problemas y mejorar procesos en distintos sectores como negocios, aplicaciones e incluso en la industria misma, un ejemplo de esto es (Satrifo, 2022) un *software* de monitoreo y alerta de riesgos de incendios forestales, el cual permite monitorear bosques y parques con el fin de prevenir incendios antes de que estos ocurran.

En aplicaciones donde se requiere gran cantidad de sensores desplegados en el campo de monitoreo, el uso de recursos como suministro de energía, alcance de transmisión y de red en general se vuelven un punto crucial para brindar la mayor rentabilidad y eficiencia, dado que, el monitoreo y control de magnitudes físicas de un entorno dado son y han sido tareas de suma importancia que han permitido el desarrollo de soluciones integrales a las necesidades que presentan los diferentes sectores económicos.

Tomando en cuenta el concepto IoT, el presente artículo describe la implementación de un sistema de monitoreo web para una red de sensores haciendo uso de tecnologías englobadas por este concepto, LoRa, MQTT y servicios basados en la nube como un servidor privado virtual (VPS), para este propósito es necesario cumplir con una serie de tareas:

- El análisis y diseño de la arquitectura de red que se utilizará.
- El diseño y configuración de los nodos finales.
- La configuración de dispositivos LoRa.
- La implementación del protocolo MQTT.
- La implementación y configuración de servicios en un VPS.
- El desarrollo de un aplicativo web que permita la visualización de datos.

2. ANÁLISIS DE ARQUITECTURA DE RED

En el diseño de la arquitectura de red, es necesario tomar en cuenta la arquitectura propuesta por la tecnología LoRa y el protocolo MQTT, ya que ambas llegan a ser similares en ciertos aspectos, principalmente en su topología. Por una parte, LoRa que está basada en la arquitectura de una red LPWAN, propone el uso de nodos finales, un Gateway principal, un servidor de red y aplicaciones finales, por otra

parte, la arquitectura del protocolo MQTT que utiliza un servidor principal llamado Broker MQTT que gestiona todos los datos transmitidos de cantidad de clientes MQTT o dispositivos finales, estas se describen a continuación.

2.1 LoRa

Por sus siglas del inglés Long Range, es una de las tecnologías de comunicación inalámbrica perteneciente a las redes LPWAN, que proporciona distancias de transmisión superiores a 2 kilómetros con un consumo de potencia bastante reducido.

Esta tecnología engloba dos términos los cuales son LoRa y LoRaWAN, el primero que hace referencia a la tecnología o capa física y la segunda que llega a ser el protocolo que puede ser implementada dentro de una solución LoRa.

El método de modulación empleado por LoRa llega a ser Chirp Spread Spectrum (CSS) que es una técnica de modulación de espectro ensanchado que utiliza una serie de pulsos conocidos como chirridos para codificar los datos a transmitir, estos pulsos de chirridos son una variación de la frecuencia en el tiempo y esta variación puede ser ascendentes o decrecientes a los cuales se los conoce como upchirp y downchirp respectivamente, en la comunicación de dos dispositivos, la trama LoRa que se envía está conformada de una serie de pulsos de chirrido los cuales contienen la información que se quiere compartir. En la Figura 1 se presenta la modulación CSS.

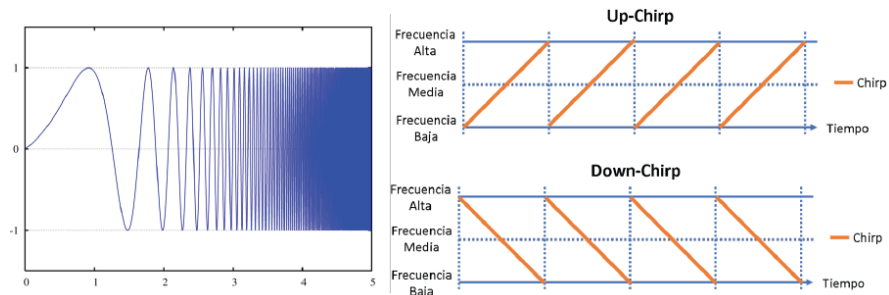


Figura 1. Modulación CSS. Fuente: Calderón, 2019.

Para una comunicación exitosa a través de esta tecnología es necesaria la configuración de ciertos parámetros como el factor de propagación, ancho de banda y velocidad de datos, los cuales se describen más adelante.

2.2. Redes LPWAN

LPWAN por sus siglas del inglés Low Power Wide Area Network, son aquellas redes de telecomunicaciones inalámbricas que permiten la transmisión de datos a largas distancias, 10 kilómetros con plano de visión con una baja tasa de transferencia de datos, 200 kbps en promedio y un consumo de energía bastante reducido que hace posible la alimentación de dispositivos mediante baterías (Campos, 2021).

Como se muestra en la Figura 2, las redes LPWAN superan notablemente en alcance de transmisión a redes inalámbricas como WiFi y redes LTE, con una tasa de *bits* relativamente baja, características que hacen de estas redes ideales para la implementación de aplicaciones IoT de baja potencia.

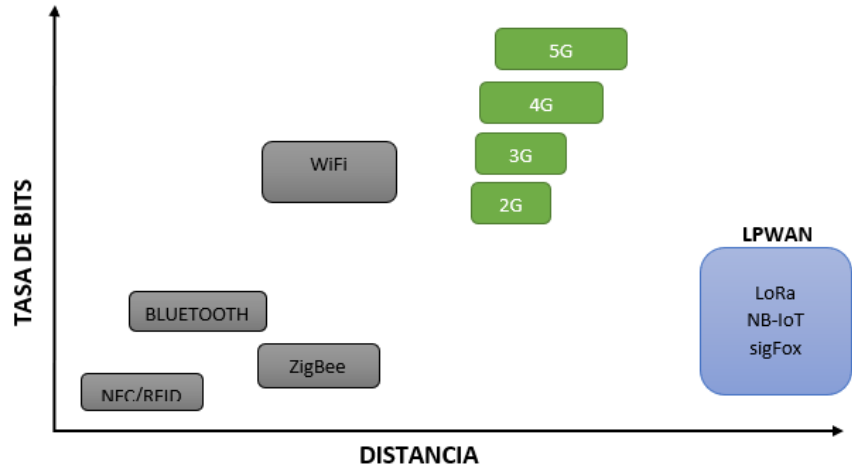


Figura 2. Tecnologías inalámbricas alcance de transmisión. Fuente: Elaboración propia, 2022.

2.3 Arquitectura de red LPWAN

La arquitectura de las redes LPWAN consiste principalmente de una topología en estrella donde muchos dispositivos finales o también llamados nodos finales van conectados a un dispositivo principal central llamado Gateway encargado de direccionar y retransmitir toda la información generada por los nodos finales hasta un servidor principal en el cual se gestiona toda la información de la red para finalmente retransmitirlas a aplicaciones finales implementadas por el usuario final (Ordoñez, 2017). En la Figura 3, se presenta la arquitectura de red LPWAN y los dispositivos que la componen.

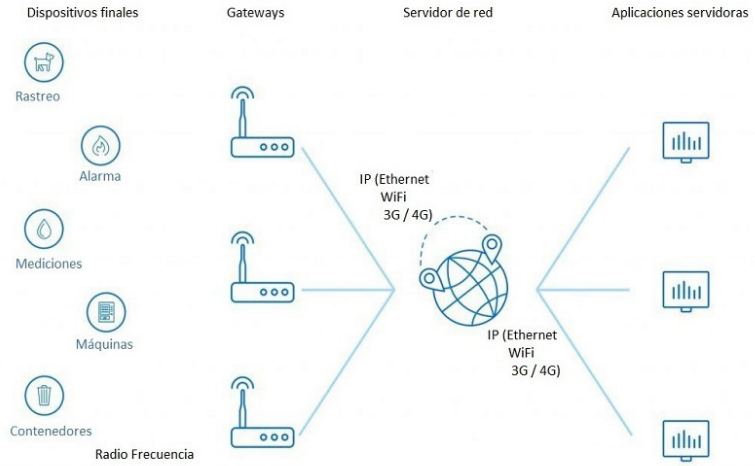


Figura 3. Arquitectura de red LPWAN. Fuente: La Rosa, 2022.

2.4 Tecnologías LPWAN

Existen varias tecnologías inalámbricas que pertenecen a las redes LPWAN y que brindan todas sus características, entre ellas LoRa. La Tabla 1, presenta una comparativa entre las tecnologías LPWAN de mayor relevancia.

Tabla 1. Comparativa entre tecnologías LPWAN

Propiedad	sigFox	LoRa	NB-IoT
Modulación	BPSK	CSS	QPSK
Frecuencia	433, 868, 915 MHz	433, 868, 915 MHz	LTE Frecuencia licenciada
Ancho de banda	200 Hz	125, 250, 500 KHz	200 kHz
Tasa de bits	100 kbps	50 kbps	200 kbps
Mensajes/ día Max	140 (UL), 4(DL)	Ilimitado	Ilimitado
Tamaño max payload	12 bytes	243 bytes	1600 bytes
Distancia	10 km (urbano) 40 km (rural)	5 km (urbano) 20 km (rural)	1 km (urbano) 10 km (rural)
Inmunidad a la interferencia	Muy alto	Muy alto	Baja
Redes privadas	No	Si	No
Tasa de bits adaptable	No	Si	No

Fuente: Meyerb, 2017.

En la Tabla 1 se puede observar que LoRa, en comparación con las demás tecnologías, posee características altamente admisibles. SigFox al igual que LoRa puede trabajar en las frecuencias no licenciadas de 433, 868 y 915 MHz, tiene un ancho de banda muy reducido, LoRa, en este sentido es la mejor, debido a que cuenta con tres rangos configurables de 125, 250, 500 KHz de ancho de banda.

En relación al alcance, LoRa no tiene la mayor distancia de alcance de transmisión, puede alcanzar hasta los 20 km en campos abiertos, el doble de NB-IoT. Además, LoRa tiene la principal ventaja de poder configurar una tasa de bit adaptables y la implementación de redes privadas, lo que permite personalizar la topología de red, el protocolo utilizado y otros aspectos, SigFox y NB-IoT en este sentido no permiten la implementación de redes privadas, lo que significa que no es posible modificar aspectos como la arquitectura de red, no permiten implementar servidores privados y limitan al usuario a utilizar necesariamente los servidores del proveedor para el almacenamiento de datos. En este sentido, LoRa es una tecnología que brinda capacidades altamente aceptables para cualquier tipo de aplicación IoT, especialmente donde se requiera la implementación de una red privada con el control total de los datos.

2.5 Protocolo MQTT

MQTT (Message Queue Telemetry Transport) es un protocolo de red ligero de publicación/suscripción, orientado a la transmisión de pequeñas cantidades de información. Desarrollado en 1999 y desde el año 2014 es un estándar abierto OASIS. Es un protocolo M2M (*machine to machine*), lo que significa que está pensado para el intercambio de información entre dispositivos sin interacción humana. MQTT requiere poco ancho de banda, pensado para funcionar sobre conexiones de baja calidad y en dispositivos de bajo consumo, como sensores autónomos alimentado por baterías (Pizarro Peláez, 2019).

2.6 Arquitectura MQTT

Como se muestra en la Figura 4, MQTT utiliza un paradigma de publicación y suscripción que corre sobre el protocolo de transporte TCP donde muchos clientes MQTT interactúan a través de un agente central llamado Broker. Debido a que utiliza un modelo cliente servidor permite que cada uno de los sensores se comporten como clientes MQTT, los mensajes transmitidos en la red corresponden a datos discretos que para el servidor son invisibles, cada mensaje se comparte bajo un tópico que es una dirección en la que se comparten los datos y todos los clientes suscritos en esa dirección de tópico tienen la posibilidad de recibir los datos que se comparten en la red.

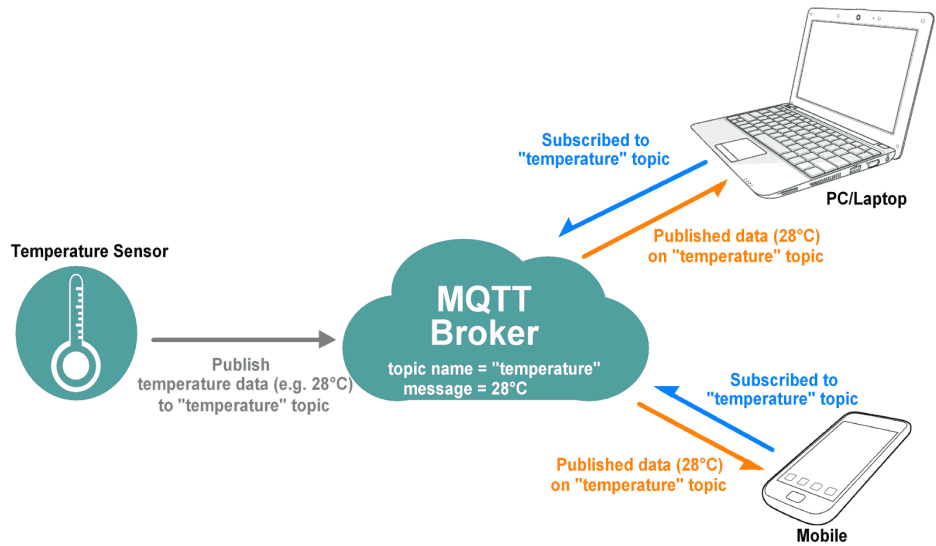


Figura 4. Arquitectura MQTT. Fuente: Firtec, 2021.

2.7 Diseño de arquitectura de red

Tomando en cuenta las arquitecturas antes descritas, en la Figura 5 se presenta un modelo de comunicación entre ambas tecnologías.

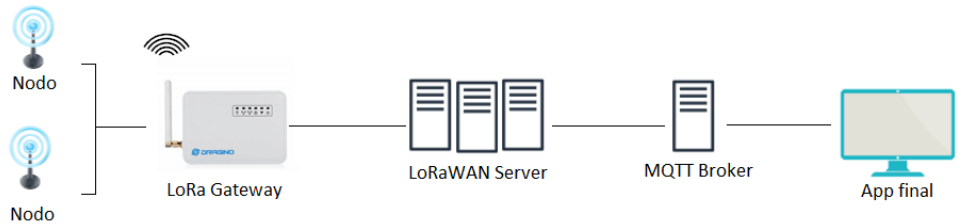


Figura 5. Modelo preliminar de Red. Fuente: Elaboración propia, 2022.

Resaltando que ambas tecnologías utilizan un servidor principal para la gestión de sus datos, el servidor de red en una red LoRa y el servidor Broker para MQTT, una propuesta inicial para la comunicación de LoRa y MQTT involucra que ambos servidores principales de ambas arquitecturas tengan que comunicarse entre sí (servidor LoRa-Broker MQTT) ilustrada en la figura 5, esta comunicación da paso a la interacción de ambas tecnologías, pero ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de utilizar este tipo de integración que se propone?, y ¿Es esto recomendable para la implementación de una red donde se quiera exclusividad y privacidad en el flujo de transmisión de datos?

En primer lugar, al utilizar un servidor de red LoRa, la principal ventaja es el enrutamiento de los datos a la aplicación adecuada y la selección de la mejor puerta de enlace calculada en función a la calidad del enlace. Existen variedad de servidores de red LoRa entre los cuales resaltan TTN y ChirpStack. La primera se caracteriza por ofrecer todas las cualidades de un servidor de red LoRaWAN dentro de una red pública en la nube, ventajosa en variedad de situaciones, pero también resulta desventajosa en otras, por ejemplo, no se podría implementar una red completamente privada, ya que al ser una red abierta y pública se estaría compartiendo la disponibilidad y el uso del dispositivo Gateway con todos los usuarios pertenecientes a la comunidad de TTN. La segunda, ChirpStack al igual que TTN proporciona todas las características de un servidor de red LoRa, con la principal diferencia de que es posible instalarlo en un computador privado y este pueda ser administrado por el propietario de forma privada, pero los servidores de red juegan un papel muy importante siempre y cuando se tengan gran cantidad de dispositivos Gateways o gran cantidad de redes LoRa, ya que una de sus características principales es gestionar los datos recibidos de variedad de Gateways de distintas redes y fabricantes.

Implementar un servidor de red LoRaWAN involucra primero, realizar la configuración de la conexión del Gateway con el servidor de red y segundo la comunicación del servidor de red con el servidor Broker MQTT para finalmente conectar con la plataforma de monitoreo web (Aplicación web final), esto se vuelve redundante debido a que la información que se transmite de los nodos finales estaría atravesando por distintos servidores y conexiones para ser visualizados en la plataforma web, generando riesgo de que la información llegue con pérdida o alteración de datos.

La solución ideal y recomendable para tener una red exclusiva y privada donde se tenga el control total de los datos sin depender de terceros es comunicar el Gateway LoRa directamente con el servidor Broker MQTT, debido a que este último es posible instalarlo en un servidor privado virtual, de esta manera, se logra obtener una red totalmente privada y segura donde la transmisión de datos hacia la plataforma WEB, sea lo más directa posible.

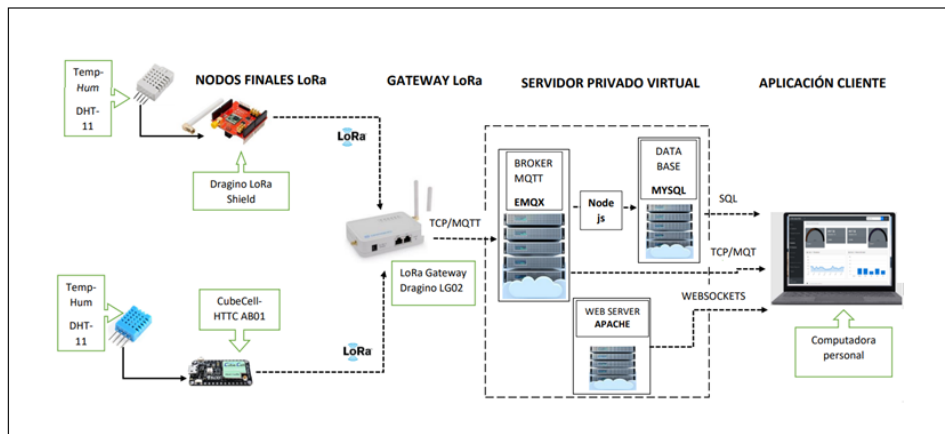


Figura 6. Arquitectura de Red. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 6 muestra la arquitectura empleada que permite comunicar exitosamente la red de nodos finales con un Broker MQTT, donde el Gateway LoRa es el dispositivo principal que permite efectuar dicha comunicación. Para el prototipo desarrollado solo se implementó tres nodos y dos usuarios, sin embargo, la arquitectura de red propuesta permite la conexión de más de 100 dispositivos y múltiples usuarios.

1.1. Diseño e implementación de nodos finales

Los nodos finales llegan a ser los principales componentes encargados de la adquisición de datos del entorno real, se conforman de la configuración de un microcontrolador, un sensor, un módulo de transmisión inalámbrica LoRa y unas baterías para su alimentación.

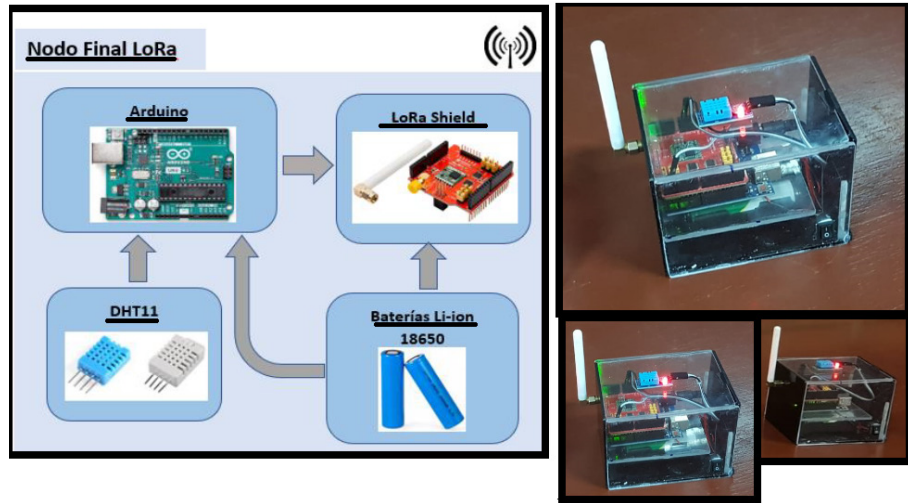
LoRa es la tecnología utilizada para la transmisión inalámbrica de datos en la red de nodos finales. si bien es posible implementar soluciones alternas con tecnologías como WiFi o redes celulares para este mismo propósito, LoRa brinda conectividad a larga distancia en escenarios precarios donde el acceso a la red es bastante limitado, esto con un consumo de energía relativamente bajo. Una de las principales limitantes que puede encontrarse con la tecnología WiFi para comunicar directamente sensores a la red, es el alcance de la señal inalámbrica y el alto consumo de recursos de energía y red que tiene. En los últimos años los avances en velocidad son impactantes, las distancias de transmisión que alcanzan se han mantenido estáticas, con un alcance que ronda los 50 metros en interiores y 100 metros sin obstáculos, por lo tanto, sus distancias de transmisión no han evolucionado lo suficiente.

En escenarios donde se tiene que cubrir grandes distancias de transmisión con una gran cantidad de sensores desplegados en el campo de monitoreo, es posible utilizar redes celulares que brindan un gran alcance de transmisión, pero su implementación para una red de sensores llegaría a ser bastante costosa, ya que tendría que proporcionarse a cada sensor módems celulares y servicio de datos y además se estaría haciendo un mal uso de esta tecnología, ya que las velocidades que posee son sumamente excesivas para propósitos en los que solo se quiere transmitir una pequeña cantidad de *bits* de datos unas pocas veces por hora o en algunos casos por día. LoRa en este sentido llega a ser ideal, ya que permite la transmisión de pequeñas cantidades de datos a distancias que rondan los kilómetros de alcance de transmisión.

En la Figura 7 se presenta el diseño de un nodo final compuesto de los siguientes componentes:

- Arduino UNO: una de las placas de desarrollo más empleadas en la electrónica, cuenta con un microcontrolador ATmega328, con un oscilador de cristal de 16 MHz, conversor analógico digital con una resolución de 10 *bits*
- Sensor de Temperatura y Humedad DHT11: cuenta con un rango de medición en el caso de humedad de 20 – 90%RH y de temperatura de 0 - 50 °C, con un rango de precisión de 5%RH y 2 °C respectivamente.
- Shield Dragino LoRa: Es una placa de transmisión inalámbrica LoRa de código abierto, totalmente compatible con Arduino. Está basada en un chip SX1276 pudiendo funcionar en las frecuencias 433, 868 y 915 MHz.
- Baterías Li-ion 18650: altamente portables y manipulables, proporcionan el suministro de voltaje a 3.7 V y 26000 mAh.

Figura 7. Nodo final



Fuente: Elaboración propia, 2022.

Para el correcto funcionamiento y transmisión de datos por parte de un nodo final, es importante la configuración de los siguientes parámetros LoRa:

- **FACTOR DE PROPAGACIÓN (SF):** El factor de propagación o Spread Factor es un parámetro configurable que permite ajustar aspectos como la duración de la señal de chirrido en el aire y la cantidad de *bits* codificados dentro de una señal de chirrido, puede ser configurado con valores que van de 7 a 12, un mayor valor de SF representa una mayor codificación de *bits* que se traduce en mayor tiempo que los datos permanecen en el aire.
- **ANCHO DE BANDA (BW):** LoRa utiliza tres anchos de banda configurables los cuales se muestran en la tabla 1, estos son 125 kHz, 250 kHz y 500 kHz. Todas las señales de chirrido transmitidas en una comunicación LoRa utilizan todo el ancho de banda para realizar la variación de la frecuencia en el tiempo.
- **VELOCIDAD DE DATOS (DR):** Es el parámetro que define la velocidad de transmisión de los datos, este depende directamente del ancho de banda utilizado y el factor de propagación definido.
- **TASA DE CÓDIGO (CR):** La tasa de código o coding rate del inglés, tiene efecto directo sobre las interferencias que la señal LoRa puede sufrir a lo largo del trayecto de transmisión, este valor se ajusta de acuerdo con las condiciones del canal, si este es propenso a la pérdida de datos se recomienda utilizar un valor elevado de CR.

La configuración de los parámetros LoRa se realiza a través de la programación del microcontrolador del nodo final, el cual contiene el firmware que permite la adquisición, la conversión analógico digital de los datos captados por los sensores y contiene un identificador único para cada nodo final, la Tabla 2 presenta la configuración de parámetros LoRa necesarios.

Tabla 2. Parametros LoRa configurables

Parámetro	Valor	Descripción
Frequency (Hz)	433000000	Banda de Frecuencia para la transmisión de datos a través de LoRa
Spreading Factor	SF7	Factor de expansión que permite controlar la velocidad de transmisión de datos
Preable Length	8	Longitud de preámbulo de una trama
RF-Power (dBm)	17	Potencia de la señal de salida
RF-Bandwidth (Hz)	125 KHz	Ancho de banda utilizado
Coding Rate	4/5	Tasa de código
LoRa Syc Word	52	Valor de un byte utilizado para identificar las redes lora que utilizan la misma frecuencia

Fuente: Elaboracion propia, 2022

Con los dispositivos empleados y la configuración realizada, los nodos finales son capaces de consumir un promedio de 130 mA al momento de realizar una transmisión de datos. En un escenario real donde la transmisión de datos se realiza una vez por hora utilizando una batería de 2600 mAh es posible obtener una autonomía de funcionamiento de hasta 186 días sin la necesidad de una recarga de las baterías.

1.2. Gateway LoRa

El Gateway es el principal dispositivo que permite centralizar toda la información proveniente de los nodos finales y de retransmitir dicha información hasta un servidor principal utilizando el protocolo MQTT, este posibilita la comunicación con un Broker MQTT el cual se ejecuta como un programa informático en un servidor virtual que está a escuchando todas las publicaciones que se realicen.

Lograr la comunicación del Gateway con el servidor Broker MQTT depende directamente de las capacidades del dispositivo Gateway empleado, este debe contar con funcionalidades que le permitan conectar con servidores privados. En la Figura 8, se presenta el Gateway Lora utilizado en el proyecto.

El Gateway LoRa utilizado cuenta con las siguientes características:

- Modelo: Dragino LG02
- Sistema operativo: Linux
- Procesador: AR9331 – 400 MHz
- RAM: 64 MB – 16 MB (flash)
- Transceptor LoRa: SX1276/SX1278
- Frecuencias de operación: 433/868/915 MHz
- Conexión a Internet vía: LAN, WiFi, 3G/4G



Figura 8. Gateway LoRa. Fuente: Elaboración propia, 2022.

Para que la comunicación con los nodos finales se efectúe correctamente y el Gateway pueda retransmitir los datos utilizando el protocolo MQTT es necesario configurar los parámetros LoRa descritos en la Tabla 2 en el Gateway y también el modo de funcionamiento para la utilización del protocolo MQTT, la Tabla 3 muestra los principales parámetros que deben ser configurados para la comunicación vía MQTT.

Tabla 3. Configuración de parámetros MQTT en Gateway LoRa

Nº	Campo de configuración	Descripción
1	MQTT service profile	Servicio MQTT
2	Broker Address (h)	Dirección IP del bróker MQTT al que se quiere conectar
3	Broker port (p)	Puerto de utilizado para la transmisión por MQTT
4	Client ID (i)	Identificador del Gateway LoRa
5	Topic format (-t)	Macro de tópico
6	Data format (-m)	Tipo de macro de mensaje, data o meta

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Esta configuración permite al Gateway LoRa funcionar como un cliente MQTT que está conectado al Broker, de esta manera el Gateway al momento de retransmitir un dato, realiza una publicación del mismo dato en el Broker, este proceso también requiere de la configuración de un mapeo de canales en el Gateway, el cual consta de un identificador de nodo final asociado a un canal remoto, el canal remoto llega a ser el nombre de tópico en el que el Gateway realiza la publicación del dato.

El mapeo de canales de la Tabla 4 permite verificar al Gateway que el identificador de un nodo final esté asociado a un canal remoto para realizar la publicación en el Broker MQTT.

Tabla 4. Mapeo de canales – Gateway LoRa

Nº	Id nodo final	Canal Local	Canal Remoto
1	Id_nodo_1	Id_nodo_1	Canal remoto1
2	Id_nodo_2	Id_nodo_2	Canal remoto 2

Fuente: Elaboración propia, 2022.

La Figura 9 muestra el proceso utilizado.

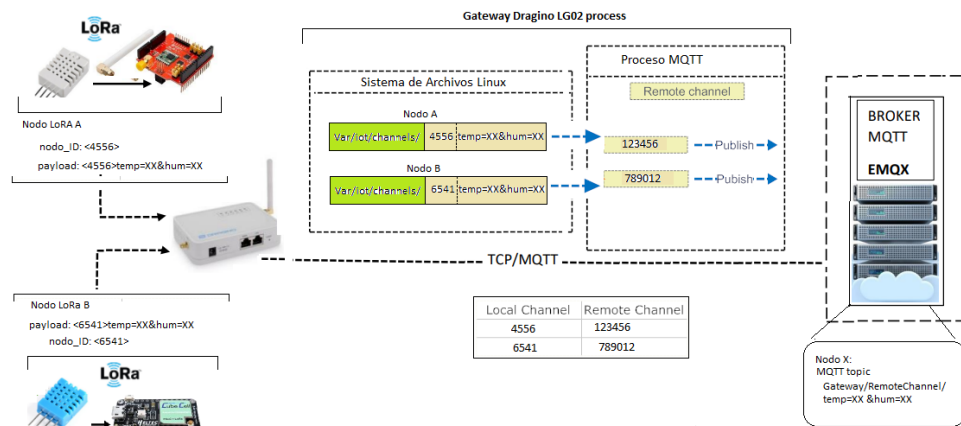


Figura 9. Proceso de transferencia de datos Gateway – Broker MQTT. Fuente: Elaboración propia, 2022.

2.10 Servidor principal

La implementación de un servidor principal es necesaria ya que este permite configurar e instalar una serie de programas informáticos para la gestión de todos los datos transmitidos en la red. Un servidor privado virtual (VPS) llega a ser más ventajoso ya que está alojada en la nube y aspectos como el mantenimiento y la seguridad de los datos recae directamente sobre la empresa proveedora del servicio de alojamiento.

El servidor empleado consta de una máquina virtual en la nube, en el cual es posible realizar instalaciones y configuraciones de servicios informáticos que permitan el correcto flujo de datos. En la Tabla 5 se muestra las características de un servidor privado virtual y una serie de servicios que permiten administrar y gestionar los datos provenientes de los nodos finales.

Tabla 5. características y servicios VPS

N°	Descripción	Nombre
0	Instancia	T2 micro
1	Sistema operativo	Linux Ubuntu 18
2	Tecnología de virtualización	HVM
3	Tipo de almacenamiento	HDD
4	Arquitectura	64 bits (x86)
5	Servicio WEB	Apache
6	Servicio BDD	MySQL
7	Lenguajes de lado del servidor	PHP, JavaScript
8	Panel de administración de hosting	Vesta Control Panel
9	JavaScript capa de servidor	Node Js
10	Nombre de dominio	GoDaddy
11	Broker MQTT	EMQ x

Fuente: Elaboración propia, 2022.

Uno de los principales servicios empleados llega a ser EMQx, que es un Broker MQTT el cual permite la comunicación con el Gateway LoRa a través del protocolo MQTT, también gestiona todos los datos provenientes del Gateway para ser visualizados en la aplicación correcta. En la Figura 10 se muestra los distintos servicios implementados que conforman el VPS.

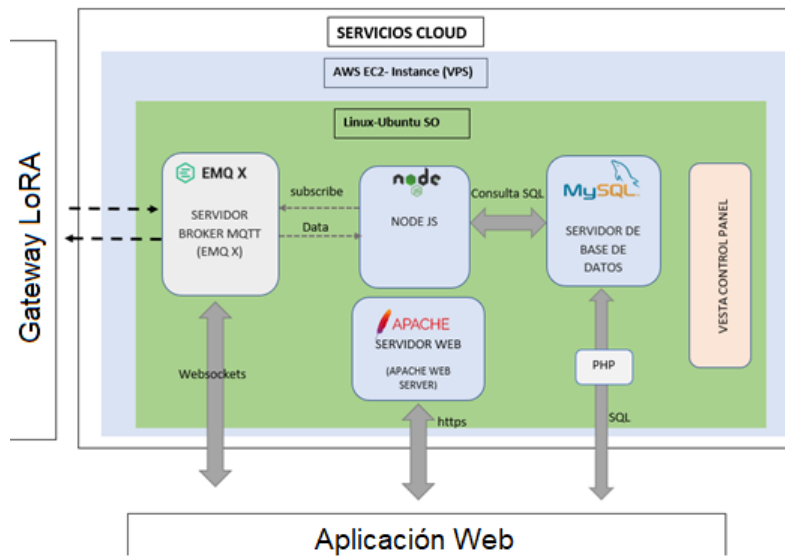


Figura 10. Servidor principal. Fuente: Elaboración propia, 2022.

2.11 APLICACIÓN WEB FINAL

Para el acceso y la visualización de los datos que se captan y comparten desde los nodos finales, es necesario desarrollar una página web la cual pueda ser accedida mediante cualquier navegador web. La Figura 11 muestra la aplicación web desarrollada con tecnología Bootstrap y lenguajes de programación como PHP y JavaScript permite visualizar dinámicamente a través de gráficos y registros todos los datos captados por los nodos sensores.

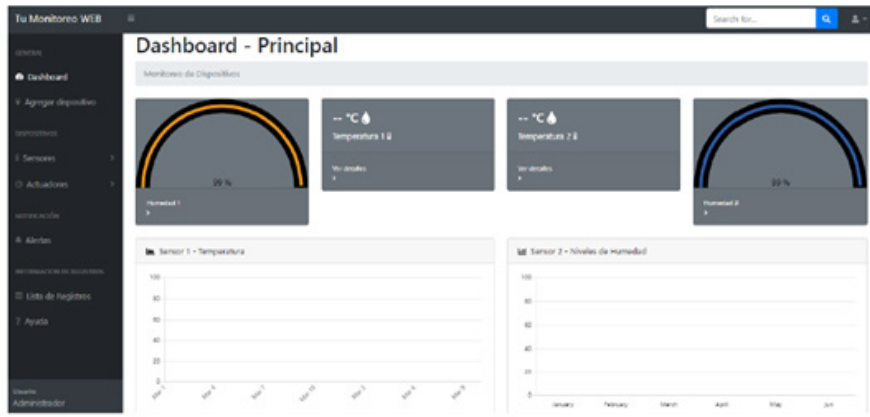


Figura 11. Aplicación web final. Fuente: Elaboración propia, 2022.

2.12 Flujo de datos en la red

Los nodos finales se comunican con el Gateway LoRa utilizando modulación de radiofrecuencia LoRa, cada trama enviada por los nodos finales contiene el identificador único de cada nodo final y los datos captados del entorno real, una vez que el Gateway LoRa recibe los datos provenientes de un nodo final, este verifica que el identificador del nodo final este registrado en el Gateway para así realizar la retransmisión del dato al servidor virtual, esta retransmisión de datos llega a ser una publicación mediante el protocolo MQTT que el Gateway realiza en el Broker MQTT, el cual se ejecuta como un programa informático en el servidor virtual. La página web y la base de datos fueron configuradas como clientes MQTT, este proceso se llevó a cabo utilizando la librería MQTT.js que permitió realizar esta configuración, de esta manera tanto la página web como la base de datos pueden estar suscritas a todos los tópicos en los cuales el Gateway realiza la publicación de los datos que los nodos finales captan del entorno real, y así poder visualizar dichos datos en tiempo real mediante gráficos y registros en la página web.

3. RESULTADOS

Con el fin corroborar el correcto funcionamiento de las tecnologías, protocolos y servicios implementados, del sistema de monitoreo en general, se realizaron distintos tipos de pruebas los cuales se describen a continuación.

3.1 Prueba de alcance de transmisión

La prueba consistió en la transmisión de datos por parte de un nodo final al Gateway, verificando el alcance entre estos y su presentación en la página web en escenarios de prueba con línea y sin línea de visión entre el nodo transmisor y el Gateway receptor.

3.2 Transmisión sin línea de visión

En un escenario de prueba sin línea de visión, donde se resalta la existencia de residencias, árboles y otros objetos que interfieren el plano de visión, el alcance máximo obtenido sin plano de visión fue de 350 m. En la Figura 12, se presenta los detalles de la prueba de alcance de transmisión sin plano de visión.



Figura 12. Prueba de alcance de transmisión sin plano de visión. Fuente: Elaboración propia, 2022.

3.3 Transmisión con línea de visión

En un escenario de prueba con línea de visión, para el caso el escenario utilizado fue una carretera con un trayecto recto que permitía la visibilidad entre el nodo final transmisor y el Gateway LoRa receptor, el alcance de transmisión obtenido fue de 700 m aproximadamente llegando en ocasiones a una longitud mayor, pero con un menor número de datos recibidos por parte del Gateway. En la Figura 13, se presenta los detalles de la prueba de alcance con plano de visión.

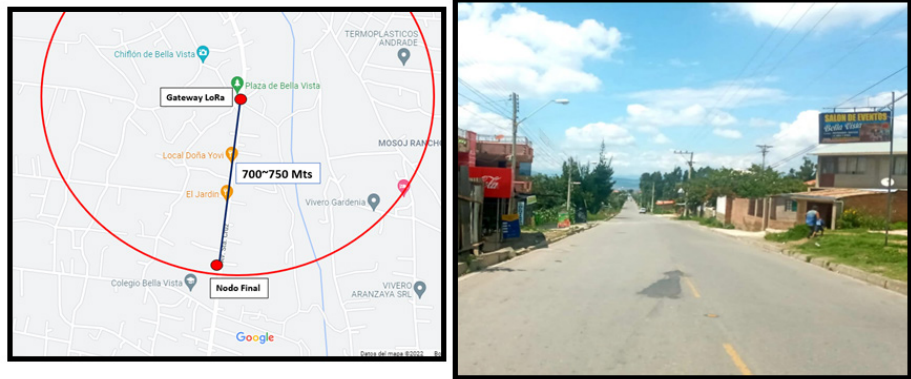


Figura 13. Prueba de alcance de transmisión con plano de visión. Fuente: Elaboración propia, 2022.

3.4 Prueba de transmisión simultánea de datos

La prueba involucró la transmisión de datos simultáneamente de tres nodos finales al Gateway para su posterior visualización en la página web. En la Figura 14, se presenta la prueba de transmisión de datos de los dispositivos a la aplicación web.

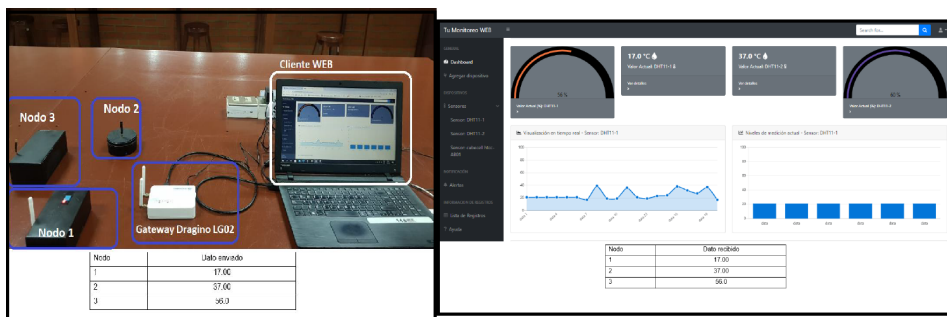


Figura 14. Prueba de transmisión simultanea de datos. Fuente: Elaboración propia, 2022.

Bajo este mismo escenario se pudo verificar la carga del servidor virtual utilizando la herramienta VestaCP, donde se obtuvo valores del 18 % del uso de la CPU con una utilización de memoria RAM del 50%. Se debe tomar en cuenta que el servidor privado virtual da cabida a varios servicios incluyendo la base de datos y el Broker MQTT entre los principales.

4. DISCUSIÓN

Con la implementación de este proyecto se ha conseguido una evaluación en campo, de la aplicabilidad de una tecnología, que se transporta sobre capa física inalámbrica, denominada LoRa, y su protocolo de comunicación de capa de red, LoRaWAN. De forma análoga a una red de computadoras TCP/IP, se podría decir que LoRa son los cables Ethernet que conectan los dispositivos de red y LoRaWAN, es la interconexión a nivel de direcciones MAC e identificadores únicos de red o direcciones IP.

Al ser LoRaWAN un protocolo abierto, permite que multitud de fabricantes y desarrolladores puedan ofrecer dispositivos compatibles, abaratando los costes de implementación de redes IoT en diversos escenarios, desde ciudades inteligentes, hasta monitoreo industrial, agro, comercio, gobierno, hogar, etc. Lo que indudablemente facilitará su empleo en un mayor número de aplicaciones en los próximos años.

El uso de esta tecnología y su particular tipo de modulación permite una mejor tolerancia al ruido y de esta forma alcanzar largas distancias con un consumo muy bajo de energía, si bien el estándar especifica que se puede llegar a varios kilómetros, en la implementación del proyecto con un equipo convencional con una sensibilidad de -142.5 dbm se llegaron a distancias superiores a los 700 metros en LoS.

El bajo consumo de energía, junto al protocolo MQTT, permiten que los dispositivos IoT puedan operar en periodos muy largos de tiempo, por cuanto se podrían utilizar bancos de energía solar en aplicaciones a cielo abierto.

La arquitectura Network Server en la nube, brinda la ventaja de independizar los servidores de datos de los Gateways de acceso para dispositivos IoT, esta arquitectura permite la comunicación de miles de dispositivos a través de uno o varios Gateways, garantizando una alta escalabilidad de la red LoRaWAN, además de simplificar los procesos de configuración, los mismos se pueden realizar de forma encadenada o por lotes de dispositivos, prestando servicios a múltiples aplicaciones de forma centralizada y transparente para los usuarios finales. La desventaja de este modelo es el incremento en los costos del proyecto, que deben ser analizados y solventados de acuerdo al escenario de aplicación.

Desde el punto de vista del proyecto, no se analizaron los detalles de seguridad de la red, si bien el protocolo ofrece un nivel alto de seguridad entre dispositivos, desde los nodos hasta el servidor de aplicaciones, existe un hueco de seguridad que debe ser subsanado de acuerdo a recomendaciones y políticas de seguridad de la información, como podrían ser firewalls perimetrales o listas de acceso en los nodos de transporte.

Dependiendo de la ubicación geográfica de los escenarios de aplicación de un proyecto IoT Lora, las bandas de frecuencia utilizadas pueden variar de país a país, en Bolivia la Autoridad de Regulación y Fiscalización de Telecomunicaciones y Transporte ATT, de acuerdo a Resolución Administrativa Regulatoria ATT-DJ-RAR-TL LP 3234/2020 del 29 de septiembre de 2020, con base al informe técnico INF-TEC 417/2020 y a través del informe jurídico INF-JUR 286/2020, aprobaron el instructivo técnico para la utilización de las bandas de uso libre para el Internet de las Cosas, considerando parámetros mínimos para garantizar la coexistencia de tecnologías que operan en la banda de 915 a 928 MHz.

Después de la implementación y pruebas del proyecto, cuando evaluamos LoRa y LoRaWAN, vemos que podemos utilizar LoRa sin implementar LoRaWAN, esto para proyectos simples, mientras que para proyectos más complejos y con una cantidad de nodos considerable, recomendamos implementar una red LoRaWAN, junto a una arquitectura Server Network para garantizar escalabilidad, seguridad y gestión.

5. CONCLUSIONES

Mediante la investigación de tecnologías como LoRa, MQTT, servidores privados virtuales y servicios web, y su implementación en un proyecto de Internet de las cosas, se pudo verificar el funcionamiento, las ventajas y desventajas que dichas tecnologías presentan en una aplicación de monitorización remota, las cuales se presentan a continuación:

- Las redes de bajo consumo de potencia y grandes distancias de transmisión (LPWAN) están en un punto de transición pasando de ser tecnologías de investigación a tecnologías potencialmente utilizables para la solución a problemáticas reales existentes en la actualidad, especialmente en aplicaciones IoT como sistemas de monitoreo remoto.
- LoRa es una tecnología en desarrollo con gran potencial en aplicaciones de transmisión inalámbrica de datos utilizando un bajo consumo de potencia y donde tecnologías como WiFi se ven limitadas tanto en alcance de cobertura como uso de ancho de banda.
- El alcance de transmisión de la tecnología LoRa como cualquier otra tecnología inalámbrica está sujeta a factores tales como, el escenario donde se realice la transmisión, la visibilidad entre los puntos de transmisión, la calidad de los dispositivos utilizados, si estos están fabricados para aplicaciones de uso profesional o solo de desarrollo. Un dispositivo LoRa de mayor calidad y alcance de transmisión también representa un costo de adquisición más elevado, esto se pudo ver reflejado en las pruebas de alcance de transmisión realizadas, donde se utilizó dispositivos LoRa genéricos, logrando un alcance de transmisión en el mejor de los casos de aproximadamente de 350 metros sin plano de visión y 750 metros con plano de visión entre los puntos de transmisión.
- Emplear un servidor privado virtual (VPS) es altamente beneficioso en términos de rapidez, disponibilidad tanto para la implementación de servicios como el alojamiento de una página web, principalmente en casos donde se requiere de exclusividad y privacidad.
- Utilizar el protocolo MQTT para la comunicación de datos, ayuda a reducir el consumo de ancho de banda, el protocolo permite una comunicación rápida, liviana y una compatibilidad con variedad de dispositivos como el Gateway LoRa Dragino LG02 utilizado en el proyecto, también optimiza el uso de recursos como CPU y RAM ideal para aplicaciones referidas a la IoT.

Agradecimientos

Agradecimientos a la Dirección Nacional de Investigación de la Universidad Privada del Valle por apoyar el proyecto con el financiamiento para la compra de los dispositivos Lora.

REFERENCIAS

SATRIFO, S. (2015). *Sistema de monitoreo y alerta temprana de riesgos de incendios forestales*. Recuperado de <https://incendios.fan-bo.org/Satrifo/>

Campos, F. (2021). *LPWAN: qué son y para qué se utilizan*. *Industrial M2M*. Recuperado de <https://www.m2mlogitek.com/lpwan-que-son-y-para-que-se-utilizan/>.

Ordóñez, I. (2017). “*Estudio de la arquitectura y el nivel de desarrollo de la red LoRaWAN y de los dispositivos LoRa*,”. Recuperado de. <http://hdl.handle.net/10609/64365>.

La Rosa, A. (2022). *LPWAN como base de comunicaciones para IoT*. Recuperado de <https://pandorafms.com/blog/es/que-es-lpwan/>.

Mekkia K, Bajica E, Chaxela F, Meyerb F. (2017). *A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment*. *ICT Express* 5(1): 1-7. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ict.2017.12.005>

Calderón Porras, A. P. (2019). *Implementación de una Red LPWAN de Sensores para el Monitoreo de Condiciones Ambientales*. Santander, Colombia: Corporación centro de desarrollo Tecnológico de gas.

Pizarro Peláez, J. (2019). *Internet de las cosas (IoT) con Arduino Manual Práctico*. Madrid: Ediciones Paraninfo.

FirTec, (2021). *Electrónica y Programación para Microcontroladores*. Recuperado de <https://www.firtec.com.ar/cms/53-que-es-mqtt>.