



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**PROTOTIPO DE UN SISTEMA DE TELEMETRÍA PARA LA MEDICIÓN DE AGUA POTABLE
RESIDENCIAL UTILIZANDO LA TECNOLOGÍA LORA Y EL PROTOCOLO LORAWAN**

Pablo David Velásquez Vela

Asesorado por Msc. Ing. Marlon Fernando Klee Ambrosio

Guatemala, octubre de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROTOTIPO DE UN SISTEMA DE TELEMETRÍA PARA LA MEDICIÓN DE AGUA POTABLE
RESIDENCIAL UTILIZANDO LA TECNOLOGÍA LORA Y EL PROTOCOLO LORAWAN**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

PABLO DAVID VELÁSQUEZ VELA

ASESORADO POR MSC. ING. MARLON FERNANDO KLEE AMBROSIO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRÓNICO

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO a.i.	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Ing. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADORA	Inga. Ana María Navarro Orozco
EXAMINADOR	Ing. Brian Enrique Chicol Morales
EXAMINADOR	Ing. Jorge Gilberto González Padilla
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

PROTOTIPO DE UN SISTEMA DE TELEMETRÍA PARA LA MEDICIÓN DE AGUA POTABLE RESIDENCIAL UTILIZANDO LA TECNOLOGÍA LORA Y EL PROTOCOLO LORAWAN

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 14 de junio de 2023.



Pablo David Velásquez Vela



EEPFI-PP-0357-2023

Guatemala, 13 de abril de 2023

Director
Armando Alonso Rivera Carrillo
Escuela De Ingeniería Mecanica Electrica
Presente.

Estimado Ing. Rivera

Reciba un cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería.

El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado y aprobado el Diseño de Investigación titulado: **PROTOTIPO DE UN SISTEMA DE TELEMETRÍA PARA LA MEDICIÓN DE AGUA POTABLE RESIDENCIAL UTILIZANDO LA TECNOLOGÍA LORA Y EL PROTOCOLO LORAWAN**, el cual se enmarca en la línea de investigación: **Internet de las cosas - Internet de las cosas**, presentado por el estudiante **Pablo David Velásquez Vela** con cui **1716793260101**, quien optó por la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en ARTES en Ingeniería Para La Industria Con Especialidad En Ciencias De La Computación.

Y habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Décimo, Inciso 10.2 del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Mtro. Marlon Fernando Klée Ambrosio

Asesor(a)

MSc. Lic. Marlon Fernando Klée Ambrosio
Colegiado No. 11105



null Carlos Gustavo Alonzo
Coordinador(a) de Maestría

Mtro. Edgar Darío Álvarez Coti
Director

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería





EEP-EIME-0356-2023

El Director de la Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica de la Facultad de Ingenieria de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador y Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, del Diseño de Investigación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **PROTOTIPO DE UN SISTEMA DE TELEMETRÍA PARA LA MEDICIÓN DE AGUA POTABLE RESIDENCIAL UTILIZANDO LA TECNOLOGÍA LORA Y EL PROTOCOLO LORAWAN**, presentado por el estudiante universitario **Pablo David Velásquez Vela**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingenieria en esta modalidad.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
Director
Escuela De Ingenieria Mecanica Electrica

Guatemala, abril de 2023



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Decanato
Facultad e Ingeniería

24189101- 24189102

LNG.DECANATO.OIE.84.2023

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **PROTOTIPO DE UN SISTEMA DE TELEMETRÍA PARA LA MEDICIÓN DE AGUA POTABLE RESIDENCIAL UTILIZANDO LA TECNOLOGÍA LORA Y EL PROTOCOLO LORAWAN**, presentado por: **Pablo David Velasquez Vela** después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Firmado electrónicamente por: José Francisco Gómez Rivera
Motivo: Orden de Impresión
Fecha: 06/10/2023 18:54:40
Lugar: Facultad de Ingeniería, USAC.

Ing. José Francisco Gómez Rivera
Decano a.i.



Guatemala, octubre de 2023

Para verificar validez de documento ingrese a <https://www.ingenieria.usac.edu.gt/firma-electronica/consultar-documento>

Tipo de documento: Correlativo para orden de impresión Año: 2023 Correlativo: 84 CUI: 1716793260101

Escuelas: Ingeniería Civil, Ingeniería Mecánica Industrial, Ingeniería Química, Ingeniería Mecánica Eléctrica, - Escuela de Ciencias, Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS). Postgrado Maestría en Sistemas Mención Ingeniería Vial. Carreras: Ingeniería Mecánica, Ingeniería Electrónica, Ingeniería en Ciencias y Sistemas. Licenciatura en Matemática. Licenciatura en Física. Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas (CESEM). Guatemala, Ciudad

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por guiarme a lo largo de este viaje académico y por brindarme la fuerza y la determinación para enfrentar los desafíos que surgieron en el camino. Su infinita sabiduría y amor incondicional han sido mi fuente de inspiración constante.

Mis padres

Por su sacrificio, apoyo inquebrantable y valores inculcados desde mi infancia, que son los cimientos sobre los cuales he construido mi educación. Por ser mi ejemplo de perseverancia y dedicación.

Mi esposa

Por ser mi compañera de vida y por su apoyo incondicional a lo largo de este proceso. Sus palabras de aliento, paciencia y amor constante.

Mis hijas

Por llenar cada día con alegría y por ser una fuente constante de inspiración.

Mis hermanas

Por su amor y apoyo a lo largo de los años. Sus consejos y ánimo han sido un faro de luz en mi camino académico.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por brindarme la oportunidad de proporcionar un entorno de aprendizaje para lograr esta meta.

Mis amigos

Quienes han estado a mi lado en este viaje, quiero agradecerles por su apoyo constante y sus palabras de aliento en los momentos de duda. Sus conversaciones, consejos y risas han sido un bálsamo para el estrés académico.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
OBJETIVOS.....	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
1. ANTECEDENTES	1
2. PLANTENAMIENTO DEL PROBLEMA.....	5
3. JUSTIFICACIÓN	9
4. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE LA SOLUCIÓN	11
5. ALCANCES	15
5.1. Perspectiva investigativa	15
5.2. Perspectiva técnica	16
5.3. Perspectiva de resultados	17
6. MARCO TEÓRICO.....	19
6.1. Perdidas en sistemas de distribución de agua	19
6.1.1. Control de fugas	19
6.1.1.1. Gestión de tuberías y activos.....	20
6.1.1.2. Gestión de la presión	20
6.1.1.3. Rapidez y calidad de las reparaciones	21
6.1.1.4. Control activo de fugas	21
6.2. Sistema de telemetría.....	22
6.3. Internet de las cosas	24
6.3.1. Sistemas embebidos IoT	25
6.3.2. Protocolos inalámbricos IoT.....	26

	6.3.2.1.	LPWAN.....	28
6.4.		Transmisión y propagación de radio	31
	6.4.1.	Definiciones.....	32
		6.4.1.1. Decibeles.....	33
		6.4.1.2. Indicador de fuerza de la señal recibida	34
		6.4.1.3. Sensibilidad.....	34
		6.4.1.4. Relación señal ruido.....	34
		6.4.1.5. Presupuesto de enlace.....	36
	6.4.2.	Modelo Okumura-Hata	37
6.5.		LoRa.....	38
6.6.		LoRaWAN	39
	6.6.1.	Arquitectura y componentes.....	40
		6.6.1.1. Dispositivos finales.....	41
		6.6.1.2. Gateway	41
		6.6.1.3. Servidor de red.....	42
		6.6.1.4. Servidor de aplicación	43
		6.6.1.5. Plataforma IoT	44
	6.6.2.	Clases de dispositivos finales.....	45
		6.6.2.1. Clase A – Bajo consumo	45
		6.6.2.2. Clase B – Faro	46
		6.6.2.3. Clase C – Escucha constante	47
	6.6.3.	Activación de dispositivos finales	48
		6.6.3.1. Activación por personalización	49
		6.6.3.2. Activación por aire	49
	6.6.4.	Parámetros regionales LoRaWAN	51
6.7.		Medidores de agua potable.....	51
	6.7.1.	Medidor de agua mecánico	52
	6.7.2.	Medidor de agua electromagnético	52

6.7.3.	Medidor de agua ultrasónico.....	53
6.7.4.	Medidor de agua inteligente.....	54
6.8.	Computación en la nube.....	55
6.8.1.	Modelos de servicio	56
6.8.1.1.	Infraestructura como servicio.....	56
6.8.1.2.	Plataforma como servicio	57
6.8.1.3.	Software como servicio.....	57
6.8.2.	Modelos de implementación	57
6.8.2.1.	Nube pública.....	58
6.8.2.2.	Nube privada	58
6.8.2.3.	Nube híbrida	58
6.8.3.	Empresas líderes que prestan el servicio en nube	58
6.8.3.1.	Amazon Web Services	59
6.8.3.2.	Microsoft Azure.....	59
6.8.3.3.	Google Cloud.....	60
	CONCLUSIONES	61
	RECOMENDACIONES	63
	REFERENCIAS	65

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

Figura 1.	Esquema de la solución.....	12
Figura 2.	Los cuatro métodos básicos de gestión de pérdidas reales	20
Figura 3.	Visión general del sistema de telemetría (a) paquete enviado, (b) medio de transmisión y (c) equipo receptor.....	23
Figura 4.	Arquitectura compuesta por tres niveles o capas para IoT	25
Figura 5.	Protocolos inalámbricos utilizados en IoT.....	26
Figura 6.	Mercado LPWAN	28
Figura 7.	Aplicaciones de las LPWAN	29
Figura 8.	Diagrama de bloques funcional de un sistema de comunicación	31
Figura 9.	SNR	35
Figura 10.	Perfil de pérdidas y ganancias del sistema para un presupuesto de enlace	36
Figura 11.	Tiempo de transmisión del símbolo	39
Figura 12.	Tecnología LoRaWAN	40
Figura 13.	Arquitectura típica de una red LoRaWAN.....	41
Figura 14.	Autenticación del servidor de red.....	43
Figura 15.	Autenticación del servidor de aplicación.....	44
Figura 16.	Conexión entre el servidor de aplicación y la plataforma IoT.....	45
Figura 17.	Espacios de recepción para un dispositivo clase A	46
Figura 18.	Espacios de recepción para un dispositivo clase B	47
Figura 19.	Espacios de recepción para un dispositivo clase C	48

Figura 20.	Procedimiento de unión a la red LoRaWAN por medio de activación por aire	50
Figura 21.	Características de un medidor inteligente	55

TABLAS

Tabla 1.	Protocolos de red	27
Tabla 2.	Panorama de las tecnologías LPWAN	30
Tabla 3.	Parámetro regional LoRaWAN Guatemala.....	51

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
dB	Decibeles
mW	Mili Watts

GLOSARIO

AES	Advanced Encryption Standard (Estándar de cifrado avanzado).
AWS	Amazon Web Services (Servicios web de Amazon).
CSS	Chirp Spread Spectrum (Espectro ensanchado de chirrido).
HTTP	Hypertext Transfer Protocol (Protocolo de transferencia de hipertexto).
IoT	Internet of things (Internet de las cosas).
LoRa	Modulación de radio frecuencia para largo alcance (Long Range).
LoRaWAN	Protocolo de red de área amplia y baja potencia.
LPWAN	Low Power Wide Area Network (Red de área amplia y baja potencia).
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport (Transporte de telemetría para mensaje de colas).

NFC	Near Field Communication (Comunicación de campo cercano).
RSSI	Received Signal Strength Indicator (Indicador de fuerza de la señal recibida).
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition (Control supervisor y adquisición de datos).
SNR	Signal to Noise Ratio (Relación señal ruido).

RESUMEN

La tesis presenta un proyecto de investigación sobre un sistema de telemetría para la medición de agua potable residencial utilizando la tecnología LoRa y el protocolo LoRaWAN. El objetivo principal del proyecto es recopilar información del medidor de agua a nivel residencial para detectar consumos anómalos y conocer la curva de consumo por parte de los usuarios.

El documento comienza con una introducción que describe la importancia de contar con información oportuna para una correcta toma de decisiones en la medición del consumo de agua potable a nivel residencial. A continuación, se presentan los capítulos que componen el trabajo de graduación, incluyendo antecedentes, justificación, alcances, marco teórico y metodológico.

En el capítulo de antecedentes, se explican los estudios y artículos que emplean tecnologías inalámbricas para la medición inteligente de agua potable. Se muestran sistemas para la medición de agua potable y el monitoreo para la detección de fugas haciendo uso de plataformas del Internet de las cosas, permitiendo de esta manera la conservación del recurso hídrico.

En el capítulo de justificación, se describe la importancia de contar con información oportuna para una correcta toma de decisiones, aplicado a la medición del consumo de agua potable a nivel residencial. Se explica cómo el desconocimiento sobre el consumo de agua por parte de los usuarios conlleva a hacer un mal uso del recurso hídrico.

En el capítulo de alcances, se describen las perspectivas investigativas, técnica y de resultados del proyecto. Se explica cómo se utilizará la tecnología LoRa y el protocolo LoRaWAN para la detección de consumos anómalos y el conocimiento de la curva de consumo por parte de los usuarios.

En el capítulo de marco teórico, se presentan los conceptos y teorías relacionados con el proyecto, incluyendo las pérdidas en sistemas de distribución de agua, el control de fugas, la gestión de tuberías y activos, la gestión de la presión, la rapidez y calidad de las reparaciones, el control activo de fugas, el sistema de telemetría.

OBJETIVOS

General

Desarrollar un prototipo basado en un sistema de telemetría para detectar los comportamientos anómalos remotamente y de esta manera contribuir a la disminución de pérdidas de agua potable a nivel residencial.

Específicos

1. Implementar la tecnología LoRa y el protocolo LoRaWAN para la adquisición de información del medidor de agua residencial de manera inalámbrica.
2. Implementar una plataforma capaz de brindarle a los usuarios la visualización y el acceso a los datos recopilados del medidor de agua residencial de manera remota.
3. Implementar un sistema de alarmas que notifiquen a los usuarios sobre comportamientos anómalos en su red de distribución de agua residencial.

INTRODUCCIÓN

En el país de Guatemala las tecnologías para la medición del recurso hídrico de manera remota a nivel residencial no están del todo implementadas. Es un área de oportunidad para un mejor manejo del agua potable. Ya que, al desconocer de los comportamientos de alguna variable de interés, nos es más difícil tomar decisiones que nos apoyen y contribuyan a optimizar un proceso.

La falta de información verídica y en un tiempo no oportuno, es crítica cuando se trata del recurso del agua que es vital para la existencia de los seres vivos.

El estudio busca apoyar en una solución para la medición de agua potable a nivel residencial, haciendo uso de las tecnologías del Internet de las Cosas que favorecen en aplicaciones donde es importante optimizar y obtener información por medios remotos.

Para aplicaciones donde los equipos que se instalan se encuentran en un difícil acceso, como apoyo es bueno hacer uso de tecnologías que permitan la adquisición de información con buen alcance, como lo son las aplicaciones de medición de agua potable a nivel residencial.

Se busca el brindar una solución, que sea aplicable y viable a los entornos que nos encontramos en la realidad al momento de querer realizar una medición de agua potable a nivel residencial. Esto quiere decir que se utilizará a nivel de hardware equipos con buenas capacidades para hacer del prototipo del sistema de telemetría no lejano a la realidad en la que nos encontramos.

A continuación, se presentan los capítulos que componen el presente trabajo de graduación.

En el capítulo de Antecedentes, se explican los estudios y artículos que emplean tecnologías inalámbricas para la medición inteligente de agua potable. Haciendo uso de distintos medios para la adquisición de información de manera remota, mostrando sistemas para la medición de agua potable y el monitoreo para la detección de fugas haciendo uso de plataformas del Internet de las cosas, permitiendo de esta manera la conservación del recurso hídrico.

En el capítulo de Justificación, se describe la importancia de contar con información oportuna para una correcta toma de decisiones, aplicado a la medición del consumo de agua potable a nivel residencial. Con el apoyo de un sistema de telemetría que hace uso de la tecnología LoRa y el protocolo LoRaWAN, que permiten tener buena cobertura y penetración de señal. Esto para la recopilación de datos y que por medio de una plataforma brindarle al usuario la disposición de información para la toma de decisiones y análisis del comportamiento del consumo de agua, con el fin de hacer un mejor uso del recurso hídrico.

En el capítulo de Alcances, se definen las perspectivas en las que se basa el estudio. Donde se fija la parte investigativa que compone los conceptos y definiciones que describen el sistema de telemetría utilizando la tecnología LoRa y el protocolo LoRaWAN; en la parte técnica se expone el diseño que se cubrirá para la creación del prototipo y en la parte de resultados se describe el alcance de la implementación del sistema de telemetría para la medición de agua potable, la ejecución de la plataforma y el método de alarmas que notifican al usuario ante un comportamiento anómalo en su red de distribución de agua potable.

En el capítulo del Marco Teórico, se brinda el concepto de que es un sistema de telemetría, los protocolos inalámbricos utilizados comúnmente para el Internet de las Cosas y la transmisión de datos por medio de radio frecuencia. También se define la tecnología LoRa y el protocolo LoRaWAN, así como las distintas técnicas empleadas por los medidores de agua potable para efectuar su medición; el control de fugas en los sistemas de distribución de agua y los conceptos de computación en la nube junto con las empresas que lideran estos servicios.

En el capítulo de Presentación de Resultados, con base a la investigación documental, se lleva a cabo el diseño de la arquitectura que se propone para desarrollar el prototipo del sistema de telemetría, aplicando los conceptos de la tecnología LoRa y el protocolo LoRaWAN. Se elaborará un mapa de cobertura de señal donde se instalarán los dispositivos, para validar la buena recepción de información en la comunicación existente entre los equipos que conforman el prototipo.

Se describen las configuraciones de los componentes del prototipo del sistema de telemetría, como el de la plataforma. De igual manera las pruebas del funcionamiento de la comunicación, el Network Server, la visualización de datos en la plataforma y el accionamiento de las alarmas.

En el capítulo de Discusión de Resultados, se validan los datos obtenidos por el medidor de agua potable de manera manual, con los obtenidos por medio del prototipo del sistema de telemetría haciendo uso de la tecnología LoRa y el protocolo LoRaWAN. Aplicando análisis estadísticos se comparan las muestras tomadas de los registros de consumo de agua de ambos escenarios, para visualizar el comportamiento de la curva horaria de consumo de agua.

Se lleva a cabo un análisis de los datos recopilados del consumo de agua diariamente durante una semana de manera cuarto-horaria; para la verificación del comportamiento entre cada uno de los días, haciendo uso de la estadística inferencial. También se plantean pruebas en escenarios donde se simulen fugas de agua como un comportamiento anómalo de la red de distribución de agua residencial, para realizar un análisis comparativo por medio de observaciones validando el comportamiento de las alarmas y su funcionamiento, media vez sobrepase los límites que se establezcan para su activación por medio de la plataforma.

En el capítulo de las Conclusiones, se explica el cumplimiento de los objetivos del desarrollo de un prototipo de un sistema de telemetría utilizando la tecnología LoRa y el protocolo LoRaWAN, para contribuir a la disminución de pérdidas de agua potable a nivel residencial por medio de la medición, notificación y visualización de información en una plataforma.

Y finalmente en el capítulo de las Recomendaciones, por medio de los resultados obtenidos, se presentan opciones de mejora, para que los mismos sean utilizados en futuras investigaciones, con el objetivo de contribuir a la disminución de pérdidas de agua potable a nivel residencial.

1. ANTECEDENTES

A lo largo del tiempo han surgido diferentes tecnologías que apoyan a los seres humanos a llevar una mejor calidad de vida, facilitando la adquisición de información de manera remota de los distintos dispositivos que lo rodean y gracias a esto se ha tenido la capacidad de recopilar datos para mejorar la toma de decisiones. Uno de los recursos importantes que es necesario monitorear y hacer uso eficiente, es el del agua.

Alvisi, Casellato, Franchini, Govoni, Luciani, Poltronieri, Riberto, Stefanelli y Tortonesi (2019) presentan el artículo “Wireless middleware solutions for smart water metering”, donde hablan de cómo las aplicaciones de medición inteligente se han centrado más en las soluciones de energía y como el monitoreo del consumo de agua es necesario prestarle atención; menciona la importancia de contar con protocolos abiertos que sean interoperables y que no dependan de soluciones patentadas para la recopilación de datos de los medidores de agua. Proponen una aplicación de medición inteligente del agua que es inalámbrica e interoperable basado en Edge Computing instalada en Gorino Ferrarese, Italia.

Es conveniente contar con un medio inalámbrico que permita recopilar información, tal como lo es la tecnología LoRa que operar en un espectro de radiofrecuencia no licenciado y es utilizada en el despliegue de redes para una amplia cobertura y baja potencia; también posee una buena confiabilidad durante periodos de alto tráfico de datos (Figueiredo, 2019). El desempeño de esta tecnología es importante para integrar dispositivos de IoT, en aplicaciones que permitan tener una escalabilidad a futuro en la medición de agua, la robustes que presenta la tecnología LoRa y el protocolo LoRaWAN en entornos urbanos es

importante (Moya, 2018) para el despliegue de la medición de agua a nivel residencial.

Fuentes (2021) presenta la tesis “Sistema de medición inteligente de consumo de agua en hogares usando IoT y Cloud Computing” en la cual habla de cómo un sistema de medición inteligente para el consumo de agua utilizando tecnologías de computación en la nube y algoritmos para detección de fugas permiten generar ahorro de agua y evitar el mal uso de esta.

Propone una arquitectura para un sistema de medición del consumo de agua que cubre cinco aspectos importantes, la captura del consumo de agua, el procesamiento local de los consumos registrados, la seguridad física del dispositivo electrónico, el almacenamiento y la visualización de los consumos obtenidos, y la detección de fugas. Empleando un medio inalámbrico Wi-Fi y el protocolo MQTT para la adquisición de información del dispositivo utilizado para la medición de agua. Esta aplicación fue un prototipo orientado en el país de Perú.

Los usuarios deben de contar con una forma de detección capaz de notificarles inmediatamente sus consumos anómalos, también es importante la automatización de los sistemas de detección y monitoreo de fugas ya que es necesario para la correcta administración del agua. Alghamdi, Khairullah y Al Mojamed (2022), proponen en su artículo “LoRaWAN Performance Analysis for a Water Monitoring and Leakage Detection System in a Housing Complex”, un sistema automático para la detección de fugas, y en su modelo comprenden un medidor de agua, un sensor de presión y una válvula inteligente que hacen uso de la tecnología LoRa. El estudio concluye que por medio de la medición de presión es posible la detección de fugas y con la ayuda de una válvula inteligente, de forma automática se puede cortar el suministro del agua, evitando de esta manera el desperdicio de este recurso.

La importancia de accionar de manera inmediata y contar con información en tiempo real pero también de una forma histórica por medio de una plataforma, apoya a los usuarios a examinar sus comportamientos de consumo y analizar de qué forma pueden hacer un mejor uso del recurso hídrico. Hill (2019) en su tesis “Scalable IoT Platforms”, lleva a cabo una comparación de las distintas plataformas utilizadas en IoT en el que su enfoque es explorar cuales son las más confiables, escalables y heterogéneas; de acuerdo con los análisis de comparación, menciona que entre las plataformas mejor valoradas se encuentran: Azure IoT Hub, IBM Watson IoT, AWS IoT Core y Google IoT Cloud. Las plataformas resaltan factores como la capacidad de los protocolos que implementan, flexibilidad, documentación, soporte, disponibilidad, cifrado de datos, infraestructura, entre otros. Dichas variables muestran las consideraciones que se deben de tener en cuenta en la plataforma para apoyar a los usuarios a visualizar su información en la medición de agua residencial.

Visualizar los consumos de agua residencial es el primer paso para ahorrar y usar eficientemente el agua. Yang, Yang, Magiera, Froelich, Jach y Laspidou (2017) en el artículo “Domestic water consumption monitoring and behaviour intervention by employing the internet of things technologies”, mencionan que hay dos categorías principales de medidas de ahorro de agua para reducir el uso de la misma; las medidas técnicas que incluyen el mejoramiento de la red de distribución como la reparación de fugas, y las medidas no técnicas que cubren la concientización de los usuarios que puede cambiar los hábitos de consumo con base en información, donde el documento se centra en este último, presentando las formas de intervenir el comportamiento de consumo de agua de las personas utilizando tecnologías IoT.

En la arquitectura hacen uso de medidores de agua comunicados por medio de WiFi hacia un Gateway que concentra los datos y posteriormente envía la información a un sistema de apoyo para decisiones del uso eficiente del agua a nivel domiciliario; donde este sistema muestra al usuario el consumo de agua diario, semanal o mensual, representado por medio de un gráfico de barras. El trabajo es parte del proyecto ISS-EWATUS que ha sido financiado por el Séptimo Programa Marco de la Unión Europea para investigación, desarrollo tecnológico y demostración bajo el acuerdo de subvención no (619228) y fue desplegado en Sosnowiec, Polonia y Skiathos, Grecia.

La implementación de un sistema de telemetría con amplia cobertura y que permita la adquisición de información de manera inalámbrica de los medidores de agua a nivel residencial, beneficia a los usuarios ya que pueden contar con los datos para la toma de decisiones, esto apoya a las personas a conservar el recurso hídrico, ya que por medio de una plataforma pueden visualizar en forma inmediata sus curvas de consumo y ser notificados de cualquier anomalía que les permita accionar de forma oportuna.

2. PLANTENAMIENTO DEL PROBLEMA

El agua potable es un recurso fundamental para la conservación de la vida que es necesario preservar, una de las causas de su escasez se debe al mal uso de este recurso, tanto a grande como a pequeña escala a nivel residencial. El comportamiento del consumo de los usuarios repercute en el suministro o calidad del agua a manera que la demanda no puede llegar a satisfacerse por completo (Lentini, 2010).

Los factores que afectan en la mala administración del agua es la falta de gobernanza, ya que una forma efectiva de gobernabilidad abarca la gestión sostenible de los recursos hídricos y para esto es necesario establecer un marco regulatorio que cuente con mecanismos de servicios eficientes con capacidad de seguimiento y evaluación continua (Iza y Rovere, 2006). El uso de tecnologías que permitan acceder a la información recopilada de forma automática para mejorar el aprovechamiento del agua a nivel residencial.

Las principales causas de la pérdida del recurso hídrico por el desconocimiento de los usuarios sobre el comportamiento en su curva de consumo son:

- Deficiencia en los sistemas de gestión que no apoyan a los usuarios a obtener información de los medidores de agua residenciales de manera inmediata y actualizada.
- Falta de normativa sobre el manejo del agua potable que se ve reflejado en infraestructuras deficientes que causan fugas de agua.

- Falta de conciencia sobre la importancia del manejo de agua debido a inadecuados niveles de educación sobre el uso de este, que dan como resultado el mal manejo y desperdicio del recurso.
- Fallas en las lecturas de los contadores de agua que se ven afectados por la mala calidad del suministro de agua.
- Uso de tecnologías antiguas en los medidores de agua y registro de consumos, por la falta de conocimiento de nuevas formas de adquisición de los datos de utilización de agua de una forma remota y automática.

Al hacer mal uso del recurso hídrico debido a la falta de información, tiene como consecuencia la escasez de agua, se mencionan los siguientes efectos:

- Aumento de enfermedades que conllevan a problemas de salud que disminuyen la calidad de vida.
- A futuro, un alto coste en el consumo de agua.
- Conflictos sociales por el acceso al servicio de agua que conllevan a un impacto económico importante.

Para reducir el uso inadecuado del agua potable por parte de los usuarios es importante contar con la recopilación de datos y un sistema de telemetría, cuya finalidad sea conocer los consumos de manera remota.

El tener acceso a la información de manera actualizada, permite detectar comportamientos anómalos en las curvas de consumo de los usuarios, tomando acciones inmediatas para que los entes encargados de la distribución de agua

tengan un mejor control de sus procesos y que los consumidores puedan hacer un buen uso del recurso hídrico.

Derivado a estos problemas se plantea la siguiente pregunta central:

- ¿Cómo detectar de manera inmediata perdidas del recurso hídrico utilizando tecnologías de IoT para registrar el consumo de agua potable por los usuarios a nivel residencial?

Y, las siguientes preguntas auxiliares de investigación:

- ¿De qué manera se puede adquirir la información de los medidores de agua residencial de manera remota?
- ¿De qué forma podrán visualizar los usuarios su curva de consumo de agua remotamente?
- ¿De qué manera se puede notificar a los usuarios sobre fugas o consumos no deseados de forma inmediata dentro de su red de distribución de agua residencial?

3. JUSTIFICACIÓN

Este trabajo de graduación corresponde al área de la ingeniería para la industria con especialidad en ciencias de la computación, orientado a la electrónica computacional basado en IoT para apoyar al uso adecuado del recurso hídrico residencial por medio de un sistema de telemetría utilizando la tecnología LoRa y el protocolo LoRaWAN.

La importancia de contar con información veraz y oportuna es fundamental para la correcta toma de decisiones sobre el buen uso del agua a nivel residencial; esto se logra por medio de un sistema de telemetría capaz de obtener y mostrar la información recopilada de los medidores de agua remotamente.

Para una buena gestión es importante contabilizar el agua de manera correcta, por lo que es necesario disponer de un medidor que registre el flujo de una manera confiable, para esto se utilizan tecnologías ultrasónicas que permiten más precisión y exactitud en la lectura.

El uso de tecnologías inalámbricas proporcionan más información de manera remota ejecutando así el proceso de lectura del medidor de agua, para esto es necesario contar con una tecnología que sea capaz de tener una buena cobertura, buena penetración y que sea resistente a las interferencias; pero al mismo tiempo debe de hacer un buen uso del consumo energético de manera independiente, es por eso que para la comunicación del sistema de telemetría se utilizara la tecnología LoRa y el protocolo LoRaWAN que permite hacer un buen uso energético en los dispositivos gracias a su baja potencia y largo alcance en la transmisión de información.

Los usuarios accederán a la información por medio de una plataforma que permite visualizar los datos de los consumos de agua de manera remota. Esto ayuda a conocer los comportamientos, analizar los datos y tomar decisiones buscando la optimización de la red de distribución de agua residencial.

Al detectarse anomalías es importante que las acciones sean tomadas de forma inmediata, la plataforma de los usuarios cuenta con notificaciones instantáneas que alertan a los mismos sobre consumos no deseados, esto contribuye a la preservación del recurso híbrido y evita su desaprovechamiento.

Este trabajo de graduación se centra en brindar las herramientas a los usuarios para que conozcan la información recolectada del medidor de agua y de esta manera hagan un buen uso del recurso hídrico, brinda información de manera inmediata y remota.

Por medio de la implementación del sistema de telemetría, los usuarios contarán con información valiosa para la toma de decisiones y oportunamente evitar el mal uso de agua a nivel residencial, con el fin de provocar un cambio positivo en el comportamiento de las curvas de consumo. De igual manera al ser utilizado por los entes distribuidores de agua a nivel residencial, tomarán la información de la plataforma dando como resultado un mejor aprovechamiento del recurso hídrico, accionando ante las pérdidas detectadas de forma inmediata.

4. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE LA SOLUCIÓN

Para la toma de decisiones de una manera correcta es necesario contar con información, ya que sin los resultados que se obtienen no pueden ser cuantificados y por ende no se pueden mejorar. El desconocimiento sobre el consumo de agua por parte de los usuarios conlleva a hacer un mal uso del recurso hídrico; este trabajo pretende cubrir esa necesidad, por medio de la recopilación de información del medidor de agua a nivel residencial, basándose en un sistema de telemetría haciendo uso de la tecnología LoRa y el protocolo LoRaWAN; para la detección de consumos anómalos y el conocimiento de la curva de consumo por parte de los usuarios.

Existen distintas tecnologías inalámbricas que no cuentan con una buena cobertura y penetración de señal al nivel del suelo donde comúnmente están instalados los medidores de agua, normalmente estos se encuentran aislados de fuentes de energía externas y no pueden funcionar de forma remota e independiente, por lo que es necesario utilizar una red de baja potencia que permite hacer un buen uso del consumo energético para transmitir la información de manera eficiente, como lo es LoRa.

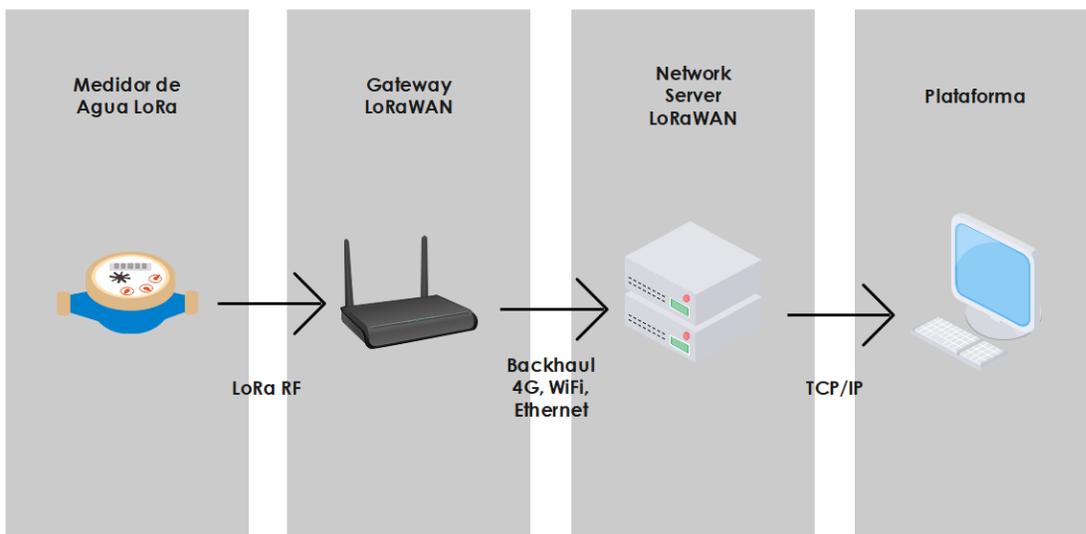
El tomar las lecturas de los medidores de agua de manera manual no permiten a los usuarios detectar de inmediatamente si existe una fuga o consumo anómalo en su red de distribución, imposibilitando el accionar ante una circunstancia para evitar el mal uso del recurso hídrico. Debido a esto, se busca hacer uso de una plataforma que permita la visualización de información de los consumos obtenidos del medidor de agua remotamente.

La plataforma permitirá notificar a los usuarios de manera inmediata sobre comportamientos anómalos detectados en su red de distribución de agua. Se busca cubrir la necesidad de hacer un mejor uso del agua utilizando tecnologías de IoT, para una buena toma de decisiones basados en la información obtenida.

A continuación, en la Figura 1 se presenta el esquema planteado de la solución:

Figura 1.

Esquema de la solución



Nota. Descripción del sistema de producción de la empresa. Elaboración propia, realizado con Edraw.

Del esquema anterior, a continuación, se describen los diferentes participantes del ecosistema:

- Medidor de Agua LoRa

El medidor de agua hace uso de la tecnología de radio frecuencia LoRa de baja potencia y largo alcance para comunicarse de manera inalámbrica hacia el Gateway LoRaWAN. El medidor de agua hace uso de baterías para la alimentación del módulo de comunicación LoRa, logrando así independencia de una red de energía externa permitiéndole operar de forma remota.

- Gateway LoRaWAN

El Gateway es el encargado de concentrar la información obtenida al comunicarse con el medidor de agua por medio de la tecnología de radio frecuencia LoRa, este posee diferentes tipos de backhaul para establecer comunicación con el Network Server LoRaWAN. La topología utilizada entre el Gateway y el medidor de agua es estrella.

- Network Server LoRaWAN

El Network Server LoRaWAN es el núcleo de una red LoRaWAN, permite la conectividad, el monitoreo y administración de los dispositivos, funciona como una puerta de enlace hacia la aplicación del usuario final permitiendo la integración hacia distintas plataformas. Este garantiza la seguridad de la información, la escalabilidad y confiabilidad de la red.

- Plataforma

La plataforma procesa y decodifica la información enviada por el medidor de agua LoRa y se encarga de brindarle acceso al usuario final para la

visualización de su información al igual que la notificación de alertas debido a incidencias en su red.

5. ALCANCES

5.1. Perspectiva investigativa

Se definen que los alcances desde la perspectiva investigativa se basan en un estudio del tipo descriptivo; porque se va a describir que sucede en el proceso del envío de datos desde un medidor de agua potable residencial utilizando la tecnología LoRaWAN, hasta que la información sea visualizada en una plataforma.

Los alcances investigativos son:

- Definir los conceptos de la tecnología LoRa y el protocolo LoRaWAN, y su comparación con otras tecnologías inalámbricas.
- Describir de manera breve sobre los distintos principios de medición que utilizan los medidores de agua residencial.
- Describir las diferentes herramientas y equipos del sistema de telemetría a implementar que hacen uso de la tecnología LoRa y el protocolo LoRaWAN.
- Definir la arquitectura para el sistema de telemetría y visualización de la información recopilada por el medidor de agua potable residencial.
- Describir el método para la detección de consumos anómalos en la red de distribución de agua residencial del prototipo a implementar.

5.2. Perspectiva técnica

Se utilizará la tecnología LoRa y el protocolo LoRaWAN para la recopilación de los datos del consumo del medidor de agua potable a nivel residencial.

Los aspectos técnicos que se cubrirán son:

- Diseño del mapa de cobertura de radio frecuencia para una red de área amplia y baja potencia.
- Diseño de la topología de una red LoRaWAN.
- Diseño de un ambiente de prueba para la implementación de un sistema de telemetría que permita la adquisición de información del medidor de agua potable.
- Presentación de la información en una plataforma para la visualización de los datos del consumo obtenidos por el medidor de agua potable.
- Diseño del proceso para la detección y notificación de alarmas de consumos anómalos.
- Creación de un prototipo que simula un sistema de telemetría que hace uso de la tecnología LoRa y el protocolo LoRaWAN, que permite tener una amplia cobertura de señal.

5.3. Perspectiva de resultados

La investigación da como resultado un prototipo que utiliza una tecnología inalámbrica con amplia cobertura de señal, que permite la adquisición de información de los medidores de agua potable a nivel residencial. El área geográfica de la investigación se limita al país de Guatemala.

Los resultados a obtener son:

- Implementación de un sistema de telemetría que utiliza la tecnología LoRa y el protocolo LoRaWAN para la medición remota del consumo de agua potable a nivel residencial.
- Ejecución de una plataforma que pueda mostrar la información recopilada por el medidor de agua potable y visualizarla en un dashboard.
- Ejecución de un método de alarmas que permitan notificar al usuario cuando ocurra un comportamiento anómalo en la red de distribución de agua a nivel residencial.

6. MARCO TEÓRICO

6.1. Pérdidas en sistemas de distribución de agua

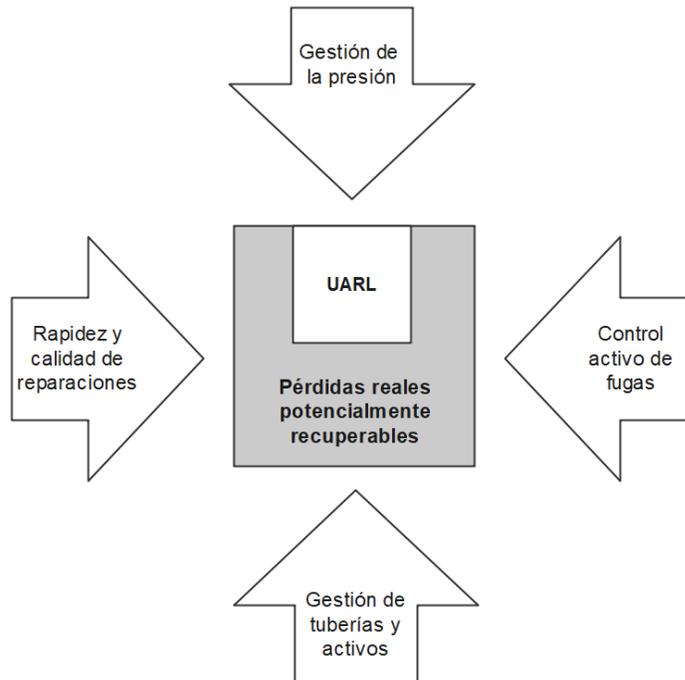
Las pérdidas en sistemas de distribución de agua representan un desafío significativo en la gestión hídrica, dando lugar a una disminución en la eficiencia operativa y al desperdicio de un recurso escaso. Estas pérdidas, que pueden ser tanto reales (fugas de agua) como aparentes (errores de medición), son causadas por diversos factores, como la edad y el deterioro de la infraestructura, fluctuaciones de presión y falta de mantenimiento adecuado. Además de impactar negativamente en la disponibilidad de agua, las pérdidas también generan costos económicos y ambientales considerables.

6.1.1. Control de fugas

A medida que pasan los años en un sistema existe la tendencia a una tasa natural de aumento de pérdidas reales a través de nuevas fugas y estallidos. Los cuales no son reportados o detectados inmediatamente por lo que para controlar esta tendencia se maneja una combinación de los cuatro componentes que se muestran en la Figura 2.

Figura 2.

Los cuatro métodos básicos de gestión de pérdidas reales



Nota. Pérdidas reales potencialmente recuperables. Obtenido de Mendaza et al. (2002). *Water Losses Management and Techniques*.

6.1.1.1. Gestión de tuberías y activos

La infraestructura con el paso de los años se va deteriorando y debido a los altos costos que involucra el renovarla o reemplazarla de manera constante no es posible producir mejoras y esto repercute en pérdidas reales (Carden, Jedlicka y Henry, 2002).

6.1.1.2. Gestión de la presión

En los sistemas donde los materiales de las tuberías no se encuentran en buenas condiciones, el ritmo de deterioro y la velocidad a la que se producen las fugas puede reducirse mediante la gestión de medición de presión. En algunos

países se hace practico la gestión eficaz de esta variable convirtiéndose así en una medida contra las fugas.

El aspecto más importante en la gestión de la presión con relación al manejo de fugas es el control de picos de presión debido a un suministro intermitente donde a menudo se encuentran presiones inusablemente altas que dan paso a nuevas fugas y estallidos en la tubería (Carden *et al.*, 2002).

6.1.1.3. Rapidez y calidad de las reparaciones

Para una gestión eficaz de fugas no solo es importante el tamaño de la fuga, sino también el tiempo de respuesta. La velocidad y calidad de reparación de las fugas detectadas es importante (Carden *et al.*, 2002).

6.1.1.4. Control activo de fugas

Un control activo de fugas representa la duración para la atención de las fugas que no se detectan o declaran, los métodos de control activo de fugas consisten en la detección de nuevas fugas no reportadas en un sistema. Algunos tipos de control activo son la comparación del volumen de consumo de agua en la entrada, mediciones continuas de caudal nocturno con registros por medio de un sistema como lo es un SCADA, mediciones intermitentes diurnas método de consumo cero (Carden *et al.*, 2002).

También existen diferentes métodos para detectar fugas dentro de la red de distribución de agua como los siguientes (Fuentes, 2021):

- Caudal mínimo nocturno (MNF)

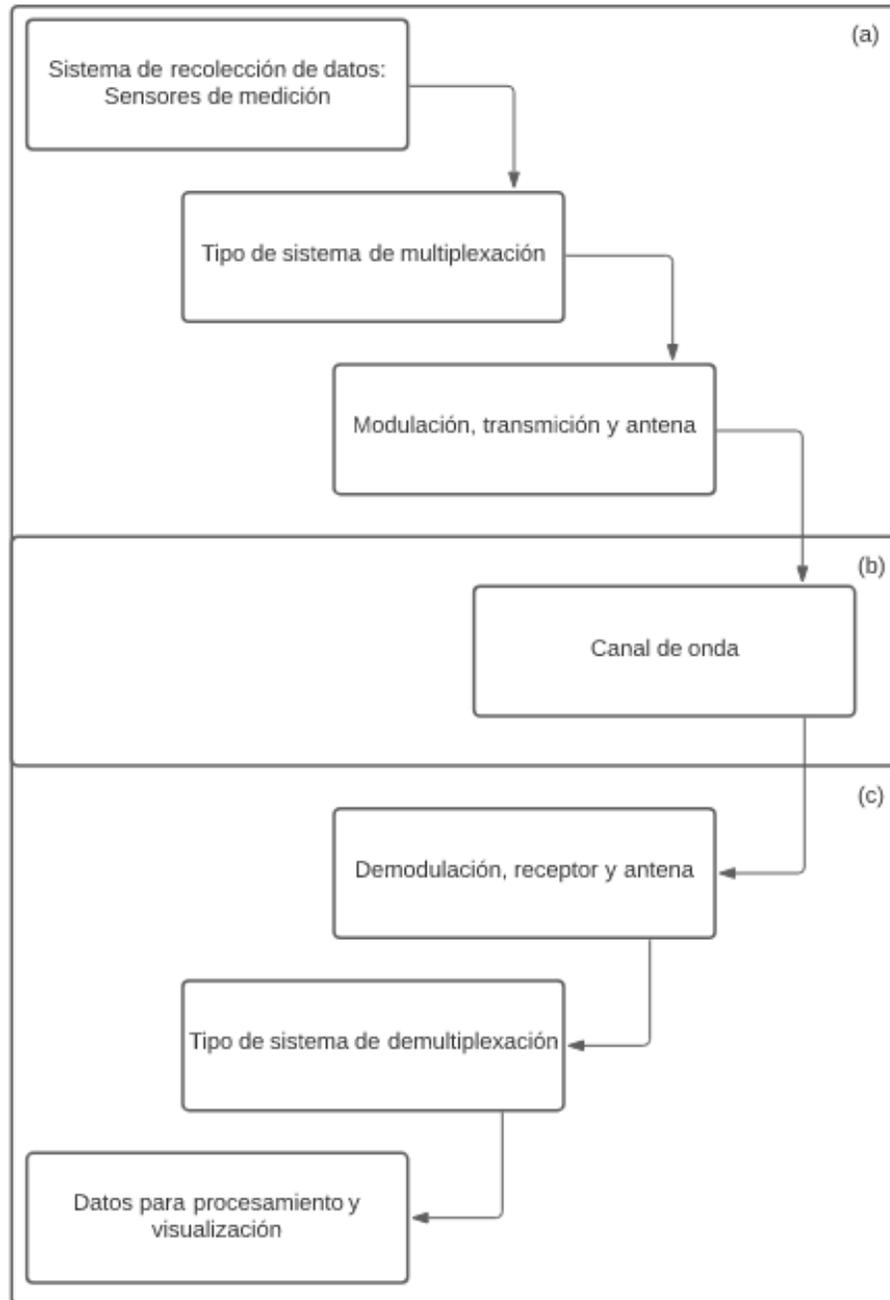
- Consumo de agua continuo distinto de cero (CNZ)
- K-Vecinos más próximos (KNN)

6.2. Sistema de telemetría

El objetivo de un sistema de telemetría es obtener datos que se encuentren en un lugar remoto o de difícil acceso, para luego redirigir la información a un punto donde los datos sean procesados y evaluados. En la Figura 3 se pueden apreciar los componentes que integran a un sistema de telemetría (Carden *et al.*, 2002).

Figura 3.

Visión general del sistema de telemetría (a) paquete enviado, (b) medio de transmisión y (c) equipo receptor



Nota. Sistema de telemetría. Obtenido de Carden, Jedlicka y Hendy (2002). *Telemetry Systems Engineering*.

El sistema recolector de datos comprende a los sensores o dispositivos que miden la variable física, para luego convertir el mensaje en señales eléctricas. Dicha señal es acondicionada por medio de una modulación que luego es transmitida por el dispositivo. El propósito del sistema de recopilación de datos es adquirir datos de los sensores y preparar la señal para transmitirla al lugar de destino deseado (Carden *et al.*, 2002).

El medio utilizado como transporte para el mensaje a transmitir es de manera inalámbrica; luego la parte receptora se encarga de demodular la señal y adecuarla para ser procesada. Una vez extraída la información procede a ser visualizada (Carden *et al.*, 2002).

6.3. Internet de las cosas

Existen diversas definiciones que se utilizan para explicar el concepto del Internet de las cosas (IoT); en la solicitud de comentarios 7452 de las Consideraciones Arquitectónicas en Redes de Objetos Inteligentes, lo definen como:

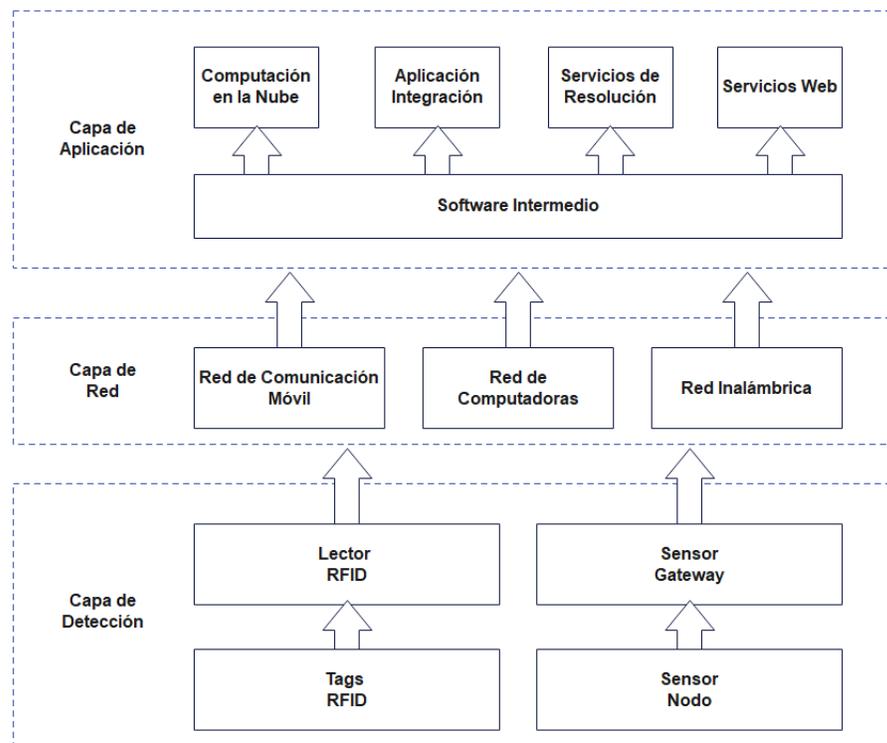
El término “Internet de las cosas” (IoT) denota una tendencia en la que un gran número de dispositivos integrados emplean servicios de comunicación ofrecidos por protocolos de internet. Muchos de estos dispositivos, a menudo llamado “objetos inteligentes”, no son operados directamente por humanos, sino que existen como componentes en edificios o vehículos, o están dispersos en el medio ambiente. (Tschofenig, *et al.*, 2015, p. 1)

6.3.1. Sistemas embebidos IoT

Los dispositivos electrónicos IoT se caracterizan por su potencia en el consumo, la capacidad de procesamiento y el tamaño. Lo que describe a los dispositivos IoT es su facultad para transmitir datos de forma inalámbrica y su conexión hacia el internet; así como se ilustra en la arquitectura que se presenta en la Figura 4 (Schiller, Aidoo, Fuhrer, Stahl, Ziörjen y Stiller, 2002).

Figura 4.

Arquitectura compuesta por tres niveles o capas para IoT



Nota. Ejemplo de una arquitectura IoT. Obtenido de Schiller, Aidoo, Fuhrer, Stahl, Ziörjen y Stiller (2002). *Landscape of IoT security.*

Los sistemas embebidos IoT poseen dispositivos integrados con la capacidad y la tecnología para las distintas aplicaciones de los consumidores, donde el dispositivo posee la inteligencia y está diseñado para ejecutar una o

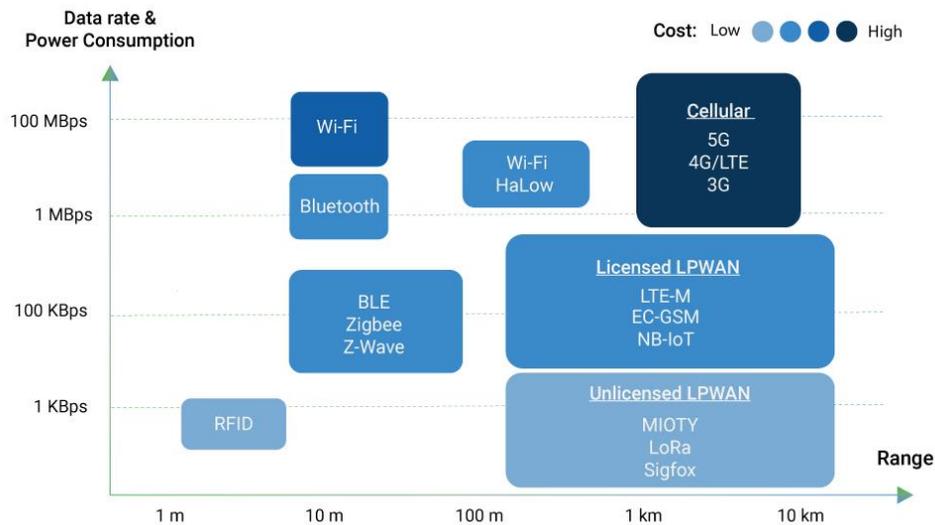
varias tareas haciendo uso de diferentes arquitecturas (Yashiro, Kobayashi, Koshizuka y Sakamura, 2013).

6.3.2. Protocolos inalámbricos IoT

Dentro del mundo IoT existen distintos protocolos como NFC, Zigbee, Bluetooth, WiFi, 2G, 3G, 4G, 5G y más. Normalmente se clasifican de acuerdo con el ancho de banda, precio que poseen y rango que pueden alcanzar, como podemos ver en la Figura 5.

Figura 5.

Protocolos inalámbricos utilizados en IoT



Nota. Comparación de distintos protocolos inalámbricos utilizados en IoT. Obtenido de Industry today. *Best Uses of Wireless IoT Communication Technology*. (<https://industrytoday.com/best-uses-of-wireless-iot-communication-technology/>), consultado el 16 de febrero de 2023. De dominio público.

A continuación, en la Tabla I vemos una comparación de distintos protocolos utilizados en IoT, evaluados por distintos criterios.

Tabla 1.

Protocolos de red

Criterios	Protocolo	WiFi	Bluetooth	LoRa	Zigbee	Z-Wave	Celular	NFC	Sigfox	Neul	6LowPan
Especificación	Based on 802.11 n	Based on 802.11 n	Bluetooth 4.2 especificación básica	LoRaWAN	ZigBee 3.0 basado en IEEE802.15.4	Alianza Z-Wave ZAD12837 /ITU-T G.995	GSM/GPRS/EDGE (2G) UMTS/HSPA (3G), LTE (4G)	ISO/IEC 18000-3	Sigfox	Neul	IPv6 sobre IEEE802.15.4
Tipo de red	LAN WPAN/P2P	LAN WPAN/P2P	LAN	LPWAN	LAN	LAN	MAN	P2P	LPWAN	WAN	LAN
Topología	Estrella	Estrella	Estrella y Estrella de Estrellas	Estrella y Estrella de Estrellas	Malla, Estrella y Arbol	Malla	Malla	Malla	Estrella	Malla	Malla, Estrella
Potencia	Baja-Alta	Baja	Baja	Muy baja	Muy baja	Muy baja	Alta	Muy baja	Baja	Baja	Muy baja
Velocidad de datos	Hasta 1.3 Gbps	Hasta 1.3 Gbps	2.1 Gbps	0.3 Gbps a 100 kbps	250 Gbps	40 Gbps	Hasta 1 Gbps	424 kbits	10-1000 bps	Pocos bps hasta 100 kbps	200 Gbps
Banda de frecuencia	54 Mb/s	54 Mb/s	2.4 GHz	Varias	868/915 MHz, 2.4 GHz	900 MHz (ISM)	850/900; 1800/1900 MHz	13.56 MHz	900 MHz	900 MHz (ISM), 458 MHz (UK), 470-790 MHz (espacio blanco)	2.4 GHz
Técnica de modulación	BPSK, QPSK, OFDM, M-QAM	BPSK, QPSK, OFDM, M-QAM	GFSK, CPFSK, 8-DPSK, π/4-DQPSK	GFSK	BPSK, O-QPSK	BFSK, GFSK	GMSK, 8PSK	ASK	UNB LTN	-	O-QPSK
Espectro ensanchado	MC-DSSS, CCK, OFDM	MC-DSSS, CCK, OFDM	FHSS	Chirp	DSSS	DSSS	TDMA, DSSS	FHSS	PBSS	FHSS	CSS
Rango	Hasta 100 m	Hasta 100 m	<100 m	3-5 km en áreas urbanas	10-20 m	30 km	Hasta donde alcance la señal	5 cm	30-50 km	10 km	10-20 m
Seguridad	WPA y WPA2	WPA y WPA2	Secreto	Llaves por dispositivo AES128, llave secreta AES128	CBC-MAC	Encriptación de datos	-	-	-	-	SNMP
Costo	Bajo	Bajo	Bajo	Bajo	Bueno	Efectivo	Menos y vice versa	Barato	Relativamente bajo	-	Alto
Riesgos de colisión de datos	Bajo	Bajo	Alto	-	Medio	-	-	-	-	-	-
Energía necesaria	-	-	Alta	-	Media	-	-	-	-	-	-
Adopción del mercado	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Aplicación	Cualquier dispositivo con conectividad celular	Cualquier dispositivo con conectividad celular	Red para auriculares de intercambio de datos	Ciudades inteligentes, red de sensores, aplicaciones de automatización industrial	Redes sensor para automatización industrial	Iluminación residencial y automatización	Usado en WiFi, ADSL, banda ancha, TV y radio digital	Red inteligente	Automatización del hogar	Redes sensor para automatización industrial	-
Tamaño de red	Mediana	Mediana	Pequeña	Medio grande	Muy grande	Grande	Muy grande	Pequeña	Mediana	Mediana	Muy grande

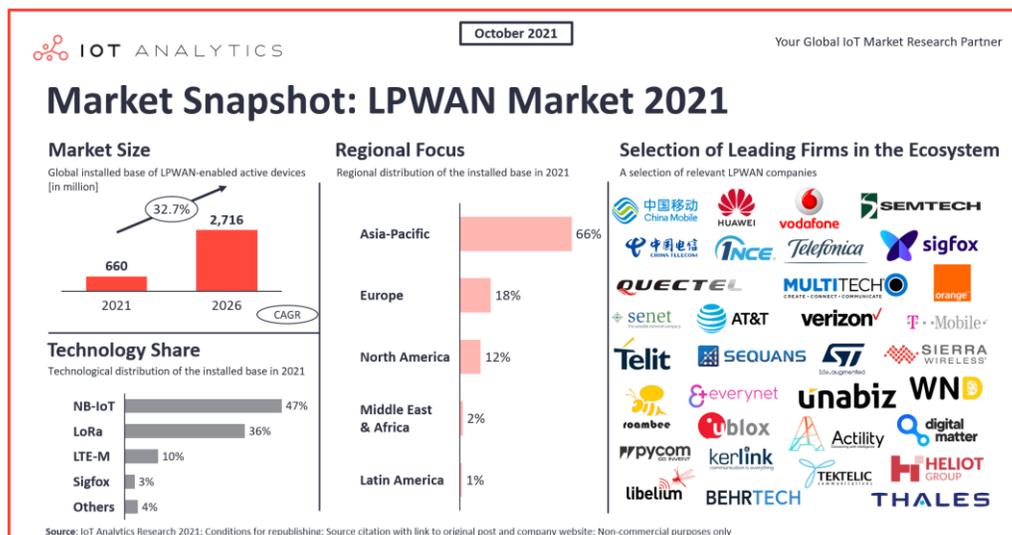
Nota. Comparación de protocolos IoT. Obtenido de Elhadi, Marzak, Sael y Merzouk (2018). *Comparative study of IoT protocols.*

6.3.2.1. LPWAN

Una red de área amplia y baja potencia (LPWAN) se enfoca en un sistema que no prioriza altas velocidades de transferencia de datos, como lo hacen WiFi y 3G/4G, ni en aplicaciones que requieren una baja latencia. Las principales características que definen a las LPWAN son el uso eficiente de energía, el largo alcance y la escalabilidad de la red (Song, Lin, Tang y Dong, 2017).

Las principales tecnologías LPWAN disponibles en el mercado incluyen a IoT de banda estrecha (NB-IoT), LoRa, evolución a largo plazo para máquinas (LTE-M) y Sigfox. A continuación, en la Figura 6 se muestra la participación que tiene cada una de las tecnologías y el crecimiento de estas a lo largo del tiempo.

Figura 6.
Mercado LPWAN



Nota. Mercado de las soluciones LPWAN. Obtenido de IoT Analytics. *5 things to know about the LPWAN market in 2021.* (<https://iot-analytics.com/5-things-to-know-lpwan-market/>), consultado el 17 de febrero de 2023. De dominio público.

Debido al crecimiento y los casos de uso de IoT para aplicaciones que permitan la conectividad para abarcar grandes áreas y la capacidad de manejar un gran número de conexiones, la demanda de las LPWAN ha aumentado. Gracias a su extenso alcance y su reducido consumo energético, estas tecnologías son utilizadas en una amplia gama de aplicaciones, tales como el monitoreo ambiental, ciudades inteligentes, medición de agua y energía, agricultura, automatización industrial, rastreo de activos, salud y otras muchas áreas, tal y como se muestra en la Figura 7 (Chaudhari, Zennaro y Borkar, 2020).

Figura 7.

Aplicaciones de las LPWAN



Nota. Líderes de la tecnología LPWAN. Obtenido de IoT Analytics. *LPWAN Market Report 2018-2023.* (<https://iot-analytics.com/lpwan-market-report-2018-2023-new-report/>), consultado el 17 de febrero de 2023. De dominio público.

Existen diferentes factores a tomar en cuenta para elegir la tecnología LPWAN que mejor se adapte a la aplicación, en la Tabla II se muestra una comparación entre las tecnologías Sigfox, LoRaWAN y NB-IoT (Mekki, Bajic, Chaxel y Meyer, 2019).

Tabla 2.

Panorama de las tecnologías LPWAN

	SigFox	LoRaWAN	NB-IoT
Modulación	BPSK	CSS	QPSK
Frecuencia	Bandas sin licenciamiento ISM (868 MHz en Europa, 915 MHz en Norte America y 433 MHz en Asia)	Bandas sin licenciamiento ISM (868 MHz en Europa, 915 MHz en Norte America y 433 MHz en Asia)	Frecuencia LTE con licencia
Ancho de Banda	100 Hz	250 kHz y 125 kHz	200 kHz
Máxima velocidad de transmisión	100 bps	50 kbps	200 kbps
Bidireccionalidad	Limitado / Half-duplex	Si / Half-duplex	Si / Half-duplex
Maximo de mensajes por dia	140 (UL), 4 (DL)	Ilimitado	Ilimitado
Longitud máxima del payload	12 bytes (UL), 8 bytes (DL)	243 bytes	1600 bytes
Rango	10 km (urbano), 40 km (rural)	5 km (urbano), 20 km (rural)	1 km (urbano), 10 km (rural)
Inmunidad a interferencias	Muy alta	Muy alta	Bajo
Autenticación y encriptación	No soportado	Si (AES128)	Si (encriptación LTE)
Tasa de datos adaptativa	No	Si	No
Transferencia	Los dispositivos finales no se unen a una única estación base	Los dispositivos finales no se unen a una única estación base	Los dispositivos finales se unen a una única estación base
Localización	Si (RSSI)	Si (TDOA)	No (bajo especificación)
Permite redes privadas	No	Si	No
Estandarización	La comunidad de Sigfox esta en colaboración con ETSI para la estandarización de la red basada en Sigfox	LoRa-Alliance	3GPP

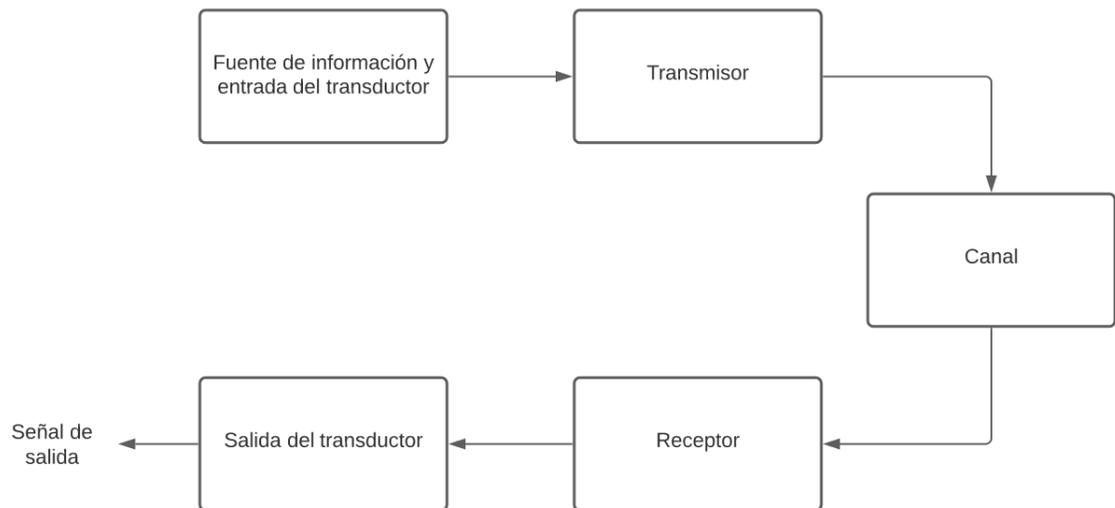
Nota. Comparación de las tecnologías líderes LPWAN. Obtenido de Mekki, Bajic, Chaxel y Meyer (2019). *A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment.*

6.4. Transmisión y propagación de radio

Un sistema de comunicación está diseñado para el envío de mensajes desde una fuente hacia uno o varios destinos. En la Figura 8 se muestra un diagrama de bloques que representa un sistema de comunicación.

Figura 8.

Diagrama de bloques funcional de un sistema de comunicación



Nota. Diagrama del proceso de un sistema de comunicaciones. Obtenido de Proakis y Salehi (2001). *Communication systems engineering (Vol. 2)*.

Se requiere de un transductor que es el encargado de convertir la salida de la fuente a una señal eléctrica. Un sistema de comunicación consiste en tres partes básicas, el transmisor, el canal y el receptor. A continuación, se detallan cada uno de estos componentes.

- El transmisor

Esta toma la señal eléctrica y la adecua para que la misma sea transmitida por un medio de transmisión, por lo que traduce la señal de información a un rango de frecuencia apropiado, donde el transmisor efectúa la coincidencia con la señal de mensaje con el canal por un proceso llamado modulación (Proakis y Salehi, 2001).

- El canal

El canal de comunicación es el medio físico por el que se transmite la señal, del transmisor hacia el punto donde se encuentra el receptor. Cuando hablamos de un medio inalámbrico el canal utilizado es el espacio vacío (Proakis y Salehi, 2001).

- El receptor

Su función principal es recuperar el mensaje de la señal transmitida, el mismo realiza una demodulación de la señal del mensaje y esta debido al canal por el que se transmitió la fidelidad del mensaje puede contener ruido por lo que el receptor también realiza un filtrado para recuperar la integridad del mensaje enviado (Proakis y Salehi, 2001).

6.4.1. Definiciones

En el contexto de las telecomunicaciones y las redes de comunicación, los enlaces son una evaluación detallada que cuantifica y analiza los diversos componentes que afectan la transmisión de datos entre dos puntos. Incluye factores como la potencia de la señal transmitida, las pérdidas de señal debido a

la atenuación y obstáculos, la ganancia, las interferencias, la sensibilidad del receptor y otros parámetros relevantes. El objetivo principal del presupuesto de enlace es asegurar que la señal transmitida sea lo suficientemente fuerte y de calidad para mantener una comunicación confiable y eficiente entre los puntos de origen y destino, teniendo en cuenta las condiciones específicas de la red o el enlace de comunicación en cuestión.

6.4.1.1. Decibeles

Los decibeles (dB) es la relación entre la potencia del receptor P_r y la potencia del transmisor P_t .

$$\text{Relación de Potencia (dB)} = 10 * \log_{10} \left(\frac{P_r}{P_t} \right)$$

Cuando obtenemos un resultado con un número negativo lo que significa es que estamos obteniendo una atenuación. Ahora si el resultado que se obtiene es un número positivo lo que quiere decir es que tenemos una ganancia (Horton, 1954).

El dBm es la potencia comparada con 1 mW por lo que se puede decir que 0dBm es equivalente a 1 mW.

Las fórmulas para la potencia en Watts y en dBm son las siguientes:

$$\text{Potencia (Watts)} = 0.001 * 10^{\frac{\text{Potencia (dBm)}}{10}}$$

$$\text{Potencia (dBm)} = 10 * \log_{10} \left(\frac{\text{Potencia (Watts)}}{0.001} \right)$$

6.4.1.2. Indicador de fuerza de la señal recibida

El indicador de fuerza de señal recibida (RSSI) se define como la intensidad con la que se recibe una señal de radio frecuencia, por lo que se puede decir que es la fuerza con la que un dispositivo está escuchando a otro en un ambiente inalámbrico. Este valor es utilizado para tomarlo como medida de que tan bien un equipo receptor puede escuchar la señal del transmisor. RSSI es medida en dBm desde 0 a -120. En cuanto más cerca se encuentre el valor de 0 lo que significa es que la señal es más fuerte (Srinivasan y Philip, 2006).

6.4.1.3. Sensibilidad

Cuando se evalúa una tecnología inalámbrica tener en consideración la sensibilidad es importante tanto como la potencia de transmisión. En un sistema de comunicación el receptor debe de tener la capacidad de procesar una señal débil, la sensibilidad de un receptor es el indicador del nivel de potencia más bajo con el que se puede detectar una señal de radio frecuencia (Brent, 2017).

6.4.1.4. Relación señal ruido

La relación señal ruido (SNR) hace referencia a la proporción entre la potencia de la señal y la potencia del ruido (Johnson, 2006). Es una de las métricas importantes utilizada en el procesamiento de señales que comúnmente es expresada en decibelios (dB); el conocer cuál es la forma en que el ruido degrada la señal contribuye a compensar los efectos y es por ello que es importante que los dispositivos inalámbricos tengan la capacidad de obtener con claridad la señal recibida e ignorar la señal de fondo. El ruido de fondo son transmisiones que otros dispositivos crean al momento de transmitir e interfieren en la misma frecuencia (Papadopoulos, *et al.*, 2014).

La fórmula para la relación señal ruido es la siguiente:

$$SNR = \frac{P_s}{P_N}$$

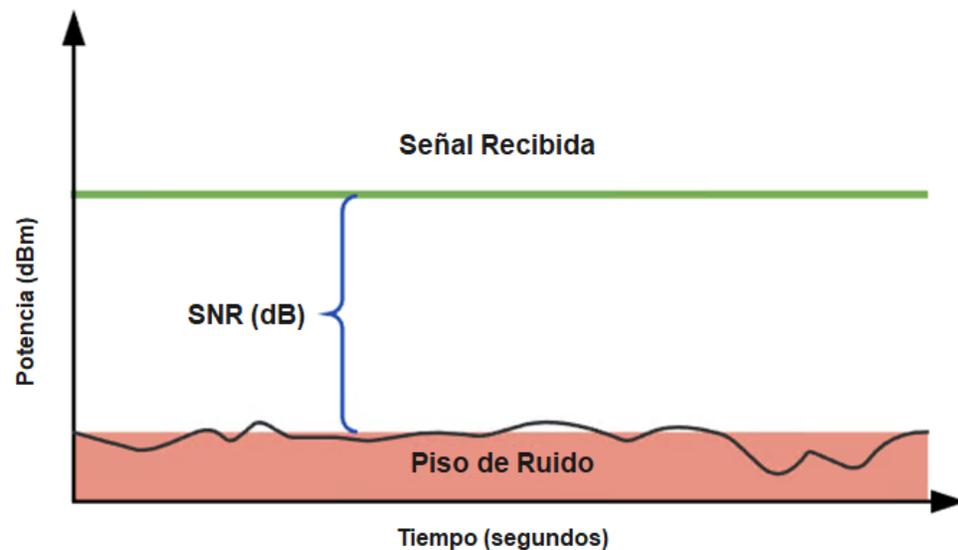
$$SNR(dB) = 10 \log_{10} \frac{P_s}{P_N}$$

Donde P_s corresponde a la potencia de la señal y P_N a la potencia del ruido.

A continuación, en la Figura 9 se puede observar que cuanto más alejada esté la señal recibida del ruido de fondo, mejor será la calidad de la señal recibida. Una señal mientras más cercana se encuentre al nivel del ruido más propensa se encuentra a una corrupción en los datos que se están transmitiendo.

Figura 9.

SNR



Nota. Comportamiento de la relación de la señal-ruido. Obtenido de Meraki Cisco (2020). *Signal-to-noise ratio (SNR) and wireless signal strength.*

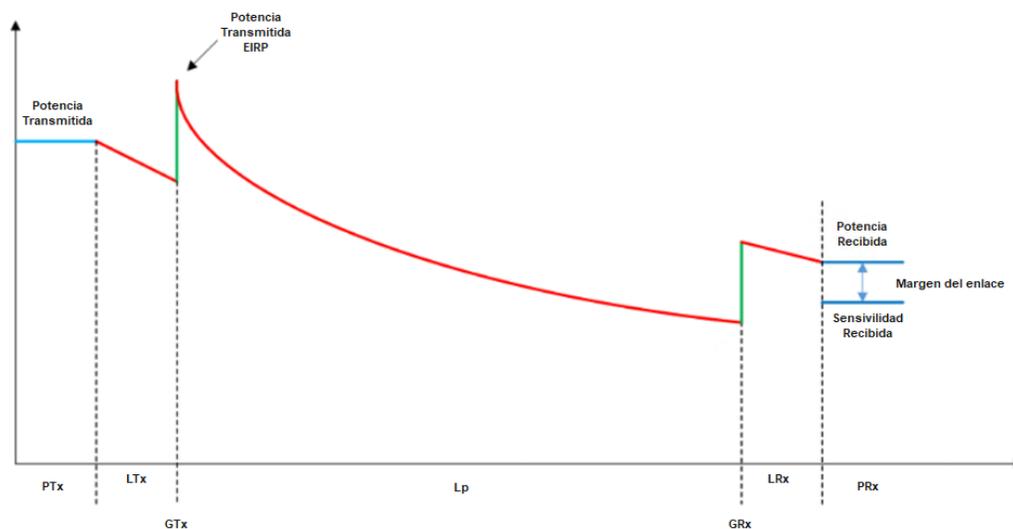
6.4.1.5. Presupuesto de enlace

Cuando se planifica un enlace de telemetría por medio de radio frecuencia el primer paso es diseñar el sistema para predecir el rendimiento antes de un despliegue. Para la planificación es necesario lo que se conoce como un presupuesto del enlace, el cual toma en consideración la potencia del equipo que transmite y las pérdidas del trayecto hacia receptor (Seybold, 2005).

Para garantizar un enlace óptimo, el nivel de potencia del receptor debe de exceder el margen necesario para un nivel mínimo de rendimiento y dicho valor está ligado a la sensibilidad del equipo receptor. La sensibilidad del receptor determina la potencia mínima a utilizar para producir una señal que sea utilizable. En la Figura 10 se muestran todos los factores involucrados a tomar en cuenta en un presupuesto de enlace (Campbell Scientific Inc, 2016).

Figura 10.

Perfil de pérdidas y ganancias del sistema para un presupuesto de enlace



Nota. Comportamiento de las pérdidas y ganancias en un enlace de comunicaciones. Obtenido de Circuit Design, INC. *RF Design Guide*. (https://www.cdt21.com/design_guide/link-budget/), consultado el 23 de febrero de 2023. De dominio público.

El presupuesto del enlace puede ser encontrado utilizando la siguiente formula:

$$P_{RX} = P_{TX} - L_{TX} + G_{TX} + L_p + G_{RX} - L_{RX}$$

Donde:

P_{RX} = es la potencia recibida en dBm.

P_{TX} = es la potencia transmitida en dBm.

L_{TX} = es el total de pérdida del sistema en dB en el transmisor.

G_{TX} = es la ganancia de la antena en dBi en el transmisor.

L_p = pérdida total de propagación en dB entre las antenas del transmisor y el receptor.

G_{RX} = es la ganancia de la antena en dBi en el receptor.

L_{RX} = es el total de pérdida del sistema en dB en el receptor.

6.4.2. Modelo Okumura-Hata

El modelo Okumura-Hata es presentado por Hata tomando como base los resultados de las pruebas de campo de Okumura, y se caracteriza por las predicciones matemáticas de los efectos de las pérdidas de propagación en áreas urbanas. El modelo está limitado al rango de frecuencia de 150 MHz a 1,500 MHz, distancias entre 1 km a 20 km, altura de las estaciones base de las antenas entre 30 m a 200 m y la altura de la antena móvil entre 1 m y 10 m. A continuación, la siguiente expresión matemática se utiliza para las ciudades de tamaño medio-pequeño. (Hata, 1980):

$$L_p(dB) = 69.55 + 26.16 \log_{10} f_c - 13.82 \log_{10} h_b - a(h_m) \\ + (44.9 - 6.55 \log_{10} h_b) \log_{10} R$$

$$a(h_m) = (1.1\log_{10}(f) - 0.7)h_m - (1.56\log_{10}(f) - 0.8)$$

Donde:

L_p = es la pérdida de la trayectoria

$a(h_m)$ = es un factor de corrección para la estación móvil

f_c = es la frecuencia de la portadora en un rango de 150 a 1500MHz

h_m = es la altura de la antena de la estación móvil en un rango de 1 a 10 m

h_b = es la altura de la antena de la estación base en un rango de 30 – 200 m

R = es la distancia entre las dos antenas en un rango de 1 a 20 km

6.5. LoRa

LoRa (Long Range) forma parte de la capa física de una tecnología de comunicación inalámbrica LPWAN que emplea la modulación de Espectro Ensanchado de Chirp (CSS) para codificar los datos transmitidos.

A la frecuencia con la que varían los Chirp (Compressed High Intensity Radar Pulse) se les denomina factor de dispersión (SF), este factor determina el rendimiento de la comunicación. Un factor de dispersión más alto representa una tasa de Chirp más baja, que se ve reflejado en una tasa de transmisión de datos más baja, pero que a su vez tiene un alcance de transmisión más amplio. LoRa utiliza factores de dispersión entre 7 y 12 (Gumaa, 2022).

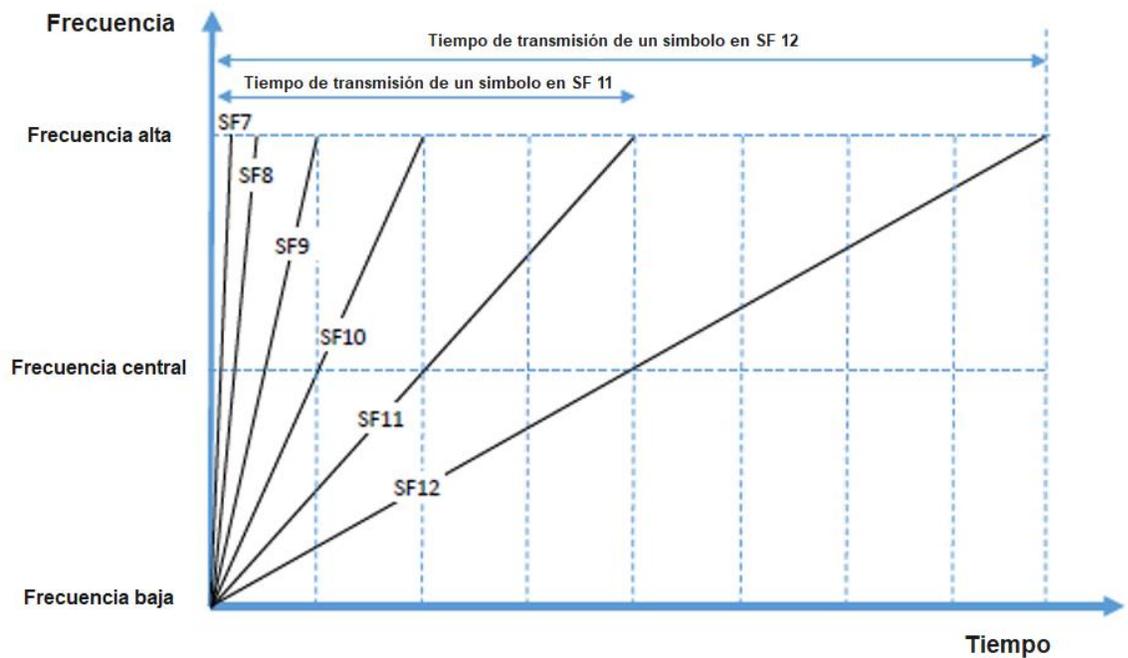
El tiempo que se requiere para transmitir cada símbolo está relacionado con el factor de dispersión, siendo mayor el tiempo de transmisión a medida que aumenta dicho factor. Este tiempo también depende del ancho de banda utilizado, en la Figura 11 muestra el comportamiento de los diferentes factores de dispersión en base al tiempo de transmisión del símbolo (Magrin, 2016).

La siguiente expresión describe la representación del tiempo de transmisión de cada símbolo:

$$T_s = \frac{2^{SF}}{\text{Ancho de Banda}}$$

Figura 11.

Tiempo de transmisión del símbolo



Nota. Niveles de tiempo de transmisión del símbolo con base al factor de dispersión. Obtenido de Montagny (2022). *LoRa - LoRaWAN and IoT for beginners*.

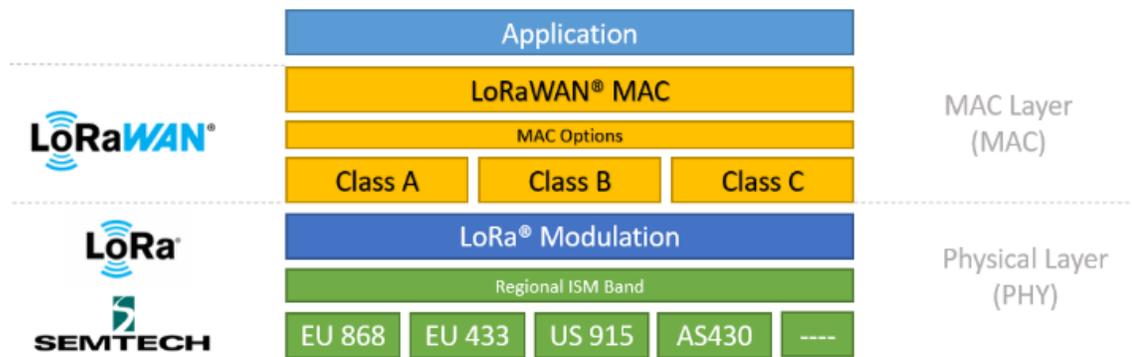
6.6. LoRaWAN

LoRa es la modulación de la señal, la cual está patentada por la empresa Semtech y es utilizada como la capa física para la comunicación entre los dispositivos y el Gateway. Cuando se menciona toda la cadena de comunicación de cada uno de sus componentes nos referimos al protocolo LoRaWAN, donde

el ecosistema es desarrollado por la organización LoRa Alliance, que brinda la capacidad de conectar los dispositivos hacia el servidor de forma segura y proporcionar los datos al usuario final. La Figura 12 exhibe el esquema de la red correspondiente a la tecnología LoRa y el protocolo LoRaWAN. (Moya, 2018).

Figura 12.

Tecnología LoRaWAN



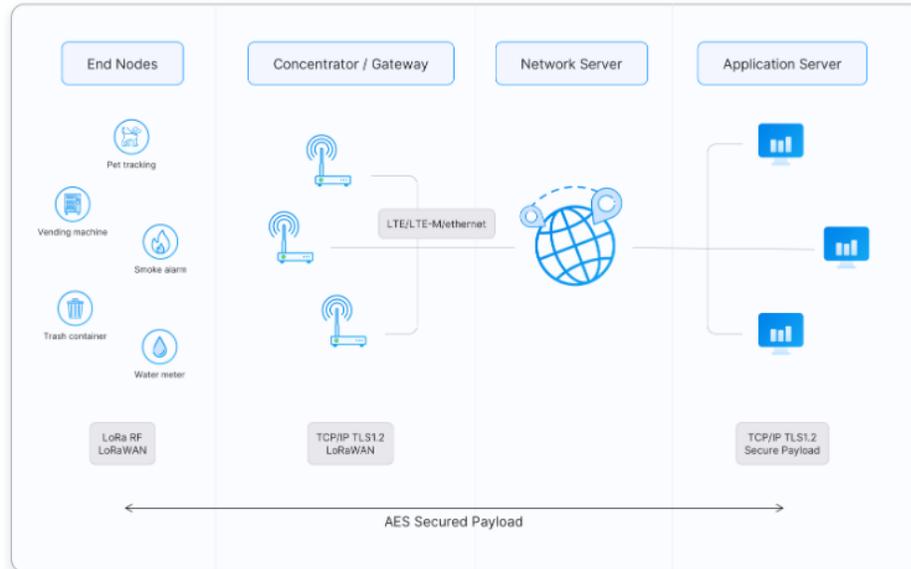
Nota. Modelo del protocolo LoRaWAN. Obtenido de Semtech Corporation (2019). *LoRa and LoRaWAN: A Technical Overview*. (<https://lora-developers.semtech.com/documentation/tech-papers-and-guides/lora-and-lorawan/>), consultado el 22 de febrero de 2023. De dominio público.

6.6.1. Arquitectura y componentes

La estructura de la red LoRaWAN es implementada por medio de una topología estrella de estrellas, donde los componentes que la conforman son dispositivos finales, Gateway, servidor de red y servidor de aplicación como se muestra en la Figura 13. Los nodos o dispositivos finales transmiten sus datos a los Gateways, los cuales se encargan de compartir la información con el servidor de red a través de la red de retorno (Backhaul), la cual puede ser celular, WiFi, ethernet o satelital (Moya, 2018).

Figura 13.

Arquitectura típica de una red LoRaWAN



Nota. Arquitectura del funcionamiento de una red LoRaWAN. Obtenido The Things Network. *LoRaWAN Architecture.* (<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/architecture/>), consultado el 22 de febrero de 2023. De dominio público.

6.6.1.1. Dispositivos finales

En LoRaWAN los dispositivos finales son los sistemas electrónicos embebidos utilizados en el mundo de IoT. Estos pueden ser sensores o actuadores que comúnmente hacen uso de baterías para operar adecuadamente y están orientados para distintas aplicaciones, los dispositivos finales transmiten los datos de forma inalámbrica mediante la modulación LoRa hacia los Gateway (Moya, 2018).

6.6.1.2. Gateway

Los Gateways se encuentran a la escucha en todos los canales y en los distintos factores de propagación al mismo tiempo. Cuando el equipo recibe la

información que proviene de un dispositivo final por medio de la modulación LoRa, este se encarga de transmitir el contenido a través de internet hacia el servidor de red. Existen Gateways para categorías tanto en interiores como exteriores que se conectan a internet haciendo uso de la red de retorno pudiendo ser esta la red celular, WiFi, ethernet (Moya, 2018).

6.6.1.3. Servidor de red

El servidor de red es el encargado de gestionar toda la red LoRaWAN, recibe los mensajes transmitidos por los Gateways y depura los mensajes duplicados. Establece conexiones seguras por medio de la autenticación de paquetes mediante una clave AES de 128 bits denominada NwkSKey (clave de sesión de red), tal y como se muestra en la Figura 14. El servidor de red no puede acceder a los datos de la aplicación. Una vez el proceso de autenticación es aceptado el servidor de red transfiere el mensaje al servidor de aplicación (Semtech Corporation, 2019).

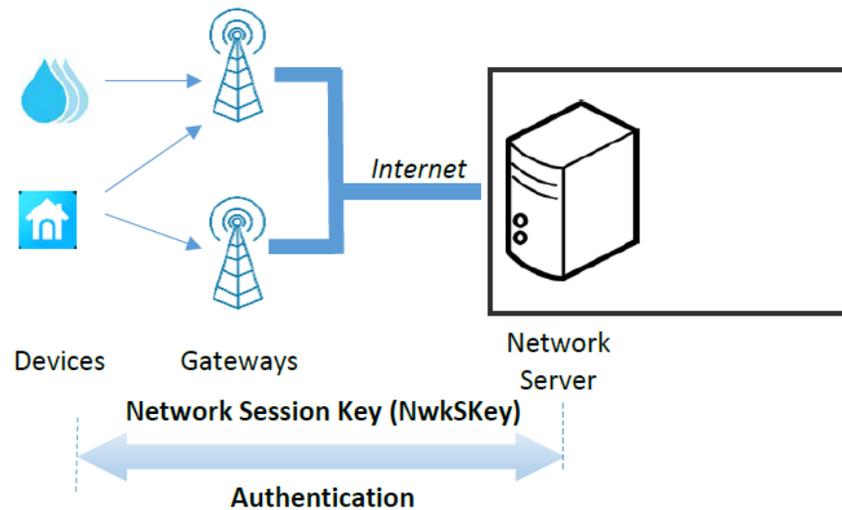
Los servidores de red comparten las siguientes características:

- Hacen una comprobación de identificación de los dispositivos.
- Realizan una autenticación de tramas y gestionan el contador de estas.
- Informan la recepción de los mensajes.
- Tienen la capacidad de adaptar la velocidad de transmisión de los datos.
- Responde a cada una de las peticiones provenientes de los dispositivos de la capa MAC.

- Se encarga de poner en cola las cargas útiles de enlace descendente procedentes de cualquier servidor de aplicaciones a cualquier dispositivo conectado a la red.

Figura 14.

Autenticación del servidor de red



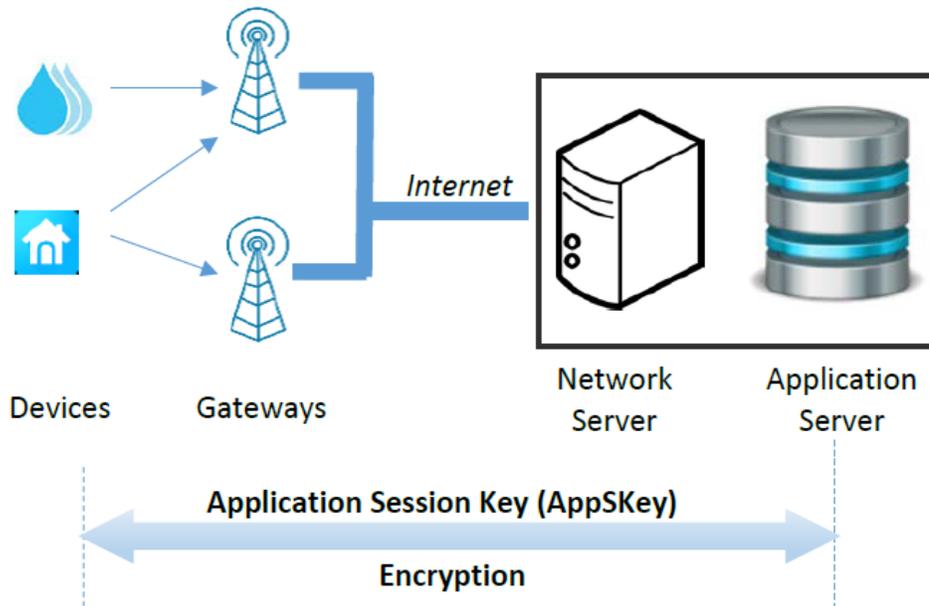
Nota. Proceso de autenticación de un dispositivo final en el servidor de red. Obtenido de Montagny (2022). *LoRa - LoRaWAN and IoT for beginners*.

6.6.1.4. Servidor de aplicación

El servidor de aplicación recibe el mensaje del servidor de red. Establece conexiones seguras autenticando los paquetes mediante una clave AES de 128 bits conocida como AppSKey (llave de sesión de aplicación), como se observa en la Figura 15. Es responsable de gestionar correctamente los datos de las aplicaciones de los nodos finales. (Semtech Corporation, 2019). Cuando se habla de un servidor LoRaWAN se asocia a la utilización en conjunto del servidor de red y el servidor de aplicación.

Figura 15.

Autenticación del servidor de aplicación



Nota. Proceso de autenticación de un dispositivo final en el servidor de aplicación. Obtenido de Montagny (2022). *LoRa - LoRaWAN and IoT for beginners*.

6.6.1.5. Plataforma IoT

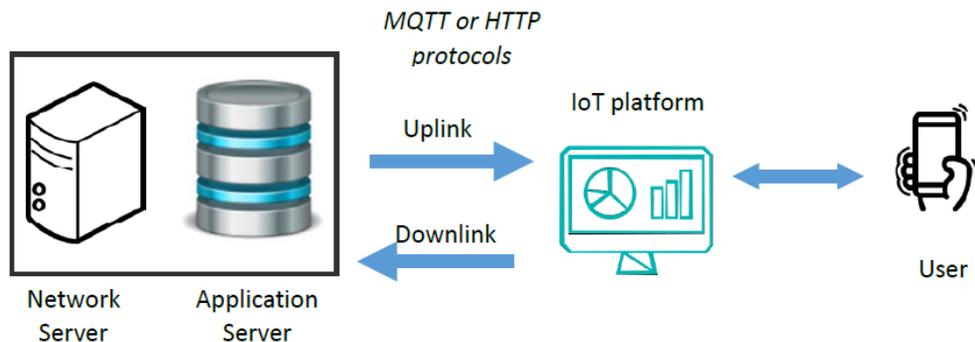
Una plataforma IoT es la interfaz de aplicación por la que el usuario interactúa y obtiene información de los dispositivos (Montagny, 2022). La Figura 16 exhibe la conexión existente entre la plataforma y el servidor.

- Posee un conector hacia el servidor de aplicación para adquirir la información, se utilizan protocolos como HTTP o MQTT.
- Contiene una base de datos para el almacenamiento de la información recopilada de los sensores.

- Es capaz de acceder a un panel a través de un acceso web o una aplicación en el teléfono por medio del usuario.

Figura 16.

Conexión entre el servidor de aplicación y la plataforma IoT



Nota. Envío y recepción de información desde los servidores utilizados en LoRaWAN hacia una plataforma IoT del usuario final. Obtenido de Montagny (2022). *LoRa - LoRaWAN and IoT for beginners.*

6.6.2. Clases de dispositivos finales

En LoRaWAN, se pueden distinguir tres categorías de nodos finales denominados A, B y C, siendo posible que todos los dispositivos funcionen como clase A. Cada clase establece los modos de comunicación con la red para abordar cada aplicación.

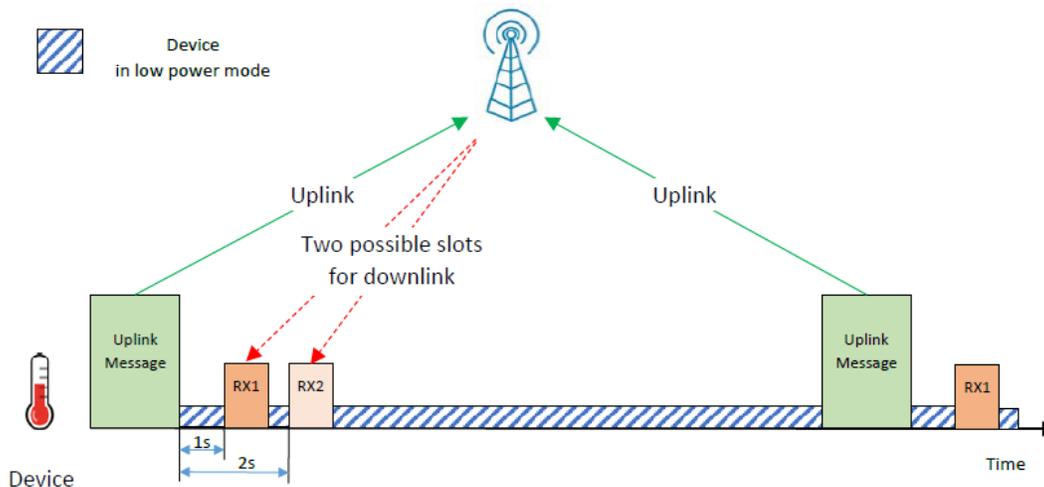
6.6.2.1. Clase A – Bajo consumo

Es utilizado para los dispositivos finales de menor potencia, la comunicación de la clase A siempre es iniciada por el dispositivo. Cada transmisión de enlace de subida (uplink) puede enviarse en cualquier momento hacia el Gateway y posterior a ello se inician dos ventanas cortas para la recepción de enlaces de

bajada (downlink). Luego de que las ventanas de recepción han finalizado el dispositivo permanece inactivo hasta la siguiente transmisión, de este modo, el dispositivo no permanece continuamente a la espera del servidor, y solo recibirá órdenes después de haber establecido un enlace ascendente, tal y como se ilustra en la Figura 17. Esto convierte a la clase A en el modo de funcionamiento que menos consumo de energía posee (Moya, 2018).

Figura 17.

Espacios de recepción para un dispositivo clase A



Nota. Ventanas de tiempo para el envío y recepción de información de un dispositivo clase A. Obtenido de Montagny (2022). *LoRa - LoRaWAN and IoT for beginners*.

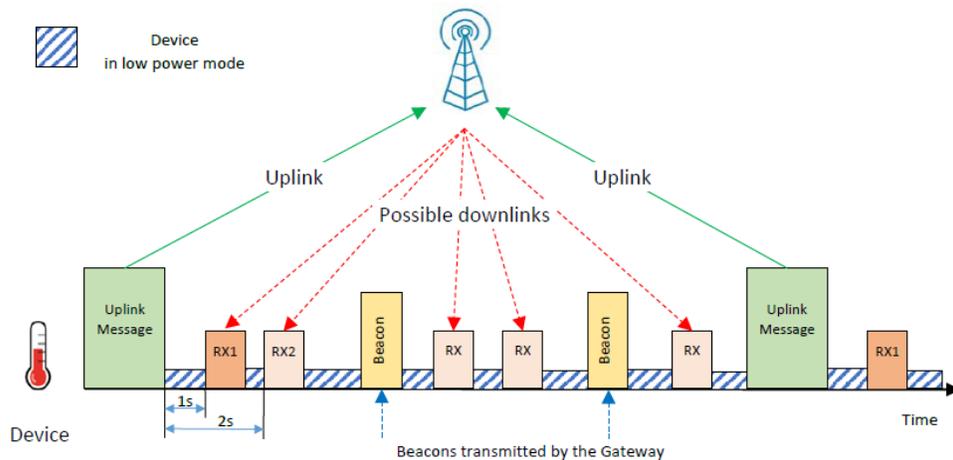
6.6.2.2. Clase B – Faro

Además de compartir la forma de operar de la clase A, los dispositivos pertenecientes a la clase B tienen intervalos de tiempo específicos para recibir información de manera programada, como se exhibe en la Figura 18. Gracias a la funcionalidad de faro (beacon) el dispositivo recibe una sincronización de tiempo periódicamente de parte del Gateway y esto permite conocer si el dispositivo se encuentra en modo escucha. Esto convierte a la clase B en

dispositivos finales que posee un mayor consumo de energía en comparación con la clase A (Moya, 2018).

Figura 18.

Espacios de recepción para un dispositivo clase B



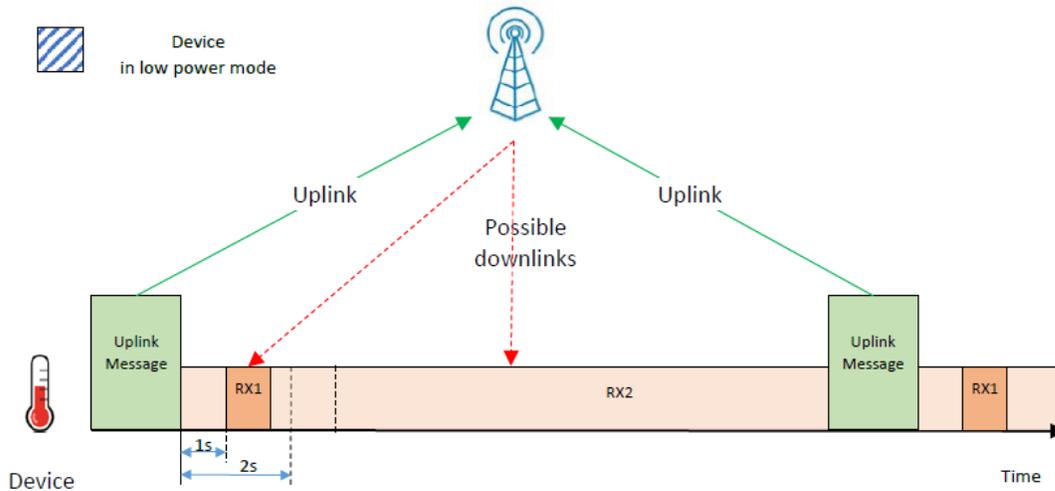
Nota. Ventanas de tiempo para el envío y recepción de información de un dispositivo clase B. Obtenido de Montagny (2022). *LoRa - LoRaWAN and IoT for beginners*.

6.6.2.3. Clase C – Escucha constante

La clase C adicional a poseer la forma de operar que la clase A. Son dispositivos bidireccionales donde su ventana de recepción permanece abierta y a la escucha constante del Gateway, como se visualiza en la Figura 19. Por lo tanto, resultan ideales para aplicaciones que dispongan de una fuente de energía continua. (Figueiredo, 2019)

Figura 19.

Espacios de recepción para un dispositivo clase C



Nota. Ventanas de tiempo para el envío y recepción de información de un dispositivo clase C. Obtenido de Montagny (2022). *LoRa - LoRaWAN and IoT for beginners*.

6.6.3. Activación de dispositivos finales

El proceso para dar de alta un dispositivo en la red LoRaWAN debe de llevarse de una manera segura, por lo que los elementos importantes para la comunicación son la dirección del dispositivo (DevAddr) la cual es un identificador del dispositivo final, así como las dos llaves de autenticación NwkSKey y AppSKey.

En las especificaciones de LoRaWAN permiten dos tipos de activación para los dispositivos finales, activación por personalización (ABP) y activación por aire (OTTA).

6.6.3.1. Activación por personalización

El método de activación por personalización consiste en que las claves ya se encuentran preestablecidas en el dispositivo final de manera estática y son las mismas que se registran en el servidor de red, debido a esto el dispositivo ya se incorpora a la red y no pasa por un procedimiento de aceptación en la misma, algunas características de este tipo de activación son las siguientes (Semtech Corporation, 2019):

- Se trata de un proceso de configuración más simple, pero menos seguro, para poner en marcha los dispositivos finales.
- Las llaves y los identificadores son personalizables al momento de iniciar.
- Implica que los dispositivos se conecten automáticamente a la red una vez que comienzan a funcionar, sin tener que seguir un procedimiento para unirse a la red.
- Los dispositivos finales están destinados a un servicio de red específico.

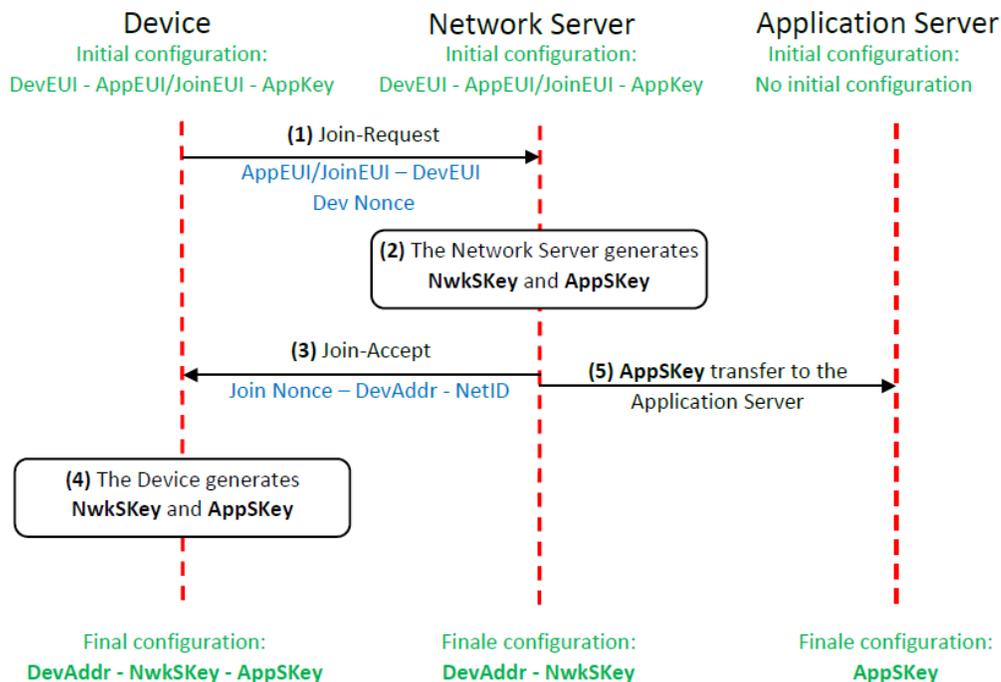
6.6.3.2. Activación por aire

En el método por activación por aire los dispositivos finales y el servidor de red hacen uso del DevAddr, AppSKey y NwkSKey. Y estos son generados durante el proceso de unirse a la red, como se muestra en la Figura 20. algunas características de este tipo de activación son las siguientes (Semtech Corporation, 2019):

- Cada fabricante genera de manera independiente los parámetros de configuración necesarios.
- Es posible actualizar las claves de seguridad de forma periódica.
- Los dispositivos finales tienen la capacidad de almacenar diferentes identidades para que de forma dinámica puedan cambiar de manera segura entre las redes del operador.
- Funciones de seguridad mejoradas y a prueba de manipulaciones.

Figura 20.

Procedimiento de unión a la red LoRaWAN por medio de activación por aire



Nota. Proceso e intercambio de llaves para la activación por aire de un dispositivo final en la red LoRaWAN. Obtenido de Montagny (2022). *LoRa - LoRaWAN and IoT for beginners*.

6.6.4. Parámetros regionales LoRaWAN

LoRa Alliance proporciona un documento donde indica los parámetros regionales utilizados para LoRaWAN. El documento describe los parámetros que se aplican a las distintas regiones según las regulaciones de todo el mundo y detalla específicamente los canales de frecuencia a utilizar, las velocidades de transmisión de datos, las potencias de los dispositivos finales y los Gateways. En la Tabla III se muestra el canal de frecuencia LoRaWAN a ser utilizado en Guatemala (LoRa Alliance, 2022).

Tabla 3.

Parámetro regional LoRaWAN Guatemala

ISO 3166-1 Country name (Code alpha-2)	Band / channels	Channel Plan	LoRaWAN® Certified devices with Regulatory Type Approval
Guatemala (GT)	915 – 928 MHz ²	AU915-928 ³	

¹ AU915-928 also applies to this band.

² Regulations imply 902-928 MHz, but only 915-928 MHz is available.

³ AS923-1,2,3,4 also apply to this band.

Nota. Banda de frecuencia a ser utilizadas en Guatemala para la utilización del protocolo LoRaWAN. Obtenido LoRa Alliance (2022). *LoRaWAN® Regional Parameters RP002-1.0.4.*

6.7. Medidores de agua potable

Según Zyl (2011), “un medidor de agua es un dispositivo que mide el volumen de agua que pasa a través de él” (p. 8). Los medidores de agua cuentan con componentes básicos como lo son, el sensor que se encarga de detectar el flujo que pasa a través del equipó, el transductor que transmite la señal del flujo, el contador que se encarga de llevar el control del total del volumen que pasa por

el medidor de agua y el display de indicador que muestra la lectura del medidor de agua (Zyl, 2011).

6.7.1. Medidor de agua mecánico

Los medidores mecánicos se caracterizan por contar con partes móviles que son las utilizadas para la detección del flujo de agua, entre la clasificación de estos medidores se encuentran los volumétricos y los inferenciales.

Los medidores volumétricos miden directamente el volumen de agua que fluye a través de ellos, y para la medición de flujo, muchos de ellos utilizan un disco giratorio y son comúnmente conocidos como medidores rotativos de pistón.

A diferencia de los volumétricos los medidores inferenciales no miden directamente el volumen de agua que pasa a través de ellos, sino que infieren el volumen del flujo a través de la velocidad del agua. Existen dos categorías que son las utilizadas comúnmente; están los que usan paletas radiales y los que utilizan un impulsor de paletas tipo hélice. Los medidores de paletas radiales se dividen en medidores tipo chorro único y medidores de chorro múltiple. Los medidores de paletas tipo hélice son llamados también Woltmann.

La mayoría de los medidores de agua instalados en los sistemas de distribución de agua son de tipo mecánico (Zyl, 2011).

6.7.2. Medidor de agua electromagnético

Los medidores electromagnéticos para medir la velocidad del agua que fluye a través de ellos utilizan el principio del electromagnetismo al que se le conoce como ley de inducción de Faraday. La ley de Faraday describe que, si un

conductor se mueve por un campo magnético, se induce una tensión eléctrica en los bordes del conductor.

En el medidor electromagnético se crea un campo magnético dentro de la tubería, cuando el agua que a su vez es un conductor eléctrico, atraviesa el campo magnético se induce una tensión que es detectada por los electrodos que están situados en las paredes del medidor de agua. El medidor electromagnético funciona midiendo la tensión generada de manera proporcional a la velocidad del flujo de agua, permitiéndole calcular el caudal que atraviesa el dispositivo. La señal eléctrica que convierte la velocidad en volumen comúnmente es mostrada en un display pero también puede ser obtenida por un sistema de telemetría (Zyl, 2011).

6.7.3. Medidor de agua ultrasónico

Los medidores ultrasónicos aprovechan el comportamiento y las propiedades de las ondas sonoras que se generan cuando existe movimiento de agua al instante que los atraviesan. Los tipos de mecanismos para la medición ultrasónica son el tiempo transmitido y el medidor Doppler.

La medición por medio de tiempo transmitido se basa en que las ondas sonoras disminuyen su velocidad cuando se mueven en contra de un flujo de agua, y a su vez aumenta su velocidad cuando se mueven en sentido del flujo. El medidor ultrasónico consta de dos transductores que se encuentran colocados en los lados opuestos de la tubería, cada transductor enviara una señal ultrasónica al otro transductor. Estos obtendrán una diferencia en los tiempos en que transcurre la onda de sonido, y de esta manera se utilizara para determinar la velocidad del agua y posteriormente el flujo.

Un medidor Doppler hace uso del efecto Doppler que al momento de reflejar una onda sonora de un objeto en movimiento este cambia su frecuencia. El funcionamiento consiste en que al crear una onda sonora sobre un fluido en movimiento este golpeará las pequeñas burbujas de aire o partículas de suciedad que se mueven con el flujo y luego regresan a donde se originó la señal. Estas ondas ultrasónicas que son reflejadas se detectan por medio de un receptor que se encarga de verificar si existe un cambio en la frecuencia de la onda. El cambio se relaciona con la velocidad y de esta manera se obtiene el flujo de agua (Zyl, 2011).

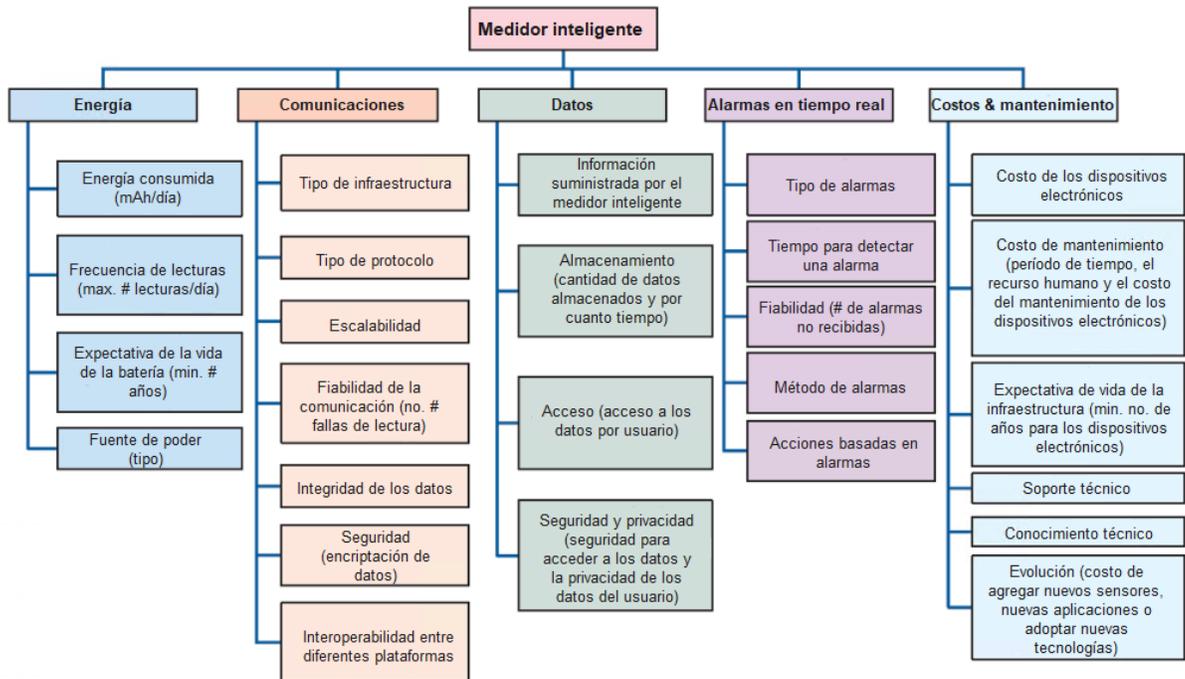
6.7.4. Medidor de agua inteligente

Un medidor de agua inteligente está relacionado con un dispositivo que permite la lectura y visualización de manera electrónica sobre el consumo de agua. Cuando ya se cuenta con la información obtenida de la señal electrónica, esta se dispone para procesarla, utilizando el internet y otras tecnologías que permitan llevar la señal hacia otro medio para su visualización. (Hauber-Davidson, 2006).

El medidor inteligente además de recolectar la información también permite comprender los hábitos de consumo y esto apoya para mejorar la eficiencia de la red, contribuyendo así al ahorro de agua. Gracias a esto los datos pueden ser gestionados y cualquier impacto en la red es monitoreado. En la Figura 21 se muestran algunas funcionalidades importantes relacionadas a los medidores inteligentes (Lloret, Tomas, Canovas y Parra, 2016).

Figura 21.

Características de un medidor inteligente



Nota. Desglose de las características de un medidor inteligente. Obtenido de Lloret, Tomas, Canovas y Parra (2016). *An integrated IoT architecture for smart metering.*

6.8. Computación en la nube

La computación en la nube (Cloud Computing) es un término utilizado para describir un tipo de aplicación como una plataforma. Esta provee de manera dinámica el aprovisionamiento de servidores pudiendo ser virtualizados. La nube informática también se refiere a aplicaciones que se pueden acceder a través de internet. Las aplicaciones en la nube disponen del uso de centros de datos que proveen servicios para almacenamiento, seguridad de dispositivos, máquinas virtuales, servicios Web.

La nube puede manejar distintas cargas de trabajo, como también permite el rápido despliegue de tareas y aprovisionamiento de máquinas virtuales. Soporta redundancia y es altamente escalable. Adicional permite el monitoreo de los recursos permitiendo la gestión para tomar acciones de manera inmediata (Boss, Malladi, Quan, Legregni y Hall, 2007)

6.8.1. Modelos de servicio

La computación en la nube se divide en tres modelos de servicio: IaaS (Infraestructura como Servicio) proporciona recursos de infraestructura virtualizados como servidores, almacenamiento y redes, permitiendo a los usuarios administrar y desplegar sus aplicaciones y sistemas operativos. PaaS (Plataforma como Servicio) ofrece un entorno de desarrollo completo, incluyendo herramientas y servicios, para que los desarrolladores construyan, ejecuten y gestionen aplicaciones sin preocuparse por la infraestructura subyacente. SaaS (Software como Servicio) ofrece aplicaciones completamente gestionadas a través de la nube, permitiendo a los usuarios acceder y utilizar software sin preocuparse por la infraestructura, mantenimiento o actualizaciones, lo que facilita la colaboración y el acceso desde cualquier lugar con conexión a Internet.

6.8.1.1. Infraestructura como servicio

El tipo de servicio de Infraestructura como servicio (IaaS), provee la infraestructura, como la capacidad de almacenamiento y poder computacional para el desarrollo y despliegue de máquinas virtuales, servidores, redes sin necesidad de contar con algún equipo físico (Sowmya, Deepika y Naren, 2014).

6.8.1.2. Plataforma como servicio

La plataforma como servicio (PaaS), provee plataformas de computación que dan los recursos como el sistema operativo, bases de datos, lenguajes de programación, servidores web. En este modelo los desarrolladores trabajan en aplicaciones que corren en un ambiente específico (Sowmya, Deepika y Naren, 2014).

6.8.1.3. Software como servicio

Software como servicio (SaaS) es la capa más alta y la forma más básica de la computación en la nube. Para este modelo los datos están alojados en internet, por lo que el usuario hace uso de un navegador web para acceder a los servicios. El servicio no requiere de ninguna instalación de algún tipo de estructura de software o hardware. Es posible acceder desde cualquier sitio con conexión a internet (Sowmya, Deepika y Naren, 2014).

6.8.2. Modelos de implementación

Los modelos de implementación de la nube se refieren a las diversas formas en que los servicios de computación en la nube pueden ser desplegados y gestionados. Existen principalmente tres modelos: nube pública, nube privada y nube híbrida. La nube pública ofrece recursos compartidos por múltiples usuarios y gestionados por un proveedor de servicios externo, lo que brinda escalabilidad y economía. La nube privada se crea y gestiona internamente por una organización, proporcionando mayor control y seguridad, pero a menudo con costos más altos. La nube híbrida combina elementos de ambas, permitiendo a las empresas equilibrar la eficiencia y el control al integrar servicios de nube pública y privada.

6.8.2.1. Nube pública

En un modelo de nube pública la infraestructura y los recursos se pueden a disposición y se ofrecen como un servicio. Estos recursos son compartidos por los usuarios que deseen adquirirlos. Los recursos son manejados por terceras partes y se comparten con múltiples organizaciones o personas (Goyal, 2014).

6.8.2.2. Nube privada

En el modelo de nube privada la infraestructura y los recursos se operan exclusivamente para una organización. A estos recursos solo acceden los miembros con autorización. La nube privada puede estar alojado en el centro de datos de la empresa, este modelo ofrece mayor seguridad que la nube pública (Goyal, 2014).

6.8.2.3. Nube híbrida

En el modelo de nube híbrida se encuentra involucrados tanto el modelo de nube pública como el de nube privada. Por lo que en la nube híbrida la organización provee y maneja algunos recursos de manera interna y otros de forma externa. Este modelo es el que más flexibilidad proporciona a los usuarios (Goyal, 2014).

6.8.3. Empresas líderes que prestan el servicio en nube

Varias empresas líderes destacan en la prestación de servicios en la nube, incluyendo Amazon Web Services (AWS), Microsoft Azure y Google Cloud Platform (GCP). AWS, una división de Amazon, es ampliamente reconocida por su gama completa de servicios en la nube, desde cómputo hasta

almacenamiento y análisis de datos. Microsoft Azure ofrece una solución integral con una amplia adopción empresarial, centrándose en la integración con productos de Microsoft y herramientas de desarrollo. Google Cloud Platform se destaca por su experiencia en la gestión de datos y su enfoque en la inteligencia artificial y el aprendizaje automático. Estas empresas líderes continúan innovando y compitiendo en el mercado de la nube, proporcionando a los usuarios una variedad de opciones para satisfacer sus necesidades de infraestructura y servicios en la nube.

6.8.3.1. Amazon Web Services

Amazon Web Services (AWS) son pioneros en el tipo de servicio de computación en la nube, es el líder a nivel mundial adoptado como plataforma en la nube ofreciendo más de 175 servicios y posee distintos centros de datos desplegados globalmente.

AWS es el que ofrece más funcionalidad, cuenta con un conjunto de servicios en nube incluyendo, computación, almacenamiento, redes, análisis, bases de datos, herramientas de gestión, seguridad, IoT. En la actualidad es la arquitectura que brinda más flexibilidad y seguridad (Borge, 2020).

6.8.3.2. Microsoft Azure

Microsoft Azure es una plataforma de computación en la nube que permite la gestión de recursos y servicios proporcionados por Microsoft. Es una plataforma que provee los recursos para correr aplicaciones y almacenar datos. Ofrece los modelos de implementación para SaaS, PaaS e IaaS (Borge, 2020).

6.8.3.3. Google Cloud

Google Cloud Platform (GCP) es la plataforma en la nube de más rápido crecimiento para los servicios públicos. Ofrece servicios para análisis de datos y aprendizaje automático. GCP tiene cables de fibra bajo el mar a lo largo del mundo por lo que brinda conectividad de baja latencia. Funciona en la misma plataforma que utiliza Google para los servicios hacia los usuarios de YouTube o Google Search (Borge, 2020).

CONCLUSIONES

1. El sistema de telemetría utilizando la tecnología LoRa y el protocolo LoRaWAN es una herramienta eficaz para la medición de agua potable residencial, ya que permite detectar consumos anómalos y conocer la curva de consumo por parte de los usuarios.
2. La implementación de sistemas de medición inteligente de agua potable es fundamental para la conservación del recurso hídrico, ya que permite detectar fugas y consumos anómalos, y promover un uso más eficiente y responsable del agua.
3. La información oportuna es clave para una correcta toma de decisiones en la medición del consumo de agua potable a nivel residencial, ya que el desconocimiento sobre el consumo de agua por parte de los usuarios conlleva a hacer un mal uso del recurso hídrico.
4. La tecnología inalámbrica y el Internet de las cosas son herramientas útiles para la medición inteligente de agua potable, ya que permiten la adquisición de información de manera remota y la detección de fugas.
5. Es necesario seguir investigando y mejorando los sistemas de medición inteligente de agua potable, con el fin de optimizar la gestión de tuberías y activos, la gestión de la presión, la rapidez y calidad de las reparaciones, y el control activo de fugas.

RECOMENDACIONES

1. Implementar el sistema de telemetría en hogares para la medición de agua potable, utilizando la tecnología LoRa y el protocolo LoRaWAN, para detectar consumos anómalos y conocer la curva de consumo por parte de los usuarios.
2. Realizar estudios y artículos que empleen tecnologías inalámbricas para la medición inteligente de agua potable, con el fin de mostrar sistemas para la medición de agua potable y el monitoreo para la detección de fugas haciendo uso de plataformas del Internet de las cosas, permitiendo de esta manera la conservación del recurso hídrico.
3. Promover la importancia de contar con información oportuna para una correcta toma de decisiones en la medición del consumo de agua potable a nivel residencial, ya que el desconocimiento sobre el consumo de agua por parte de los usuarios conlleva a hacer un mal uso del recurso hídrico.
4. Realizar investigaciones futuras para mejorar el sistema de telemetría y la medición inteligente de agua potable, con el fin de optimizar la gestión de tuberías y activos, la gestión de la presión, la rapidez y calidad de las reparaciones, y el control activo de fugas.
5. Fomentar la conservación del recurso hídrico a través de la implementación de sistemas de medición inteligente de agua potable, que permitan detectar consumos anómalos y conocer la curva de

consumo por parte de los usuarios, y así promover un uso más eficiente y responsable del agua.

REFERENCIAS

- Alghamdi, A., Khairullah, E. y Al Mojamed, M. (2022). LoRaWAN Performance Analysis for a Water Monitoring and Leakage Detection System in a Housing Complex. *Sensors*, 22(19), 7188.
- Alvisi, S., Casellato, F., Franchini, M., Govoni, M., Luciani, C., Poltronieri, F., Riberto, G., Stefanelli, C., y Tortonesi, M. (2019). Wireless middleware solutions for smart water metering. *Sensors*, 19(8), 1853
- Behr Technologies Inc. (2018) Best Uses of Wireless IoT Communication Technology. Industry Today. <https://industrytoday.com/best-uses-of-wireless-iot-communication-technology/>
- Brent, M. (2017). RF Fundamentals for the Internet of Things. *OleumTech*, 1-10.
- Borge, S., y Poonia, N. (2020). Review on Amazon web services, Google cloud provider and Microsoft windows Azure. *Advance and Innovative Research*, 53.
- Boss, G., Malladi, P., Quan, D., Legregni, L., y Hall, H. (2007). Cloud computing. *IBM white paper*, 321, 224-231.
- Cambell Scientific, INC. (2016). The Link Budget and Fade Margin. <https://s.campbellsci.com/documents/us/technical-papers/link-budget.pdf>

Carden, F., Jedlicka, R., y Henry, R. (2002). Telemetry systems engineering. Boston, Londres: Artech House.

Chaudhari, B., Zennaro, M., y Borkar, S. (2020). LPWAN technologies: Emerging application characteristics, requirements, and design considerations. *Future Internet*, 12(3), 46.

Circuit Design, INC. RF Design Guide. https://www.cdt21.com/design_guide/link-budget/

Elhadi, S., Marzak, A., Sael, N., y Merzouk, S. (2018). Comparative study of IoT protocols. Smart Application and Data Analysis for Smart Cities. SSRN, 5.

Figueiredo, T. (2019). LoRaWAN performance evaluation (Tesis de maestría). Universidade Nova, Lisboa.

Fuentes, H. (2021). *Sistema de medición inteligente de consumo de agua en hogares usando IoT y Cloud Computing* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú].

Goyal, S. (2014). Public vs private vs hybrid vs community-cloud computing: a critical review. *International Journal of Computer Network and Information Security*, 6(3), 20-29.

Gumaa, E. M. (2022). Design and Implementation of CI\CD over LoRaWAN [Tesis de maestría, University of Turku, Turkia].

- Hata, M. (1980). Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services. *IEEE transactions on Vehicular Technology*, 29(3), 317-325.
- Hauber-Davidson, G., y Idris, E. (2006). Smart water metering. *Water*, 33(3), 38-41.
- Hill, S. (2019). Scalable iot platforms [Tesis de maestría, University of Stuttgart, Alemania].
- Horton, J. (1954). The bewildering decibel. *Electrical Engineering*, 73(6), 550-555.
- Iza, A. y Rovere, M. (2006). Gobernanza del agua en América del Sur: dimensión ambiental (No. 53) UICN. Cambridge, Reino Unido: Editores del Puerto s.r.l.
- Johnson, D. (2006). Signal-to-noise ratio. *Scholarpedia*, 1(12), 2088.
- Lentini, E. (2010). Servicios de agua potable y saneamiento en Guatemala: beneficios potenciales y determinantes de éxito. Comisión Económica para América Latina y el Caribe, 1-93.
- Lloret, J., Tomas, J., Canovas, A., y Parra, L. (2016). An integrated IoT architecture for smart metering. *IEEE Communications Magazine*, 54(12), 50-57.
- LoRa Alliance (2022). LoRaWAN® Regional Parameters RP002-1.0.4. LoRa Alliance, 1-101. <https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/rp002-1-0-4-regional-parameters>.

- Magrin, D. (2016). Network level performances of a LoRa system (Tesis de maestría). Universidad de Padua, Italia.
- Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F., y Meyer, F. (2019). A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ICT express*, 5(1), 1-7.
- Mendaza, F., Tveit, O., Lazzarin, L., Lorenze, H., Lee, H., ... y Lo, S. (2002). Water losses management and techniques. *Water Supply*, 2(4), 1-20.
- Meraki Cisco. (2020). Signal-to-noise ratio (SNR) and wireless signal strength. Cisco. https://documentation.meraki.com/MR/Wi-Fi_Basics_and_Best_Practices/Signal-to-Noise_Ratio_%28SNR%29_and_Wireless_Signal_Strength.
- Moya, M. (2018). Evaluación de pasarela LoRa/LoRaWAN en entornos urbanos [Tesis de maestría, Universidad Politecnica de Valencia. España].
- Montagny, S. (2022). LoRaWAN and IoT for beginners. Chambéry, Francia: Savoie Mont Blanc University.
- Pasqua E. (2018). LPWAN Market 2018-2023. IoT Analytics. <https://iot-analytics.com/lpwan-market-report-2018-2023-new-report/>
- Pasqua E. (2021). 5 things to know about the LPWAN market in 2021. IoT Analytics. Recuperado de <https://iot-analytics.com/5-things-to-know-lpwan-market/>

- Papadopoulos, P., Tsiartas, A., Gibson, J., y Narayanan, S. (2014). A supervised signal-to-noise ratio estimation of speech signals. International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 8237-8241.
- Proakis, J., y Salehi, M. (2001). Communication systems engineering (Vol. 2). New Jersey, Estados Unidos: Prentice Hall.
- Schiller, E., Aidoo, A., Fuhrer, J., Stahl, J., Ziörjen, M., y Stiller, B. (2022). Landscape of IoT security. Computer Science Review, 44, 100467.
- Semtech Corporation (2019). LoRa and LoRaWAN: A Technical Overview. Semtech, 1-26. https://lora-developers.semtech.com/uploads/documents/files/LoRa_and_LoRaWAN-A_Tech_Overview-Downloadable.pdf
- Seybold, J. (2005). Introduction to RF propagation. New Jersey, Estados Unidos: John Wiley & Sons, INC.
- Song, Y., Lin, J., Tang, M., y Dong, S. (2017). An Internet of energy things based on wireless LPWAN. Engineering, 3(4), 460-466.
- Sowmya, S., Deepika, P., y Naren, J. (2014). Layers of Cloud-IaaS, PaaS and SaaS: A Survey. International Journal of Computer Science and Information Technologies, 5(3), 4477-4480.
- Srinivasan, K., y Levis, P. (2006). RSSI is under appreciated. In Proceedings of the third workshop on embedded networked sensors. EmNets, 2006, 1-5.

The Things Network. LoRaWAN Architecture.
<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/architecture/>

Tschofenig, H., Arkko, J., Thaler, D., y McPherson, D. (2015). Architectural considerations in smart object networking. RFC Editor, 7452, 1-24.

Yang, L., Yang, S. H., Magiera, E., Froelich, W., Jach, T., y Laspidou, C. (2017). Domestic water consumption monitoring and behaviour intervention by employing the internet of things technologies. *Procedia Computer Science*, 111, 367-375.

Yashiro, T., Kobayashi, S., Koshizuka, N., y Sakamura, K. (2013). An Internet of Things (IoT) architecture for embedded appliances. In 2013 IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference, 314-319.

Zyl, V. (2011). Introduction to integrated water meter management. Gezina, Sudáfrica: Water Research Commission.