



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE INGENIERÍA



Sistema de Reducción de Agua No Contabilizada Basado en Internet de las Cosas para la Industria

TESIS PRESENTADA A LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA POR

Jesús Fabián Calixto Méndez

EN CUMPLIMIENTO PARCIAL DE LOS REQUERIMIENTOS
PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
MAGISTER EN INGENIERÍA ELÉCTRICA.

DIRECTOR DE TESIS

Dr.-Ing. Benigno Rodríguez..... Universidad de la República

TRIBUNAL

Msc.-Ing. Eduardo Cota..... Universidad de la República

Dr.-Ing. Leonardo Barboni..... Universidad de la República

Dr.-Ing. Alejandro Uriz (Revisor Externo)... Universidad Nacional de
Mar del Plata

DIRECTOR ACADÉMICO

Dr.-Ing. Benigno Rodríguez..... Universidad de la República

Montevideo
lunes 9 diciembre, 2024

Sistema de Reducción de Agua No Contabilizada Basado en Internet de las Cosas para la Industria, Jesús Fabián Calixto Méndez.

ISSN 1688-2806

Esta tesis fue preparada en L^AT_EX usando la clase iietesis (v1.1).

Contiene un total de 127 páginas.

Compilada el lunes 9 diciembre, 2024.

<http://iie.fing.edu.uy/>

El hombre nunca sabe de lo que es capaz hasta que lo intenta.

CHARLES DICKENS

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a Jesucristo, nuestro Dios, por estar presente en cada momento de mi vida, siendo mi guía y salvador. A mis padres, gracias por la educación y los valores que me inculcaron, que me han inspirado a seguir creciendo como persona y profesional. A mi esposa, por su apoyo incondicional, su fe en mí y su constante motivación para alcanzar cada meta que me propongo.

Agradezco también a la Facultad de Ingeniería de la UDELAR por permitirme formar parte de esta casa de estudios y brindarme la oportunidad de cursar la Maestría en Ingeniería en Telecomunicaciones. Mi gratitud a todos los profesores por sus enseñanzas y conocimientos, en especial al profesor Benigno Rodríguez, por su orientación y valioso apoyo durante toda la Maestría y el desarrollo de esta Tesis.

Extiendo mi agradecimiento a la empresa CSI Ingenieros - Ciemsa por su respaldo en el desarrollo del proyecto, y a los ingenieros Pedro Mastrangelo y, especialmente, Juan Pablo González, por su apoyo técnico y la valiosa experiencia compartida durante la ejecución de esta Tesis.

Finalmente, agradezco a la Fundación Ricaldoni por el apoyo brindado a través de la beca del Centro de Innovación en Ingeniería, que hizo posible este camino de formación y desarrollo profesional.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

A mi familia.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Resumen

El Internet de las Cosas (IoT) representa una tecnología que facilita la interconexión de diversos dispositivos y sensores a través de la red de Internet. Esta interconexión posibilita una interacción más dinámica entre individuos y empresas con el entorno circundante. En esta investigación, se aborda inicialmente un estudio exhaustivo del estado actual de la tecnología IoT y sus fundamentos. Se analizan dos arquitecturas de sistemas IoT: la Arquitectura Estandarizada propuesta por el IoT World Forum (IoTWF) y un Modelo Simplificado de Arquitectura IoT. Ambas propuestas son evaluadas en términos de las capas que conforman dichas arquitecturas.

Un aspecto crucial de esta tecnología es el sistema de comunicación. En este trabajo se estudian los sistemas de Red de Área Extensa de Bajo Consumo (LPWAN, por sus siglas en inglés). La base de estos sistemas es la transmisión de paquetes de datos reducidos, utilizando mínima energía y logrando un alcance significativo. La tesis dedica un capítulo al estudio de diversas tecnologías de comunicación LPWAN, entre las cuales se destacan Long Range (LoRa), NarrowBand-IoT y Sigfox.

El análisis de los principios y componentes de la tecnología IoT sienta las bases para el desarrollo de una solución específica para la industria, en este caso, para una empresa de servicios de agua. Esta solución tiene como objetivo principal la contribución a la Reducción de Agua No Contabilizada (RANC). El proyecto incluye el diseño de una aplicación IoT y un estudio de cálculo de enlace en la zona de las Piedras en Canelones. Este análisis teórico busca verificar la viabilidad de la comunicación inalámbrica en puntos específicos donde se encuentran las líneas de suministro de agua.

El desarrollo de la aplicación y el estudio de comunicación se complementa con un prototipo que emplea la tecnología LoRa/LoRaWAN. Además, para la recolección y verificación de los datos captados, se utiliza el servicio en la nube denominado “The Things Stack”, sistema creado para el uso e implementación del protocolo LoRa/LoRaWAN.

El propósito final del proyecto y del prototipo desarrollado es ofrecer un aporte significativo en aplicaciones relacionadas con la industria de servicios de agua, con el fin de optimizar el uso de este recurso vital.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Tabla de contenidos

Agradecimientos	III
Resumen	VII
1. Introducción	1
1.1. Internet of Things (IoT)	2
1.2. Aplicaciones	2
1.3. Sistemas de Comunicación	4
1.4. Objetivos de la Tesis	5
1.4.1. Objetivos Específicos	6
1.4.2. Alcance y Limitaciones	6
1.5. Estructura de la Tesis	6
2. Diseño de Aplicaciones IoT	9
2.1. Arquitectura de Red	9
2.1.1. Arquitectura Estandarizada por el IoT World Forum (IoTWF)	10
2.1.2. Modelo Arquitectura IoT Simplificada	11
2.2. Dispositivos IoT	12
2.2.1. Sensores y Actuadores	13
2.2.2. Dispositivos Inteligentes (Nodos)	14
2.2.3. Sistemas de Alimentación	15
2.3. Red de Acceso y Comunicación	16
2.3.1. Radiofrecuencia (RF) y Propagación	16
2.3.2. Estimación o Cálculo de un Enlace Inalámbrico	18
2.3.3. IoT Gateway	18
2.4. Red de Datos y Transporte	19
2.5. Transporte y Gestión de Datos IoT	20
2.5.1. Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)	20
2.5.2. Constrained Application Protocol (CoAP)	21
2.5.3. Comparación entre MQTT y CoAP	23
2.6. Gestión y Análisis de Datos	23
2.6.1. Fiware	24
2.6.2. The Things Industries	26
2.7. Seguridad en la Red	27
3. Low Power Wide Area Network (LPWAN)	29
3.1. Características Principales de la Tecnología	29
3.2. Tecnologías de Comunicación LPWAN	30
3.2.1. Estándar IEEE 802.15.4	30
3.2.2. ETSI LTN	34

Tabla de contenidos

3.2.3. LoRa/LoRaWAN	37
3.2.4. Cellular IoT: EC-GSM-IoT, LTE-M, NB-IoT	40
3.2.5. Otras Tecnologías LPWAN	44
4. IoT para la Industria	47
4.1. Aplicación en Fábricas y Manufactura	48
4.2. Aplicación en Petróleo y Gas	48
4.3. Aplicación en Empresas de Servicios Públicos	48
4.3.1. Reducción de Agua No Contabilizada (RANC)	49
4.4. LoRa/LoRaWAN para IoT en la Industria	53
4.4.1. Sistema de Transmisión LoRa	54
4.4.2. Especificación LoRaWAN	59
4.5. Comparación LoRa/LoRaWAN con otras tecnologías	64
5. Diseño de Sistema IoT para RANC	67
5.1. Tecnología de Comunicación para Sistemas RANC	67
5.1.1. Ubicación Geográfica	68
5.1.2. Especificación del Sistema de Agua Instalado	68
5.2. Propuesta de Solución IoT	69
5.2.1. Diseño General de la Red LoRaWAN	70
5.2.2. Arquitectura de la Red	71
5.2.3. Cálculo de Enlace	72
5.3. Prototipo LoRa/LoRaWAN	73
5.3.1. Equipos y Dispositivos LoRa/LoRaWAN	73
5.3.2. Configuración y Programación de los Dispositivos	78
5.3.3. Conexión con The Things Stack, TTS	85
5.3.4. Pruebas de Transmisión	90
6. Conclusiones	95
6.1. Evaluación de los Objetivos Propuestos para la Tesis	96
6.2. Líneas de Trabajo Futuro	97
A. Cálculos de Enlaces	99
A.1. Modelado de Línea de Vista	99
A.2. Verificación del Perfil del Terreno	101
Referencias	105
Índice de tablas	108
Índice de figuras	110

Capítulo 1

Introducción

Internet de las Cosas o Internet of Things (IoT), es un paradigma tecnológico cuya premisa se centra en poder agregar las habilidades que antes solo tenían las computadoras a todas las cosas que nos rodean, como: el hogar, las plantas industriales, los edificios, las calles, la agricultura, entre otras áreas en que se desenvuelven las personas. Las nuevas tecnologías están acelerando la convergencia entre el mundo informático y el mundo industrial, que se considera una fusión de dos grandes revoluciones, donde casi cada máquina, cada auto, cada reloj y cada electrodoméstico puede beneficiarse de las habilidades inteligentes, brindando productos más conectados, máquinas más confiables y una manera mucho más eficiente de usar los recursos de nuestro planeta. A su vez, el desarrollo y establecimiento de las nuevas tecnologías lleva tiempo, estudio y trabajo. La evolución de los sistemas hasta la concepción de lo que hoy se conoce como IoT se debe a distintas innovaciones dentro del campo de la electrónica, computación y redes de comunicación.

Uno de los primeros estudios se realizó en 1959, donde Engelbart presentó su paper Microelectrónica y el Arte de Similitud, donde explicó el principio de construcción de microelectrónica, donde la reducción a escala dramática de las propiedades básicas de la tecnología cambiaría, abriendo la puerta para la creación de componentes mucho más pequeños con una capacidad computacional nunca imaginada antes. Seguidamente, Moore en 1965 escribió su artículo “Cramming more components onto integrated circuits” Amontonando más componentes en los circuitos integrados. El desarrollo de los circuitos integrados, así como su evolución año tras año de acuerdo a la ley de Moore, permitió la proliferación de la electrónica así también como el desarrollo de la computadora personal. Moore ya presagiaba el futuro del IoT con el smartphone y los autos autónomos, con la frase “insertando esta ciencia en muchas áreas nuevas. . . como controles automáticos para autos y dispositivos de comunicación personales” [1].

Unos pocos años después en 1968, Douglas Engelbart realiza la presentación de la computadora Engelbart Augment NLS (oN-Line System) la cual se anunció como el primer nodo de la ARPANet, la red que, con el tiempo, se convirtió en lo que hoy conocemos como Internet. Otro contribuidor notable a la tecnología fue Mark Weiser, quien en 1988 acuñó el término “computación ubicua”. Weisser imaginaba computadoras y sensores integrados invisiblemente en todo nuestro alrededor ayudándonos en nuestra vida cotidiana. Para lograr esto decía que había que poner centenares de pequeñas

Capítulo 1. Introducción

computadoras y sensores conectados a la red en absolutamente todo: interruptores, ventanas, heladeras, televisores, termostatos, zapatos, ropa, etc. Hasta que, en el año 1999 Kevin Ashton, durante una presentación planteaba la idea de colocar microchip a los lápices labiales de tal forma que estos pudieran ser localizados de forma inalámbrica con el fin de hacer un control de los movimientos en los inventarios. Durante la presentación usó el termino Internet of Things, para explicar aquel concepto todavía novedoso y complejo a los ejecutivos de la empresa [1].

1.1. Internet of Things (IoT)

Internet de las cosas tiene como enfoque principal el poder agregar habilidades computacionales y de comunicación a todas las cosas que nos rodean. Para lograr la conectividad usa la red informática, esencialmente Internet, con el fin de conseguir la interconexión o interacción entre los distintos objetos y las personas. Es una tecnología con la capacidad de transformar o combinar sistemas ya existentes para construir nuevas soluciones con el objetivo de mejorar nuestra calidad de vida. Al integrar sensores para medir parámetros físicos y controlarlos mediante computadoras permite el monitoreo y la gestión de máquinas a través de la red, lo cual contribuye a mejorar la eficiencia, la automatización y a posibilitar el desarrollo de nuevas aplicaciones

IoT es un gran sistema que contiene diferentes elementos, protocolos y tecnologías, que se implementan de acuerdo a una aplicación en particular. Por lo cual, genera desafíos a la hora de diseñar una solución específica. Actualmente se han implementado o desarrollado diferentes aplicaciones en varios campos de ingeniería y desarrollo, en la próxima sección se brindan varios ejemplos de aplicaciones IoT.

1.2. Aplicaciones

Industria y Energía

Segmento importante y donde esta causando gran impacto la tecnología IoT. Desarrollo de aplicaciones donde se está logrando la combinación del área operacional de una industria con el área informática. Las aplicaciones IoT buscan que las variables físicas de un equipo, parámetros del sistema de una industria, métricas de rendimiento, entre otros puedan ser recolectados en tiempo real. IoT agrega como valor generar información a partir de todos los datos recolectados permitiendo tener un mejor mantenimiento preventivo, eficiencia en la producción y ahorro energético.

En esta área existen varios desafíos para obtener una aplicación exitosa que es la integración de tecnología y protocolos existentes a la red, ya que se pueden encontrar equipos que usen protocolo serial o RS485. Es fundamental seleccionar una tecnología de comunicación que permita tiempos de respuesta rápidos y bajo retardo, de modo que desde el lado operativo se puedan ejecutar acciones de forma ágil y automática sobre los equipos. La redundancia en la comunicación también es importante, ya que muchos equipos y áreas críticas requieren de alta disponibilidad. Finalmente, la seguridad es otro aspecto clave, los datos tanto en su transporte como en su almacenamiento requieren de una red privada o una nube privada, que garantice su integridad

1.2. Aplicaciones

y confidencialidad.

En el área de la energía ha crecido el desarrollo de implementaciones para el monitoreo de fuentes de generación, transmisión y distribución hasta el cliente de energía eléctrica, usando sistemas IoT. Uno de los grandes beneficios que ofrece la tecnología es poder dar comunicación a unidades de producción que se encuentran en zonas remotas o en áreas clasificadas. Otra aplicación importante de uso es la medida inteligente de consumo de energía eléctrica, agua y gas, optimizando y mejorando la obtención de datos de consumo de los clientes.

Salud

En la industria de la salud hay aplicaciones orientadas al monitoreo de pacientes, empleando dispositivos que pueden obtener diferentes valores y pueden ser verificados vía remota. Aplicaciones que permiten crear modelos preventivos para la salud de las personas, ofreciendo nuevos servicios de cuidado. Los desafíos de las aplicaciones IoT en ese sector principalmente son la seguridad y privacidad de los datos. Otro aspecto importante es el sistema de comunicación el cual debe ser confiable y con alta disponibilidad para la transmisión de datos en cualquier momento.



Figura 1.1: IoT Aplicaciones (fuente: [2]).

Agricultura y ambiente

En el área de agricultura y ambiente se encuentran aplicaciones muy interesantes, como el sistema de irrigación inteligente, que busca que la producción de alimentos sea más eficiente. El control de la iluminación de las granjas con sistemas IoT para mejorar las tasas de crecimiento y disminuir la mortalidad de pollos. Monitoreo de ganado en grandes campos usando dispositivos IoT específicos para la tarea. Monitoreo de valores ambientales en invernaderos, entre otras aplicaciones. En estas aplicaciones IoT se debe tener en cuenta el uso de sistemas de comunicación de largo alcance, como también el empleo de dispositivos de poco consumo de energía.

Capítulo 1. Introducción

Smart City

Smart City o Ciudad Inteligente es uno de los sectores con más desarrollo en IoT, gracias a la relación costo beneficio que brindan las soluciones. Una aplicación que se ha implantado en muchas ciudades es el de control de luminarias de forma inteligente, contribuyendo a la gestión y uso de la energía de una forma mas eficiente. Otra aplicación de gran impacto es el uso de cámaras inteligentes para seguridad de los ciudadanos, para el control del tráfico de automóviles y el monitoreo de espacios para parqueo. Soluciones que generan servicios que mejoran la calidad de vida de los ciudadanos y que permite la obtención de beneficios para la intendencia o departamento que administra la solución.

Esta es un área de aplicación donde la tecnología IoT ha podido desplegarse exitosamente, gracias al uso de diferentes dispositivo y sensores como: temperatura, calidad del aire, niveles de ruidos, niveles de radiación, entre otros. Permitiendo recolectar diferentes variables para el monitoreo y análisis de ciertas áreas de la ciudad. Importante a tener en cuenta en el diseño de aplicaciones de ciudad inteligente, parámetros como el ancho de banda y la capacidad de la red, debido a la cantidad de dispositivos que pueda haber.

Transporte y logística

En esta área existen aplicaciones para el seguimiento de activos desde su estado de almacenamiento, envío y hasta su entrega. Otra aplicación es la del monitoreo de una flota de vehículos utilizando dispositivos GPS más comunicación, que permite el seguimiento y advertencia de la ubicación de cada vehículo. Un ejemplo es el sistema de transporte de Montevideo que a través de una aplicación se puede visualizar la ubicación de cada ómnibus, además permite a los usuarios verificar un transporte en circulación y su ubicación relativa a una parada de la ciudad.

1.3. Sistemas de Comunicación

En el desarrollo de una aplicación IoT se considera la comunicación como uno de los pilares fundamentales de la tecnología. Por lo tanto, empresas y grupos técnicos han trabajado en el desarrollo y despliegue de tecnologías de comunicación que cubran las necesidades principales de una red IoT como son: diseño económico, lograr altas coberturas y una baja tasa de transferencia de datos, para así obtener un bajo consumo de energía. Para seleccionar la tecnología de comunicación es importante considerar los siguientes aspectos [3]:

- Rango: define el área de cobertura de una tecnología, además de la distancia máxima de comunicación entre los dispositivos. Las diferentes tecnologías de comunicación para IoT se categorizan de acuerdo al rango, como corto, medio y largo, ver Fig. 1.2.
- Bandas de Frecuencia: las tecnologías operan en bandas licenciadas o en bandas no licenciadas. Las bandas licenciadas son empleadas mayormente en tecnologías de largo alcance como celular IoT (EC-GSM, LTE-M y NB-IoT) y WiMAX.

1.4. Objetivos de la Tesis

Las bandas no licenciadas normalmente son empleadas en aplicaciones de corto alcance, como IEEE 802.11b/g/n Wi-Fi, IEEE 802.15.1 Bluetooth y IEEE 802.15.4 WPAN. Cabe destacar que en IoT se han realizado despliegues empleando la tecnología Low Power Wide-Area Network (LPWAN) que ha permitido cubrir largas distancias en una banda no licencia de Sub 1 GHz, específicamente usando la tecnología LoRa/LoRaWAN.

- Consumo de Energía: hay dispositivos o nodos que son alimentados directamente con una fuente eléctrica, otros dispositivos que son alimentados con baterías. Las tecnologías de acceso de IoT a seleccionar debe permitir la conectividad de nodos que funcionen con alimentación a baterías y preferiblemente puedan configurarse en modo de ahorro de energía.
- Topología: las topologías dominantes dentro de la conectividad IoT son: estrella, malla (mesh) y peer-to-peer. Se usa una determinada topología, de acuerdo a los requerimientos propios del proyecto y la tecnología de comunicación a utilizar.
- Velocidad de Datos y Rendimiento: la velocidad de datos para las tecnologías de comunicación IoT va desde los 100 bps (protocolos como Sigfox) a 10 Mbps con tecnologías como LTE y IEEE 802.11ac. Para un diseño óptimo de una red es importante tener claro los requerimientos de ancho de banda y el rendimiento para la red de IoT en cuestión.

En la Fig. 1.2 se presentan distintas tecnológicas de comunicación agrupadas de acuerdo al rango o distancias que alcanzan.

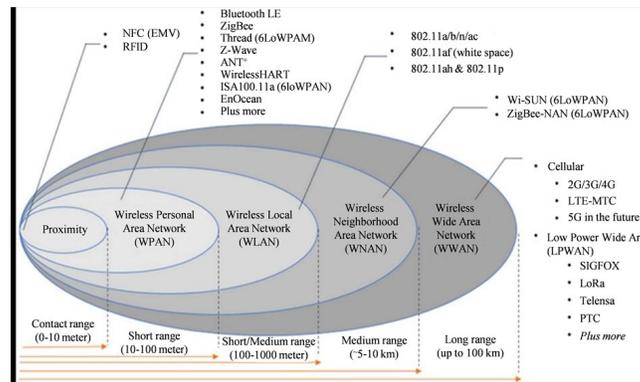


Figura 1.2: Tecnología de Comunicación Rangos (fuente: [4]).

Los sistemas de comunicación para IoT están agrupados en lo que se conoce como “Low Power Wide Area Network” (LPWAN), tecnología que se desarrolla en un capítulo posterior y forma parte de los objetos de estudio de la tesis.

1.4. Objetivos de la Tesis

El objetivo principal del trabajo de tesis de maestría presentado es el estudio de las principales tecnologías de comunicación en el área de IoT. Además, el diseño y

Capítulo 1. Introducción

desarrollo de una aplicación IoT para el sector industrial y/o energético, que busca la reducción de agua no contabilizada.

Se va a proporcionar información de las diferentes tecnologías de comunicación, buscando profundizar en las más relevantes o de mayor uso en sistemas IoT. Para el diseño de la aplicación se va a seleccionar una tecnología para la comunicación que sea apropiada para la solución. Adicionalmente, el desarrollo de la aplicación va a seguir una arquitectura para sistemas IoT con el fin de obtener una solución completa de inicio a fin.

1.4.1. Objetivos Específicos

- Estudiar los sistemas IoT y el estado del arte de la tecnología.
- Investigar las distintas tecnologías de comunicación que se están aplicando en IoT y profundizar el estudio de una de la tecnología de mayor uso.
- Diseñar una aplicación siguiendo una arquitectura IoT, enfocada al uso en el sector industrial y/o energético.
- Desarrollar un prototipo de la aplicación diseñada que pueda ser implementada en sistemas para la reducción de agua no contabilizada.
- Finalmente presentar los resultados y conclusiones de las pruebas y ensayos realizados.

1.4.2. Alcance y Limitaciones

La tesis comprende el estudio de las tecnologías de comunicación IoT, el estudio de aplicaciones de IoT para la industria y el desarrollo de un prototipo con aplicación industrial, que pueda ser utilizado como un elemento dentro del sistema de Reducción de Agua No Contabilizada (RANC).

1.5. Estructura de la Tesis

Este capítulo explicó la evolución de la tecnología hasta el establecimiento IoT como tecnología que busca conectar y dar habilidades computacionales a todas las cosas. Se expone la definición de IoT así como las áreas de aplicación donde se está viendo mayor despliegue. Uno de los focos de la tesis son las tecnologías de comunicación para IoT, por lo que se hace un acercamiento sobre los sistemas de comunicación y los criterios a considerar para la selección de una tecnología. Esta primera sección culmina con los objetivos del proyecto, su alcance y limitaciones.

La tesis se estructura de la siguiente forma: el Capítulo 2, diseño de una aplicación IoT donde se explican los fundamentos para el diseño de una solución como es la arquitectura, cálculo de enlace, entre otros. Capítulo 3, se exponen los sistemas de comunicación para IoT donde se explican los aspectos importantes de las principales tecnologías. Capítulo 4, trata sobre la tecnología IoT en la Industria, además se profundiza en la implementación de la tecnología LoRa/LoRaWAN. Capítulo 5, presenta la aplicación IoT de estudio, su desarrollo e implementación para la Reducción de

1.5. Estructura de la Tesis

Agua No Contabilizada (RANC). Por último, el Capítulo 6 desarrolla las conclusiones de la tesis.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 2

Diseño de Aplicaciones IoT

El diseño de una aplicación IoT comprende el estudio de varios elementos, protocolos y sistemas. Para obtener una solución exitosa es fundamental seguir una arquitectura de referencia. Este capítulo muestra dos arquitecturas, las cuales sirven de guía para estudiar cada elemento en una red IoT. Los elementos que se estudian son: los dispositivos, la conectividad, el transporte de datos, los protocolos de aplicación y la gestión de datos. Además, el aspecto de la seguridad en la red IoT, desarrollado en un apartado de este mismo capítulo.

2.1. Arquitectura de Red

Es fundamental la comprensión de la arquitectura de la tecnología, sus capas y la interacción que hay entre ellas. En el diseño de un sistema IoT la arquitectura a seguir es importante, para lograr una solución integral. Las diferentes arquitecturas IoT, se han presentado con el objetivo de separar en capas las funciones fundamentales de la red como también para asegurar durante el diseño los requerimientos principales del sistema para que sea a gran escala.

Estos requerimientos son la escalabilidad, debido a la cantidad de dispositivos a conectar en una red IoT es en el orden de miles. La seguridad, donde es fundamental encriptación en los datos intercambiados entre los dispositivos, protección y almacenamiento de datos de forma correcta y la aplicación de políticas de seguridad en la red. También, considerar que los dispositivos tienen capacidades limitadas, por lo cual la mayor cantidad de dispositivos que integran la red, poseen consumo bajo de potencia, capacidad de computo limitado y baja transferencia de datos. Tecnologías de comunicación inalámbrica de largo alcance, para la conectividad entre los diferentes dispositivos de la red. Por último, la cantidad de datos, la gran cantidad de dispositivos en la red generaría un gran volumen de datos, el análisis de estos datos es importante a considerar en la arquitectura.

Actualmente existen diferentes arquitecturas IoT presentadas por diferentes organizaciones como: OneM2M, IoT Standardized Architecture, la IoT World Forum (IoTWF)

Capítulo 2. Diseño de Aplicaciones IoT

Standardized Architecture, entre otras. A continuación, se estudia dos de ellas que se consideran de mayor relevancia.

2.1.1. Arquitectura Estandarizada por el IoT World Forum (IoTWF)

Del Estandar [5] se explican cada una de las capas que integran esta arquitectura. Referrirse a la figura 2.1 para observar la arquitectura estandarizada del IoTWF:

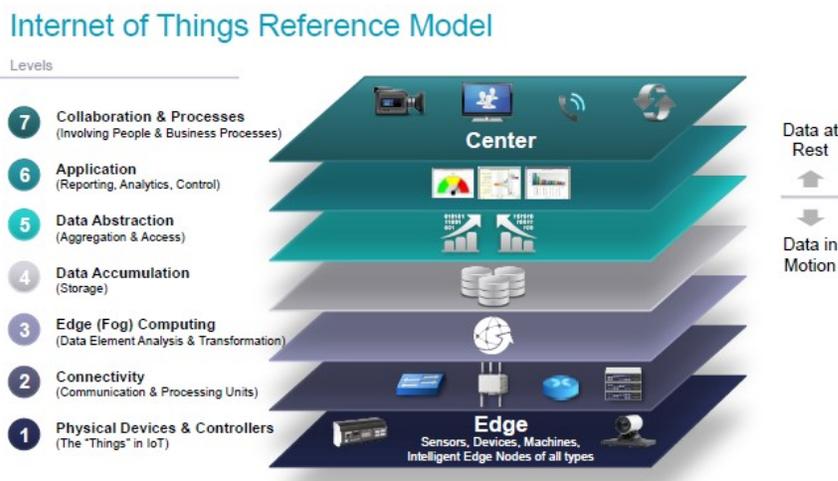


Figura 2.1: Capas según el IoT World Forum (IoTWF) Standardized Architecture (fuente: [5]).

- Capa 1 Dispositivos físicos y Controladores: comprende la gran cantidad de dispositivos finales conectados a la red, estos dispositivos son capaces de generar datos, convertir señales analógicas a digital y además tener la capacidad de conectividad para ser controlados por la red.
- Capa 2 Conectividad: La función principal de esta capa es la transmisión confiable y oportuna de los datos, la conectividad incluye la comunicación entre dispositivos de la capa 1 y la red, además entre la red y la información procesada en la Capa 3.
- Capa 3 Computación de Borde (Edge Computing): el objetivo de esta capa es la reducción de datos y la conversión del flujo de los datos en información lista para ser almacenada y procesada por las capas superiores. La capa cumple la función de evaluación y reformato de los datos para procesamiento en niveles más altos, filtrado de datos y evaluar datos para notificar alertas u otras acciones.
- Capa 4 Acumulación de Datos: esta capa tiene como objetivo la captura y almacenamiento de datos, dejándolos disponibles para ser utilizados por aplicaciones cuando sea necesario. La Capa 4 interviene en la gestión y procesamiento de estos datos, evaluando si son relevantes para niveles superiores y determinando su almacenamiento en disco o en una memoria específica. También se encarga de la organización de los datos y del tipo de almacenamiento requerido, ya sea un sistema de archivos, un sistema de big data o una base de datos. Finalmente, decide si los datos deben ser recombinados o reprocesados.

2.1. Arquitectura de Red

- Capa 5 Abstracción de Datos: está encargada de la reconciliación de los múltiples formatos de los datos, asegurando la consistencia de los mismos. Consolida los datos en un solo lugar o empleando virtualización en almacenes de datos múltiples, también brinda protección usando autenticación y autorización correspondiente.
- Capa 6 Aplicación: es el lugar donde se da la interpretación de los datos y se pueden encontrar distintas aplicaciones para funciones específicas como el control de dispositivos o el monitoreo de datos, así también como aplicaciones analíticas que permiten interpretar datos y generar reportes para la toma de decisiones.
- Capa 7 Colaboración y Procesamiento: se enfoca en potenciar a las personas a realizar mejor su trabajo, esto quiere decir que la información entregada por la Capa 6 tiene realmente valor cuando es analizada para generar una acción, por lo tanto, las personas tienen que tener la disponibilidad de comunicarse y colaborar entre ellas usando la red tradicional de Internet, para dar el valor correspondiente a la información generada por la red IoT.

La arquitectura presentada anteriormente ha servido de base para otros modelos de arquitectura IoT, una de ellas es la Arquitectura IoT Simplificada [2], explicada a continuación.

2.1.2. Modelo Arquitectura IoT Simplificada

En esta arquitectura se presenta dos stacks paralelos: IoT Data Management and Compute Stack, sección de computación y gestión de datos IoT, y la Core IoT Functional Stack, sección del núcleo funcional IoT, donde ambas están integradas por tres capas, de esta forma obteniendo un par de bloques de tres capas, además con la función de seguridad disponible en todo el bloque IoT [3].

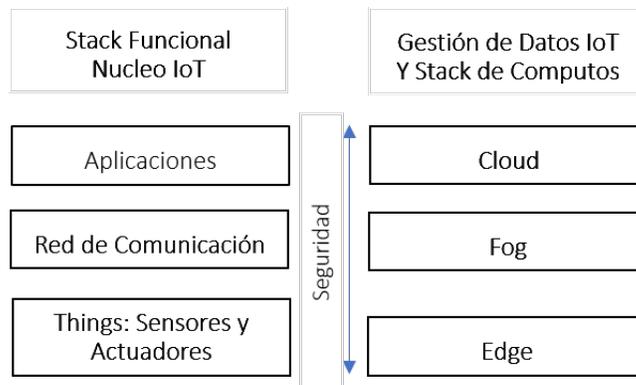


Figura 2.2: Arquitectura IoT Simplificada (fuente: [3]).

La Capa Things: Sensores y Actuadores, comprende a los sensores y actuadores, es decir los dispositivos físicos implementados en sitio los cuales se encargan de proporcionar la información necesaria para la red IoT.

Capítulo 2. Diseño de Aplicaciones IoT

La Capa de Red de Comunicación especifica la tecnología de comunicación utilizada por los dispositivos, donde se debe especificar la red de acceso que para el caso de comunicación inalámbricas se tiene por ejemplo IEEE 802.15.4 o LoRa, también especifica la puerta de enlace o Gateway que sirve de punto central para los nodos, el mismo recibe la información y la envía a una estación central para que sea procesada, empleando un medio o conexión de mayor ancho de banda. Otro elemento importante son los protocolos de transporte de red, aquí se emplean los ya conocidos IP, TCP y UDP. Para el intercambio de datos con los sensores, especifica los protocolos MQTT y CoAP. Capa de aplicación, comprende el procesamiento de datos recibidos, para así analizar y tomar la decisión más inteligente, seguidamente enviar las acciones a los dispositivos para que ajusten sus funciones a las condiciones ambientales o del sistema que se precisa.

La Gestión de Datos IoT y Stack de Computos es un bloque muy importante ya que el volumen de datos que genera una red IoT es grande, esto debido a la cantidad de dispositivos que se pueden encontrar. Comprende tres elementos para realizar análisis de datos en distintos puntos de la red IoT, para evitar el envío de todos los datos a la nube, permitiendo un análisis rápido y eficiente de los datos, así como también la gestión del ancho de banda de la red de una forma más eficiente.

La Computación de Borde (Edge Computing) se refiere a la capacidad de un dispositivo final, o generalmente de un dispositivo intermedio cercano a él, de realizar análisis de datos en un nivel local para facilitar la toma de decisiones. Muchos dispositivos inteligentes poseen capacidad de procesamiento suficiente para ejecutar estas tareas, lo que permite una respuesta más rápida ante eventualidades en el punto de la red donde se encuentra el dispositivo.

La Computación de Niebla (Fog computing), brinda soluciones para la distribución de datos en un sistema IoT, llevando la gestión lo más cerca del borde de la red IP, esto se puede efectuar habilitando el análisis de datos cerca del lugar de donde se recopila como en routers, controladores industriales, servidores, gateway lo cual minimiza los tiempos de latencia en la red.

Estos sistemas son complementarios para la nube (cloud), que sería el nivel más alto para el análisis de datos, por lo cual lo ideal es utilizarla cuando se precisan recursos de cómputos mas profundos y que generan tiempos de procesamiento más altos.

2.2. Dispositivos IoT

En la red de IoT el sistema comienza con el sensado o la medición de una variable física, la cual es procesada en un mismo dispositivo o en otro posteriormente, para informar o enviar un comando para que una acción sea ejecutada por un elemento final o actuador, que este instalado en el sistema. También, los datos generados por un sensor son recolectados y almacenados para ser analizados posteriormente, lo cual generará acciones finales o decisiones a implementar. A continuación, se explica las principales características de los dispositivos físicos, conocidos como “Things” o “Cosas”, que integran una red IoT.

2.2.1. Sensores y Actuadores

Los sensores detectan cambios en un entorno físico, como temperatura, presión o luz, y convierten estas variaciones en señales eléctricas o digitales que pueden ser procesadas por un dispositivo o sistema inteligente. Los actuadores, por otro lado, reciben señales de control y ejecutan acciones físicas en el entorno, como abrir una válvula o mover un motor, permitiendo una interacción directa y dinámica con el sistema. En el Internet de las Cosas (IoT), se conectan una gran cantidad de sensores, por lo que es fundamental conocer los diferentes tipos de sensores, sus aplicaciones, principios de funcionamiento y otras características clave. Esto permite a los ingenieros seleccionar el sensor más adecuado para cada necesidad específica, además, identificar posibles fallas o mejoras en caso de obtener mediciones incorrectas. En esta sección se describen varios sensores de aplicación en la industria y el hogar.

Sensores de Temperatura

Altamente difundidos están presentes prácticamente en todos lados, en IoT podemos encontrar termostatos inteligentes, sistemas logísticos de almacenamiento frío, refrigeradores, medidores en maquinaria, entre otros. Los principales sensores son las termocuplas, los detectores de temperatura por resistencia (RTD) y los termistores [6].

Sensores de Presión

Son utilizados para medir la fuerza que ejerce un líquido o un gas, la presión es una fuerza por unidad de superficie y puede expresarse en unidades como pascal, bar, atmósferas, kilogramos por centímetro cuadrado y psi [6]. Para la medición de presión existen elementos mecánicos como el barómetro, el tubo de Bourdon, el diafragma, el fuelle entre otros. Elementos electromecánicos los cuales utilizan componentes como los mencionados anteriormente en combinación con elementos resistivo, magnéticos, capacitivos, extensiométricos o piezoeléctricos, los cuales permiten traducir la variación mecánica en señal eléctrica, ejemplo de esto son las galgas extensiométricas. Otros son los elementos electrónicos de vacío utilizados para las medidas de altos vacío como el medidor McLeod, el termopar, el cátodo frío entre otros.

Sensores de Flujo

Se emplea para la medida de volumen (flujo másico) o la velocidad de flujo de un fluido que pasa a través de un conducto por un período de tiempo dado. Existen varios métodos para medir el caudal, como: presión diferencial (placa de orificio, tubo Venturi, entre otros), área variable como el rotámetro, velocidad como el medidor de turbina y el medidor por ultrasonido, y por tensión inducida que son los medidores magnéticos [6].

Capítulo 2. Diseño de Aplicaciones IoT

Sensores de Nivel

Los cuales son utilizados para la medición de la altura del nivel de líquidos o sólidos. Entre los sensores más utilizados tenemos los medidores de presión diferencial, sensores por ultrasonido y sensores por microondas.

Otros sensores

Sensores de posición, sensores de velocidad, sensores de movimiento, sensores de humedad, sensores de luz, sensores de radiación, medidores de niveles de CO₂, sensores acústicos, biosensores, medidores de pH, entre otros.

Actuadores

También conocidos como elementos finales de control, estos actúan de acuerdo a una señal recibida bien sea eléctrica o digital para así ejecutar una acción física que puede ser un movimiento, una fuerza o un cambio de estado. En la industria el actuador por excelencia es la válvula de control, sin embargo, como elementos finales también se pueden mencionar los motores eléctricos, micro válvulas, transistores bipolares, entre otros.

Sistemas micro electromecánicos (MEMS)

Dispositivos que poseen tamaño reducido, bajo costo y son fabricados en masa, por ende, son muy atractivos para soluciones IoT. Algunos tipos de sensores MEMS son los acelerómetros y giroscopios, que normalmente son utilizados para posicionamiento y seguimiento de movimiento. Otros son los micrófonos que se utilizan para la detección de sonidos y vibraciones, implementados para el monitoreo del estado y predecir el mantenimiento de una máquina. Hoy en día se encuentran distintos dispositivos MEMS lo cuales pueden ser utilizados en aplicaciones como agricultura de precisión, ciudades inteligentes, industria 4.0, entre otros.

2.2.2. Dispositivos Inteligentes (Nodos)

Son los elementos fundamentales en toda red IoT, los cuales permiten transformar una red en un sistema inteligente de objetos, estos tienen la capacidad de aprender del medio en el cual están conectados, además la capacidad de interactuar entre ellos. Los dispositivos inteligentes aparte de poseer sensores y activar elementos actuadores, tienen también capacidad de procesamiento y habilidad de comunicación lo que les permite formar parte de una red que trabaje de forma coordinada y eficiente, permitiendo de esta forma crear aplicaciones inteligentes que dan solución a un problema en particular. Un dispositivo inteligente está formado por los siguientes bloques:

La unidad de procesamiento es el elemento principal, está encargado de procesar y analizar los datos obtenidos por el sensor, además es la encargada de controlar el funcionamiento general del dispositivo, así como la unidad de comunicación, la unidad de

2.2. Dispositivos IoT

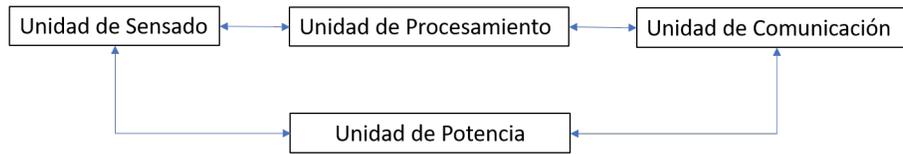


Figura 2.3: Diagramo de Bloque de un Nodo.

alimentación y finalmente da las órdenes al elemento final de control. En los nodos por su tamaño, flexibilidad, bajo consumo y simplicidad de programación son empleados microcontroladores como unidades de procesamiento.

La unidad de comunicación es la encargada de interconectar de forma alámbrica o inalámbrica un dispositivo inteligente con otros o con un gateway, de esta forma creando una red inteligente. Para la comunicación inalámbrica se utilizan antenas. La función principal de una antena de comunicación es convertir las señales eléctricas en ondas electromagnéticas que se propagan a través del espacio, o viceversa, convertir las ondas electromagnéticas captadas del espacio en señales eléctricas que pueden ser procesadas por el dispositivo receptor. Muchos dispositivos IoT son diseñados y fabricados con antenas planas en forma de “F” invertida (Planar Inverted-F Antenna, PIFA), en el documento [7] se presenta un estudio de diseño de este tipo de antenas.

La unidad de sensores está conformada por sensores como los descritos anteriormente y la unidad de alimentación se desarrolla a continuación.

2.2.3. Sistemas de Alimentación

Los sistemas de alimentación, para sensores y dispositivos IoT, representan un gran desafío, especialmente para dispositivos desplegados en zonas rurales o remotas, donde sería difícil tener una fuente de alimentación conectada a una red eléctrica. También dependiendo de la aplicación puedan ser instalados bajo el mar o embudidos dentro de estructuras de concreto, lo que haría muy difícil la sustitución de su fuente de alimentación. Por lo tanto los sistemas de alimentación y su gestión son de interés para los desarrolladores de sistemas IoT. De forma general para los dispositivos IoT (nodos) se utilizan baterías de iones de litio (Li-ion), debido a su densidad de energía y su duración.

Un dispositivo alimentado con batería puede tener una duración entre 5 y 10 años, para ello se debe implementar una gestión eficiente del consumo de potencia, esto se puede lograr implementando funciones en los dispositivos como el modo suspensión o el modo de consumo ultra bajo, para así tener un funcionamiento óptimo de los nodos con periodos dormidos y períodos de activación cuando se requiera monitorear el estado de alguna variable o enviar algún dato necesario. Además, de ser posible combinar con otras fuentes de energía como la energía solar, sistemas piezoeléctricos, entre otros.

Para alimentar un Gateway en un sitio sin suministro de energía eléctrica, se puede utilizar energía solar junto con una batería para respaldo. En este sistema de energía se emplean celdas solares, y un aspecto clave a considerar es la incidencia de la luz

solar, ya que una mayor exposición permite optimizar la eficiencia del colector solar.

2.3. Red de Acceso y Comunicación

En los sistemas IoT domina la comunicación y el envío de datos utilizando sistemas inalámbricos, en la sección a continuación se profundizará en el estudio de la Radiofrecuencia (RF) y propagación. Verificando los aspectos que influyen en la transmisión inalámbrica como las pérdidas en el espacio libre, los mecanismos de propagación, las interferencias, entre otros aspectos a considerar para llevar a cabo un cálculo de enlace o link budget en inglés, que permita asegurar una comunicación eficiente entre nuestros dispositivos.

2.3.1. Radiofrecuencia (RF) y Propagación

En sistemas inalámbricos al estudiar la propagación se toma como base un modelo ideal. El transmisor y receptor se encuentran separados a una distancia (R), donde ambos tienen línea de vista y el transmisor envía una señal a una potencia (P_t). Las ondas de radio se propagan sin ninguna obstrucción o interferencia a una determinada frecuencia, las cuales son recibidas por el receptor.

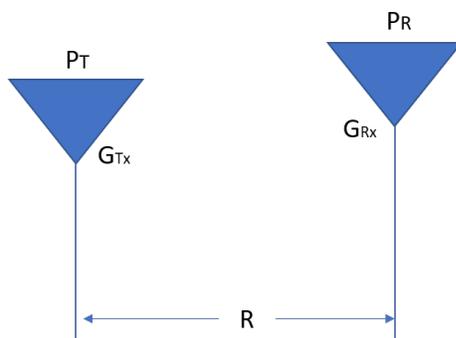


Figura 2.4: Modelo Básico de Propagación.

De este simple modelo se obtiene la ecuación general de Friss:

$$P_r = P_t G_{Tx} G_{Rx} \frac{\lambda^2}{(4\pi R)^2} \quad (2.1)$$

Donde P_r es la Potencia Recibida, P_t es la Potencia Transmitida, G_{Tx} es la Ganancia de la Antena Transmisora, G_{Rx} es la Ganancia de la Antena Receptora y R la distancia entre Tx y Rx.

Otra forma de expresar la ecuación de Friss en decibelios (dB):

2.3. Red de Acceso y Comunicación

$$P_r = P_t + G_{T_x} + G_{R_x} + 20 \log_{10} \frac{\lambda}{(4\pi R)} \quad (2.2)$$

Pérdidas en el Espacio Libre

Las pérdidas de camino, son la reducción de la densidad de potencia (atenuación) de una onda electromagnética a lo largo de su propagación. Un efecto importante responsable de la pérdida de trayectoria a gran escala es la dispersión natural de la potencia radiada debido a la pérdida en el espacio libre [8], en inglés conocido como Free Space Path Loss (FSPL).

$$FSPL(dB) = 20 \log_{10} \frac{(4\pi R f)}{c} \quad (2.3)$$

$$FSPL(dB) = 20 \log_{10}(R) + 20 \log_{10}(f) - 147,55 \quad (2.4)$$

Donde f es la frecuencia, R es la distancia entre Tx y Rx y c la velocidad de la luz.

En una situación real de propagación en nuestro camino se pueden presentar obstáculos, que puedan afectar nuestra señal transmitida. Por lo tanto, existen diferentes mecánicas de propagación que se puede ver a continuación.

Mecanismos de Propagación

Básicamente se pueden distinguir cuatro mecanismos de propagación: reflexión, transmisión, difracción y dispersión [9].

Reflexión: ocurre cuando una onda electromagnética procedente de un medio 1 impacta sobre una superficie que divide este medio de un medio 2; luego aparece una onda reflejada (en el medio 1) y una onda transmitida (o también llamada refractada) (en el medio 2). Esa onda que impacta sobre un objeto genera múltiples ondas que en ciertas circunstancias puede contribuir de forma positiva o negativa en la recepción de la señal.

Transmisión: Esto permite que una onda electromagnética (la señal transmitida) llegue a la antena receptora (Rx) tras atravesar ciertos objetos. En general, al pasar a través de estos objetos, la señal experimenta una pérdida de energía; sin embargo, en algunos casos, puede llegar a la antena Rx con un nivel de energía considerable.

Difracción: aparece cuando entre Tx y Rx hay un objeto con bordes o irregularidades agudas. Típico en un escenario urbano, los bordes de los edificios causan difracción. Este mecanismo genera una “curvatura” de la onda alrededor del edificio obstructor haciendo posible alcanzar una antena Rx detrás de él, en una situación donde no existe línea de vista.

Dispersión: aparece cuando una onda impacta sobre una superficie rugosa, entonces la energía reflejada se propaga en varias direcciones.

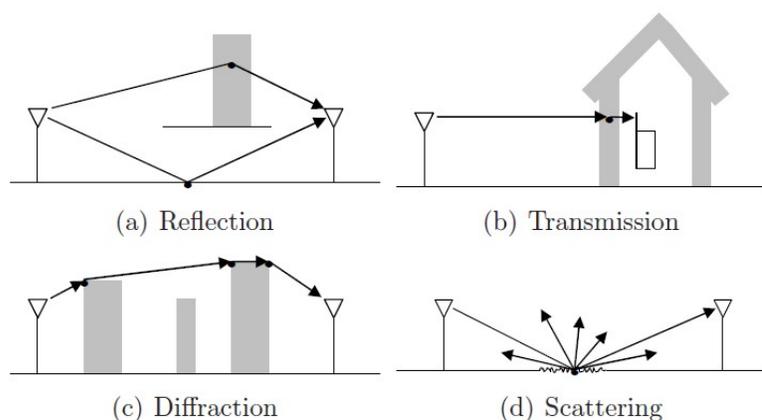


Figura 2.5: Mecánismo de Propagación (fuente: [9]).

El efecto causado por obstáculos de atenuar la potencia entre el transmisor y el receptor debido a la absorción de energía durante la transmisión a través del objeto, es conocido como sombreado (shadowing). Estas pérdidas por absorción deben ser consideradas en el diseño y cálculo de un enlace por radio.

$$R_x(dB) = T_x(dB) - Pérdidas(dB) \quad (2.5)$$

2.3.2. Estimación o Cálculo de un Enlace Inalámbrico

La estimación de un enlace es un cálculo que nos permite cuantificar el rendimiento de un enlace. Este cálculo se realiza para evaluar y predecir varios aspectos clave de la comunicación inalámbrica, como la potencia de señal esperada, la atenuación de la señal, la ganancia de antena, la pérdida de trayectoria, la interferencia y la relación señal-ruido (SNR).

En el diseño, pruebas o selección de equipos se puede considerar aumentar el nivel de potencia en transmisión para cumplir con los requisitos de rango, pero esto puede violar el cumplimiento normativo o afectar la vida útil de la batería del dispositivo. La opción más adecuada es la selección de un equipo con buen nivel de sensibilidad del receptor y principalmente antenas con buena ganancia y adaptación de impedancia.

2.3.3. IoT Gateway

Gateway o puerta de enlace son dispositivos utilizados en comunicación para enviar datos o información entre distintos equipos en una misma red de telecomunicación o en redes diferentes. En una red IoT el Gateway se utiliza para concentrar diferentes datos provenientes de sensores y dispositivos inteligentes, para su procesamiento como también el envío a diferentes servidores dentro de la red, normalmente estos equipos

2.4. Red de Datos y Transporte

tienen una conexión WAN para el envío de la información.



Figura 2.6: IoT Gateway.

La comunicación entre el gateway y los nodos es a través de sistemas inalámbricos, por lo que el cálculo del enlace es importante para estimar unos niveles de señal adecuados para la interconexión entre los dispositivos. En redes IoT que utilizan por ejemplo tecnología LoRa/LoRaWAN, en los gateway se instalan antenas omnidireccionales colocadas en zonas con una altura específica, que permita línea de vista, con la finalidad de obtener una buena cobertura en la zona donde se van a desplegar los sensores. Otro caso es una red celular con NB-IoT, la puerta de enlace son las radios base las cuales son instaladas de acuerdo a un estudio de enlace y cobertura, de forma que puedan cubrir un mayor espacio geográfico proveyendo comunicación.

Procesamiento de Borde

Existen gateways con capacidad de proveer recursos de procesamiento. Los equipos que cuentan con estas capacidades permiten realizar lo que se conoce como Procesamiento de Borde (Edge Processing). Esta funcionalidad de procesamiento, permite la recopilación y análisis de datos proveniente de sensores, por parte del Gateway, sin necesidad de enviarlo a los servidores de la red.

Uno de los beneficios de esta función es realizar el procesamiento y análisis de los datos cerca de las instalaciones donde se encuentran los sensores. Además, permite ejecutar acciones en elementos de control directamente sin necesidad de enviar los datos a los servidores principales de la red usando la conexión WAN. Para realizar estas operaciones los gateways con capacidad de procesamiento cuentan con software para realizar la programación necesaria para ejecutar las tareas que requiera el sistema.

2.4. Red de Datos y Transporte

La Capa de red o tecnología de red, usa principalmente el protocolo Internet Protocol (IP). El protocolo IP es el principal en las redes de ordenadores y la comunicación de Internet. Para las redes IoT el protocolo de red idóneo también es IP, debido a

Capítulo 2. Diseño de Aplicaciones IoT

las ventajas que ofrece por ser un estándar abierto. Permite su implementación en múltiples industrias y múltiples medios. Una gran ventaja es la escalabilidad, con IP se pueden integrar miles de sensores en una misma red, gracias a la implementación de IPv6. Esta versión permite proveer un mayor rango de direcciones frente a IPv4, lo cual es fundamental considerando la masividad de dispositivos que va a tener una red IoT.

La capa de transporte es soportada por los protocolos Transmission Control Protocol (TCP) y el User Datagram Protocol (UDP). TCP es un protocolo orientado a conexión por lo que requiere establecer una sesión entre la fuente y el destino para poder intercambiar datos, dentro de sus principales características se destaca la capacidad de enviar volúmenes de datos en pequeños paquetes, garantiza la correcta secuencia de envío de los paquetes, además provee control de flujo y ajuste de la velocidad de envío, y puede retransmitir paquetes perdidos. Por otro lado, UDP es un protocolo de comunicación no orientado a conexión y sin mecanismos de confiabilidad, lo cual significa que no requiere establecer una sesión previa para el envío de datos. Esto permite un intercambio de datos rápido entre el emisor y el receptor; sin embargo, no garantiza la entrega de los paquetes, ni ofrece control sobre la integridad de los datos enviados. El beneficio principal de UDP es el rendimiento y la latencia, por lo que es un protocolo idóneo para tráfico de datos en tiempo real.

Para una aplicación específica IoT es importante el protocolo de transporte que se usa y su integración con las capas del nivel bajo y alto de la pila de protocolos. Normalmente aplicaciones industriales son implementadas con el protocolo TCP, sin embargo, existen aplicaciones donde el protocolo UDP es empleado en dispositivos IoT de bajo recursos, que solo puedan enviar unos cuantos bytes, por lo que UDP es más flexible para estos casos por ser un protocolo más ligero que TCP.

2.5. Transporte y Gestión de Datos IoT

En el nivel de aplicación para IoT se han desarrollado protocolos que mejor se adaptan a dispositivos o nodos en una red, entre estos protocolos se mencionan Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) y Constrained Application Protocol (CoAP).

2.5.1. Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)

El Protocolo MQTT atendiendo a la definición indicada en [10], es un protocolo de mensajería de publicación/suscripción, extremadamente simple y liviano, diseñado para dispositivos de bajos recursos y redes con poco ancho de banda, alta latencia o poco confiables. Los principios de diseño son minimizar el ancho de banda de la red y los requisitos de recursos del dispositivo, al mismo tiempo que intentan garantizar la confiabilidad y cierto grado de seguridad de la entrega. Estos principios también hacen que el protocolo sea ideal para Internet de las cosas y para las aplicaciones móviles donde el ancho de banda y la energía de la batería son importantes.

La arquitectura de MQTT funciona como un sistema cliente/servidor ver Fig. 2.7. Los sensores serían los clientes que se conectan por medio de TCP a un servidor que es conocido como Broker que tiene la función de ser un sistema intermediario entre

2.5. Transporte y Gestión de Datos IoT

los sensores y los usuarios finales. En el servidor cada mensaje recibido es publicado en una dirección conocida como un Topic (tópico), en el cual los usuarios finales que serían también clientes, se subscriben para recibir u observar dicho mensaje publicado por el broker.

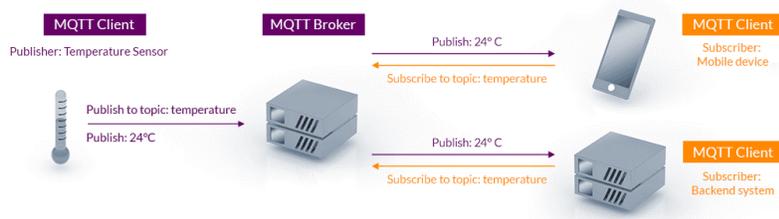


Figura 2.7: Arquitectura MQTT (fuente: [11]).

MQTT funciona siguiendo el modelo publicación/subscripción (publish/subscribe) como ya se mencionó. Este modelo separa a un cliente que está transmitiendo un mensaje de otro cliente que recibe el mensaje, mediante el MQTT broker. En Fig. 2.8 se puede ver un ejemplo en el cual un cliente se conecta al broker y se suscribe en un tópico conocido como temperature/roof, por otra parte, se encuentra el dispositivo que publica la temperatura usando el tópico definido como temperture/roof. El valor transmitido es recibido por el cliente suscrito a dicho tópico mientras este se encuentre conectado al broker.

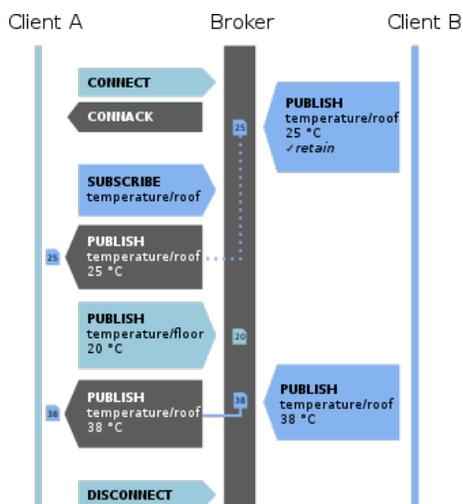


Figura 2.8: Modelo MQTT de publicación/subscripción (fuente: [12]).

2.5.2. Constrained Application Protocol (CoAP)

CoAP es desarrollado por el grupo del IETF Constrained RESTful Environments, este se adapta al framework de IoT, el mismo define una forma sencilla y flexible de

Capítulo 2. Diseño de Aplicaciones IoT

manipular sensores y actuadores para la gestión de datos y dispositivos, CoAP a su vez está diseñado para trabajar sobre el protocolo UDP, permitiendo además el uso DTLS (Datagram Transport Layer Security) y puede funcionar tanto con IPv4 que con IPv6 [10].

CoAP es un protocolo similar a HTTP, por lo que comparte una sintaxis similar. Usa direccionamiento de acuerdo a la estructura URI (Universal Resource Identifier), la forma típica de URI en CoAP es: `coap://host[:port]/[path][?query]` [10]. La diferencia con HTTP es que tiene requerimientos de sistemas menores debido a su diseño ligero, además es un protocolo no orientado a conexión y realiza el intercambio de mensajes de forma asíncrona. De igual forma a HTTP emplea los métodos GET, PUT, POST y DELETE para colocar solicitudes sobre recursos.

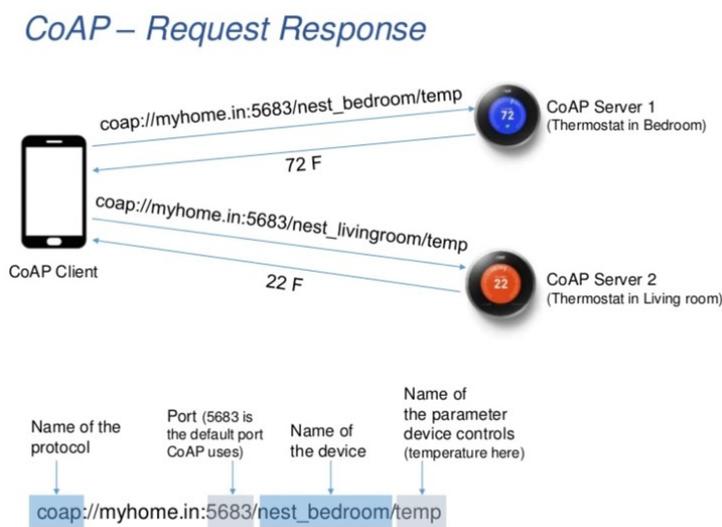


Figura 2.9: Protocolo CoAP (fuente: [13]).

El protocolo CoAP es compatible con 4 tipos de intercambio de información:

- Acknowledgments (ACK): confirman un mensaje CON, también pueden confirmar y enviar la información en una misma transmisión.
- Confirmable (CON): son mensajes que se envían con solicitud de una respuesta de confirmación de recepción del mensaje (ACK). Un mensaje CON puede reenviarse en intervalos hasta que llega la confirmación de envío exitoso o un reset (RST).
- Non-confirmable (NON): son mensajes que no tienen garantía de entrega exitosa. No solicitan confirmación (ACK).
- Reset (RST): los mensajes de reinicio sirven para confirmar la recepción de un mensaje CON o NON, pero que no puede ser procesado. También un mensaje RST puede entregarse con alguna otra data.

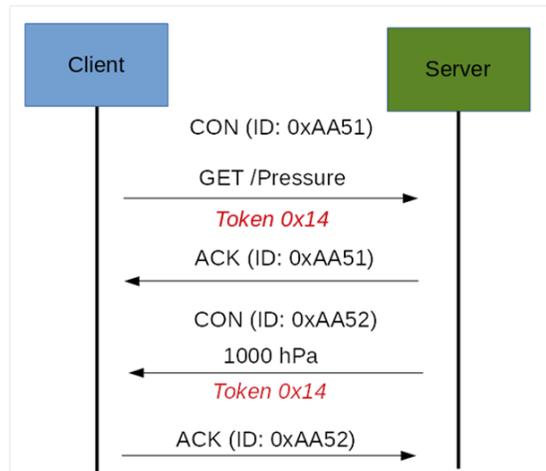


Figura 2.10: Intercambio de Información con Protocolo CoAP (fuente: [13]).

2.5.3. Comparación entre MQTT y CoAP

Al estudiar las características de ambos protocolos se verifica que requieren pocas cantidades de paquetes de red, permitiendo una optimización en el consumo de energía, por lo que son ideales para su uso en dispositivos IoT. De todas formas, en la tabla 2.1 se presentan las diferencias principales entre ambos protocolos.

Tabla 2.1: Comparación entre MQTT y CoAP

MQTT	CoAP
Modelo publicación y suscripción	Modelo Request y Response
Envío de mensajes con Broker	Envío de mensajes es tipo unicast
Utiliza TCP para la comunicación	Utiliza UDP para la comunicación
No tiene etiquetado de mensajes	Define correctamente los mensajes

En resumen CoAP y MQTT son protocolos de capa de aplicación diseñados específicamente para entornos de IoT, aunque responden a distintos requisitos. CoAP es adecuado para entornos con recursos limitados, ya que emplea un mecanismo de solicitud-respuesta sobre UDP, lo cual lo hace apropiado para aplicaciones con restricciones de ancho de banda y consumo de energía. Por otro lado, MQTT está orientado a una comunicación confiable y de bajo ancho de banda mediante el paradigma de publicación-suscripción sobre TCP, siendo ideal para la comunicación M2M (Machine-to-Machine) en entornos de IoT.

2.6. Gestión y Análisis de Datos

Para la gestión y análisis de datos IoT, se utilizan plataformas que integran un conjunto de componentes que permiten la visualización y análisis de los datos obtenidos de la

Capítulo 2. Diseño de Aplicaciones IoT

red IoT. Entre los componentes, integra aplicaciones para mostrar datos en tiempo real, estado actual de actuadores y ejecución de acciones mediante comandos. En esta sección se explican de forma general dos plataformas. Una plataforma usada hoy en día en muchos sistemas IoT es Fiware, actualmente se utiliza en la red de ciudad inteligente de la intendencia de Montevideo. Otra plataforma es The Things Industries concebida inicialmente como La Red de las Cosas (The Things Network, TTN) y fue desarrollada para el uso e implementación de la tecnología LoRa/LoRaWAN.

2.6.1. Fiware

Fiware¹ es un plataforma abierta y estándar para el desarrollo de aplicaciones y servicios inteligentes basado en Internet, con gran relevancia en áreas sociales y económicas. Esta plataforma permite habilitar funciones que facilitan la conexión IoT, además posee la capacidad de procesar y analizar grandes volúmenes de datos en tiempo real.

Este sistema propone una arquitectura basada en cuatro componentes, denominados Generic Enablers (GE). Cada GE a su vez está integrado por diversas APIs y aplicaciones las cuales pueden ser incluidas de acuerdo a las necesidades de la aplicación. Algo importante de Fiware es que presenta la idea de tener un estándar único para recopilar, gestionar, publicar e informar sobre los cambios en la información que está siendo recolectada por la plataforma [14]. Este estándar se llama Next Generation Service Interface (NGSI).

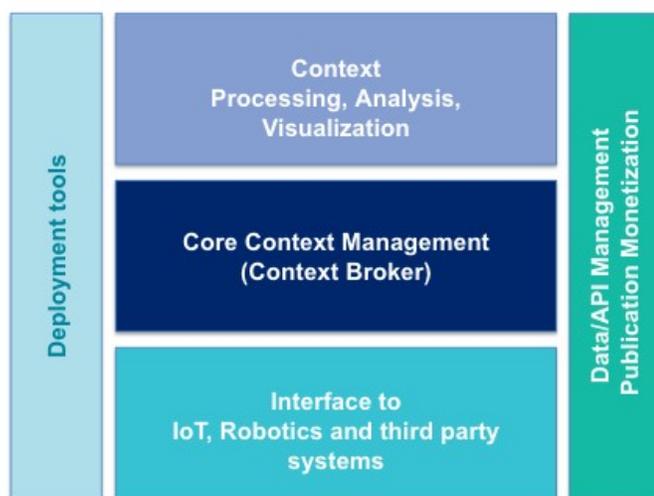


Figura 2.11: Bloque de Sistemas de Fiware (fuente: [14]).

¹Referencia: <https://www.fiware.org/>.

Interfaz IoT, Robots y Sistemas de Terceros

Componente cuya principal función es permitir y simplificar la comunicación con dispositivos IoT, Robots y sistemas de terceros. Además, permite recolectar información de contexto valiosa y generar acciones como respuesta a actualizaciones en el contexto. Uno de los GEs fundamental en este grupo es el Integrated Data Acquisition System (IDAS).

IDAS está formado por los IoT Agents, cuya función principal es traducir los protocolos específicos de IoT de los dispositivos (Ultralight2.0, MQTT, LWM2M/CoAP, etc) al protocolo de información de contexto NGSI. Al usar los agentes, los dispositivos se representan en FIWARE como entidades NGSI en un Gestor de Contexto (Context Broker).

Gestor de Contexto

Componente con capacidad de almacenar, acceder, procesar y analizar datos que conforman una aplicación inteligente, también tiene la funcionalidad de permitir suscripciones a los cambios en la información permitiendo a clientes suscritos recibir datos en base a condiciones completamente personalizables. El Context Boker su implementación es del tipo Publish/Subscribe Context, el mismo mantiene representaciones virtuales de los dispositivos físicos. Esto le da la capacidad de mediar entre los sensores y los consumidores de los datos que éstos generan.

En Fiware la implementación del Context Broker se conoce como Orion y el mismo se apoya con una base de datos MongoDB para almacenar los últimos datos generados por los dispositivos. Si se quiere almacenar el histórico de los datos generados por los dispositivos es necesario utilizar algún GE que lo permita y conectarlo con el Context Broker.

Procesamiento, Análisis y Visualización del Contexto

Componente cuyo objetivo es procesar, analizar y visualizar información de contexto. Estos componentes implementan diversas funcionalidades que se adaptan a distintos casos de uso. Actualmente hay disponibles varios GE que facilitan el procesamiento, análisis o visualización de información. Por ejemplo, GE que permiten la construcción de paneles y gráficos para representar la información recibida. Con la finalidad de implementar el ciclo de retroalimentación esperado en cualquier aplicación “inteligente” [14].

Gestión, Publicación y Monetización de Datos de Contexto

Componentes encargados de brindar funciones de seguridad sobre los componentes de cualquier sistema implementado con FIWARE. Algunas de las funcionalidades provistas por estos módulos son: autenticación, autorización, control de acceso, gestión de publicación de grupos de datos y asignación de precios y tarifas de pago por uso, entre otros [14].

2.6.2. The Things Industries

Es una plataforma IoT desarrollada para el uso e implementación de la tecnología LoRa/LoRaWAN. En su origen fue denominada como The Things Network, hace unos años cambio a The Things Industries² con una versión nueva del sistema conocida como The Things Stack (TTS) [15].

The Things Stack está formado por un conjunto de servidores de red LoRaWAN, componentes críticos para cualquier solución LoRaWAN. TTS es un servidor LoRaWAN de nivel empresarial que incluye las funciones de servidor de red y de servidor de aplicaciones de LoRaWAN. Además, está diseñada para gestionar de forma segura millones de dispositivos LoRaWAN en producción. Su arquitectura se puede ver en la Fig. 2.12.

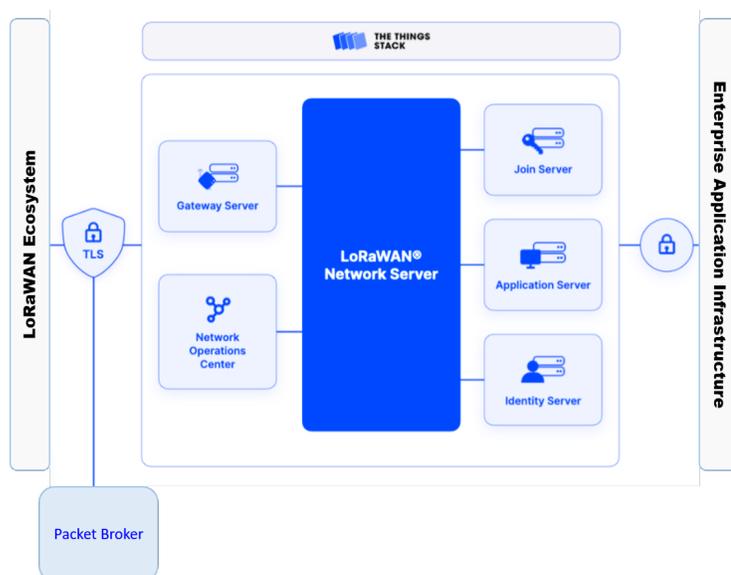


Figura 2.12: The Things Stack (fuente: [16]).

Los componentes principales de TTS de acuerdo a la información en [16], se describen a continuación:

Gestor de Paquetes (Packet Borker)

La función principal del Packet Broker es intercambiar tráfico con otras redes LoRaWAN para compartir cobertura y mejorar el rendimiento general de la red. Para lograr eso utiliza el protocolo LoRaWAN. Packet Broker distingue dos tipos de redes: Forwarders y Home Networks. El primero son redes con puertas de enlace que reenvían mensajes uplink desde los gateways al Packet Broker y mensajes downlink desde el Packet Broker de regreso a los gateways. Las redes domésticas son redes que simplemente contienen dispositivos finales.

²Referencia: <https://www.thethingsindustries.com/>.

2.7. Seguridad en la Red

Servidor Gateway

Mantiene conexiones con puertas de enlace que soportan protocolos de la estación base, UDP, MQTT y gRPC. Su función principal es reenviar el tráfico uplink a los servidores directa o indirectamente y también programar el tráfico downlink en las puertas de enlace.

Servidor de Red (Network Server)

Se encarga de manejar la capa de red LoRaWAN, incluidos comandos MAC, parámetros regionales y el componente Adaptive Data Rate (ADR) o velocidad de datos adaptativa, esto se verá en la sección de la tecnología LoRa/LoRaWAN en el Capítulo 3.

Servidor de Aplicación (Application Server)

Se encarga de manejar la capa de aplicación LoRaWAN, incluido el descifrado y decodificación de datos uplink, las colas downlink incluyendo la codificación y cifrado de datos.

Servidor de Identidad (Identity Server)

Proporciona los registros que almacenan entidades como aplicaciones con sus dispositivos finales, puertas de enlace, usuarios, organizaciones, clientes y proveedores de autenticación. También gestiona el control de acceso a través de membresías y claves API.

Servidor de Asociación (Join Server)

Maneja el flujo de unión de LoRaWAN, incluida la autenticación del servidor de aplicaciones y redes y la generación de claves de sesión.

Centro de Operación de la Red (Network Operations Center)

Proporciona información agregada a un centro de operaciones para una red operada con el sistema The Things Stack [16].

2.7. Seguridad en la Red

La seguridad en IoT se ha convertido en un tema de gran importancia, ya que una red IoT comprende una gran cantidad, de dispositivos o nodos los cuales van a tener acceso

Capítulo 2. Diseño de Aplicaciones IoT

a Internet, lo cual los convierte en un punto o una puerta de entrada para ataques de hackers, afectando la red, el sistema o al dispositivo en sí. Dentro de Internet existen distintos tipos de amenazas como Distributed Denial of Service (DDoS), Man-in-the-Middle Attack (MITM), botnets, dictionary attack, rootkit, entre otros. Ataques que pueden ser perpetrados a través de una conexión abierta en un sensor o dispositivo inteligente.

El diseño en la red IoT busca establecer aspectos de seguridad en cada capa del stack de comunicación, por lo cual se entiende la necesidad de aplicar sistemas de seguridad en el dispositivo físico, en el sistema de comunicación, en la red como también en las aplicaciones que se disponga en la Internet. Una técnica de seguridad en dispositivos es el establecimiento de una raíz de confianza. Root of Trust (RoT) es un proceso de arranque validado por hardware que garantiza que el primer código de operación ejecutable se inicie desde una fuente inmutable. Este es el ancla del proceso de arranque que posteriormente desempeña un papel en el arranque del resto del sistema desde BIOS hasta el sistema operativo y la aplicación. Un RoT es una defensa de base contra un rootkit.

Gestión de claves y módulos de plataforma de confianza como las claves públicas y privadas son fundamentales para garantizar un sistema seguro. Estas se pueden usar para mantener, asegurar y administrar otras claves para servicios como el cifrado de disco, el inicio de Root of Trust, la verificación de la autenticidad del hardware y/o software y la administración de contraseñas. Estos incluyen servicios con bloques de cifrado AES, cifrado asimétrico, además sistemas hash SHA-1 y SHA-256.

Capítulo 3

Low Power Wide Area Network (LPWAN)

La tecnología de comunicación LPWAN (Low-Power Wide-Area Network, en español Red de Área Amplia de Baja Potencia) esta diseñada para ser empleada en dispositivos que tienen la necesidad de enviar a largas distancias pequeñas cantidades de datos y usando la mínima cantidad de energía. Las principales áreas de aplicación de las LPWAN son: controladores de luz inteligente, automatización distribuida (smart grid), sistemas de seguimiento de activos, sistemas de medición de agua, detectores de gas y agricultura inteligente.

3.1. Características Principales de la Tecnología

En las tecnologías de comunicación consideradas LPWAN, la topología mayormente empleada es tipo estrella, la cual brinda ventajas a la hora de ahorrar energía, ya que una estación base provee acceso rápido y conveniente cuando es requerido por un dispositivo final. La banda de frecuencia está en el orden del Sub GHz (Europa 433/868 MHz, América 915 MHz). El empleo de bandas no licenciadas disminuye la necesidad de un proveedor de servicio privado para acceder al espectro radioeléctrico. Está diseñada para lograr una capacidad de enlace de $150 \pm 10dB$ permitiendo un rango de unos pocos kilómetros en áreas urbanas a decenas de kilómetros en zonas rurales, en circunstancias óptimas. Por lo que tiene un largo alcance de 5 hasta 40 km en campo abierto.

Adopta dos clases de técnicas de modulación Narrowband y Spread Spectrum Techniques (CSS y DSSS). La mayoría de estos sistemas utilizan el mecanismo de acceso al medio Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA), el cual proporciona escalabilidad mediante técnicas como la diversidad. Además, varias tecnologías LPWAN emplean comunicación multi-canal y multi-antena, lo que permite paralelizar la transmisión hacia y desde los dispositivos conectados. Esto hace que la comunicación sea más resistente a interferencias y permite realizar transmisiones

Capítulo 3. Low Power Wide Area Network (LPWAN)

redundantes.

Tecnología de implementación de bajo costo, reduce la complejidad de hardware a utilizar, como también requerimientos mínimos de infraestructura. Una sola estación base LPWAN conecta muchos dispositivos distribuidos sobre varios kilómetros. También, presenta un bajo consumo eléctrico de los dispositivos (por debajo de los 50 microWatts), permitiendo un tiempo de vida de las baterías de 10 años.

Tiene un rendimiento, dependiendo de la aplicación, de unos pocos cientos o menos de bits por segundo. Ofrece una excelente cobertura incluyendo zonas remotas o áreas rurales, buena penetración dentro de edificios o subsuelos, para la lectura de medidores de potencia, por ejemplo.

Actualmente es la tecnología principal para el desarrollo de proyectos IoT en distintas aplicaciones. A su vez se encuentra en una constante mejora donde los esfuerzos están enfocados en el diseño de dispositivos más económicos, conectividad confiable y en la integración total de aplicaciones de extremo a extremo. Los principales desafíos y direcciones de estudio de la tecnología de acuerdo a [17] son:

- Escalar redes a una gran cantidad de dispositivos.
- Control y mitigación de interferencias.
- Técnicas de modulación de alta velocidad de datos.
- Interoperabilidad entre diferentes tecnologías LPWAN.
- Localización precisa, optimización y adaptación del enlace.
- Mejoras en seguridad, movilidad y roaming.
- Soporte para acuerdos de nivel de servicio, coexistencia de LPWAN con otras redes inalámbricas.

3.2. Tecnologías de Comunicación LPWAN

Existen diferentes tecnologías diseñadas específicamente para habilitar comunicaciones inalámbricas de largo alcance con un bajo consumo de energía. Estas tecnologías son ideales para aplicaciones de IoT y Máquina a Máquina (M2M) que requieren una cobertura amplia y una larga vida útil de la batería. En el diagrama de la Fig. 3.1 se pueden observar varias de las tecnologías de comunicación que se consideran LPWAN, agrupadas por estándar y propietarias. Seguidamente se expone los aspectos importantes de varias de estas tecnologías.

3.2.1. Estándar IEEE 802.15.4

Es un estándar que define las especificaciones de capa física (PHY) y de enlace (MAC) para redes inalámbricas de área personal (WPAN) [18], estas son redes de bajo costo y baja tasa de transferencia de datos, la cual está limitada a 250 kbps, y puede ser implementada en dispositivos cuya fuente de energía es a través de baterías, dentro de las características principales del estándar se indican las siguientes:

3.2. Tecnologías de Comunicación LPWAN

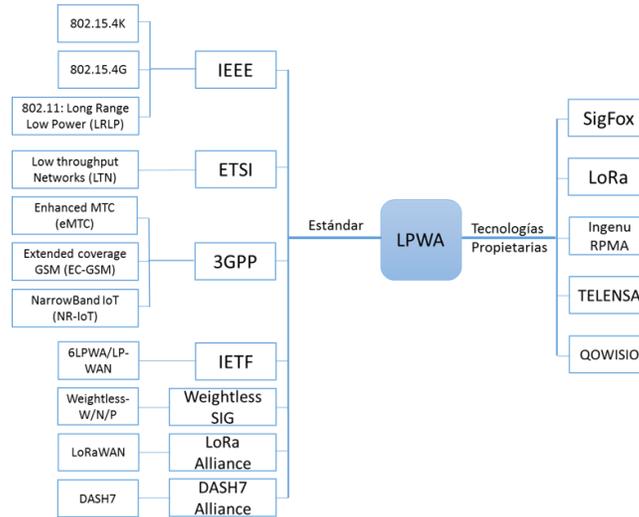


Figura 3.1: Tecnologías LPWAN (fuente: [17]).

- Operación en topología estrella y peer-to-peer.
- Dirección extendida de 64 bit o dirección de 16 bit.
- Sistema de accesos por CSMA-CA o accesos de canales ALOHA.
- Protocolo completamente reconocido para la confiabilidad de la transferencia.
- Bajo consumo de energía.
- Detección de energía
- Indicador de calidad del enlace.

El estándar soporta un rango amplio de frecuencias de operación las cuales se especifican a continuación. Frecuencia de 2.4 GHz con 16 canales con una transferencia de datos de 250 kbps. Frecuencia de 915 MHz con 10 canales con una transferencia de datos de 250 kbps. Frecuencia de 868 MHz con 3 canales, con una transferencia de datos de 100 kbps.

De las bandas de frecuencia señaladas las de 2.4 GHz y la 915 MHz están habilitadas en el Uruguay. El acceso físico está basado en la técnica de modulación Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS), técnica que permite extender la señal intencionalmente en el dominio de frecuencia. El estándar además señala otras posibilidades físicas de comunicación: OQPSK PHY, es un sistema DSSS que emplea modulación por desplazamiento de fase en cuadratura desplazada o offset. BPSK PHY, también DSSS empleando modulación por desplazamiento de fase binaria. ASK PHY, la cual es tecnología de espectro ensanchado de secuencia paralela (PSSS) empleando modulación por desplazamiento de amplitud. La inclusión de estos esquemas de modulación es lo que permite la transferencia de datos para 915 MHz y 868 MHz indicadas anteriormente.

El acceso a los canales del medio físico es gestionado por la capa MAC, la cual define como los dispositivos en una misma área comparten la frecuencia asignada, en

Capítulo 3. Low Power Wide Area Network (LPWAN)

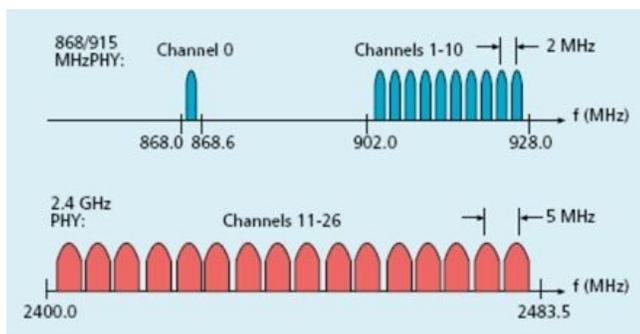


Figura 3.2: Canales IEEE 802.15.4 (fuente: [18]).

esta capa es donde se coordina la señalización de red para dispositivos que actúan como coordinadores, se efectúa la asociación de dispositivos a una PAN, se gestiona la seguridad de dispositivo y la comunicación de enlace confiable entre dos entidades MAC.

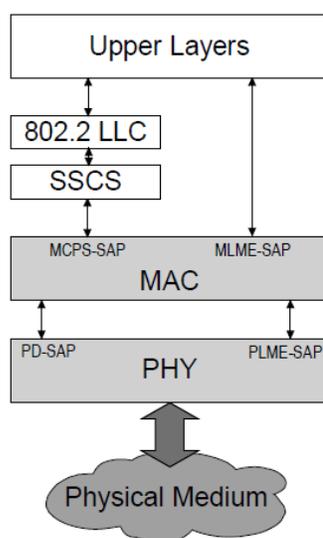


Figura 3.3: Arquitectura de Capas IEEE 802.15.4 (fuente: [18]).

La topología de la red del estándar IEEE 802.15.4 permite el desarrollo de redes en topología estrella, peer-to-peer, o malla (mesh) esto de acuerdo al estándar IEEE 802.15.4 [18]. La seguridad implementada es la AES 128 bit, algoritmo de encriptación de datos, a parte de la encriptación también valida los datos enviados utilizando un mensaje de integridad. La seguridad es implementada modificando el formato de la trama lo cual consume parte del payload, específicamente se habilita el campo de seguridad en la trama de control (frame control). Estándar IEEE 802.15.4 es el fundamento para varias tecnologías o estándar de la industria donde la capa física dependiendo de la

3.2. Tecnologías de Comunicación LPWAN

frecuencia y modulación ofrece como velocidad máxima unos 250 kbps, por otro lado, la capa MAC es responsable de la asociación de dispositivos en la red, la comunicación confiable, la seguridad y la formación de la topología de la red.

ZigBee

Es un sistema de comunicación que adopta el estándar IEEE 802.15.4 para el funcionamiento de la capa física (PHY) y la subcapa de acceso al medio (MAC) y define el protocolo ZigBee para las capas de red (NWK) y la capa de aplicación (APL). Atendiendo a lo mencionado ZigBee opera en la banda de 868 MHz, 915 MHz y 2.4 GHz con posibilidad de transferencia de datos hasta 250 Kbps, a continuación, en la siguiente figura 3.4 se observa el esquema de capas de ZigBee [19].

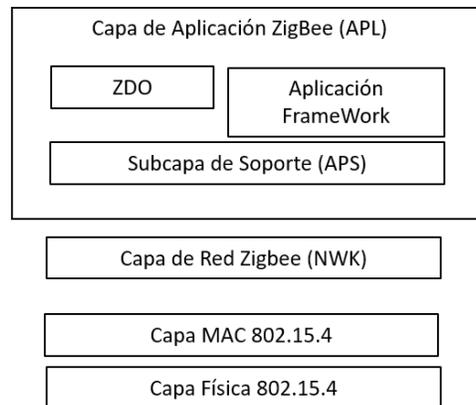


Figura 3.4: Capas Zigbee.

La capa de red provee funciones para el armado y manejo de redes, además la interfaz para su relación con las aplicaciones, esta capa provee servicios de datos y control. En forma resumida la capa de red opera con un coordinador el cual asigna direcciones de 16 bits a cada miembro de la red, la cual es idéntica a la dirección MAC 802.15.4. Cada trama lleva un parámetro que establece el número de saltos máximo y una vez que llegue a 0 el número de saltos, la trama no será retransmitida. Dentro de las principales funcionalidades de la capa se señalan las siguientes: conectar o desconectar un dispositivo a la red, despliegue de nuevas redes tipo árbol o malla, garantizar la comunicación dentro de toda la red, configuración de nuevos dispositivos a conectar en la red, asignación de dirección de red permitiendo una interconexión para todos los dispositivos, sincronización entre dispositivos, seguridad y rutear tramas a sus destinos.

Como mecanismo de ruteo en la capa de red se implementa el algoritmo AODV (Ad hoc On-Demand distance Vector), este mecanismo de ruteo permite que cada nodo tenga una tabla de ruteo hacia los destinos conocidos, a medida que aparece un nodo con camino desconocido se va ampliando la tabla. En el momento que se descubre un nodo nuevo se propaga mensajes entre los nodos para que actualicen sus tablas. En la capa de aplicación se realiza el mantenimiento de las tablas para los enlaces (binding), esto es balancear o adaptar dos dispositivos entre ellos basados en los servicios y necesidades. La capa en si está conformada por la Subcapa de Soporte de Aplicación

Capítulo 3. Low Power Wide Area Network (LPWAN)

(APS), la cual está encargada de descubrir que estén funcionando dentro del mismo espacio operativo, y la ZigBee Device Object (ZDO), la cual define el rol del dispositivo dentro de la red.

Los nodos especificados en el estándar ZigBee son: el coordinador, el enrutador y el dispositivo final. En la red, solo se permite un nodo coordinador, cuya presencia es obligatoria. Este nodo actúa como raíz en la topología en árbol y es responsable de iniciar la red, configurar sus parámetros, admitir nuevos nodos y asignar direcciones de red. El enrutador tiene como función principal extender la cobertura de la red y mejorar su confiabilidad mediante la creación de rutas de datos adicionales. Finalmente, el dispositivo final, generalmente alimentado por baterías, tiene una funcionalidad limitada y opera con baja potencia, comunicándose únicamente con el nodo enrutador o el coordinador.

ZigBee como técnica de encriptación implementan AES. Un dispositivo puede obtener la clave de seguridad mediante uno de los tres métodos: Preinstalación, donde el fabricante embebe la clave en el dispositivo. Transporte de clave: el dispositivo solicita a un centro de confianza para que le envíen la clave. Establecimiento de clave sin comunicación: es un servicio que tiene ZigBee basado en el protocolo SKKE (Symmetric-Key Key Establishment), que permite generar claves al azar para dos dispositivos, previamente estos deben tener una clave maestra obtenido con alguno de los dos métodos anteriores mencionados. Otra característica de seguridad es la autenticación de dispositivos y datos. Para tener integridad en el mensaje ZigBee emplea un Message Integrity Code (MIC) el cual es generado a través de un método conocido por el emisor y el receptor, permitiendo de esta forma verificar la autenticidad del mensaje al momento de su recepción [19].

Aplicaciones desarrolladas usando ZigBee se tiene la automatización del hogar. Ejemplo de esto son los sistemas para la seguridad empleando sensores de movimiento, de rotura de vidrios, apertura de puertas y ventanas. También la transmisión de imágenes de baja calidad captadas por una cámara de seguridad. Otro uso es en las Mediciones en el hogar, como el sensado de consumo de agua, electricidad y gas. Sistema de riego automático, empleando medidores de humedad lo cual permite tener un riego eficiente. Control de la iluminación y control de la temperatura.

Existe una evolución de ZigBee, conocida como ZigBee IP, que permite el soporte en la capa de red y transporte protocolos como IP y TCP/UDP. El motivo de la creación de ZigBee IP es que sea funcional con los estándares abiertos desarrollados por el IETF, en Low Power and Lossy Networks (LLNs) (IPv6, 6LoWPAN y RPL) que proporcionan bajo ancho de banda, bajo consumo de energía y comunicación eficiente. Fue diseñado con el propósito de cumplir con aplicaciones de medidas inteligentes y gestión de energía del hogar [3].

3.2.2. ETSI LTN

El grupo de especificación del European Telecommunications Standards Institute (ETSI) desarrollo la Low Throughput Networks (LTN), tecnología de comunicación inalámbrica para redes de área amplia, la cual permite el envío de datos a larga distancia, además comunicación con equipos que estén bajo el suelo, utilizando consumo mínimo de potencia [20]. La tecnología permite comunicar hasta 40 km en campo abierto, esta cualidad de comunicación en combinación con procesamiento avanzado de señales le

3.2. Tecnologías de Comunicación LPWAN

permite tener buena protección ante interferencias, lo que la hace una buena opción para comunicaciones M2M.

Una red LTN está formada por los dispositivos finales LTN (LTN End-Points LEP) que se conectan vía radio a los puntos de acceso LTN (LTN Access Point LAP), la red es gestionada por un sistema final y brinda servicios al usuario a través de una plataforma de servicios. LTN puede trabajar de forma cooperativa con la red celular (2G, 3G y 4G), lo cual permite a LTN ser una red de respaldo o una alternativa para la transmisión de pequeños paquetes críticos, que estén en zonas fuera del alcance de la red celular. En la Fig. 3.5 se presenta una arquitectura básica de una red LTN [20].

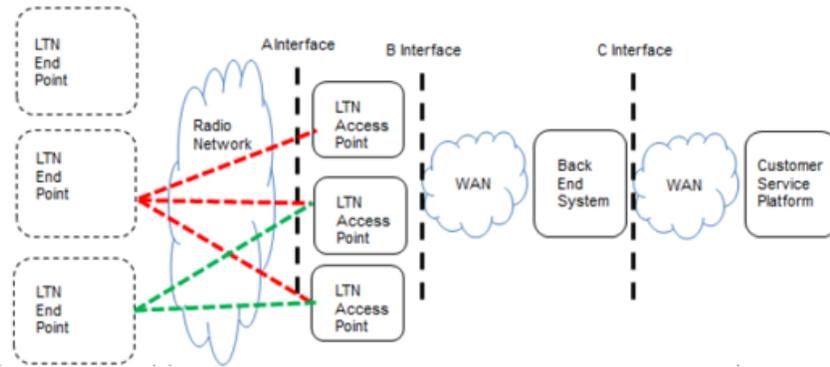


Figura 3.5: LTN Network ETSI GS LTN 001 V1.1.1 (2014-09) (fuente: [20]).

Esta tecnología opera en la banda ISM libre del sub-GHz, típicamente 868-915 MHz con ancho de canal de 100 Hz, empleando esquema de modulación BPSK en el uplink y GFSK en el downlink. El sistema presenta una tasa de datos que varía entre 200 bytes por día, en promedio, y hasta un máximo de 5 kB por día. El tamaño del payload es de 12 bytes, con un límite máximo de 255 bytes. En lo concerniente al consumo de potencia la misma está regulada a 25 mW en el enlace de subida y 500 mW para la comunicación de bajada, además un dispositivo que envía 12 mensajes por día, 100 bytes por mensaje, es de 24 μ W monodireccional y 120 μ W bidireccional [20], permitiendo una duración de batería en el orden de los 20 años.

Dentro de las principales aplicaciones donde se pueden implementar LTN están: medidas inteligente de electricidad, agua y gas, gestión del tráfico y vialidad. Aplicaciones de ciudades inteligentes como el monitoreo de iluminación pública, gestión de estacionamiento, aplicaciones en agricultura de precisión, en la industria, el monitoreo de la salud entre otros.

Sigfox

Es una tecnología de comunicación implementada en IoT, está basada en el estándar ETSI LTN cuyo objetivo es desarrollar una red alternativa exclusiva para dispositivos conectados. Tecnología propietaria cuyo sistema provee una forma estándar de recolectar datos de los sensores a través de un solo conjunto de API (Application Programming Interface) basado en estándares.

Capítulo 3. Low Power Wide Area Network (LPWAN)

Los principios de la tecnología de Sigfox comprende el uso 192 kHz de la banda pública disponible para el intercambio de mensajes en el aire, emplea el tipo de modulación diferencial DBPSK para subida y una modulación GFSK para la descarga de datos, en ambos casos utilizando Ultra-Narrow Band (UNB), cada mensaje tiene un ancho de 100 Hz transmitido a una tasa de datos de 100 a 600 bps. La banda de operación de Sigfox para Europa está entre 868 y 868.2 MHz y para el resto del mundo entre 902 y 928 MHz.

Para ofrecer calidad de servicio emplea la técnica de acceso aleatorio utilizando diversidad en tiempo y frecuencia. Hace transmisión de paquetes en tamaño reducido, variando desde 12 hasta 24 bytes adicional unos bits extras para la autenticación de parámetros, el tiempo de envío es de 2.08 segundos sobre el aire a una tasa de 100 bps. Otro principio tecnológico que usa Sigfox es la diversidad espacial con el objetivo de emplear una recepción cooperativa, esto quiere decir que un mensaje emitido puede ser recibido por cualquier estación base que esté cerca.

Esta tecnología de comunicación tiene un alcance de 30 a 50 Km en zonas rurales y de 3 a 10 km en áreas urbanas, buena cobertura indoor gracias al empleo de bandas sub GHz, además buena resiliencia a las fuentes de interferencia y capacidad anti-jamming gracias a la robustez intrínseca acoplada de UNB más la diversidad espacial de las estaciones base. En lo concerniente al consumo de energía posee alta eficiencia, consumo desde 10 mA a 50 mA en transmisiones, no precisa intercambio de mensajes de sincronización entre un objeto y la estación base, por último, el consumo inactivo es muy bajo.

La arquitectura de la red está compuesta primero por los equipos de red (estaciones bases) encargados de recibir los mensajes y enviarlos al Centro de Soporte Sigfox (Sigfox Support Systems), este último está constituido por el núcleo de la red y es encargado de procesar los mensajes y enviarlos al sistema del cliente, a parte se encuentran en él los módulos fundamentales para asegurar el despliegue, la operación y el monitoreo de la red. La red posee una alta capacidad permitiendo una escalabilidad a billones de objetos. Otro elemento importante a mencionar en Sigfox es la utilización de Software Defined Radio (SDR), por lo que no se necesita un hardware especial, a través de SDR se puede hacer demodulación de forma eficiente así reduciendo el costo total de operación.

En el aspecto de seguridad posee autenticación, integridad y anti replica de mensajes, función de encriptación utilizando AES y también confiabilidad en los datos como opción. Otras características de seguridad a resaltar son suscripción y gestión de dispositivo, protección de datos en movimiento y protección de datos en REST. Sigfox posee muchas aplicaciones, a continuación, mencionamos las principales: monitoreo de calidad del aire y nivel de agua, estacionamiento inteligente, agricultura de precisión, sensores de calidad y fuga de agua, medición de agua y electricidad, gestión inteligente de edificio y el hogar, salud y vida asistida, aplicaciones en la industria, y seguimiento de activos y transporte [21].

Telensa UNB

Es una tecnología de comunicación propietaria que está diseñada para operar en la banda del Sub-GHz, donde la comunicación inalámbrica emplea una técnica de modulación Ultra Narrow Band (UNB), diseñada por Telensa. Para la estandarización

3.2. Tecnologías de Comunicación LPWAN

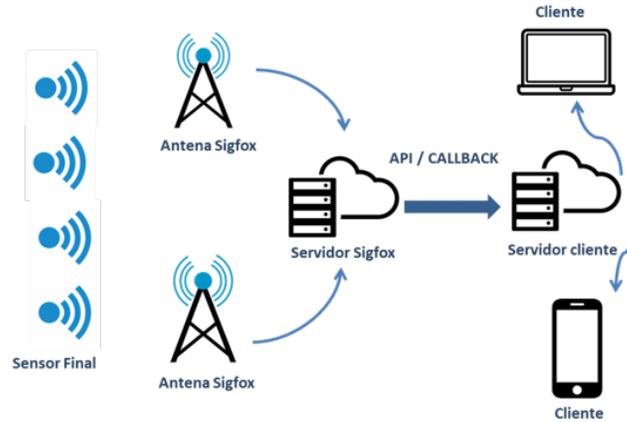


Figura 3.6: Arquitectura Sigfox (fuente: [21]).

de la tecnología se basa en la especificación de ETSI LTN para así lograr una mejor integración con distintas aplicaciones.

Es importante señalar que Telensa es una empresa que diseña y fabrica soluciones IoT enfocada en ciudades inteligentes, cuyo desarrollo principal o mercado es el control inteligente de luminarias. En esta tecnología se destaca el sistema de control de luminarias exteriores en la ciudad de Londres y también el sistema en la ciudad Georgia en Estados Unidos.

Actualmente esta empresa de tecnología brinda soluciones con interface abiertas para IoT, que permita el uso de diferentes sensores (luminarias, monitoreo de tráfico, nivel en contenedores de basura, drenajes y calidad del aire). Además, operar junto con otras tecnologías de comunicación y funcionar en conjunto con otras plataformas para ciudades inteligentes [22].

3.2.3. LoRa/LoRaWAN

Es una tecnología de comunicación LPWAN utilizada en distintas aplicaciones de IoT. Diseñada para proporcionar conectividad de largo alcance y baja velocidad de datos, por ende, está enfocada en dispositivos IoT. En la capa física tenemos LoRa correspondiente a Long Range, que es como un servicio de datos móviles, pero optimizado para dispositivos integrados. Y en la capa MAC el sistema LoRaWAN, estándar abierto creado por la LoRa Alliance [23], grupo que es dueño y encargado del desarrollo técnico de LoRaWAN [24] su arquitectura y protocolos. Las capas definidas por la LoRa Alliance se pueden ver representado en la Fig. 3.7.

LoRa

LoRa es un sistema de modulación propietario desarrollado por la empresa Semtech Corporation [25]. Esta tecnología de capa física emplea la técnica de modulación Chirp

Capítulo 3. Low Power Wide Area Network (LPWAN)



Figura 3.7: capas de LoRa/LoRaWAN (fuente: [24]).

Spread Spectrum (CSS), la cual funcionalmente equilibra la velocidad de datos para la sensibilidad del receptor, aumentando significativamente la distancia de comunicación, también permite demodular por debajo del nivel de ruido haciendo que sea resistente a interferencias, y no menos importante gestiona un canal de ocupación con diferentes factores de propagación (Spreading Factors, SF).

Opera en las bandas de frecuencia libre 433, 868 y 915 MHz. La tecnología que utiliza LoRa está patentada, para la comprensión de su forma de operación hay trabajos como el desarrollado por Matt Knight [26] que permiten la comprensión de LoRa, atendiendo a este trabajo se hace una explicación de la modulación.

El objetivo de CSS es que una señal sinusoidal de frecuencia linealmente variable y duración fija llamada chirp, pueda ser empleada para propagar información sobre un espectro más ancho del que normalmente necesita ocupar. La velocidad de bits de LoRa es una función de la frecuencia de chirps y la velocidad de símbolos, la velocidad de bits está representada de la siguiente forma:

$$Rb = SF * [1/2^{SF}]/Bw \quad (3.1)$$

Donde SF es el factor de propagación y Bw el ancho de banda, el valor de Rb es de 0,3 kbps hasta 5 kbps. Este tipo de modulación permite la transmisión a largas distancias con un bajo consumo de energía. Los datos se codifican mediante variaciones en la velocidad de la frecuencia, y se realizan múltiples transmisiones a diferentes velocidades de datos sobre una misma frecuencia. CSS puede recibir señales a 19.4 dB por debajo del nivel de ruido, utilizando sistema de corrección de errores (Forward Error Correction, FEC). LoRa utiliza canales con un ancho de banda de 125 kHz, dedicando 6 canales y utilizándolos de forma aleatoria. Las tramas son enviadas con un factor de propagación específico, mientras este factor sea más alto la transmisión es más lenta, pero con mayor alcance. Además las tramas en LoRa son ortogonales, por ende, múltiples tramas pueden ser enviadas simultáneamente empleando diferentes SF, estos están representados por números y va desde 7 hasta 12.

Uno de los elementos a destacar de LoRa es la funcionalidad llamada velocidad de datos adaptativa (Adaptive Data Rate, ADR), esto permite escalar la capacidad de la red de forma dinámica de acuerdo a la densidad de nodos e infraestructura. Los nodos

3.2. Tecnologías de Comunicación LPWAN

que se encuentran próximos a la radio base se pueden configurar con una velocidad de datos más alta, lo que les permite realizar la transmisión de los datos, liberar el ancho de banda y entrar en estado de reposo de forma rápida para ahorro de energía, en contra de otros nodos más alejados que transmitirían a velocidades más bajas.

LoRaWAN

La capa MAC LoRaWAN aprovecha los beneficios que ofrece LoRa para optimizar el uso de batería y asegurar la comunicación hacia los dispositivos finales LoRaWAN. Dentro de la especificación están definidos tres clases de dispositivos [24]:

- Clase A, es la operación por defecto de un dispositivo final LoRa, la transmisión de paquetes la realiza de forma asíncrona. Está optimizado para ser alimentado con batería y permite la comunicación bidireccional, un nodo es capaz de recibir tráfico después de transmitir, teniendo la posibilidad de dos ventanas de recepción por transmisión, lo cual aumenta la resistencia contra fluctuaciones en el canal.
- Clase B, es un dispositivo final que funciona de forma sincronizada con el servidor de la red, para ello implementa el proceso de beacon para poder recibir paquetes en una ventana de tiempo específica, independiente del tráfico.
- Clase C, es una clase adaptada para nodos que están alimentados a través de la red eléctrica, por ende, pueden estar constantemente escuchando el canal, mantienen la ventana de recepción abierta cuando no están transmitiendo.

La topología LoRaWAN es descrita como una topología estrella, de forma general la infraestructura está compuesta por nodos o dispositivos finales, los cuales se conectan e intercambian información de forma directa con otro componente que es el gateway, que sirve de puente para enlazar con el servidor central de la red LoRaWAN, esto es efectuado utilizando conexiones IP estándares. En lo concerniente a la seguridad LoRaWAN implementa el modelo AES128 para la encriptación de datos, la seguridad y la encriptación la implementa de forma separada con dos distintas llaves, la NwkS-Key para la autenticación y la AppSKey para la encriptación y desencriptación de los datos entre los dispositivos finales y el servidor de aplicación. Los dispositivos finales en una red LoRaWAN deben registrarse y autenticarse, para ello tienen la posibilidad de dos mecanismos de asociación, Activación por personalización (Activation by personalization ABP) y Activación por el aire (Over The Air Activation, OTAA).

Dentro de las aplicaciones de LoRaWAN se destaca su uso en ciudades inteligentes, parqueo inteligente, medición y monitoreo del agua, agricultura de precisión, entre otros. Implementación notable a destacar se menciona la red LoRa creada en los Estados Unidos la cual cubre 255 ciudades donde entre las típicas aplicaciones que se pueden ver están: el riego monitorizado, monitoreo del agua y gestión de estacionamientos. Otra implementación notable es The Things Network [15] una solución IoT que permite a cualquier desarrollador conectar un gateway LoRaWAN en su red, esta red inició en Amsterdam, ciudad que fue cubierta en 4 semanas.

Capítulo 3. Low Power Wide Area Network (LPWAN)

Symphony Link

Symphony link es un protocolo estandarizado el cual ha sido desarrollado por Link-Labs [27]. Esta tecnología de comunicación incorpora el sistema LoRa CSS dentro de su capa física y se presenta como una alternativa ante LoRaWAN, por lo cual el desarrollo de symphony ha estado enfocado en mejoras frente a LoRaWAN en lo concerniente a la operación en la capa MAC y el stack de protocolos. Conociendo la capa física que emplea Symphony se puede agregar que los dispositivos operan en la banda de Sub-GHz (915 MHz y 868 MHz), puede alcanzar largas distancias gracias a la sensibilidad de hasta -137 dBm. La arquitectura de la red es tipo estrella, además permite la adición de repetidores para ampliar el rango de cobertura de la red.

Esta solución inalámbrica ha sido pensada para empresas e industrias que precisan de una conexión segura de sus dispositivos a la nube, entre las principales características de funcionamiento que ofrece este protocolo esta: el reconocimiento (acknowledgment) tanto para las transmisiones uplink como las downlink lo cual asegura una transmisión satisfactoria hacia los dispositivos, calidad de servicios que permita que los recursos de tiempo y frecuencia limitado se administren para satisfacer la amplia variedad de requisitos del usuario final, otra ventaja de este protocolo es que permite la actualización de firmware por el aire (Over The Air, OVA).

El sistema además ofrece la funcionalidad de prevención de interferencia a través de un algoritmo que opera en los Gateway que le permite monitorear constantemente la energía de RF de otros sistemas dentro de la banda, también cada nodo en la red puede analizar en tiempo real el costo de su enlace, para así de forma adaptativa optimizar la velocidad de datos y potencia de salida consiguiendo una calidad del enlace sin sacrificar la capacidad de la red [28]. Entre las aplicaciones donde se emplea symphony se tiene el seguimiento de activos, redes eléctricas inteligentes, agricultura inteligente, entre otros.

3.2.4. Cellular IoT: EC-GSM-IoT, LTE-M, NB-IoT

Los sistemas de comunicación celular introducidos a comienzo de los 80 han ido evolucionando a través del tiempo convirtiéndose hoy en día en una vía de comunicación estable en cualquier parte del mundo. La fabricación de nuevos dispositivos inteligentes como los smartphones, creó un impacto en los requerimientos de las redes celulares, las cuales tuvieron que implementar mejoras para proveer servicios de alta transferencia de datos y baja latencia, aparte de los servicios básicos de voz y texto ya provisto.

Con la introducción de la comunicación M2M, comunicación tipo máquina (Machine-Type Communication, MTC) y aplicaciones IoT, los requerimientos que debía cumplir la red celular empezaron a ser analizados y discutidos. Donde se estudiaron elementos y dispositivos con diferentes funcionalidades como por ejemplo un medidor de electricidad o agua, el cual operativamente tiene previsto el envío de pequeñas cantidades de datos por cada cierto periodo de tiempo, por ende, no requiere de una alta capacidad de transferencia de datos tampoco una ocupación permanente del canal de comunicación, pero si una buena cobertura ya que podría encontrarse ubicado en un sótano. Otro ejemplo podría ser una cámara de monitoreo de tráfico la cual necesitaría buena capacidad de transferencia de datos y una comunicación estable para su funcionamiento óptimo. Por lo tanto, se puede tener una gama de dispositivos con requerimientos

3.2. Tecnologías de Comunicación LPWAN

bajos o más relajados para la red y otros con requerimientos de más exigencia para la red.

La intención de esta sección es presentar las tecnologías de comunicación que están propuestas para los sistemas IoT, estas son: EC-GSM-IoT, LTE-M y NB-IoT, tres tecnologías diseñadas para brindar servicios a casos de estudios dentro de la categoría que se conoce como comunicación masiva (massive Machine Type Communication, mMTC), en esa categoría se encuentra principalmente Redes de Sensores, Dispositivos Inteligentes y servicios IoT. Para cubrir con los requerimientos de IoT, en el diseño de los sistemas CIoT se planteó de forma general los siguientes objetivos de desempeño:

Tabla 3.1: Objetivos de desempeño CIoT.

Objetivo	Descripción	Requerimiento
Cobertura	El sistema debía superar la cobertura GPRS en 20 dB. La referencia de cobertura de GPRS se estimó en 144 dB	164 dB
Rendimiento	Un requisito de cobertura se vuelve significativo solo cuando se asocia con un objetivo de rendimiento. Por lo tanto, se exigió que las tecnologías candidatas admitieran una velocidad de datos de al menos 160 bps en el límite de cobertura.	160 bps
Latencia	En general, se espera que mMTC brinde servicios tolerantes a la demora. Pero para garantizar una alta alerta, se estableció un requisito de latencia de 10 s para informes de alta prioridad.	10 s
Capacidad	Capacidad de soporte 40 dispositivos conectados por hogar en el centro de Londres con aproximadamente 1.500 hogares / km ² se requiere.	60.000 dispositivos/km ²
Eficiencia	Para asegurar la operación, independientemente del acceso a una fuente de alimentación principal, y con requisitos mínimos de capacidad de la batería, se esperaba que una batería de 5 vatios-hora (Wh) durara por lo menos 10 años en las situaciones de cobertura más extremas.	10 años/5 Wh
Complejidad	Se requería una complejidad de dispositivo ultra baja para admitir la producción en masa y el despliegue de dispositivos de costo ultra bajo.	Complejidad Ultra baja

Capítulo 3. Low Power Wide Area Network (LPWAN)

EC-GSM-IoT

El objetivo del GSM de cobertura extendida (extended coverage GSM, EC-GSM) propuesto por la 3GPP, es brindar un sistema de comunicación para dispositivos de ultra baja complejidad y baja tasa transferencia de datos para IoT. El principal desarrollo en el sistema es aumentar la pérdida máxima por acoplamiento (Maximum Coupling Loss MCL) en unos 20 dB más que el definido para el sistema GPRS, a unos 164 dB utilizando la banda del Sub-GHz [29], específicamente en la frecuencia de 600 kHz para conseguir cobertura a los lugares más desafiantes, para así ofrecer mejor penetración de señal en ambientes interiores, por ejemplo. De acuerdo al standard para su implementación se efectúa con una actualización a nivel de software en la red GSM, permitiendo en el espectro GPRS actual empaquetar los nuevos canales lógicos definidos para incorporar los dispositivos EC-GSM [29]. Como esquemas de modulación utiliza GMSK y 8PSK, provee una tasa de datos de al menos unos 160 bps, latencia en el servicio de 10 segundos, la duración de las baterías en los dispositivos puede alcanzar unos 10 años y el sistema tiene una capacidad de 60.000 dispositivos por km^2 .

LTE-M

El sistema de comunicación LTE con características específicas para sistemas MTC y aplicaciones IoT es conocido como LTE-M. Esta implementación se efectuó reduciendo diferentes requerimientos en la red LTE para así adaptarse y cumplir con aplicaciones de menor exigencias, por lo tanto, presenta picos en transferencia de datos menores, permite operación half-duplex de esta forma reduciendo la complejidad en antenas y modem, un ancho de banda en recepción menor de 1.4 MHz, reducción en transmisión de potencia obteniendo menores costos y eficiencia en consumo de energía.

Utiliza el mismo esquema de transmisión que LTE tanto para DL como para UL, en el DL utiliza OFDM y el UL usa SC-FDMA, con un espaciado de 15 kHz entre subportadoras, el dispositivo más simple LTE-M soporta un ancho de banda máximo en el canal de 6 bloque de recurso físico (PRB), lo cual es un ancho de banda de 1.4 MHz incluyendo la banda de guarda. LTE-M implementa un par de modos de operación que permiten mejorar la cobertura, considerando que los dispositivos son de baja complejidad y que pueden experimentar condiciones desafiantes en cobertura. Estos modos son mejora de la cobertura (Coverage Enhancement, CE) modo A, que provee suficientes mejoras para compensar las reducciones que se implementan en los dispositivos para reducir los costos, el CE modo B que provee una mayor o más profunda cobertura que A, para esos lugares que tienen condiciones con más dificultades de cobertura. Estos modos son conseguidos con pequeñas cantidades de repeticiones para el modo A y mayor cantidad de repeticiones para el modo B [29].

Una categoría dentro de LTE es la Cat-M1, la cual presenta una capacidad de 375 kbps o de 1 Mbps tanto en el UL como en el DL, la arquitectura del sistema le brinda buena capacidad de movilidad por lo que permite comunicación vehículo a vehículo V2V. En reducción de potencia el estándar presenta reducción en la potencia de transmisión de 23 dB a 20 dB, además para el ahorro de energía utiliza funcionalidades como eDRX (extended Discontinuous Reception) para períodos de apagado entre ciclos de transmisiones, también puede implementar PSM (Power-Saving Mode), además ofrece la capacidad compresión en la cabecera de paquetes TCP y UDP, finalmente la capacidad de reducir el tiempo de sincronización después de un largo periodo de apagado.

3.2. Tecnologías de Comunicación LPWAN

NarrowBand-IoT

Es un estándar de comunicación desarrollado por el 3GPP con el objetivo de ofrecer una solución de red celular para el Internet de la Cosas, para alcanzar dicho objetivo el grupo se propuso el poder utilizar la red GSM actual e introducir el sistema de comunicación para IoT a través de una actualización a nivel de software, por lo tanto, se tiene la red IoT lista para ofrecer el servicio en mucho menos tiempo. NB-IoT está soportado en un ancho de banda de 180 kHz, para el downlink (DL) como el uplink (UL), lo que permite despliegue en un reformado espectro GSM como también dentro de carriers LTE.

El sistema está previsto para comunicación masiva de ultra bajo costo, por lo que debe soportar un número masivo de dispositivos dentro de una celda. El diseño de acceso, vía radio, para lograr baja complejidad y costo, establece que el dispositivo en la selección de la celda inicial solamente debe buscar una sola sincronización de secuencia, con el fin de lograr una sincronización básica en tiempo y frecuencia con la red, estando conectado el dispositivo se le restringe el bloque de transporte DL, para que no sea mayor a unos 680 bps y también disminuir los requerimientos de tiempo de procesamiento comparado con LTE. Para la codificación de canal, NB-IoT emplea un código convolucional simple el tail-biting convolucional code (TBCC) en el canal DL. Además, el dispositivo no requiere transmitir y recibir a la vez, por lo que sistema dúplex no es requerido, con lo que el dispositivo solo tendría una antena con niveles máximos de transmisión de potencia de 20 o 23 dBm [29].

NB-IoT apunta a una cobertura de 164 dB, pudiendo servir hasta 50.000 dispositivos por celda, con la posibilidad de ser ampliada la capacidad agregando más carriers. El bloque de recursos (RB) definido para NB-IoT para DL se compone de 12 subportadoras de 15 kHz, con CP-OFDM, como en el caso de LTE. Para el enlace ascendente (UL) hay 2 posibilidades: para transmisiones multitono se definen subportadoras de 15 kHz con SC-FDMA, como en LTE. Para transmisiones de 1 tono, se definen subportadoras de 15 kHz o de 3,75 kHz [29].

Para la optimización del consumo de potencia el estándar introduce el sistema de recepción discontinua ampliada (extended Discontinuous Reception, eDRX) y modo ahorro de energía (Power-Saving Mode, PSM), que permite a un dispositivo apagar su circuito de radio y solo mantener un oscilador encendido para mantener un tiempo de referencia para salir del estado PSM o eDRX. Cuando un dispositivo se encuentra en estado de ahorro de energía tanto la red como el dispositivo mantienen la información de la conexión, esto para evitar hacer una nueva señalización y asociación del dispositivo en la red.

NB-IoT presenta tres modos de operación stand-alone, in-band y guard-band. En el modo stand-alone se puede desplegar utilizando un espacio disponible en el espectro con un ancho de banda mayor a 180 kHz, este modo puede ser implementando por un operador en su banda GSM haciendo un reformado en el espectro asignado. Los otros modos de operación son para ser implementados en una red LTE ya existente, bien sea usando el bloque de recursos físico de LTE o empleando la banda de guarda de LTE.

Actualmente la 3GPP ha continuado los trabajos con el estándar NB-IoT, donde ya se encuentra la versión 14 (Release 14), esta especificación trae funcionalidades como mejora en la precisión en el posicionamiento, aumento en la tasa de datos tanto para el UL como el DL, introduce nueva clase de dispositivos de bajo consumo y soporte

Capítulo 3. Low Power Wide Area Network (LPWAN)

para multicast, distribución eficiente de firmware a una gran cantidad de dispositivos. De forma resumida en la Tabla 3.2 se presentan las características y parámetros de funcionamientos de sistemas celular para IoT desarrollados anteriormente.

Tabla 3.2: Comparación de Especificaciones de Tecnologías.

Especificación	LTE-M	Cat 1	Cat M1	NB-IoT
Ancho de Banda	20 MHz	20 MHz	1.4 MHz	180 kHz
Downlink	1 Mbps	10 Mbps	1 Mbps o 375 kbps	200 kbps
Uplink	1 Mbps	5 Mbps	1 Mbps o 375 kbps	200 Kbps
Rango	Rango LTE	Rango LTE	4x Cat-1	7x Cat-1
MCL	142.7 dB	142.7 dB	155.7 dB	164 dB
PSM	Baja	Alta de 2 mA	Muy baja 15 μ A	Muy baja 15 μ A
Duplex	Half/Full	Full	Half/Full	Half
Antenas	1	2 MIMO	1	1
Latencia	50 - 100 ms	50 - 100 ms	10 - 15 ms	1.6 - 10 s
Potencia de Tx	23 dBm	23 dBm	20 dBm	23 dBm

3.2.5. Otras Tecnologías LPWAN

Ingenu RPMA

Es un sistema de comunicación LPWAN para aplicaciones IoT y M2M, emplea el mecanismo acceso múltiple de fase aleatoria (Random Phase Multiple Access, RPMA), que esta patentado por Ingenu. Esta tecnología opera en la banda de 2.4 GHz, contrario a otras tecnologías LPWAN que trabajan en la banda del Sub-GHz. Uno de los beneficios de operar en la banda de 2.4 GHz es la flexibilidad en las regulaciones del espectro en distintas zonas, por ejemplo, en los Estados Unidos y Europa no hay una imposición del máximo ciclo de trabajo, por lo tanto, permite mayor throughput y capacidad que otras tecnologías que operan en Sub-GHz, sin embargo, en contra parte es más sensible a interferencias y consiguen menos alcance.

RPMA utiliza DSS como sistema de modulación para las comunicaciones, soporta transmisiones bidireccionales, con velocidades en el orden de los cientos de miles de bits por segundo, consumiendo más energía que sus competidores, los tamaños de los paquetes que puede enviar van desde los 6 bytes hasta los 10 kbytes. El tiempo de vida de una batería de acuerdo a lo indicado en [20], para una transmisión de 50 kB cada 2 horas es de 14 años. Utiliza el estándar de seguridad 128 AES para la autenticación y dentro de las aplicaciones más importantes esta la implementación de smart gride, AMI, y en la industria como campos petroleros en Texas [28].

Weightless

Weightless es un estándar de comunicación para redes inalámbricas de baja potencia, el cual está desarrollado por el Weightless grupo de interés especial (Special Interest Group, SIG) y que actualmente propone tres LPWA estándar abiertos, cada uno

3.2. Tecnologías de Comunicación LPWAN

con diferentes características, rango y consumo de potencia además permitiendo la operación a frecuencias licenciadas y no licenciadas [30].

Los tres estándares de Weightless son los siguientes, Weightless-W usa acceso compartido en los espacios en blancos de TV para la propagación de señales, además soportando diferentes esquemas de modulación (16-QAM, DBPSK). Weightless-N el cual permite la comunicación unidireccional desde un dispositivo final hacia una estación base dentro de la banda del Sub-GHz usando tecnología UNB. Weightless-P es el estándar desarrollado por el grupo que permite comunicación bidireccional dentro de la banda del Sub-GHz, lo cual lo hace más atractivo que las versiones W y N, para ser utilizado en distintas aplicaciones de IoT. Weightless-P como se indicó anteriormente es totalmente bidireccional con el atributo adicional de proveer confiabilidad en la comunicación mediante acknowledgment, el mismo está optimizado para un gran número de dispositivos finales de baja complejidad, baja consumo de potencia y con una transferencia de datos desde 0,625 kbps a 100 kbps [30].

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 4

IoT para la Industria

IoT para la industria o IoT industrial, comprende el uso de sensores inteligentes y mecanismos de automatización con el objetivo de mejorar la eficiencia de los procesos industriales en diferentes niveles. Para ello se necesita implementar tecnologías de comunicación que permitan conectar máquinas, dispositivos y sistemas mediante redes con la finalidad que puedan comunicarse, recopilar información y analizar esos datos en tiempo real. La aplicación de IoT en la industria ofrece varios beneficios, a continuación se mencionan algunos.

- **Eficiencia productiva y energética:** utilización de datos para mejorar la capacidad y los procesos de las industrias, permitiendo una mejor gestión y una producción mas eficiente. Implementando sistemas IoT para medir en tiempo real el consumo de energía, con la finalidad de detectar las ineficiencias y resolverlas, permitiendo que el negocio sea más sostenible con un impacto menor en el ambiente.
- **Mantenimiento y confiabilidad:** permite efectuar una planificación del mantenimiento de las máquinas y equipos reduciendo los periodos improductivos. Además, detectar fallos o anticiparse a ellos con más antelación, optimizando los tiempos de mantenimiento de los equipos o la resolución de averías graves.
- **Seguridad en el ámbito industrial:** la integración de tecnologías de Internet de las Cosas con el propósito de disminuir los peligros y percances en entornos laborales. Al aprovechar la información vinculada a la protección cibernética y al bienestar de los empleados, se habilita la emisión de notificaciones instantáneas en caso de identificar cualquier eventualidad.
- **Minimizar gastos:** La implementación de IoT en el contexto de la cuarta revolución industrial posibilita la automatización de las líneas de fabricación, el aumento de la eficiencia en las operaciones y la optimización de los enfoques laborales, lo que finalmente conduce a una notable reducción de los costes.

4.1. Aplicación en Fábricas y Manufactura

La introducción de la IoT en las fábricas ha dado lugar a una transformación significativa en la manera en que se gestionan y operan los procesos de fabricación. La capacidad de interconectar máquinas, dispositivos y sistemas en red ha dado lugar a lo que se conoce como la Industria 4.0. Este cambio ha permitido una mayor automatización, eficiencia y capacidad de respuesta en la producción industrial. La comunicación entre máquinas (M2M) y la comunicación máquina-humano (M2H) son elementos fundamentales que permiten la coordinación y la toma de decisiones que genera un entorno de fabricación inteligente.

IoT ha impactado en áreas clave de la fabricación, como el monitoreo y control remoto de maquinaria, la recopilación y análisis de datos en tiempo real, la optimización de la cadena de suministro y la mejora de la calidad del producto. Desafíos y consideraciones importantes al implementar tecnologías IoT en el contexto de la fabricación son la interoperabilidad de dispositivos y sistemas, la ciberseguridad para proteger los datos y procesos, la integración de tecnologías heredadas y la planificación adecuada para la adopción de soluciones IoT.

4.2. Aplicación en Petróleo y Gas

La implementación de soluciones IoT en el ámbito del petróleo y gas ha dado lugar a mejoras significativas en la eficiencia operativa, la seguridad y la toma de decisiones. El sector del petróleo y gas, se caracteriza por tener operaciones complejas y a menudo peligrosas. Sistemas y tecnologías como IoT permiten la monitorización en tiempo real de activos y procesos críticos. La instalación de sensores en equipos, tuberías y plataformas permite recopilar datos detallados sobre el rendimiento, la integridad y el estado de los activos. Estos datos se utilizan para optimizar la producción, predecir fallas y planificar el mantenimiento de manera más eficiente.

Otro aspecto es la seguridad lo cual es una prioridad en el sector del petróleo y gas, IoT busca contribuir significativamente a mejorarla. La monitorización continua de las condiciones ambientales y la detección temprana de posibles fugas o incidentes pueden evitar situaciones peligrosas y proteger tanto a los trabajadores como al medio ambiente. Sin embargo, también incluye desafíos específicos como la conectividad en entornos remotos y hostiles, la ciberseguridad para proteger los datos críticos y las operaciones, así como la interoperabilidad de sistemas y dispositivos diversos.

4.3. Aplicación en Empresas de Servicios Públicos

Los servicios públicos desempeñan un papel crucial en la infraestructura de cualquier sociedad, y el Internet de las Cosas (IoT) ha tenido un impacto significativo en cómo se gestionan y entregan estos servicios esenciales. Sistemas IoT permite a las empresas de servicios públicos monitorear sus redes de manera más eficiente y en tiempo real. Esto incluye la capacidad de rastrear la infraestructura eléctrica, las tuberías de agua y las redes de gas para detectar problemas, reducir pérdidas y garantizar un suministro confiable.

4.3. Aplicación en Empresas de Servicios Públicos

La implementación de medidores inteligentes en hogares y empresas ha mejorado la forma en que se mide y se factura el consumo de electricidad, agua y gas. Estos dispositivos permiten una lectura precisa y automática de los consumos, lo que mejora la eficiencia y la precisión en la facturación. Otro beneficio es ayudar a gestionar de manera más efectiva la demanda de energía y recursos hídricos. Se pueden implementar sistemas de control automatizado para reducir la carga en momentos de alta demanda, optimizando así la eficiencia de la red.

Los sensores IoT instalados en la infraestructura permiten detectar problemas potenciales antes de que se conviertan en fallas importantes. Esto facilita la planificación de un mantenimiento preventivo, lo que ahorra costos y minimiza el tiempo de inactividad. También se utilizan para mejorar la eficiencia energética y reducir el consumo de recursos en las operaciones de los servicios. Esto incluye la gestión de la generación de energía renovable y la identificación de oportunidades de ahorro de energía.

La optimización de los recursos, el uso eficiente de los mismos, se ha convertido en los principales desafíos para los países, ciudades y empresa en los últimos años. En lo que respecta a la utilización y consumo de los recursos hídricos representa uno de los grandes pilares en lo que se refiere al aprovechamiento y el uso eficiente de los recursos naturales, esto unido a la concientización en las poblaciones de la importancia del uso inteligente y la protección de los recursos. Un proyecto de referencia es el de hogares inteligentes “Smart home energy planning using IoT and the cloud” [31], desarrollado en la Facultad de Ingeniería de la UDELAR, donde se presenta una solución para el monitoreo, control y planeación del consumo eléctrico en escenarios urbanos. Para ello efectuaron una implementación en hardware y software e integraron tecnología de IoT y cloud computing donde evaluaron el consumo energético en calentadores de agua, obteniendo como resultado una reducción del consumo en un 38.9% y manteniendo la satisfacción en el cliente.

Siguiendo esta línea de aplicaciones IoT, en esta tesis se presenta el estudio de sistemas IoT para la reducción de agua no contabilizada (RANC).

4.3.1. Reducción de Agua No Contabilizada (RANC)

La Reducción de agua no contabilizada, es un sistema formado por un conjunto de soluciones con el objetivo de atender la problemática de pérdida de agua (ver Fig. 4.1). El agua no contabilizada se considera a toda aquella que habiendo sido producida en pozos o plantas de tratamiento no es comercializada, por lo tanto esta agua es denominada no comercial ya que es agua que se ha producido, pero se pierde antes de que llegue al cliente. Las pérdidas que ocurren en un sistema de agua pueden ser generadas por distintos factores como: pérdidas en la planta de tratamiento, pérdidas por infiltración y/o roturas en los sistemas troncales o en las redes de distribución, conexiones de agua clandestinas y las pérdidas por la inexactitud en la macro y micro mediciones. Altos niveles en pérdidas de agua son perjudiciales para la sostenibilidad financiera de los servicios de agua como también dañino para la calidad del agua.

Las estimaciones de pérdidas de agua a nivel mundial están en el orden del 40% de la cantidad de agua que es utilizada y distribuida para el consumo, en países como España se estima que las pérdidas de agua durante su distribución equivale a varios embalses llenos [33], el volumen de agua que se pierde en el camino debido a fugas, roturas y averías en la red de distribución está en el orden de los 651 hm³, a esto

Capítulo 4. IoT para la Industria

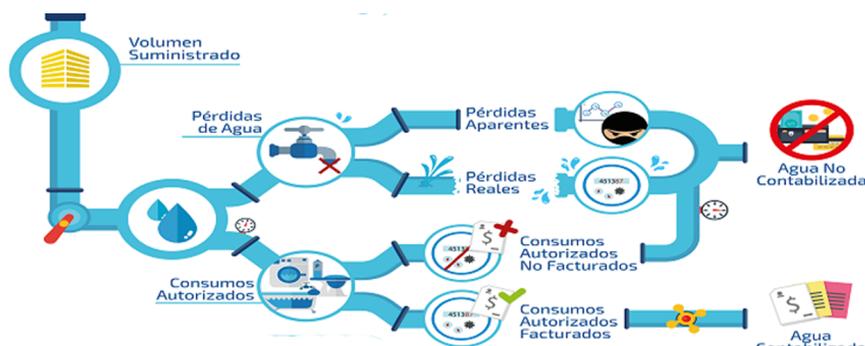


Figura 4.1: Recuperación de Agua No Contabilizada [32].

también se le suma lo que se llama pérdidas aparentes que incluye, errores de medidas, fraudes y consumos no medidos que para España se estimó 407 hm^3 , el total es 1058 hm^3 de agua no registrada de un suministro de 3214 hm^3 para el año 2014. En lo concerniente a agua no registrada el porcentaje de ese valor frente al total de agua producida en países como Singapur, Dinamarca y Holanda está en el orden del 6%, por otra parte, en países de Latinoamérica se puede observar valores como en Chile 34% y México 30% [34].

En el Uruguay existe Obras Sanitarias del Estado (OSE)¹ organismo responsable del abastecimiento de agua potable, esta empresa pertenece al estado [35]. De acuerdo a cifras provistas el valor de agua no registrada ronda alrededor de un 50% [36], de ese valor se estima que las pérdidas físicas (roturas o fugas) se ubican entre 25 y 30% mientras que las pérdidas comerciales (conexiones clandestinas, deficiencia en la medición y usuarios no facturados) se ubican en un 20%.

Alrededor del 36% de la población mundial viven en regiones con escasez de agua y el 52% experimentará una severa escasez de agua hacia el año 2050. Para el 2030 se espera que el uso del agua aumente en un 40% gracias a una combinación de factores como el cambio climático, la acción humana y el crecimiento demográfico [37]. Reducir los valores de agua no contabilizada es clave, para obtener unos porcentajes en pérdidas de aguas muchos menores a los actuales. Esto comprende la implementación de proyectos que permitan el monitoreo y control del sistema de abastecimiento, mejora en los sistemas de medidas, regularizar los consumidores no facturados, así como las conexiones clandestinas, entre otros. El proyecto que se presenta a continuación busca medir y controlar puntos críticos en el sistema de distribución de agua en la ciudad de las Piedras, Canelones, Uruguay, con el fin de monitorear presiones en las tuberías y controlar la apertura y cierre de la válvula de suministro en dicha zona crítica de la red.

Gestión de la Presión

Es la práctica de manejar presiones del sistema a niveles óptimos de servicio asegurando suministro suficiente y eficiente para usos y consumidores legítimos, a la vez

¹Referencia: <http://www.ose.com.uy/>.

4.3. Aplicación en Empresas de Servicios Públicos

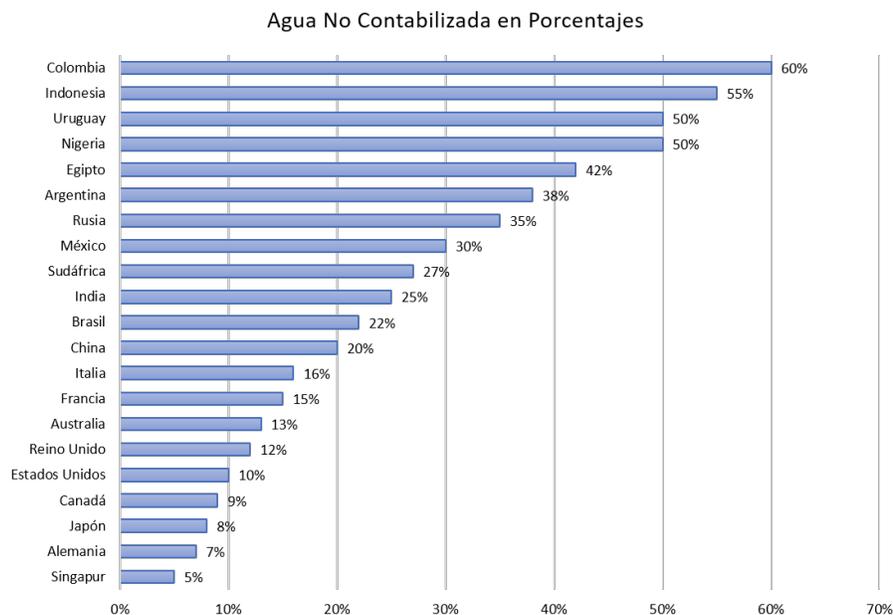


Figura 4.2: RANC Pérdidas en Países (fuente: [34])

que se reduce las presiones excesivas innecesarias, y se elimina las transiciones y los controles de nivel defectuosos, todo lo cual hace que el sistema de distribución fugue innecesariamente [38].

Una forma de gestionar la presión es la modulación de la presión en el punto crítico. Al utilizar la modulación de punto crítico (también conocida como modulación remota basada en nodo), un sensor de presión monitorea continuamente el punto crítico (PPC) y comunica información a la válvula reductora de presión (VRP) en el ingreso del sector de gestión de la presión (SGP). Esta VRP ajusta continuamente la presión corriente abajo de la VRP y PPC (P2), para que PPC permanezca tan cerca como sea posible del valor deseado (por ejemplo la presión de suministro mínima de 20 m) ver Fig. 4.3. P1 se refiere a la presión corriente arriba de la VRP. Esta técnica produce buenos resultados en la gestión de presión, pero requiere inversiones adicionales para el sensor de presión de PPC y los dispositivos de comunicación.

Sin una gestión adecuada, la presión en el punto crítico varía a lo largo del día: el alto consumo diurno provoca mayores pérdidas de presión, mientras que en la noche estas disminuyen. La gestión de presión permite mantener la presión mínima requerida y constante, utilizando estrategias de modulación de válvulas reguladoras de presión (VRP). Esto no solo estabiliza las variaciones de presión, sino que también elimina el exceso, reduciendo el caudal de fugas y las pérdidas reales de agua.

Capítulo 4. IoT para la Industria

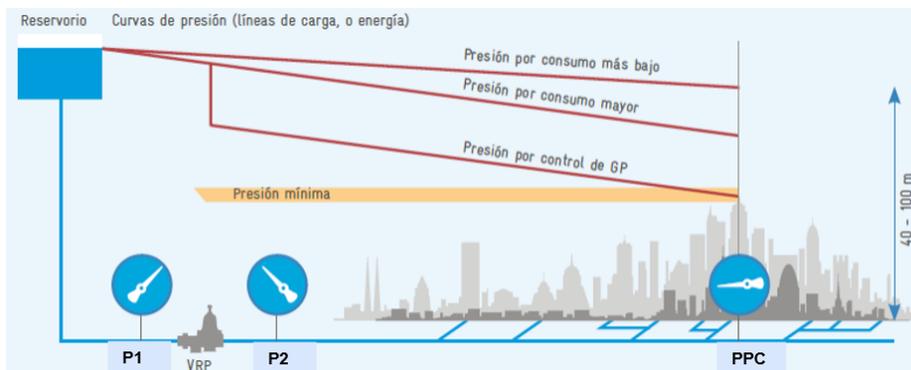


Figura 4.3: Gestion de la presión [38].

Proyectos IoT para la RANC

Soluciones se han desarrollado con el objetivo de reducir la cantidad de agua no contabilizada y se han incorporado sistemas IoT para ese fin. Un ejemplo de ello es el proyecto de sistemas de detección de pérdidas en tuberías utilizando redes de sensores inalámbricos (smartpipes) [39]. El proyecto presenta como sensores y dispositivos con Arduino, son implementados para monitorear presiones y vibraciones en tuberías de suministro de agua, registro de muestras diarias de presión en la tubería y simulaciones reales de pérdidas de agua. Permitiendo hacer una gráfica de los cambios de presiones, de esta forma desarrollar un modelo para detección de fugas en tuberías. Otro sistema interesante es el desarrollado en la Universidad Politécnica de Madrid “An IoT based reference architecture for smart water management processes” [40], donde se propone un sistema de gestión inteligente del agua utilizando tecnología IoT, basándose en una plataforma OPC AU (Object Linking and Embedding for Process Control Unified Architecture), la cual está orientada al control de procesos en fábricas.

Otro tipo de proyecto orientado a un uso eficiente del agua se puede observar en el sistema de agricultura y control de riego, presentado en el artículo “An IoT based Smart irrigation management system using machine learning and open source technologies” [41], donde se presenta una solución para el uso eficiente del agua en la siembra, basándose en datos como la humedad, temperatura, temperatura del aire, datos del clima, de precipitación, entre otros, para generar un patrón óptimo para el uso del agua de irrigación.

La incorporación de sistemas inalámbricos en dispositivos y elementos RANC se está realizando para mejorar el control y operación de esta industria de servicio. Además, el uso de tecnología como IoT, aprendizaje de máquina y computación en la nube está permitiendo la automatización de estos sistemas, logrando supervisión y mantenimiento de los elementos de la industria y una optimización en el uso de los recursos. Las LPWAN son una tecnología de comunicación que brinda oportunidades para la implementación de proyectos IoT en la recuperación de agua no contabilizada.

4.4. LoRa/LoRaWAN para IoT en la Industria

LPWANs para sistemas de RANC

Para la implementación de soluciones de RANC es necesario el sensado y monitoreo de diferentes variables en distintos puntos y zonas de suministro o distribución de agua. Por lo tanto, es necesario una tecnología que pueda transmitir a largas distancias, también que se puedan usar dispositivos alimentados por baterías considerando de que sean sitios remotos. Sistemas como Wi-Fi y Bluetooth tienen la capacidad brindar buena velocidad en transferencia de datos, pero con la limitación de abarcar distancias cortas, por ende, no es viable su implementación. Dispositivos con comunicación celular 3G y LTE ofrecen buena velocidad en transferencia de datos, además de cobertura para largas distancias, estos son sistemas que funcionan en banda de frecuencia licenciada, por lo que se necesita de un operador celular para su implementación, además los equipos o dispositivos tienen alto consumo de energía, esto implica que el tiempo de actividad usando alimentación por baterías sea muy corto.

Considerando los aspectos mencionados de recepción en distancias largas, dispositivos alimentados con baterías y uso de banda no licenciada se propone la implementación de la tecnología LPWAN. Tecnología diseñada para que dispositivos puedan enviar a largas distancias pequeñas cantidades de datos y que a su vez mantengan larga vida en sus baterías, además operar en la banda de Sub-GHz.

Actualmente para IoT existen diferentes tecnologías LPWAN varias son propietarias y otras estandarizadas, dentro del proyecto se realizó un estudio del estado del arte en IoT, donde se estudiaron diferentes tecnologías de comunicación LPWAN de donde se seleccionó la tecnología: LoRa/LoRaWAN, la cual es factible para ser utilizada en Uruguay, además tiene una buena cantidad de posibilidades para soluciones y servicios basados en IoT.

4.4. LoRa/LoRaWAN para IoT en la Industria

En la revisión de tecnologías de comunicación para IoT, se estudiaron diversos sistemas LPWAN, destacándose LoRa/LoRaWAN como la opción seleccionada. Este sistema opera en la banda no licenciada de 915 MHz, lo que permite su uso libre sin depender de proveedores de red. LoRa facilita la transmisión de datos a distancias de hasta 15 km en áreas rurales y 5 km en zonas urbanas, sin necesidad de infraestructura compleja, permitiendo cubrir grandes áreas con pocos gateways. Además, su costo de implementación y operación es significativamente bajo, ya que los dispositivos son económicos, no requiere tarifas por el uso del espectro y ofrece escalabilidad sin gastos adicionales. Por otra parte, LoRaWAN utiliza protocolos estandarizados con encriptación AES-128, garantizando la seguridad de los datos. En resumen, LoRa/LoRaWAN destaca por su eficiencia energética, amplio alcance y bajos costos operativos, siendo ideal para proyectos IoT.

En esta sección se amplía la información de parámetros importantes del protocolo para su implementación en Uruguay.

4.4.1. Sistema de Transmisión LoRa

LoRa como se estudió en el Capítulo 3 usa la técnica de modulación CSS. Técnica que usa pulsos modulados en chirp para codificar los datos. El chirp es una onda sinusoidal cuya frecuencia aumenta y disminuye a lo largo del tiempo, y puede asociarse con una señal que varía su frecuencia de manera ascendente y descendente (se toma como ejemplo la llamada de una ballena). El chirp fundamentalmente es el salto desde una frecuencia baja a una frecuencia alta para el up-chirp y viceversa para el down-chirp.

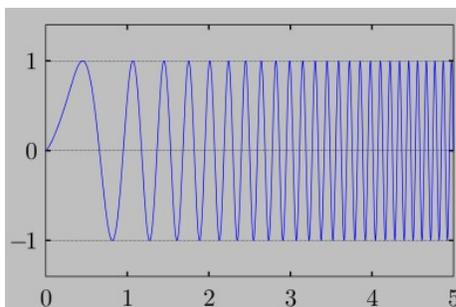


Figura 4.4: Una frecuencia lineal modulada up-chirp en el dominio del tiempo (fuente [42]).

Hay parámetros clave en el sistema LoRa, tal como se indica en (3.1) estos parámetros son el SF y el ancho de banda BW, que permiten el cálculo de la velocidad de envío de los datos.

Spreading Factor (SF)

El Spreading Factor permite determinar la eficiencia y el alcance de la modulación de la señal LoRa. Este se relaciona con la modulación por la dispersión espectral que utiliza LoRa. Los bits de datos se transforman en símbolos que se transmiten a una velocidad mucho más baja que la velocidad original de los bits. Por lo tanto, el SF se refiere a la cantidad de veces que la velocidad de símbolo es reducida en relación con la velocidad original de los bits. Cuanto mayor sea el valor del SF, mayor será la reducción en la velocidad de símbolo y por lo tanto, más lenta será la transmisión, pero con un mayor alcance y una mayor inmunidad al ruido y la interferencia.

Ancho de Banda (BW)

En LoRa el ancho de banda se expresa generalmente en kilohercios (kHz) y puede variar en función de las regulaciones regionales y de la implementación específica del sistema. Los valores de ancho de banda típicos para dispositivos LoRa suelen ser de 125 kHz, 250 kHz o 500 kHz. El ancho de banda afecta la velocidad de transmisión de datos, la resistencia al ruido y la capacidad de comunicación. Con un ancho de banda más amplio se consigue una mayor velocidad de transmisión de datos, pero a expensas de una mayor ocupación del espectro y una mayor probabilidad de interferencia con otras señales. Un ancho de banda más estrecho reduce la velocidad de datos, pero permite una comunicación más eficiente en términos de espectro.

4.4. LoRa/LoRaWAN para IoT en la Industria

Data Rate (DR)

El Data Rate determina la cantidad de bits de datos que se pueden transmitir por segundo en una comunicación LoRa. Es un parámetro clave en la configuración de la modulación LoRa y tiene un impacto directo en la eficiencia de la comunicación y la velocidad de transmisión.

Para entender la velocidad de envío de datos data rate (DR) o bit rate (Rb), hay que analizar el chirp rate (Rc) y el symbol rate (Rs), porque el Rb es una función de los dos últimos mencionados, donde los valores dependen del factor de dispersión (SF) y del ancho de banda (Bw) como vimos en (3.1), se coloca abajo la ecuación.

$$Rb = SF * [1/2^{SF}] / Bw \quad (4.1)$$

Un símbolo simplemente representa uno o más bits de datos, es decir el número de bits sin procesar que pueden ser codificados por un símbolo, esto indica el número de SF. Por ende, para un símbolo compuesto por 7 bits tendríamos un SF igual a 7. Los valores que tiene el símbolo son 2^{SF} , esto quiere decir que el símbolo tiene valores desde el 0 al 127 para el caso de SF7. Los valores del símbolo son codificados en una señal de barrido la cual es dividida por el número de SF, que para 7 serian 128 chips. En resumen, el SF define dos valores el número de bits sin procesar que puede codificar un símbolo (SF) y cuantos chips puede tener cada símbolo (2^{SF}).

El Ancho de banda (Bw) es intercambiable por el Rc, por lo que $Bw = Rc$ y se puede representar en chips/s, entonces un canal con un Bw de 125 kHz equivale a 125000 chips/s. El Rs se calcula utilizando el Rc y el SF de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Rs = Bw / 2^{SF} = Rc / 2^{SF} \quad (4.2)$$

Por lo que con el Bw anterior y el $SF = 7$, se tiene un $Rs = 977$ symbols/s, tener cuenta que siempre $Rc > Rs$.

Otro parámetro clave para el cálculo de la tasa de bits (Rb) es el FEC (Forward Error Correction). Este mecanismo incorpora bits redundantes a los datos transmitidos con el propósito de corregir errores causados por interferencias durante la transmisión. La eficiencia de esta corrección se determina mediante la tasa de codificación (Coding Rate, CR), que expresa la proporción de bits transmitidos que contienen información útil en relación con los bits totales enviados. En la Tabla 4.1 se pueden ver los diferentes CR:

Tabla 4.1: Tasas de Codificación (Coding Rate).

Coding Rate (CR)	CR = 4 / (4 + CR)
1	4/5
2	4/6
3	4/7
4	4/8

Esto funciona de la siguiente forma para $SF = 7$ que son 7 bits de transmisión usando un $CR = 1$ se multiplica $7(4/5)$ que son 5,6 lo cual representa la información y el resto

Capítulo 4. IoT para la Industria

1,4 sería para corrección de errores. Con esto último definido se puede hacer el cálculo del DR o Rb, usando la siguiente formula:

$$Rb = SF \cdot Bw / 2^{SF} * 4 / (4 + CR) \quad (4.3)$$

Finalmente, como ejemplo se puede usar el data rate SF7BW125 (SF = 7, Bw = 125 kHz) y un CR = 1, con lo que obtenemos un Rb = 5,5 kbits/s. Al aumentar el ancho de banda por ejemplo a 500 kHz obtenemos un Rb = 21,9 kbits/s, o sea mayor, si por el otro lado aumentamos el factor de dispersión, el Rb disminuye.

En resumen, se presenta la Tabla 4.2 con la información de la velocidad de transmisión de datos para cada Data Rate con el correspondiente SF y ancho de banda [43].

Tabla 4.2: Especificaciones de Data Rate en LoRa.

DataRate	SF	Ancho de Banda	Velocidad [bits/sec]
0	SF_12	125 kHz	250
1	SF_11	125 kHz	440
2	SF_10	125 kHz	980
3	SF_9	125 kHz	1760
4	SF_8	125 kHz	3125
5	SF_7	125 kHz	5470
6	SF_8	500 kHz	12500
7	LR-FHSS CR1/3	1.523 MHz	162
8	SF_12	500 kHz	980
9	SF_11	500 kHz	1760
10	SF_10	500 kHz	3900
11	SF_9	500 kHz	7000
12	SF_8	500 kHz	12500
13	SF_7	500 kHz	21900
14	RFU	RFU	-
15	Dedinida en:	TS001	-

Estos tres parámetros son esenciales al desarrollar una aplicación industrial IoT, ya que influyen en la eficiencia, el alcance, la velocidad de transmisión y la capacidad de la red. El SF afecta directamente al alcance de la comunicación. Un SF alto proporciona un mayor alcance, lo que es crucial en aplicaciones industriales IoT que a menudo requieren comunicación a larga distancia en entornos industriales o rurales, por lo tanto, elegir el SF adecuado es esencial. Un SF alto también, disminuye la velocidad de transmisión, por lo que se debe equilibrar el alcance deseado con la velocidad de datos requerida.

El ancho de banda influye en la velocidad de transmisión y la resistencia al ruido. En aplicaciones industriales, la interferencia electromagnética pueden ser un problema, un ancho de banda más amplio puede proporcionar una comunicación más robusta. Además, la velocidad de transmisión de datos es crucial en aplicaciones industriales donde la latencia y la entrega oportuna de información son críticas. Por ejemplo, aplicaciones de control o monitoreo en tiempo real puede requerir tasas de datos más altas. Sin embargo, considerar que un DR más alto implica un alcance más limitado y

4.4. LoRa/LoRaWAN para IoT en la Industria

a menudo, una mayor sensibilidad al ruido. Es importante definir bien las necesidades de la aplicación para seleccionar un DR que permita equilibrar la velocidad de datos con el alcance y la robustez de la comunicación.

Potencia de Transmisión y Ciclo de Trabajo

La potencia de transmisión es otro parámetro a considerar en los dispositivos, ya que está regulado de acuerdo a la región geográfica. Por defecto los dispositivos tienen una potencia de salida de transmisión irradiada de 20 dBm, con la regulación para un dispositivo que transmite en el ancho de banda de 125 kHz un máximo de 30 dBm, con una duración no mayor a los 400 ms y cuando la transmisión es en un ancho de banda de 500 kHz se puede usar un máximo de 26 dBm. Dicha regulación aplica a la región de USA donde no hay limitación en el ciclo de trabajo.

En Europa la potencia máxima de transmisión está limitada a 14 dBm para mensajes uplink y 27 dBm en mensajes downlink. Además, hay regulaciones gubernamentales que dependiendo del canal el ciclo de trabajo del radio está regulado a 0,1 %, 1 % y 10 %. Esto implica que cuando un dispositivo transmite mediante un canal LoRaWAN, existe un período de tiempo durante el cual no puede efectuar transmisiones en ese mismo canal. Este intervalo suele ser determinado por el dispositivo mismo, basado en el tiempo de transmisión previa en el aire. TTN atendiendo a dicha regulación tiene una política de acceso justo para cumplir con la regulación donde limita el tiempo del aire en UL a 30 segundos por día por nodo y los mensajes DL a 10 mensajes por día por nodo [15]. Al usar el servidor de TTN debemos ajustarnos a dicha política que, en caso de UL se debe ajustar el tamaño del paquete a enviar y trabajar con SF bajos para así tener menor ocupación de tiempo en el aire posible. Para el caso DL la limitación es más restrictiva, por lo que se probará la cantidad de mensajes del menor tamaño posible a enviar.

Existen alternativas ante la limitación del ciclo de trabajo una puede ser implementar una red privada usando un servidor LoRa que no sea el de TTN, se puede evaluar el uso de la red The Things Industries, que es similar y creada por TTN para proveer un servicio con mayor disponibilidad y soporte, pero que es paga. También, existen estudios abiertos para atender las limitaciones de LoRaWAN una de ellas es el emplear radio cognitiva para mejorar el uso de la banda de frecuencia [44].

Tiempo en el Aire

Para determinar el tiempo en el aire de un mensaje es importante conocer la duración de un chip (T_c) y la duración de un símbolo (T_s).

$T_c = 1/Bw$, por ejemplo, para un $Bw = 125$ kHz, se tiene un $T_c = 8 \mu s$.

$T_s = 2^{SF}/Bw$, para un $Bw = 125$ kHz y un $SF = 7$, se tiene un $T_s = 1.024$ ms. La ecuación nos indica que la duración del símbolo disminuye si el ancho de banda aumenta, y aumenta la duración si el SF se incrementa.

Para el cálculo del tiempo de transmisión de un paquete LoRa (tiempo en el aire de un mensaje transmitido), se debe hacer la suma del tiempo de duración del preámbulo más el tiempo de duración del payload [45].

Capítulo 4. IoT para la Industria

$$T_{paquete} = T_{preambulo} + T_{payload} \quad (4.4)$$

La duración del preámbulo utilizando un número de preámbulo equivalente a 8 símbolos, esto es lo definido por la especificación LoRaWAN para la frecuencia de uso, la fórmula para el cálculo es la siguiente:

$$T_{preambulo} = (No.preambulo + 4,25)Ts \quad (4.5)$$

Por otra parte, la duración del payload se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$T_{payload} = Ts(8 + \max\left(\left\lceil \frac{8PL - 4SF + 28 + 16CRC - 20H}{4(SF - 2DE)} \right\rceil\right) \times (CR + 4), 0)) \quad (4.6)$$

- Payload (PL) en bytes.
- CRC (habilitado=1, deshabilitado=0. En LoRaWAN por defecto CRC=1).
- Header (deshabilitado H=1, habilitado H=0). En LoRaWAN el header está habilitado: H=0.
- LowDataRateOptimize (habilitado DE=1, deshabilitado=0).
- Coding Rate (CR = 1, 2, 3 o 4, por defecto CR = 1).

Otra alternativa para el cálculo y la verificación del tiempo en el aire que dura el mensaje es emplear la herramienta web de loratools Air time calculator², que permite realizar estos cálculos de forma rápida. En la Tabla 4.3 se muestran los cálculos de tiempo en el aire usando la herramienta de loratools.

Tabla 4.3: Cálculo de tiempo en el aire de mensaje con LoRa Tool.

SF	Bw (kHz)	CR	PL	Preamble	TimeOnAir	Duty Cycle
7	125	1	51	8	102.66 ms	1 mensaje cada 10 seg
7	125	1	25	8	61.70 ms	1 mensaje cada 6 seg
7	125	1	13	8	46.34 ms	1 mensaje cada 5 seg
9	125	1	51	8	328.70 ms	1 mensaje cada 33 seg
9	125	1	25	8	205.82 ms	1 mensaje cada 21 seg
9	125	1	13	8	164.86 ms	1 mensaje cada 16 seg
8	500	1	51	8	46.21 ms	1 mensaje cada 5 seg
8	500	1	25	8	28.29 ms	1 mensaje cada 3 seg
8	500	1	13	8	20.61 ms	1 mensaje cada 2 seg

Resumiendo, la tecnología LoRa permite el envío de pequeños paquetes de datos a una velocidad de 0,3 kbps a 5,5 kbps con poca potencia, alrededor de 20 mW, a un receptor ubicado en una distancia lejana (urbano 2 a 5 km, rural 5 a 15 km). Los Gateway están configurados para escuchar múltiples frecuencias simultáneamente, en cada factor de

²Referencia: <https://loratools.nl>.

4.4. LoRa/LoRaWAN para IoT en la Industria

dispersión (SF) de cada frecuencia específica. El rango de frecuencias general para la zona de América que pertenece Uruguay es desde 902 MHz a 928 MHz, la asignación de canales y la frecuencia a utilizar es la indicada en la especificación LoRaWAN [43].

4.4.2. Especificación LoRaWAN

La organización LoRa-Alliance es una asociación abierta y sin fines de lucro cuyo objetivo es promover e impulsar el éxito del estándar LoRaWAN, como el estándar global para la conectividad IoT. Dentro sus trabajos para al estandarización y adopción de LoRaWAN presenta información detallada sobre los parámetros regionales específicos, para la implementación de la tecnología en diferentes regiones geográficas. Otra labor es proveer información sobre la operación de la red y dispositivos usando LoRaWAN. Los dispositivos finales LoRaWAN deben tener una funcionalidad de operación, las cuales son especificadas en Clases. Además, la infraestructura de la red LoRaWAN puede gestionar la tasa de datos y la potencia de transmisión de RF para cada dispositivo final de forma individual, mediante un esquema de tasa de datos adaptativa (ADR), también desarrollado en dicha especificación.

Asignación de canales y frecuencias

La asignación de las bandas de frecuencia es fundamental para garantizar la conformidad con las regulaciones locales y la configuración adecuada de dispositivos y gateways en redes LoRaWAN. La información suministrada de las frecuencias y canales para la comunicación es la especificada por la LoRa-Alliance en su documento de parámetros regionales [43].

La banda de frecuencia a tener en cuenta para selección y adquisición de dispositivos es USA (US 902 – 928), porque las frecuencias asignadas para LoRa en Uruguay están dentro de esa región definida. Al verificar la especificación de LoRaWAN los parámetros regionales indicados para Uruguay son rango de frecuencia Australia (AU 915 – 928) la asignación de canales para ambas regiones mencionadas se puede ver en las Figs. 4.5 y 4.6.

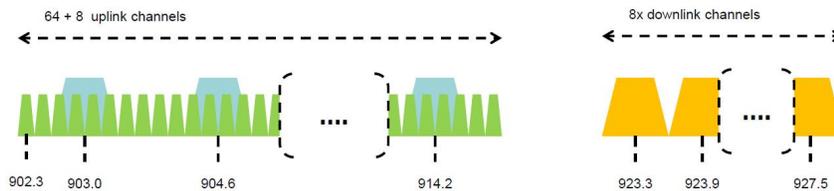


Figura 4.5: Canales frecuencia US902-928 (fuente: [43]).

Para la transmisión uplink (UL) se tiene 64 canales que van desde el 0 al 63 con un ancho de banda de 125 kHz variando el Data Rate (DR), DR0 a DR3, desde la frecuencia 902.3 incrementando 200 kHz hasta los 914,9 MHz, se puede ver en la Tabla 4.4. Adicionalmente se tienen 8 canales del 64 al 71 con un ancho de banda de 500 kHz usando DR4, comenzando desde los 903.0 con incremento de 1.6 MHz hasta los 914.9 MHz.

Capítulo 4. IoT para la Industria

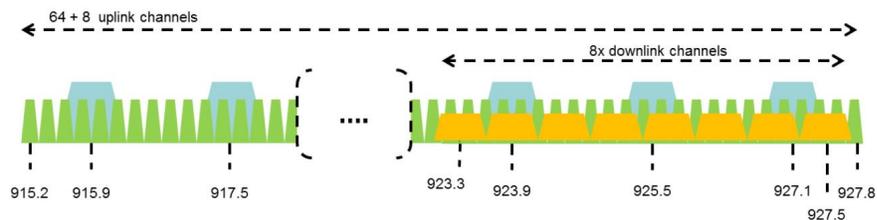


Figura 4.6: Canales frecuencia AU915-928 (fuente: [43]).

Tabla 4.4: Banda de Frecuencia US902-928 Uplink.

Frecuencia [MHz]	Data Rate	Ancho de banda
903.9	SF7 a SF10	125 kHz
904.1	SF7 a SF10	125 kHz
904.3	SF7 a SF10	125 kHz
904.5	SF7 a SF10	125 kHz
904.7	SF7 a SF10	125 kHz
904.9	SF7 a SF10	125 kHz
905.1	SF7 a SF10	125 kHz
905.3	SF7 a SF10	125 kHz
904.6	SF8	500 kHz

Para la transmisión downlink (DL) se establecen 8 canales numerados desde el 0 al 7 con un ancho de banda de 500 kHz usando DR10 al DR13, con frecuencia desde 923.3 MHz al 927.5 MHz con incrementos de 600 kHz, ver Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Banda de Frecuencia US902-928 Downlink.

Frecuencia [MHz]	Data Rate	Ancho de banda
923.3	SF7 a SF12	500 kHz
923.9	SF7 a SF12	500 kHz
924.5	SF7 a SF12	500 kHz
925.1	SF7 a SF12	500 kHz
925.7	SF7 a SF12	500 kHz
926.3	SF7 a SF12	500 kHz
926.9	SF7 a SF12	500 kHz
927.5	SF7 a SF12	500 kHz

Para el UL se tiene 64 canales que van desde el 0 al 63 con un ancho de banda de 125 kHz variando el Data Rate (DR), DR0 a DR5, desde la frecuencia 915.2 incrementando 200 kHz hasta los 927.8 MHz ver Tabla 4.6. Adicionalmente se tienen 8 canales del 64 al 71 con un ancho de banda de 500 kHz usando DR6, comenzando desde los 915.9 con incremento de 1.6 MHz hasta los 927.1 MHz. En la transmisión DL el rango de frecuencia es igual a USA, la única diferencia es que aquí se usan DR8 a DR13. La Tabla 4.2 presentada en la subsección de Data Rates permite verificar esos datos.

4.4. LoRa/LoRaWAN para IoT en la Industria

Tabla 4.6: Banda de Frecuencia AU915-928 Uplink.

Frecuencia [MHz]	Data Rate	Ancho de banda
916.8	SF7 a SF10	125 kHz
917.0	SF7 a SF10	125 kHz
917.2	SF7 a SF10	125 kHz
917.4	SF7 a SF10	125 kHz
917.6	SF7 a SF10	125 kHz
917.8	SF7 a SF10	125 kHz
918.0	SF7 a SF10	125 kHz
918.2	SF7 a SF10	125 kHz
917.5	SF8	500 kHz

Adaptive Data Rate (ADR)

El ADR es una función que permite escalar la capacidad de la red de forma dinámica de acuerdo a la densidad de nodos e infraestructura, tal como se menciona en el capítulo 3. Esta es una característica clave que permite la optimización automática de la velocidad de datos y otros parámetros de comunicación de los dispositivos LoRa en una red LoRaWAN. La principal finalidad es lograr un equilibrio óptimo entre consumo de energía, alcance y rendimiento de la red en función de las condiciones del entorno.

La función ADR en LoRaWAN trabaja realizando monitoreo del enlace. Los dispositivos LoRaWAN y las estaciones base (gateways) monitorean constantemente la calidad de la señal y la relación señal/ruido (SNR) en la red. Basándose en la información de calidad del enlace, el sistema de red LoRaWAN determina si es necesario ajustar los parámetros de comunicación del dispositivo. Estos parámetros pueden incluir el SF, la potencia de transmisión y el BW. Si la calidad es buena, el ADR podría aumentar el SF y disminuir la potencia de transmisión para reducir el consumo de energía. Si la calidad es mala, podría hacer lo contrario para mejorar la robustez de la comunicación. Esto es particularmente útil en aplicaciones de IoT donde la duración de la batería es crítica y las condiciones de comunicación pueden variar con el tiempo.

El ADR es una característica valiosa en aplicaciones de IoT, ya que permite que los dispositivos LoRaWAN se adapten a las condiciones cambiantes del entorno sin intervención manual. Esto es especialmente importante en aplicaciones industriales y agrícolas, donde las condiciones pueden variar drásticamente debido a la distancia, la interferencia y otros factores. La capacidad de optimizar dinámicamente la configuración de los dispositivos contribuye a un rendimiento confiable y eficiente de la red.

Clases de Dispositivos

- Clase A: Un nodo de Clase A posibilita comunicaciones bidireccionales tras la transmisión de información. Luego de emitir, el nodo entra en un modo de escucha durante dos breves intervalos temporales, a saber, 1 segundo con una variación de aproximadamente 20 microsegundos después de la transmisión, y luego 1 segundo con una variación de aproximadamente 20 microsegundos des-

Capítulo 4. IoT para la Industria

pués de la primera vez que entra en el modo de escucha. Estos nodos destacan por su eficiencia en el consumo energético y en consecuencia, son ampliamente preferidos.

- Clase B: Los nodos de Clase B adoptan un enfoque similar al de Clase A al entrar en el modo de escucha después de la transmisión. Sin embargo, añaden la capacidad de sincronizarse con el gateway en horarios programados. El consumo de energía de estos nodos depende de los períodos de tiempo predefinidos en la programación.
- Clase C: En este escenario, los nodos se mantienen en modo de escucha de manera continua, excepto cuando están transmitiendo. Por lo tanto, este modo se caracteriza por el mayor consumo de energía, ya que la escucha constante implica un gasto constante de energía, a diferencia de los modos A y B.

Asociación de un Dispositivo

Cuando se introduce un nuevo dispositivo LoRa en una red LoRa, es esencial que se someta a un proceso de activación. Este procedimiento permite que se compartan ambas claves de sesión entre el dispositivo LoRa y el servidor de red. En la actualidad, LoRa presenta dos enfoques de activación diferentes para llevar a cabo este proceso.

- Activation By Personalization (ABP)
- Over-The-Air Activation (OTAA)

Activation By Personalization (ABP)

Se utiliza cuando los dispositivos y la red LoRaWAN ya tienen información compartida de activación de antemano, como las claves de sesión, y no necesitan un proceso de negociación de claves en tiempo real. Esto hace que ABP sea más rápido y más simple en comparación con OTAA, pero también menos seguro. Para la activación ABP de un dispositivo LoRaWAN se debe seguir los siguientes pasos:

1. Configuración del dispositivo: Antes de enviar datos a la red LoRaWAN, el dispositivo debe estar preconfigurado con ciertos parámetros clave, incluyendo:
 - DevAddress: Es una dirección lógica que identifica al nodo en la red. Tiene un largo de 4 bytes.
 - NetworkSessionKey (NwkSKey): Utilizada por el nodo y el servidor para las distintas transmisiones y comprobación de la integridad de los mensajes. Tiene un largo de 16 bytes.
 - ApplicationSessionKey (AppSKey): Utilizada por el nodo y la aplicación para las distintas transmisiones y comprobación de la integridad de los mensajes. Tiene un largo de 16 bytes.
2. Registro del dispositivo en la red: La información de configuración del dispositivo, debe ser registrada en la plataforma de administración de la red LoRaWAN a la que el dispositivo se conectará.

4.4. LoRa/LoRaWAN para IoT en la Industria

3. Configuración de parámetros: El dispositivo debe estar configurado con la frecuencia de operación y otros parámetros de red adecuados, como el tipo de banda (por ejemplo, 868 MHz o 915 MHz, dependiendo de la región).
4. Transmitir datos: Una vez que el dispositivo está configurado y registrado, se puede transmitir datos a la red LoRaWAN utilizando la modulación LoRa.
5. Decodificación en la red: Cuando los datos del dispositivo llegan a la red LoRaWAN, la red utiliza la información de configuración, para descifrar los datos y autenticar al dispositivo.
6. Procesamiento de datos: La red LoRaWAN procesa los datos, verifica la autenticidad del dispositivo y enruta los datos a la aplicación correspondiente.

Es importante destacar que, en el método ABP, la activación es estática, lo que significa que no hay un proceso de renovación de claves o reautenticación periódica. Esto puede hacer que la comunicación sea menos segura en comparación con el método OTAA, donde se realizan negociaciones de claves dinámicas en cada activación.

El método ABP se utiliza en situaciones donde la seguridad no es la principal preocupación, se prefiere la simplicidad y velocidad en la activación de dispositivos LoRaWAN, como en aplicaciones industriales o de monitoreo ambiental. Sin embargo, en aplicaciones donde la seguridad es crítica, se prefiere OTAA debido a su mayor robustez en términos de autenticación y seguridad.

Over-The-Air Activation (OTAA)

OTAA es generalmente considerado más seguro y se utiliza cuando se requiere una mayor seguridad en la conexión de dispositivos a la red LoRaWAN. Para la activación OTAA de un dispositivo LoRaWAN se debe seguir los siguientes pasos:

1. Configuración del dispositivo: Antes de enviar datos a la red LoRaWAN, el dispositivo debe estar preconfigurado con ciertos parámetros clave, incluyendo:
 - DevEUI: Es un identificador de fábrica de cada dispositivo. Tiene 8 bytes.
 - AppEUI: Identifica al propietario de la aplicación a la que el dispositivo pertenece. Tiene 8 bytes.
 - AppKey: Clave secreta de 16 bytes entre el nodo y la red. Utilizada para establecer las distintas claves de sesión (ApplicationSessionKey y NetworkSessionKey). El nodo puede reutilizar estas claves de sesión, siempre y cuando no hayan expirado, si esto sucede se debe realizar un nuevo inicio de sesión.
2. Registro del dispositivo en la red: La información de configuración del dispositivo, incluyendo DevEUI, AppEUI y AppKey, debe ser registrada en la plataforma de administración de la red LoRaWAN a la que el dispositivo se conectará.
3. Activación OTAA: Cuando el dispositivo se inicia por primera vez o necesita volver a unirse a la red, utiliza el método OTAA. El dispositivo transmite un mensaje de solicitud de unión (Join Request) a la red LoRaWAN.
4. Respuesta de la red: Cuando la red LoRaWAN recibe el mensaje de solicitud de unión, procesa la solicitud. La red envía una respuesta de unión (Join Accept) al dispositivo.

Capítulo 4. IoT para la Industria

5. Negociación de claves: Durante la respuesta de unión, la red LoRaWAN envía al dispositivo una serie de parámetros, que le permite junto con la AppKey, generar la clave de sesión de red (NwkSKey) y la clave de sesión de aplicación (AppSKey). El dispositivo almacena estos valores y los utiliza para cifrar y descifrar datos.
6. Transmitir datos: Una vez que el dispositivo ha completado el proceso OTAA y ha recibido las nuevas claves, puede comenzar a transmitir datos a la red utilizando la modulación LoRa.
7. Decodificación en la red: Cuando los datos del dispositivo llegan a la red LoRaWAN, la red utiliza las claves de sesión proporcionadas durante la negociación para descifrar los datos y autenticar al dispositivo.
8. Procesamiento de datos: La red LoRaWAN procesa los datos, verifica la autenticidad del dispositivo y enruta los datos a la aplicación correspondiente.

OTAA es preferible en aplicaciones donde la seguridad es fundamental, ya que garantiza que el dispositivo y la red compartan claves de sesión únicas para cada sesión de activación. Esto proporciona una mayor robustez en términos de seguridad en comparación con el método ABP (Activation By Personalization), que utiliza claves estáticas.

El método OTAA también permite una mayor flexibilidad, ya que los dispositivos pueden ser administrados de manera más dinámica y segura, lo que es especialmente importante en aplicaciones de IoT críticas en cuanto a seguridad.

4.5. Comparación LoRa/LoRaWAN con otras tecnologías

LoRa es una tecnología inalámbrica de RF que permite desarrollar una variedad de soluciones que requieren largo alcance y bajo consumo de potencia, junto con el protocolo LoRaWAN permite desarrollar soluciones integras para IoT. LoRaWAN es un protocolo abierto desarrollado y mantenido por la LoRa Alliance, una asociación formada por más de 500 miembros entre empresas, fabricantes, instituciones, etc, que promueven la implementación de dicho protocolo. NB-IoT está soportado por la 3GPP y GSMA, es un sistema de comunicación desarrollado para la comunicación a larga distancia con bajo consumo sobre la infraestructura de red celular, siendo NB-IoT a su vez compatible con la red móvil LTE. Sigfox, por su parte, es una red que se basa en la tecnología de espectro expandido. Diseñada para transmitir pequeñas cantidades de datos de manera eficiente y con un bajo consumo de energía.

La red LoRaWAN opera en la banda no licenciada de Sub-GHz (para Uruguay está en la frecuencia de 900 MHz), por ser banda no licenciada es de libre acceso su uso. NB-IoT usa el espectro para redes celulares cuyas bandas son licenciadas por lo tanto su uso tiene un costo y además se depende de un operador de servicio celular. Al igual que LoRa, Sigfox opera en bandas de frecuencia no licenciadas, lo que significa que no es necesario obtener licencias para su uso, lo que puede simplificar la implementación y reducir costos.

Actualmente existen 83 operadores de redes públicas utilizando LoRaWAN en 49 diferentes países, como también distintas redes privadas, esto de acuerdo a la LoRa Alliance. Las redes LoRaWAN son flexibles en cuanto a su despliegue ya que permite tanto redes públicas como privadas o una combinación de ambas, para ambiente

4.5. Comparación LoRa/LoRaWAN con otras tecnologías

exteriores o interiores, además las señales tienen buena penetración en zonas urbanas como también un alcance de 40 km en zonas rurales. Las organizaciones que soportan NB-IoT señalan que en los próximos años alrededor de 40 países realicen despliegues de redes NB-IoT, tal como se señaló anteriormente está diseñada para utilizar la infraestructura de LTE, por lo tanto, es una red pública externa donde las estaciones base no se encuentran en todas partes, entonces puede ocurrir que zonas de interés estén fuera de la cobertura para NB-IoT.

Sigfox se caracteriza por ser una tecnología propietaria con una red global gestionada centralmente por Sigfox, por lo tanto, los dispositivos pueden tener conectividad o en caso de ser necesario puede haber un despliegue de una RB Sigfox. Tener en cuenta que la cobertura global de Sigfox es administrada por una entidad central, como también el acceso o gestión de los datos se necesita acceder de la red centralizada con un costo de servicio asociado, lo que la hace menos flexible.

El consumo de energía para dispositivos empleando sistema LoRaWAN está en el orden de 18 mA para una potencia de 10 dBm y 84 mA para una potencia 20 dBm. También gracias al funcionamiento asíncrono para el envío de datos, hace que el consumo de energía sea más eficiente, por lo que está previsto que el tiempo de vida de una batería en un dispositivo LoRaWAN alcance los 10 años. En NB-IoT el consumo eléctrico está en el orden de los 220 mA para 23 dBm y 100 mA para 13 dBm, por lo tanto, requiere más potencia que un dispositivo LoRaWAN, también NB-IoT mantiene una conexión sincronizada con la red celular por lo que el consumo de batería tendría un grado mayor en comparación con LoRaWAN. Sigfox es adecuada para aplicaciones que requieren un uso esporádico y eficiente de la batería. Está diseñada para transmitir pequeñas cantidades de datos de manera eficiente y con un bajo consumo de energía. El consumo de potencia en transmisión está en el orden de los 14 dBm.

LoRa/LoRaWAN referente a la tasa de envío de datos está alrededor de 293 bps a 50 kbps. Con la funcionalidad en el protocolo de adaptar la tasa de envío de datos de forma dinámica, puede conseguir una mayor tasa. Además, dependiendo de lo distanciado en que se encuentre el dispositivo del Gateway, puede optimizar el tiempo de ocupación del canal previniendo colisiones. NB-IoT está diseñado para aplicaciones con mayor tasa de datos que LoRaWAN presentando un máximo en tasa de datos de 250 kbps aproximadamente. En el caso de Sigfox la velocidad de transmisión de datos es de hasta 100 bps de enlace ascendente y 600 bps de enlace descendente. En la Tabla 4.7 se resume los parámetros de cada tecnología [10].

Tabla 4.7: Comparación de Tecnologías LPWAN.

Parámetro	NB-IoT	LoRa/LoRaWAN	Sigfox
Banda ISM	No	Si	Si
Ancho de Banda	180 kHz	125 kHz	100 kHz
Tasa Downlink	200 Kbps	0.3 a 5 Kbps	100 bps
Tasa Uplink	200 Kbps	5 a 50 Kbps	600 bps
Rango	7x Cat-1	5 km urbano, 15 km rural	hasta 50 km
MCL	164 dB	165 dB	168 dB
Bajo Consumo	Bajo 15 uA inactivo	Muy bajo 1.5 uA	Muy bajo 1.5 uA
Latencia	1.6 a 10 s	500 ms a 2 s	Hasta 60 segundos
Potencia Tx (UE)	23 dBm	14 dBm	14 dBm
Mobilidad	Limitada	Mobil	Limitada

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 5

Diseño de Sistema IoT para RANC

El objetivo es presentar las bases y criterios de diseño para el proyecto Reducción de Agua No contabilizada (RANC), dentro de estas bases se especifican antecedentes, ecuaciones, estudios teóricos y análisis de sistemas que permitan establecer criterios para el desarrollo del proyecto. Además, comprende el estudio de la comunicación inalámbrica utilizando tecnología Low Power Wide Area (LPWA) para IoT, para la medición, transmisión y procesamiento de datos provenientes del sistema de distribución de agua para un área dentro de la red que suministra agua a la localidad de Las Piedras. Como bases para el diseño del proyecto se especifica el lugar de implementación, el detalle de la red de distribución de agua, la tecnología a utilizar para el proyecto RANC, el sistema de comunicación inalámbrica, ecuaciones de cálculos, entre otros.

Como fue expuesto actualmente en Uruguay existen pérdidas del orden del 50 % de agua frente al total de agua producida, gran parte de las pérdidas ocurren en el sistema de distribución bien sea por fugas, roturas o averías, por lo tanto, el estudio y proyecto que se presenta está orientado a desarrollar un sistema que permita el sensado y transmisión de datos, además monitoreo y control de forma remota en una línea de distribución de agua en la localidad de Las Piedras.

El sistema a proponer utilizara dispositivos de comunicación inalámbrica empleando Low Power Wide Area Network (LPWAN), tecnología que permite el uso de dispositivos de bajo consumo de potencia dentro una red de largo alcance permitiendo la transferencia de pequeña cantidad datos, pero lo suficiente para controlar y supervisar los elementos necesarios de la línea de distribución en la red de aguas. los cuales pueden comunicarse entre sí o hacia un Gateway principal, utilizando una tecnología de comunicación inalámbrica, de esta forma obteniendo una solución de IoT.

5.1. Tecnología de Comunicación para Sistemas RANC

El objetivo es realizar la selección de la tecnología de comunicación, principalmente los protocolos de la capa física y la capa de acceso a implementar, como también los

Capítulo 5. Diseño de Sistema IoT para RANC

dispositivos y equipos a utilizar para el proyecto Reducción de Agua No contabilizada (RANC). Anteriormente se presentaron las diferentes tecnologías de comunicación para IoT, en esta sección se estudian las tecnologías inalámbricas usadas actualmente para soluciones IoT que se adaptan a la región y cumplen con los requerimientos del proyecto. Se va hacer estudio de protocolos y especificaciones de técnicas de equipos para el proyecto RANC, el cual tiene previsto ser instalado en la red de distribución de agua en la ciudad de Las Piedras, Canelones Uruguay.

5.1.1. Ubicación Geográfica

El lugar donde se realizará el relevamiento, prueba e instalación del sistema de comunicación es en la localidad de Las Piedras ($34^{\circ}41'51.4''S$ $56^{\circ}12'58.3''W$) específicamente en las coordenadas indicadas en la Tabla 5.1 a continuación:

Tabla 5.1: Ubicación Geográfica de Localidades/Sectores.

Localidad / Sector	Ubicación Geográfica
Entrada General Herten	-34.719884, -56.227462
Entrada Subsector Ricaldoni	-34.722923, -56.229486
Entrada Municipio Norte	-34.725914, -56.227423
Entrada Subsector Oeste	-34.726358, -56.228863
Entrada Asentamiento	-34.728182, -56.231540

A continuación, se presenta el mapa de cada una de las zonas de interés para el proyecto, en el mismo se puede ver marcado los puntos indicados en la tabla anterior.

5.1.2. Especificación del Sistema de Agua Instalado

El sistema de agua instalado comprende un elemento principal que abastece la localidad de donde se conecta la red de tuberías para crear la red de suministro de agua, que permite abastecer varias áreas en la localidad y dispuesta, para cubrir la demanda presente en la zona. En el plano de las áreas del sistema de distribución de agua se puede ver cada una de las zonas. El área a estudiar es la zona de Herten, y su red de agua está formada por una tubería que hace la distribución del agua en una comunidad, esta línea está conformada por una válvula de control que regula el flujo, apoyándose de un medidor flujo que permite monitorear la cantidad de líquido que atraviesa la tubería, la válvula es tipo Sander la misma funciona controlando un diafragma que impulsa el vástago de la válvula para la apertura y cierre, además en la línea hay dos puntos para la medición de la presión.

El mapa de la Fig. 5.1 presenta la red de distribución del área de Herten, subsector Ricaldoni. En el mismo con la flecha azul (1) se señala la entrada de suministro de agua del subsector, donde dice VRP y con la flecha roja (2) se indica el punto crítico, para la medición de presión.

El mapa de la Fig. 5.2 presenta la red de distribución Norte, subsector Oeste. En el mismo con la flecha azul (1) se indica la entrada de suministro de agua del subsector, donde dice VRP, con la flecha roja (2) se indica el punto crítico para la medición de

5.2. Propuesta de Solución IoT



Figura 5.1: Red de distribución área de Herten, Subsector Ricaldoni.

presión y con la flecha verde (3) tenemos la salida desde el sector a un asentamiento, conexión con sumisnito de agua no contabilizada. Este punto es ideal para medir presión y caudal. El Subsector Oeste está a la izquierda de la línea verde.

5.2. Propuesta de Solución IoT

Para brindar un sistema de intercambio de datos empleando un sistema de comunicación inalámbrico para un monitoreo constante y en tiempo real, se diseñará e implementará una red LPWAN usando la tecnología LoRa/LoRaWAN, el análisis y selección de esta tecnología está especificado en el documento selección de tecnología. Utilizando dispositivos inteligentes (Nodos) que estarán midiendo la presión en los puntos antes y después del paso del agua por la válvula. La información es enviada de forma inalámbrica a un Gateway, el cual contara con acceso a la red WAN para el envío de los datos a un servidor su procesamiento y visualización en un sistema de monitoreo vía Web.

5.2. Propuesta de Solución IoT

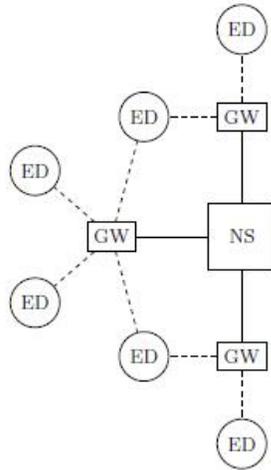


Figura 5.3: Topología Red LoRa/LoRaWAN (fuente: [45]).

5.2.2. Arquitectura de la Red

La arquitectura de red propuesta para el sistema se puede observar en la Fig. 5.4, la misma se efectuó siguiendo los fundamentos de redes LPWAN, así como también las especificaciones de LoRa/LoRaWAN.

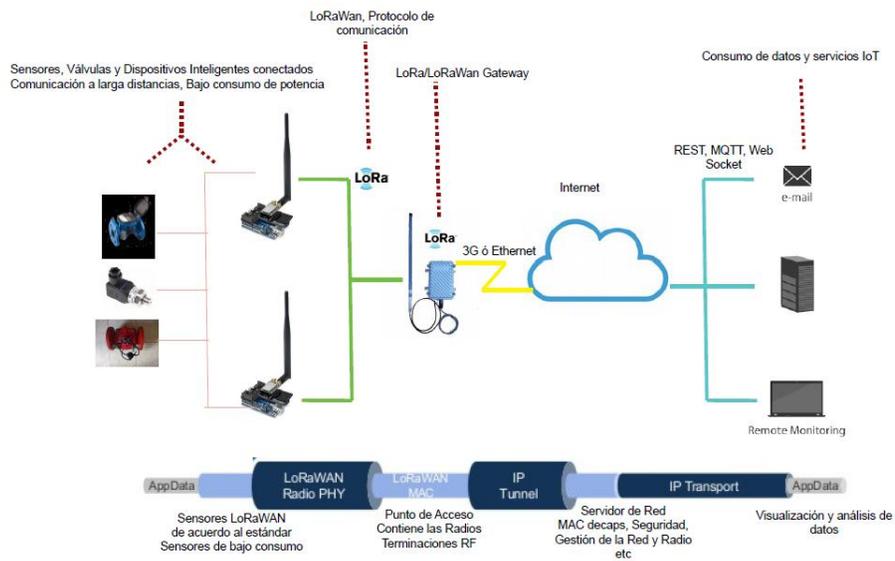


Figura 5.4: Arquitectura Red LoRa/LoRaWAN RANC.

La arquitectura esta conformada por los dispositivos LoRaWAN o nodos, que de acuer-

Capítulo 5. Diseño de Sistema IoT para RANC

do a la selección de equipo el mismo será a la vez sensor de presión, o en el otro caso el nodo recibirá la señal del sensor de presión. Los nodos se comunicarán con un Gateway central encargado de coordinar la red y ser puerta de enlace para la comunicación con Internet. La conexión a Internet es a través de la red celular o mediante conexión Ethernet a un router con el servicio respectivo, lo ideal es tener ambas conexiones siendo una de respaldo.

5.2.3. Cálculo de Enlace

La estimación del enlace de comunicación es de gran importancia para todo sistema de radio, ya que permite realizar cálculos de potencia en el receptor tomando en cuenta las ganancias, así como también las pérdidas en el camino, para ello se usará la ecuación de Friis, expresada en el Capítulo 2.

El requerimiento de sensibilidad en recepción de los dispositivos se compara con el valor de potencia recibida calculada con la ecuación de Friis, por lo tanto, para lograr comunicación entre un transmisor y un receptor la sensibilidad debe ser menor o igual a la potencia recibida $S_{rx} \leq P_{rx}$.

Los sistemas LPWAN consisten en transmisiones a larga distancia, por lo tanto, el parámetro de pérdida que más influye son las pérdidas del espacio libre. Es importante tener en cuenta para la selección de los dispositivos, la sensibilidad, generalmente los nodos LoRa tienen una sensibilidad ≤ -140 dBm, valor aceptable para lograr una comunicación a larga distancia.

Analisis de Cobertura

Para los cálculos de cobertura se utilizó la herramienta CloudRF¹, este es un software especializado que permite hacer cálculos de propagación de RF y visualización de cobertura en mapa, además posee parámetros preconfigurados para cálculos RF de distintos sistemas de comunicación entre ellos LoRa.

La Fig. 5.5 muestra el radio de cobertura de la antena en el lugar previsto para instalar el gateway. Se puede apreciar la zona de cobertura en color verde, donde se presenta el mejor nivel de señal hasta unos -85 dBm y a medida que nos alejamos de la antena, entramos en una zona de cobertura azul que representa niveles de señal más débiles (-105 dBm). Es importante señalar que el software no modela estructuras físicas como edificios, árboles, entre otros, por lo que no se tiene en consideración las pérdidas por atenuación, siendo necesario hacer medidas reales, sin embargo, nos da un indicio de que sea factible la comunicación.

En la Tabla 5.2 se puede ver los datos del transmisor y el receptor que se consideraron para la simulación, esto basándonos en la plantilla LoRa del software y las especificaciones de los equipos.

En el Apéndice A sección A.1, se muestran el modelado de línea de vista, donde se puede verificar el nivel de terreno y la zona de Fresnel entre los puntos de ubicación de los receptores en el área y el transmisor. Como se puede apreciar existen unos niveles

¹Referencia: <https://cloudrf.com/>.

5.3. Prototipo LoRa/LoRaWAN

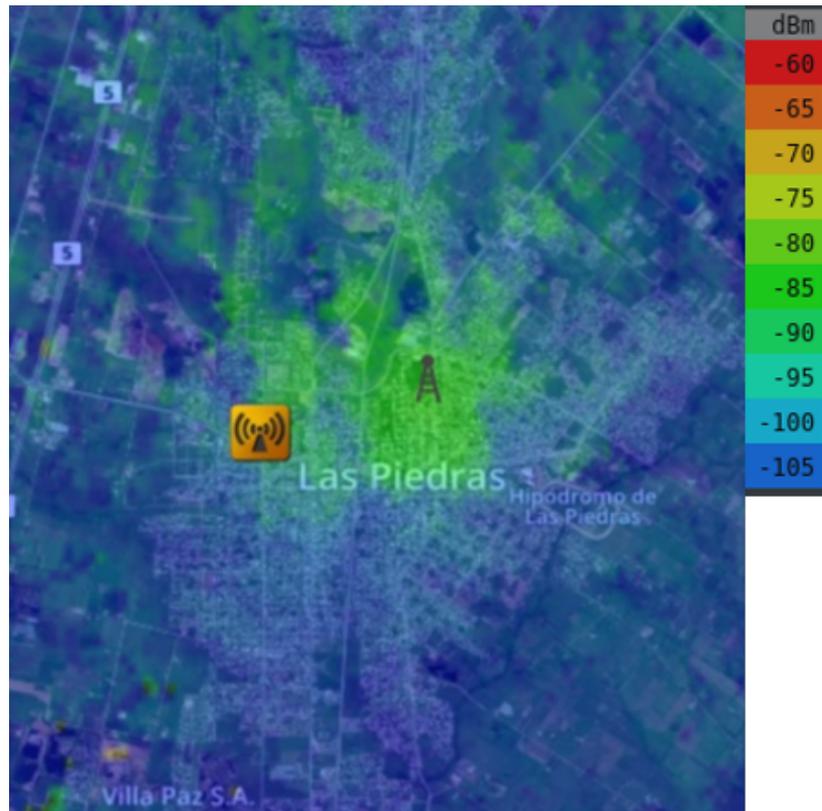


Figura 5.5: Rango de cobertura obtenido con CloudRF.

que afectan el nivel de recepción de la señal, de todas formas, la simulación indica unos niveles entre -82 dBm y -93,3 dBm, valores aceptables para que los dispositivos reciban mensajes. Además, las señales de radio LoRa tiene la facultad de penetrar lugares internos o atravesar obstáculos, por lo cual disminuye las afectaciones por atenuaciones. Además en A.2 se muestran las ubicaciones tentativas de los nodos y se verifica nuevamente el perfil del terreno, pero esta vez usando la herramienta Google Earth² para tener una comparación.

5.3. Prototipo LoRa/LoRaWAN

5.3.1. Equipos y Dispositivos LoRa/LoRaWAN

Para la selección de equipos y dispositivos para el proyecto RANC, se consideraron diversos parámetros clave. Basándose en la tecnología de comunicación estudiada, se determinó que los dispositivos deben emplear LoRa a nivel de capa física y LoRaWAN

²Referencia: <https://earth.google.com/>.

Capítulo 5. Diseño de Sistema IoT para RANC

Tabla 5.2: Parámetros de Configuración.

Parámetros	Valor
Frecuencia	915 MHz
ERP	22.8 dBm
EIRP	25 dBm
Latitud/Longitud	-34.722567, -56.214432
Altura TX	10 metros
Potencia de Transmisión (Tx RF)	0.1 W
Ganancia de Ant. Tx	5 dB
Altura RX	1 metro
Ganancia de Ant. Rx	2.14 dB
Sensibilidad de Recepción (Rx)	-140 dBm
Distancia Máxima	5 km

a nivel de capa MAC o de acceso. Además, se evaluaron factores como la ubicación geográfica, las condiciones ambientales, el rango de comunicación y la interoperabilidad entre los distintos elementos del sistema. En la Tabla 5.3 se presentan las especificaciones generales requeridas.

Tabla 5.3: Especificaciones del Sensor/Nodo y el Gateway.

Parámetros	Sensor/Nodo	Gateway
Frecuencia	900 MHz	900 MHz
Temperatura de Operación	-10°C a 65°C	-30°C a 65°C
Grado de Protección	IP 68	IP 67
Antena	Omnidireccional	Omnidireccional
Potencia de Transmisión	15 a 20 dBm	Hasta 25 dBm
Sensibilidad en Recepción	-140 dBm	-
Rango	al menos 5 Km	al menos 5 Km
Alimentación	3 - 6 V (batería)	12 - 48 V
Interfaz digital	al menos 2	-
Interfaz analógica	al menos 2	-
Sensor Integrado	Humedad y Temp.	-
Conexión Ethernet	-	Si
Conexión Celular	-	Si

Los valores de potencia de transmisión y sensibilidad se determinaron a partir de las especificaciones técnicas de los equipos seleccionados. Otros factores clave considerados fueron la interfaz de desarrollo y usuario, valorando que los nodos incluyan un IDE integrado, como Arduino, y que los gateways ofrezcan una interfaz web de configuración, así como soporte para comandos vía Telnet y/o SSH. Además, se tuvieron en cuenta aspectos como los costos, la presencia de la empresa en el mercado y la disponibilidad de soporte técnico.

5.3. Prototipo LoRa/LoRaWAN

Evaluación de Equipos

Para analizar y comparar los equipos apropiados para el proyecto se desarrolló una matriz de evaluación con el objetivo de visualizar los parámetros de los equipos de cada fabricante en conjunto, para así poder realizar una selección de los equipos que mejor se ajusten al proyecto tanto técnica como económicamente. En la Tabla 5.4 y Tabla 5.5, se muestran los equipos considerados en el proyecto.

Tabla 5.4: Tipos de Gateways.

Marca	Modelo
Microchip	DV164140-2
IMST	iC880a board
RAK	RAK 831
Libelium	Lora Gateway
Multitech	MultiConnect Conduit
NAS	Gateway IX10x1

Tabla 5.5: Ejemplos de Dispositivos LoRa.

Marca	Modelo
Arduino	Módulo de LoRa
TTN	Things Uno
Microchip	RN2903
NAS	LoRaWAN IP68 Pulse Reader
NAS	Smart Sensor Interface
Libelium	Waspote

La alternativa a considerar es la solución de gateway presentada por RAK [37]. El gateway está constituido por una Raspberry Pi con un módulo LoRa conectado, ambos dentro de una carcasa como se puede ver en la Fig. 5.6. Además como nodo sensor se puede utilizar el Wisnode RAK, ver Fig. 5.6, que es un módulo LoRaWAN adaptable a la tarjeta de desarrollo Arduino. Esta solución lleva más trabajo ya que se deben integrar los dispositivos y programar los módulos para la comunicación.

Otro módulo LoRaWAN que es adaptable a la tarjeta Arduino es el Dragino LoRa Shield Fig. 5.7, este módulo permite el envío de datos a larga distancia a una baja tasa de envío de datos, usando la técnica de modulación LoRa y emplear LoRaWAN en la capa de acceso.

Selección de los Equipos

Una propuesta eran los dispositivos y Gateway de la marca NAS. Dichos equipos tienen las capacidades industriales, grados de protección y la disponibilidad de ser instalados en ambientes externos, lo cual los hacía ideal para el lugar de instalación. Por dificultades de suministro por parte del fabricante no se pudo contar con estos equipos.

Finalmente, los equipos seleccionados para la implementación de la solución IoT del

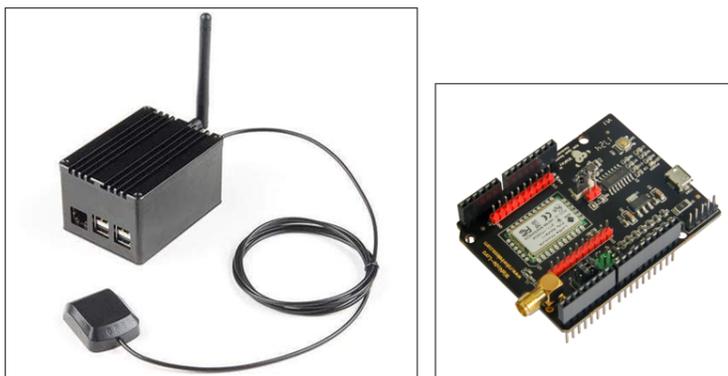


Figura 5.6: Gateway y Módulo LoRaWAN RAK.

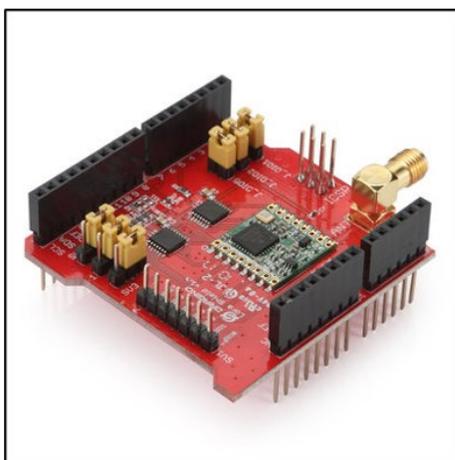


Figura 5.7: Módulo LoRa Dragino.

proyecto fueron: el gateway RAK 831, el nodo Wisnode RAK, el módulo LoRa Dragino, el módulo ADC 4-20 mA y la tarjeta de desarrollo Arduino. Estos dispositivos requieren ensamblaje y programación para su correcto funcionamiento. Además, para su instalación en entornos exteriores, deben ser colocados en cajas estancas diseñadas específicamente para soportar condiciones ambientales adversas.

Gateway LoRa/LoRaWAN RAK 831

El Gateway RAK 831, fabricado por RAKwireless³, es un equipo de desarrollo que permite ser utilizado para diferentes soluciones IoT utilizando LoRa como sistema de comunicación inalámbrica para establecer conexión con nodos instalados en un amplio rango de distancia. El Gateway está compuesto por una tarjeta Raspberry-Pi

³Referencia: <https://www.rakwireless.com/en-us>.

5.3. Prototipo LoRa/LoRaWAN

3, una tarjeta de adaptación con módulo GPS y el concentrador LoRa RAK 831. Este concentrador utiliza el chip SX1301 de Semtech el cual tiene un núcleo concentrador LoRa capaz de recibir hasta 8 paquetes LoRa de forma simultánea, enviados con diferentes factores de propagación en diferentes canales.

En la Fig. 5.8 se puede observar cada una de las tarjetas que constituyen el Gateway RAK 831.

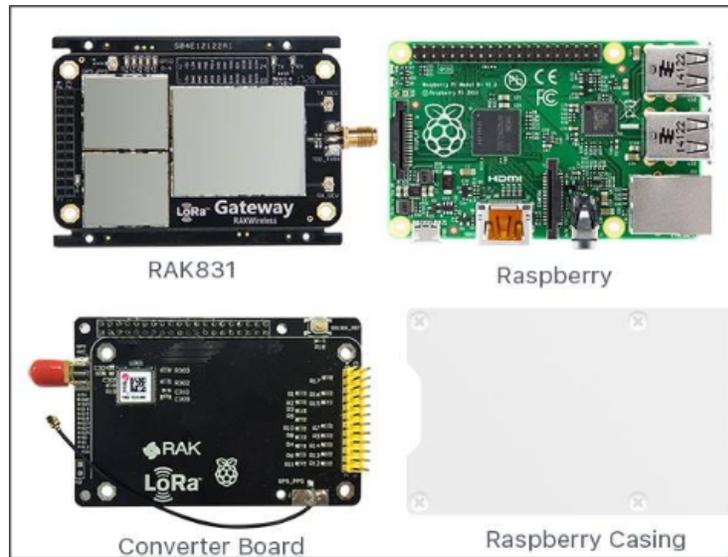


Figura 5.8: Gateway LoRa RAK 831.

Cada una de estas tarjetas son adaptables entre sí, la tarjeta de adaptación (converted board) permite la conexión del concentrador LoRa con la rapsberry, la comunicación es por medio de bus SPI, y la alimentación es por una sola fuente de 5 VDC 2 A conectada a la rapsberry. El diagrama de bloque del gateway se puede visualizar en la Fig. 5.9.

Nodo LoRa/LoRaWAN

El nodo está formado por una tarjeta de desarrollo Arduino⁴ la cual permite realizar distintos programas y aplicaciones a través de su Interfaz de Desarrollo (IDE), el módulo LoRa fabricado por Dragino⁵ para Arduino y un módulo para señales de 4 a 20 mA, en la imagen se puede observar el nodo LoRa, compuesto por la tarjeta y módulos mencionados anteriormente.

El Dragino LoRa Shield, está basado en el SX1276 / SX1278, cuyo diseño se enfoca en aplicaciones de redes de sensores inalámbricos profesionales tales como sistemas de irrigación, medición inteligente, ciudades inteligentes, detección de teléfonos inteligentes, automatización de edificios, etc. Puede lograr una sensibilidad de -148 dBm, una

⁴Referencia: <https://www.arduino.cc/>.

⁵Referencia: <https://www.dragino.com/products/lora/item/102-lora-shield.html>.



Figura 5.9: Diagrama de bloques Gateway LoRa.

potencia de salida de 20 dBm, tiene integrado un sensor de temperatura y un indicador de batería baja, una descripción completa de sus características se puede ver en [39].

El módulo ADC 4-20 mA de Circuitar⁶ Fig. 5.10, está diseñado para hacer medidas de sensores con salida de 4 mA a 20 mA, está implementado con el ADS1115 IC, el ADC 4-20 Nanoshield proporciona 25600 puntos de medición en la escala de 4 mA a 20 mA, con una resolución de 625 nA. Opcionalmente, el módulo también se puede usar para medir sensores con una salida de 0 a 20 mA (la corriente máxima recomendada es de 30 mA). Se destacan las siguientes características:

- Resolución 625 nA (25600 niveles).
- 860 muestras por segundo
- Medición de hasta 4 sensores por módulo.
- Hasta 4 módulos simultáneamente, sumando 16 sensores.
- Filtro RC en todos los canales.

5.3.2. Configuración y Programación de los Dispositivos

En el proceso de selección de los equipos se hizo una investigación de diferentes fabricantes de Gateway y dispositivos finales o nodos LoRa/LoRaWAN, de esa investigación se seleccionó el Gateway RAK 831 y los nodos compuestos por tarjeta de desarrollo Arduino, el Dragino LoRa Shield y el módulo ADC 4-20 mA. Este apartado explica la configuración y programación hecha en los dispositivos.

Configuración del Gateway RAK 831

El RAK 831 es un Gateway formado por una raspberry Pi 3, una tarjeta adaptadora con modulo GPS y la tarjeta concentradora LoRa. El mismo está diseñado para ser

⁶Referencia: <https://www.circuitar.com.br/nanoshields/modulos/adc-4-20/index.html/>.

5.3. Prototipo LoRa/LoRaWAN

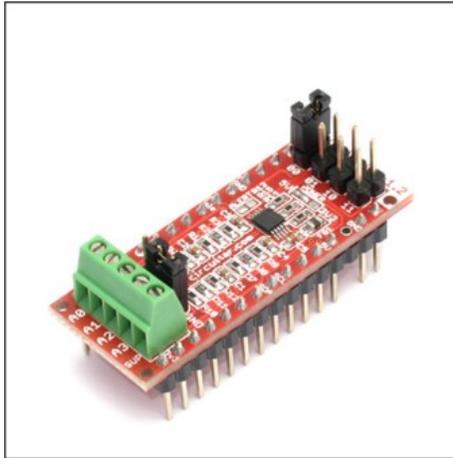


Figura 5.10: Módulo ADC 4-20 mA.

instalado internamente con la capacidad de soportar el protocolo LoRaWAN 1.0.2, siendo ideal para estudio y prototipado. El Gateway vino en un kit de desarrollo con una micro SD con los softwares preinstalados.

El concentrador RAK 831 usa el chip Semtech SX 1301 que tiene la capacidad de recibir hasta 8 paquetes LoRa de forma simultánea y enviar mensajes a diferentes SF en diferentes canales, la función del concentrador es enviar y recibir mensajes de radio, seguidamente se tienen la tarjeta adaptadora que permite enrutar las señales entre la raspberry Pi y el concentrador y por último la raspberry que procesa los mensajes de radio y los envía al servidor LoRaWAN TTN.

Recomendaciones antes de la configuración del Gateway: conectar la antena LoRa en el concentrador antes de encender el equipo, el GPS por defecto se encuentra deshabilitado por lo tanto no es necesario conectar la antena e insertar la tarjeta SD con los softwares precargados. Una vez encendido el Gateway se debe conectar a la red vía Ethernet para descubrir la dirección IP que se lo asignó al equipo se puede utilizar la herramienta Net Analyzer desde el celular, ya con la dirección IP el equipo se puede gestionar vía SSH ingresado con el usuario y password por defecto (pi, 11111111).

Para poder registrar el Gateway en el servidor TTN es necesario tener el Extended Unique Identifier (EUI), este identificador consta de 8 bytes basados en la dirección MAC preferiblemente, a continuación, se puede observar la dirección MAC del Gateway utilizado (Fig. 5.11).

```
pi@ttn-gateway:~$ ip link show eth0
2: eth0: <BROADCAST,MULTICAST,UP,LOWER_UP> mtu 1500 qdisc pfifo_fast state UP mode
DEFAUL group default qlen 1000
    link/ether b8:27:eb:65:1a:a7 brd ff:ff:ff:ff:ff:ff
pi@ttn-gateway:~$
pi@ttn-gateway:~$
pi@ttn-gateway:~$
pi@ttn-gateway:~$
```

Figura 5.11: Gateway MAC Address.

Capítulo 5. Diseño de Sistema IoT para RANC

A esa dirección MAC le insertamos el valor hexadecimal FFFE en el tercer byte y creamos nuestra EUI para poder registrarlo en TTN. El funcionamiento del Gateway a nivel de software se debe a los siguientes programas preinstalados en la raspberry Pi:

- Raspbian Stretch Lite⁷.
- Semtech LoRa library⁸.
- Semtech UDP Packet Forwarder⁹.

```
pi@ttn-gateway:~$ cat /etc/os-release
PRETTY_NAME="Raspbian GNU/Linux 9 (stretch)"
NAME="Raspbian GNU/Linux"
VERSION_ID="9"
VERSION="9 (stretch)"
ID=raspbian
ID_LIKE=debian
HOME_URL="http://www.raspbian.org/"
SUPPORT_URL="http://www.raspbian.org/RaspbianForums"
BUG_REPORT_URL="http://www.raspbian.org/RaspbianBugs"
pi@ttn-gateway:~$
```

Figura 5.12: Versión de Raspbian Instalado.

La biblioteca Semtech LoRa contiene controladores / HAL (capa de abstracción de hardware) que se utilizarán en pasarelas que utilizan una tarjeta concentradora basada en el multicanal Semtech SX1301 Módem y transceptores RF SX1257 / SX1255. El Semtech UDP Packet Forwarder es un programa que se ejecuta en el host de un LoRa que reenvía los paquetes de RF recibidos por el concentrador a un servidor LoRaWAN a través de un enlace IP / UDP.

La configuración principal que se efectuó en el Gateway es la frecuencia de trabajo para ello se debe actualizar el archivo (regional)-global.conf.json y usar la región correspondiente a la banda de frecuencia para Uruguay. Para pruebas iniciales se utilizó la región de US que emplea la banda de 902 – 928 MHz.

Para hacer la verificación del estado del Gateway se puede utilizar el comando `systemctl status ttn-gateway -l` (ver Fig. 5.13).

El archivo US-global.conf.json se puede observar completo en los anexos, este archivo de configuración tiene dos secciones principales la primera de configuración del radio y la segunda de la configuración del servidor. La configuración del servidor se define en la sección de gateway_conf y se tiene que especificar la dirección y el puerto destino.

```
"gateway_conf": {
  "server_address": "router.us.thethings.network",
  "serv_port_up": 1700,
  "serv_port_down": 1700,
  "servers": [ {
    "server_address": "router.us.thethings.network",
    "serv_port_up": 1700,
    "serv_port_down": 1700,
```

⁷Referencia: <https://www.raspberrypi.com/software/>.

⁸Referencia: https://github.com/Lora-net/lora_gateway/.

⁹Referencia: https://github.com/Lora-net/packet_forwarder.

5.3. Prototipo LoRa/LoRaWAN

```

pi@ttn-gateway:~$ systemctl status ttn-gateway -l
● ttn-gateway.service - The Things Network Gateway
   Loaded: loaded (/lib/systemd/system/ttn-gateway.service; enabled; vendor preset: enabled)
   Active: active (running) since Fri 2019-06-14 10:05:21 -03; 2 days ago
     Main PID: 600 (start.sh)
    CGroup: /system.slice/ttn-gateway.service
            └─600 /bin/bash /opt/ttn-gateway/packet_forwarder/lor_pkt_fwd/start.sh
              └─619 ./lor_pkt_fwd

jun 17 00:43:27 ttn-gateway ttn-gateway[600]: # PULL_DATA sent: 6 (0.00% acknowledged)
jun 17 00:43:27 ttn-gateway ttn-gateway[600]: # PULL_RESP(onse) datagrams received: 0
jun 17 00:43:27 ttn-gateway ttn-gateway[600]: # RF packets sent to concentrator: 0
jun 17 00:43:27 ttn-gateway ttn-gateway[600]: # TX errors: 0
jun 17 00:43:27 ttn-gateway ttn-gateway[600]: # BEACON queued: 0
jun 17 00:43:27 ttn-gateway ttn-gateway[600]: # BEACON sent so far: 0
jun 17 00:43:27 ttn-gateway ttn-gateway[600]: # BEACON rejected: 0
jun 17 00:43:27 ttn-gateway ttn-gateway[600]: ### [JIT] ###
jun 17 00:43:27 ttn-gateway ttn-gateway[600]: # SX1301 time (PPS): 3182521612
jun 17 00:43:27 ttn-gateway ttn-gateway[600]: src/jitqueue.c:448:jit_print_queue
lines 1-18/18 (END)

```

Figura 5.13: Estado Operativo del Gateway LoRa.

```

        "serv_enabled": true
    } ]
}

```

La configuración del radio es realizada en la sección SX1301_conf, donde establece el funcionamiento de los radios:

```

"radio_0": {
    "enable": true,
    "type": "SX1257",
    "freq": 904300000,
    "rssi_offset": -166.0,
    "tx_enable": true,
    "tx_freq_min": 923000000,
    "tx_freq_max": 928000000
},
"radio_1": {
    "enable": true,
    "type": "SX1257",
    "freq": 905000000,
    "rssi_offset": -166.0,
    "tx_enable": false
}

```

La configuración también especifica la asignación de canales, como el indicado abajo que toma de referencia la frecuencia del radio "0" con un desplazamiento de -0,4 MHz, usando de esta forma la frecuencia de 903,9 MHz con un ancho de banda de 125 kHz para todos los SF.

```

"chan_multiSF_0": {
    "desc": "Lora_MAC, 125kHz, all_SF, 903.9_MHz",
    "enable": true,
    "radio": 0,
    "if": -400000
},

```

Capítulo 5. Diseño de Sistema IoT para RANC

También define un canal LoRa estándar con un ancho de banda de 500 kHz con un SF ya definido en 8:

```
"chan_Lora_std": {
    "desc": "Lora_MAC, _500kHz, _SF8, _904.6 _MHz" ,
    "enable": true ,
    "radio": 0,
    "if": 300000,
    "bandwidth": 500000,
    "spread_factor": 8
},
```

Configuración del Nodo

Los nodos como ya ha sido informado están formados principalmente por un Arduino y un módulo LoRa/LoRaWAN Dragino, además de acuerdo a los requerimientos del proyecto se agregaron módulos para conectar sensores y/o actuadores. Para la configuración de Arduino se debe utilizar la librería LMIC. La librería LMIC (LoraMAC-in-C)¹⁰, la cual está adaptada para ser usada en el entorno Arduino y es compatible con los chips LoRa SX1272, SX1276, como también con el módulo HopeRF RFM95 que es el usado por el módulo Dragino. Con esta librería se puede configurar las bandas de EU-868 y US-915, por lo que el dispositivo puede funcionar en el rango de frecuencia de 902-928 MHz e implementar la operación de los nodos como clase A o clase B en el protocolo MAC LoRaWAN. Para dejar en funcionamiento el nodo en la frecuencia de interés se debe hacer el siguiente cambio en el archivo config.h:

```
#define CFG_eu868 1
#define CFG_us915 1
```

Además, en el archivo lmic.c ajusta el LMIC.channelMap dividiéndolos en 16:

```
void LMIC_disableChannel (u1_t channel) {
    if ( channel < 72+MAX_XCHANNELS )
        LMIC.channelMap[ channel/16] &= ~(1<<(channel&0xF));
}
```

Para el funcionamiento del módulo LoRa con la tarjeta Arduino en el programa a compilar se debe indicar a la librería el mapeo de pines de conexión de forma estructurada tal como se indica a continuación:

```
const lmic_pinmap lmic_pins = {
    .nss = 10,
    .rxtx = LMIC_UNUSED_PIN,
    .rst = 9,
    .dio = {2, 6, 7},
};
```

En la Fig. 5.14 se puede observar la tarjeta Dragino con la indicación de pines de conexión con la tarjeta Arduino y los pines libres que se pueden usar para conectar otro dispositivo como por ejemplo un sensor.

¹⁰Referencia: <https://github.com/mcci-catena/arduino-lmic>.

5.3. Prototipo LoRa/LoRaWAN

Pin Mapping For LoRa

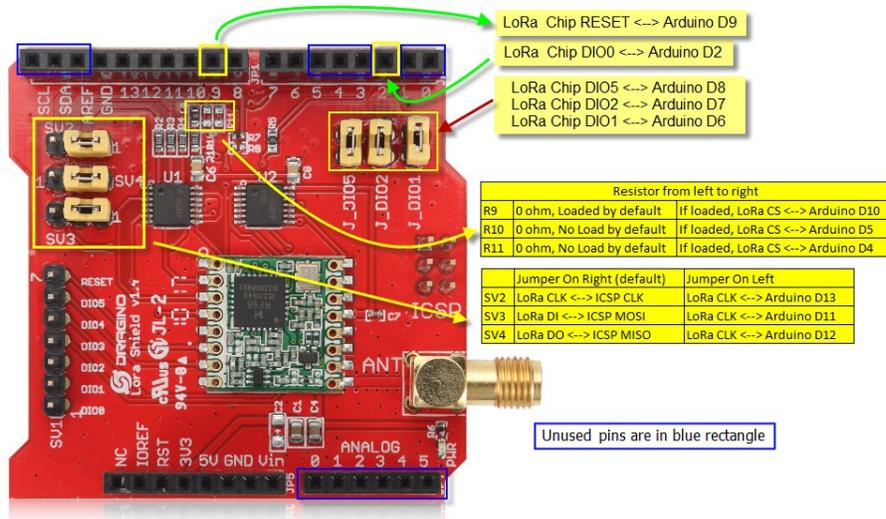


Figura 5.14: Pin Mapping para LoRa.

Otras de las funcionalidades que se destacan en el repositorio son las siguientes:

- Envío de paquetes de enlace ascendente, teniendo en cuenta el ciclo de trabajo.
- Comprobación de la encriptación y la integridad del mensaje.
- Recepción de paquetes de enlace descendente en la ventana RX2.
- Frecuencias personalizadas y ajustes de datos.
- Activación por aire (OTAA / unión).

La asociación de los nodos al servidor TTN es efectuado usando el método ABP, el servidor genera las Key y Address que se le deben configurar a los nodos, por lo que en el programa se deben incluir esas direcciones en las variables siguientes.

```
static const PROGMEM u1_t NWKSKEY[16] = { }
static const u1_t PROGMEM APPSKEY[16] = { }
static const u4_t DEVADDR =
```

La NWKSKEY y APPSKEY se deben colocar en formato hexadecimal y la DEVADDR en formato decimal.

El nodo que va a estar conectado al sensor de presión va enviar la medida obtenida cada 60 segundos al Gateway, el cual se encarga de reenviar el dato al servidor CIEMSA para su almacenamiento, visualización y análisis. El nodo encargado de controlar el solenoide que regula a la válvula de control recibirá el comando de acción desde el servidor por medio del Gateway, la lógica de funcionamiento de la válvula va a depender de las medidas de presión en los puntos correspondientes.

Para la conexión del sensor con el nodo se utiliza el Nanoshield ADC, en la Fig. 5.15 se puede observar cómo se debe conectar el módulo con la tarjeta de Arduino

Capítulo 5. Diseño de Sistema IoT para RANC

y en la Fig. 5.16 se puede visualizar, a modo de referencia, como se conecta el sensor correspondiente.

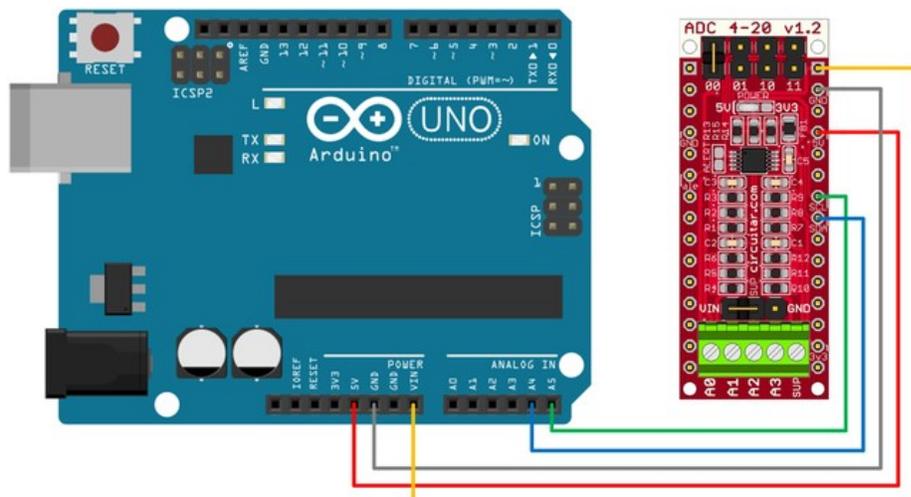


Figura 5.15: Conexión del Nanoshield ADC a la tarjeta Arduino.

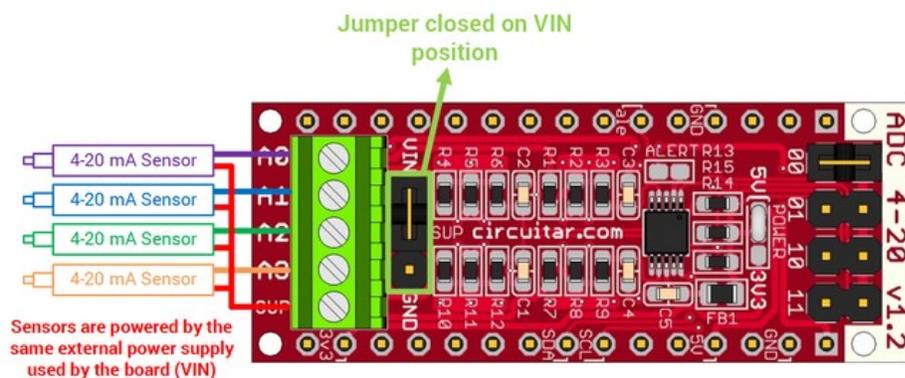


Figura 5.16: Nanoshield ADC conexión con sensor 4-20 mA.

Para su configuración se debe incorporar la librería en el Arduino la cual se puede conseguir en el repositorio del módulo Nanoshield_ADC¹¹, para así poder emplear el funcionamiento de conectar un sensor 4-20 mA.

Las características que se destacan de la librería son las siguientes:

- Conversión analógica a digital con resolución de 16 bits.
- Modo continuo para capturar medidas con una frecuencia de muestreo determinada.

¹¹Referencia: https://github.com/circuitar/Nanoshield_ADC/tree/master.

5.3. Prototipo LoRa/LoRaWAN

- Ajuste de ganancia para emparejar la magnitud de la señal con la resolución.
- Mediciones de tensión diferencial.
- Ajuste de umbral alto para desencadenar interrupciones.

El código utilizado para los nodos se encuentra en el repositorio `ranc-lorawan` ¹²

5.3.3. Conexión con The Things Stack, TTS

Para el uso de la red LoRa/LoRaWAN se usa el sistema de The Things Network recientemente migrado a TTS. Para la conexión del Gateway con TTS [16], se debe inicialmente hacer un registro y activación del equipo en la Red de TTS. El equipo para el envío de paquetes usa un sistema de envío el Semtech UDP Packet Forwarder, el cual está implementado en el Gateway para enviar los paquetes usando LoRa/LoRaWAN hacia la red especificada en el archivo de configuración global del equipo.

Un elemento importante dentro de LoRaWAN es el Packet Forwarder, el cual utiliza la interconexión LoRaWAN para intercambiar tráfico con otras redes LoRaWAN (ver Fig. 5.17, para así compartir la cobertura y mejorar el rendimiento general de la red.

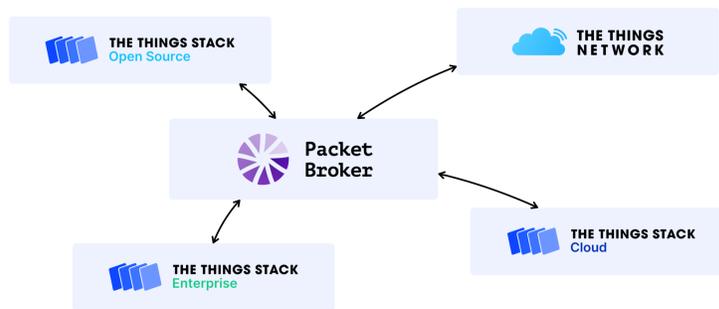


Figura 5.17: Packet Broker para Conectar con Redes LoRaWAN [16].

Conexión y Registro del Gateway

Para conectar el Gateway se debe suministrar la siguiente información:

- Crear usuario y agregar el gateway: crear un usuario en TTS en caso de no tener. Ir a la sección de Gateway el ingreso de uno nuevo.
- Setear gateway ID: asignado por nosotros al Gateway, el mismo debe ser único el sistema lo verifica. Además, agregar un nombre corto descriptivo.
- Colocar el gateway EUI: está formado por la dirección MAC con la inclusión del valor FFFE en el medio o después del tercer par de la dirección (XX-XX-XX-FFFE-XX-XX-XX).

¹²Referencia: <https://github.com/calixtojranc-lorawan>.

Capítulo 5. Diseño de Sistema IoT para RANC

- Frequency Plan: especificar las bandas de frecuencia por ejemplo US_902_928_FSB_2
- Actualizar Código: se debe especificar la red para TTS en el packet forwarder del gateway (server_address: nam1.cloud.thethings.network, serv_port: 1700).



Figura 5.18: Registro de Gateway en The Things Stack.

Una vez registro el Gateway se puede monitorear y confirmar su actividad.

Conexión y Registro de un Nodo

Para el registro de un dispositivo se deba crear primero una aplicación. Dentro de la aplicación se crea un nuevo dispositivo final, los parámetros que se deben especificar son los siguientes:

- Id del dispositivo.
- Frecuencia.
- Versión de LoRaWAN.
- Dev EUI.
- Dirección del dispositivo.
- Network Session Key (NwkSKey).
- Application Session Key (AppSKey).

5.3. Prototipo LoRa/LoRaWAN

El nodo a registrar en la aplicación como se especificó anteriormente, esta creado usando una placa de desarrollo Arduino. Por ende, hay parámetros como el Dev EUI, dirección del dispositivo, NwkSkey y AppSKey que el dispositivo no los tiene, por lo que necesitamos apoyarnos de la misma plataforma para su generación.

La actividad del nodo se observa en la sección de Live data, donde se confirma que los datos están siendo enviados al Gateway y a su vez estos redirigidos a la plataforma. En los paquetes recibidos se puede verificar el tiempo de recepción de los datos y confirmar la información del nodo (Fig. 5.19).

```
"name": "as.up.data.forward",
"time": "2023-10-15T22:26:49.074103577Z",
"identifiers": [
  {
    "device_ids": {
      "device_id": "eui-70b3d57ed005dd9d",
      "application_ids": {
        "application_id": "ciemsa-agua-01"
      }
    },
    "dev_eui": "70B3D57ED005DD9D",
    "dev_addr": "260C3498"
  }
],
```

Figura 5.19: Recepción de Información del Nodo en TTS.

El payload dentro del paquete se puede verificar y también la decodificación del mismo Fig. 5.20. Una configuración importante es el Payload formatters que permite tomar los datos enviados por el nodo y reconvertirlos para obtener el valor medido por el dispositivo.

```
function decodeUplink(input) {
  // Recupera los bytes para humedad y temperatura
  const humidityHighByte = input.bytes[0];
  const humidityLowByte = input.bytes[1];
  const temperatureHighByte = input.bytes[2];
  const temperatureLowByte = input.bytes[3];

  // Calcula la humedad y temperatura originales
  humidity = ((humidityHighByte << 8) | humidityLowByte) /
  100.0;
  temperature = ((temperatureHighByte << 8) |
  temperatureLowByte) / 100.0;

  return { data: {humidity: humidity,
  temperature: temperature}
  };
}
```

En la sección de configuración se puede ver los parámetros de LoRa que utiliza el nodo Fig. 5.21.

Capítulo 5. Diseño de Sistema IoT para RANC

```
"received_at": "2023-10-15T22:26:49.069585698Z",
"uplink_message": {
  "f_port": 1,
  "frm_payload": "GWQINA==",
  "decoded_payload": {
    "humidity": 65,
    "temperature": 21
  }
},
```

Figura 5.20: Recepción de Datos Sensados en TTS.

```
settings": {
  "data_rate": {
    "lora": {
      "bandwidth": 125000,
      "spreading_factor": 7,
      "coding_rate": "4/5"
    }
  },
  "frequency": "903900000",
  "timestamp": 150713075
},
```

Figura 5.21: Recepción de Parámetros LoRa en TTS.

Adicionalmente se tienen los valores de transmisión del dispositivo Fig. 5.22.

```
"rx_metadata": [
  {
    "gateway_ids": {
      "gateway_id": "ciemsa-gateway-1",
      "eui": "B827EBFFFE651AA7"
    },
    "timestamp": 150713075,
    "rssi": -64,
    "channel_rssi": -64,
    "snr": 10,
    "location": {
      "latitude": -34.894682921139335,
      "longitude": -56.1892130970955,
      "altitude": 20,
      "source": "SOURCE_REGISTRY"
    }
  },
],
```

Figura 5.22: Recepción de Valores de Transmisión en TTS.

Integración de Datos a Fiware

La plataforma TTS tiene la posibilidad de integrar los datos recibidos a una plataforma o sistema de un tercero. Para ello se aprovecha el servidor de MQTT que tiene el sistema de integración en la aplicación creada en TTS.

5.3. Prototipo LoRa/LoRaWAN

The Things Stack expone un servidor MQTT para trabajar con eventos de transmisión. Creando un punto para conectar un cliente MQTT y suscribirse a transmisiones uplink o publicar transmisiones downlink. Para la implementación se debe utilizar los ID de las aplicaciones y del servidor, `{application_id}@{tenant_id}`. Además, se debe incluir el ID del dispositivo final. Por ejemplo el tópico para suscribirse a un mensaje uplink sería:

```
v3/{application id}@{tenant id}/devices/{device id}/join.
```

Para utilizar el servidor MQTT, también se necesita crear una nueva clave API para autenticarse. La consola TTS proporciona la información de conexión requerida y se puede utilizar para crear una clave API para la autenticación.

Para confirmar que se estén publicando los datos se puede utilizar un cliente MQTT y suscribirse al tópico respectivo. Una opción es utilizar Eclipse Paho¹³, este es un proyecto general cuya misión es proporcionar implementaciones de alta calidad de herramientas y bibliotecas para comunicaciones M2M. Cubre implementaciones de clientes MQTT en varios lenguajes de programación como Java, Python, Go, etc.

Utilizando python se puede emplear el código de ejemplo:

```
import context
import paho.mqtt.subscribe as subscribe

m = subscribe.simple(topics=['#'],
hostname="thethings.example.com", port=1883,
auth={'username':'appl', 'password':'pass'}, msg_count=2)

for a in m:
    print(a.topic)
    print(a.payload)
```

Otro recurso que se puede utilizar es un software MQTT client, como MQTT fx¹⁴. El cual tiene una interfaz gráfica que facilita la configuración y conexión a un servidor MQTT, así como también la publicación y/o suscripción a un tópico. En la Fig. 5.23, se puede apreciar la conexión al tópico del dispositivo implementado y la información del mensaje enviado.

Esquema de la Solución IoT

Una vez configurados los nodos, el Gateway, los servidores de red y de aplicación en la nube de TTS, se desarrolló un software middleware para integrar los datos en el sistema FIWARE utilizando el protocolo MQTT, en la Fig. 5.24 se puede ver el esquema de la solución IoT. El código del middleware está disponible en el repositorio ranc-lorawan¹⁵. Para las pruebas, se utilizao la solución de FIWARE para bases de datos de series temporales (Time Series Data Base)¹⁶, lo que permite almacenar los datos de forma persistente para que después puedan ser consultados y los resultados

¹³Referencia: <https://eclipse.dev/paho/>.

¹⁴Referencia: <https://softblade.de/en/mqtt-fx/>.

¹⁵Referencia: <https://github.com/calixtoj/ranc-lorawan>.

¹⁶Referencia: <https://github.com/FIWARE/tutorials.Time-Series-Data/tree/NGSI-v2>.

Capítulo 5. Diseño de Sistema IoT para RANC

```
v3/ciems-aagua-01@ttn/devices/eui-70b3d57ed005dd9d/up 57
16-10-2023 21:25:31.77131576 QoS 0
{"end_device_ids":{"device_id":"eui-70b3d57ed005dd9d","application_ids":{"application_id":"ciems-aagua-01"},"dev_eui":"70B3D57ED005DD9D","dev_addr":"260C3498"},"correlation_ids":{"as:up:01HCXGC1B3W84BYJ5D1S1C1J3Y","gs:conn:01HCXGC1489HCFXQF0FBXB1X9JKJ","gs:up:host:01HCXGC1489HCFXQF0FBXB1X9JKJ","gs:uplink:01HCXGC1489HCFXQF0FBXB1X9JKJ"},"ns:uplink:01HCXGC1485PCXTSYD1SSDC4ZZ"},"rpc:/ttn.lorawan.v3.NsAs/HandleUplink:01HCXGC1489HCFXQF0FBXB1X9JKJ"},"rpc:/ttn.lorawan.v3.NsAs/HandleUplink:01HCXGC181K6K5ZSGG07DMAQNT"},"received_at":"2023-10-17T00:25:32.258081240Z","uplink_message":{"f_cnt":61,"rx_meta_data":{"gateway_ids":{"gateway_id":"ciems-gateway-1","eui":"B827EBFFFE651AA7"},"timestamp":387896275,"rssi":-61,"channel_rssi":-61,"snr":9.5,"location":{"latitude":-34.894682921139335,"longitude":-56.4892130970955,"altitude":20,"source":"SOURCE_REGISTER"},"uplink_token":"0148A8A007211B20H1LdhdvG2YXktMR1IuCFr/51Ggc006f7uAeCvj8LepBhCgiJIUHLjprY0lJwM=","channel_index":4,"received_at":"2023-10-17T00:25:31.934136848Z"},"settings":{"data_rate":{"lora":{"bandwidth":125000,"spreading_factor":7,"coding_rate":"4/5"},"frequency":"904700000","timestamp":387896275},"received_at":"2023-10-17T00:25:32.043808189Z"},"consumed_airtime":0.046336s},"network_ids":{"net_id":"000013","tenant_id":"ttn","cluster_id":"nam1","cluster_address":"nam1.cloud.thethings.network"}}}
```

Figura 5.23: Suscripción al Tópico y Recepción de Datos.

visualizarlos en un gráfico o a través de la herramienta de análisis de series temporales Grafana.

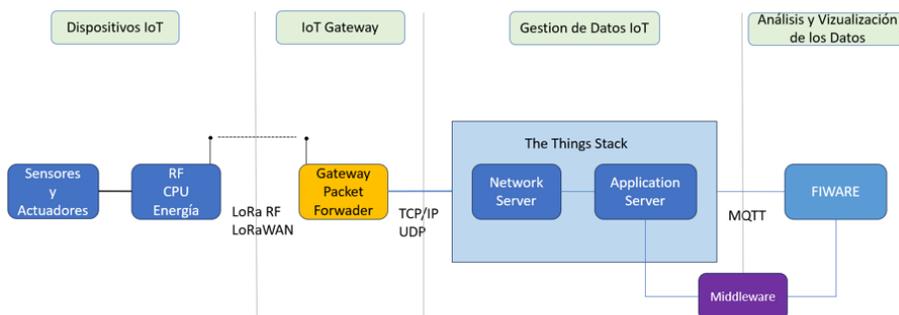


Figura 5.24: Esquema de la Solución.

5.3.4. Pruebas de Transmisión

Se realizaron pruebas de transmisión con el objetivo de verificar el sistema LoRa y confirmar distintos parámetros de comunicación. Se empleó un nodo LoRa transmitiendo cada cierto tiempo y en distintos lugares de Montevideo, el Gateway en un primer ensayo ubicado a una altura aproximada de 10 metros. A continuación, se presenta la Fig. 5.25 con los puntos de medida.

Este ensayo se hizo en una zona urbana con edificios que disminuían la potencia de la señal recibida, por lo cual se presentaba atenuación. El nodo estaba configurado para enviar un mensaje cada 30 segundos. En estos mensajes se verificaron los parámetros de la señal transmitida. El nivel más bajo registrado fue de -114 dBm, a una distancia de unos 630 metros aproximadamente. Después se perdió la comunicación, ya que en el gateway no recibieron más mensajes. De acuerdo a las especificaciones técnicas los nodos LoRa tienen una sensibilidad de hasta -145 dBm. En este caso la ubicación del Gateway influyó bastante en el bajo nivel de comunicación y el poco alcance obtenido. Para lograr una mejor propagación la instalación final debe hacerse con una mejor

5.3. Prototipo LoRa/LoRaWAN



Figura 5.25: Prueba de Transmisión 1

Tabla 5.6: Ubicación Geográfica de Medidas 1.

Equipo - Medida	Ubicación Geográfica
Gateway	-34.882189, -56.196459
Nodo A - medida 1	-34.879835, -56.197036
Nodo A - medida 2	-34.878119, -56.197774
Nodo A - medida 3	-34.875926, -56.200045
Nodo A - medida 4	-34.884159, -56.196106
Nodo A - medida 5	-34.881975, -56.193959

línea de vista.

Tabla 5.7: Valores de Medida 1.

Medida	RSSI	SNR	Data Rate	Distancia
Medida 1 (count 4)	-67 dBm	10 dB	SF7BW125	186 m
Medida 2 (count 6)	-84 dBm	10.5 dB	SF7BW125	363 m
Medida 3 (count 8)	-114 dBm	2.5 dB	SF7BW125	629 m
Medida 4 (count 20)	-65 dBm	10 dB	SF7BW125	210 m
Medida 5 (count 24)	-87 dBm	11.5 dB	SF7BW125	371 m

Para realizar una prueba de transmisión con mayor altura y línea de vista, se instaló el Gateway en la azotea de la Facultad de Ingeniería de la UDELAR. El recorrido en este caso fue por la rambla de Montevideo con el mismo Nodo. Como referencia se puede ver la Fig. 5.26 con los puntos de medidas. Seguidamente en la tabla se puede observar los datos de la ubicación geográfica de las medidas efectuadas.

Los resultados de las medidas se pueden observar en la Tabla 5.9. En esta prueba con una altura del gateway importante se logró conseguir una línea de vista hacia el nodo. En el punto mas alejado que estuvo el nodo transmitiendo se alcanzo casi 4 km de comunicación con un nivel de intensidad de -87 dBm. Este valor obtenido nos sirve

Capítulo 5. Diseño de Sistema IoT para RANC

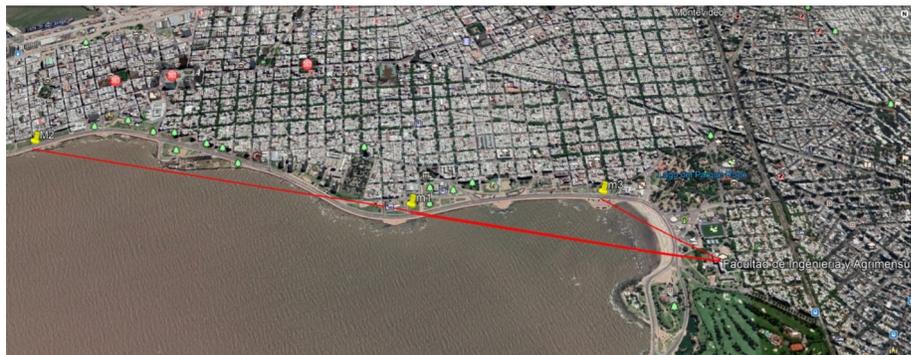


Figura 5.26: Prueba de Transmisión 2.

Tabla 5.8: Ubicación Geográfica de Medidas 2.

Equipo - Medida	Ubicación Geográfica
Gateway	-34.918102, -56.166279
Nodo A - medida 1	-34.914213, -56.173185
Nodo A - medida 2	-34.915316, -56.185337
Nodo A - medida 3	-34.911057, -56.208135
Nodo A - medida 4	movimiento en auto

para estimar que se puede alcanzar los 5 km de comunicación un zona urbana con línea de vista entre los equipos. Otro valor importante fueron los medidos estando dentro de un vehículo en movimiento, cuyo nivel de señal en uno de los paquetes enviados fue de -101 dBm.

Tabla 5.9: Valores de Medida 2.

Medida	RSSI	SNR	Data Rate	Distancia
Medida 1	-79 dBm	10 dB	SF7BW125	720 m
Medida 2	-83 dBm	8.8 dB	SF7BW125	1.7 km
Medida 3	-87 dBm	9.8 dB	SF7BW125	3.9 km
Medida 4	-101 dBm	6.2 dB	SF7BW125	movimiento

Finalmente en la Fig. 5.27 se puede observar el prototipo LoRa/LoRaWAN desarrollado.

5.3. Prototipo LoRa/LoRaWAN

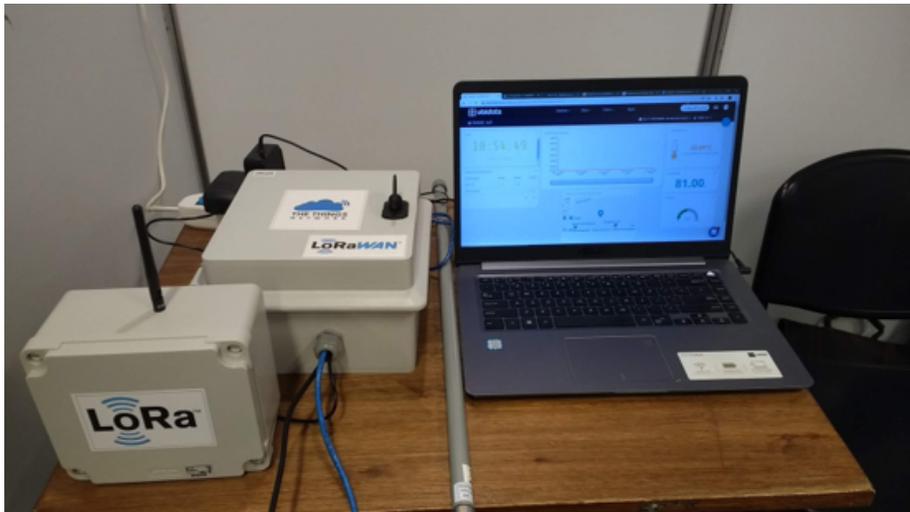


Figura 5.27: Prototipo LoRa/LoRaWAN.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Capítulo 6

Conclusiones

La presente investigación ha explorado las posibilidades y beneficios de la implementación de Internet de las Cosas (IoT) en la industria, con el estudio de una aplicación específica en la reducción de agua no contabilizada utilizando el sistema de comunicación LoRa/LoRaWAN. En este estudio se recorrieron varias fases, desde el análisis de la arquitectura de los sistemas IoT, la investigación de las diferentes tecnologías de comunicación LPWAN, aplicaciones de IoT en la industria y finalmente el diseño de un sistema IoT para RANC.

Para el diseño de una aplicación IoT una arquitectura bien definida es fundamental para el éxito de un proyecto por varias razones. Se garantiza la interoperabilidad entre los diferentes dispositivos y sistemas en un entorno IoT. Los dispositivos IoT provienen de diversos fabricantes y deben poder comunicarse entre sí de manera eficiente. También, permite al sistema escalar a medida que crece el número de dispositivos conectados. Esto es esencial ya que los proyectos IoT suelen empezar con pocos equipos, pero pueden expandirse rápidamente a medida que se añaden más dispositivos y se generan más datos. En el diseño de una aplicación es importante incluir medidas de seguridad robustas en todas las capas, desde los dispositivos hasta la nube. Esto es esencial para proteger la integridad de los datos, la privacidad de los usuarios y prevenir posibles ataques.

Al planificar el diseño de un sistema IoT se debe tener en cuenta la eficiencia en el uso de recursos, como el ancho de banda, la energía y el procesamiento. Esto debido a que los dispositivos a menudo tienen recursos limitados. Además, la gestión eficiente de grandes cantidades de datos, incluyendo su procesamiento en tiempo real y el almacenamiento seguro a largo plazo. El considerar estos aspectos ayuda a optimizar los costos del proyecto, la gestión eficiente de recursos, la elección adecuada de tecnologías y la minimización de la complejidad innecesaria.

Las tecnologías de comunicación LPWAN son esenciales para IoT por su capacidad de conectar dispositivos de baja potencia a largas distancias. De las características de esta tecnología se considera que las más importantes, que definen la tecnología son al menos tres. Primero el bajo consumo de energía, que habilita a los dispositivos funcionar durante largos períodos sin necesidad de cambiar las baterías. Segundo el largo alcance, brindando conectividad en áreas extensas, como ciudades inteligentes, campos

Capítulo 6. Conclusiones

agrícolas y redes de sensores industriales. Y por último la baja tasa de transmisión de datos, esta tecnología ofrece por lo general tasas más bajas en comparación con otras tecnologías, por lo tanto, es para aplicaciones que no requieren grandes volúmenes de datos, pero que necesitan una conectividad constante.

Además de las características indicadas se considera necesario mencionar otras que son importantes. El costo efectivo, LPWAN ofrece una solución de conectividad rentable, haciéndola atractiva para implementaciones a gran escala. La infraestructura requerida tiende a ser más económica en comparación con otros sistemas que admiten mayores tasas de transferencia de datos. Otro aspecto es la diversidad de espectro, permitiendo adaptabilidad a diferentes entornos y requisitos de aplicaciones, gracias al uso de una variedad de frecuencias y espectros.

Actualmente las tecnologías LPWAN más relevantes son: LoRaWAN porque utiliza un espectro no licenciado y tiene un buen equilibrio entre alcance, consumo de energía y costo. Tiene una presencia importante en aplicaciones para ciudades inteligentes, agricultura y seguimiento de activos. NB-IoT la cual se integra con las redes celulares existentes y ofrece una mayor penetración en interiores siendo adecuada para aplicaciones como monitoreo remoto y servicios públicos. Sigfox red LPWAN global que utiliza una red propietaria con una conectividad de baja velocidad, pero amplia cobertura, siendo útil en aplicaciones como rastreo de activos y monitorización ambiental. Es importante señalar que la elección entre estas tecnologías depende de los requisitos específicos de cada proyecto, como el alcance necesario, la tasa de transferencia de datos, el consumo de energía y los costos asociados. De otra forma se puede decir que la mejor tecnología de comunicación para una aplicación IoT es la que cumpla mejor con los requisitos del proyecto.

LoRa como se investigó, es una tecnología de modulación de espectro expandido que permite la comunicación inalámbrica de largo alcance con bajo consumo de energía, por otra parte, LoRaWAN es el protocolo de red que habilita la conectividad y gestión de dispositivos LoRa en una topología estrella. Estas dos tecnologías juntas, LoRa y LoRaWAN son ideales para aplicaciones de IoT que requieren una cobertura amplia y eficiencia energética. Como se estudió en el capítulo correspondiente, el SF determina la velocidad de transmisión y el alcance. Valores más altos de SF ofrecen un mayor alcance, pero a expensas de la velocidad de datos. LoRaWAN define tres clases de dispositivos: Clase A, Clase B y Clase C, cada uno con características específicas de comunicación y consumo de energía como se vio en el Capítulo 4. También la función ADR, que permite ajustar dinámicamente la tasa de datos y la potencia de transmisión para optimizar la comunicación en función de las condiciones de la red.

6.1. Evaluación de los Objetivos Propuestos para la Tesis

Los objetivos planteados en el trabajo de tesis fueron alcanzados de forma satisfactoria. Se logró comprender los sistemas IoT y cada uno de los elementos para el diseño de una aplicación IoT. Como parte de la investigación realizada se consiguió profundizar en las tecnologías de comunicación, destacando principalmente el sistema LoRa/LoRaWAN utilizado en la aplicación desarrollada.

El enfoque realizado de aplicaciones IoT para la industria, permitió ver el potencial de la tecnología para brindar soluciones en esa área y oportunidades de negocios que

6.2. Líneas de Trabajo Futuro

puede abrir. Al estudiar los sistemas para la reducción de agua no contabilizada se pudo ver el beneficio de los sistemas IoT para la solución de esta problemática, no siendo solamente este caso una oportunidad de negocio, sino también una herramienta que ofrezca un valor positivo como es la optimización en el uso de los recursos hídricos.

La aplicación desarrollada y el prototipo creado fue orientado a la reducción de agua no contabilizada, obteniendo un nodo con la capacidad de conectar un sensor de presión para ser usado en las líneas de suministro de agua. Como parte de la verificación del funcionamiento del prototipo se hicieron diferentes pruebas de comunicación y envío de mensajes.

Finalmente, el trabajo de tesis siguió varias fases las cuales fueron reflejadas en los diferentes capítulos, donde se hizo un estudio del estado del arte de la tecnología IoT, se analizaron los sistemas de comunicación aplicados en IoT y se desarrollo una aplicación orientada a la industria de servicio del agua.

6.2. Líneas de Trabajo Futuro

Se proponen varias líneas de trabajo futuro que pueden continuar la temática de aplicaciones IoT para sistemas RANC:

- Sistemas de gestión de datos empleando plataformas de análisis y gestión, que recopilen datos de múltiples fuentes (sensores, medidores, etc.) y utilicen análisis avanzados para identificar patrones, anomalías y áreas de pérdida de agua en las redes de suministro.
- Tecnologías de detección avanzada usando sensores inteligentes de detección de fugas, esto puede realizarse con dispositivos más avanzados que no solo detecten fugas, sino que también puedan determinar su ubicación con mayor precisión, lo que agiliza las operaciones de reparación.
- Modelado predictivo y analíticas avanzadas utilizando algoritmos y modelos predictivos basados en IoT para anticipar y prevenir posibles fallas en la red de distribución de agua antes de que ocurran.
- Sistemas de información y alerta para usuarios finales con aplicaciones móviles o sistemas IoT que brindan información en tiempo real a los consumidores sobre su consumo de agua, fomentando la conciencia y la reducción del desperdicio.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Apéndice A

Cálculos de Enlaces

A.1. Modelado de Línea de Vista

En este apartado se incluyen las figuras con los cálculos de enlace realizados utilizando la herramienta CloudRF, para las ubicaciones señaladas con flechas en el mapa de la red de distribución del área de Herten, subsector Ricaldoni y en el mapa de la red de distribución Norte, subsector Oeste.

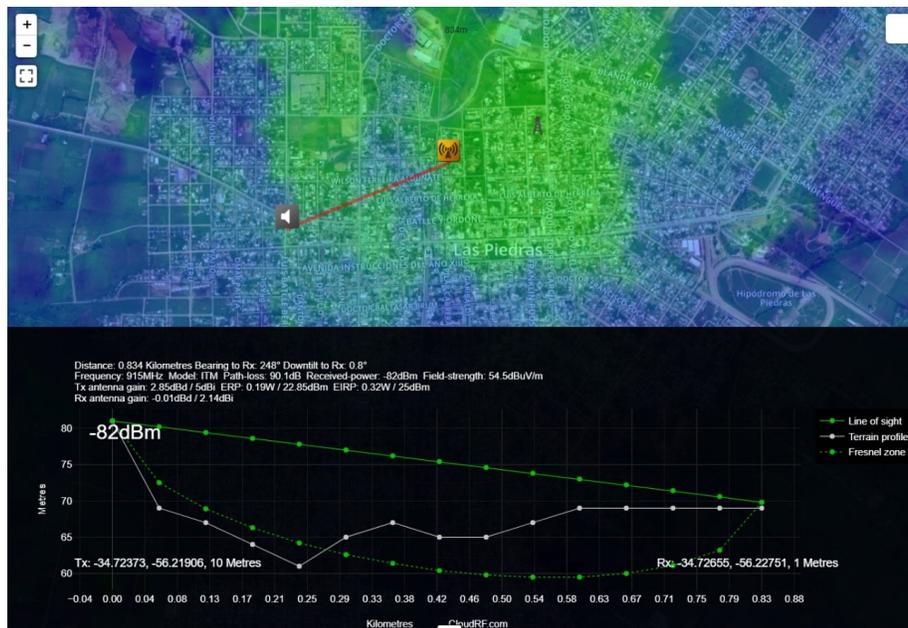


Figura A.1: Modelado de Línea de Vista Subsector Municipio Oeste.

Apéndice A. Cálculos de Enlaces

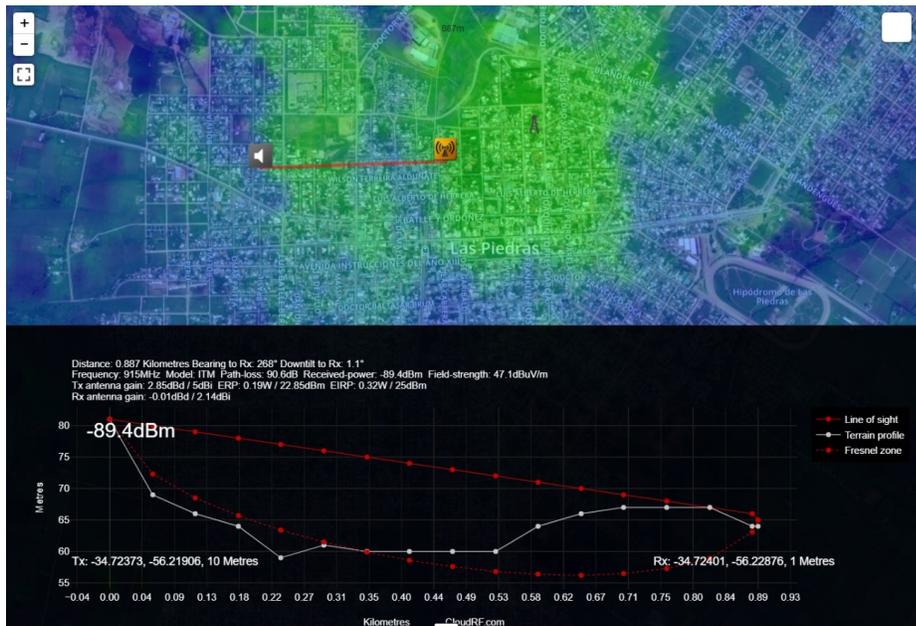


Figura A.2: Modelado de Línea de Vista Entrada Subsector Ricaldoni.

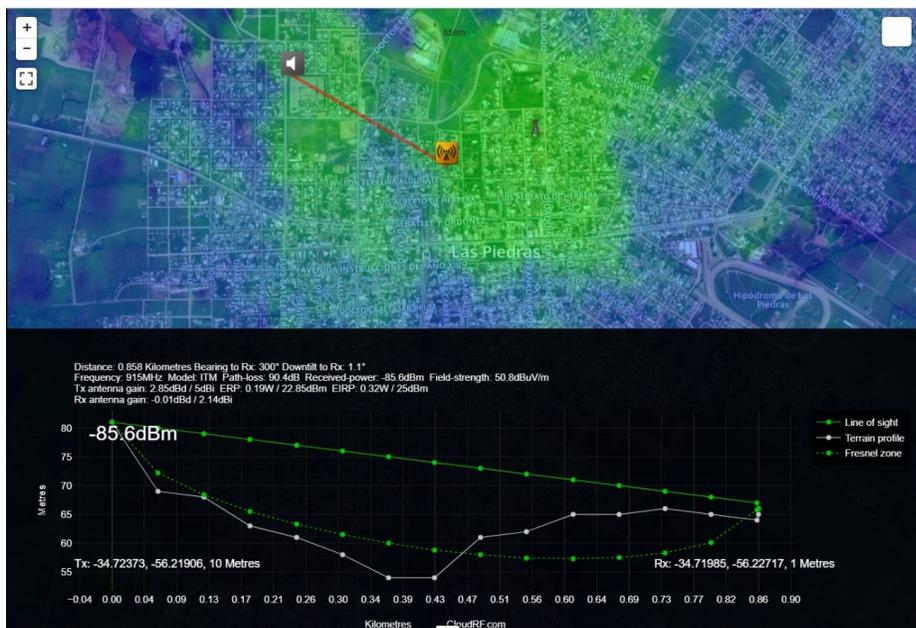


Figura A.3: Modelado de Línea de Vista Entrada Herten.

A.2. Verificación del Perfil del Terreno

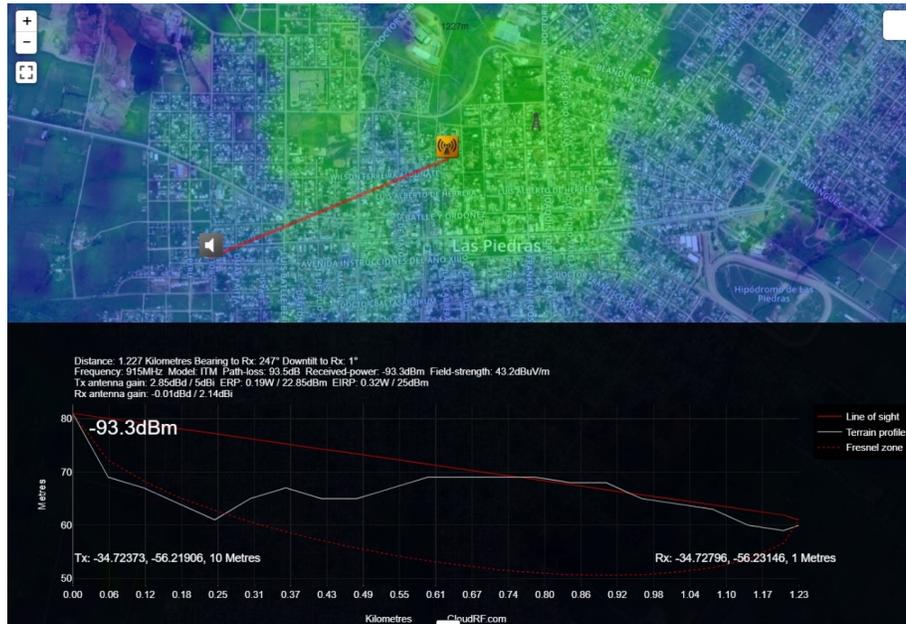


Figura A.4: Modelado de Línea de Vista Entrada Asentamiento.

A.2. Verificación del Perfil del Terreno

En los sistemas de radio propagación el perfil del terreno es un factor importante a considerar ya que permite ver los obstáculos en el camino, que puede generar desviaciones en la señal transmitida: reflexión, atenuación, refracción, dispersión. Para ver el perfil del terreno emplearemos la herramienta de Google Earth.

Con el perfil de elevación se puede verificar la línea de vista entre el transmisor y receptor, para una mejor visualización del radio de Fresnel y realizar los cálculos en recepción se utilizó el software de CloudRF como se vio anteriormente.

Apéndice A. Cálculos de Enlaces



Figura A.5: Perfil de Elevación Entrada Herten.



Figura A.6: Perfil de Elevación Entrada Subsector Ricaldoni.

A.2. Verificación del Perfil del Terreno



Figura A.7: Perfil de Elevación Subsector Municipio Oeste.



Figura A.8: Perfil de Elevación Subsector Oeste.

Apéndice A. Cálculos de Enlaces



Figura A.9: Perfil de Elevación Asentamiento.

Referencias

- [1] Andrei Vazhnov. *La Red de Todo: Internet de las cosas y el Futuro de la Economía Conectada*. Smashwords Edition, 2016.
- [2] Fabio Leon. ¿que es iot y para que sirve? <https://www.dynamoelectronics.com/que-es-iot-y-para-que-sirve/>, 2023.
- [3] David Hanes, Gonzalo Salgueiro, Patrick Grossetete, Robert Barton, and Jerome Henry. *IoT fundamentals: Networking technologies, protocols, and use cases for the internet of things*. Cisco Press, 2017.
- [4] Jonathan Holdowsky, Monika Mahto, M Raynor, and Mark Cotteleer. A primer on the technologies building the iot. *Inside the Internet of Things (IoT)*, 2015.
- [5] Ahmed El Hakim. Internet of things (iot) system architecture and technologies. *White Paper*, 10, 2018.
- [6] Antonio Creus. Instrumentación industrial (8. a edición). *Alfaomega. México*, 2011.
- [7] Jesús Calixto Méndez, Benigno Rodríguez Díaz, Javier Schandy Wood, and Mauricio González Nappa. Diseño y simulación de una antena pifa para iot. *Telemática*, 20(2), Mar. 2021.
- [8] Constantine A Balanis. *Antenna theory: analysis and design*. John wiley & sons, 2016.
- [9] Benigno Rodríguez Díaz. *Differential STBC for OFDM based wireless systems*. Cuvillier Verlag, 2007.
- [10] Perry Lea. *Internet of Things for Architects: Architecting IoT solutions by implementing sensors, communication infrastructure, edge computing, analytics, and security*. Packt Publishing Ltd, 2018.
- [11] Eric Heiser. ¿qué es mqtt? <https://www.redeweb.com/articulos/mqtt/>, 2022.
- [12] Huecat. Conectar placa arduino uno a blynk (servicio iot/mqtt) con módulo gsm900. <https://huecat.es/conectar-placa-arduino-uno-a-blynk-servicio-iot-mqtt-con-modulo-gsm900/>, 2020.
- [13] Devopedia. Constrained application protocol. <https://devopedia.org/constrained-application-protocol>, 2019.
- [14] FIWARE FIWARE. The open source platform for our smart digital future, 2021. URL: <https://www.fiware.org>.
- [15] W Giezeman and J Stokking. The things network. URL <https://www.thethings-network.org>, 2016.

Referencias

- [16] The Things Industries. Where companies scale their lorawan® solutions. *URL: <https://www.thethingsindustries.com/>*.
- [17] Usman Raza, Parag Kulkarni, and Mahesh Sooriyabandara. Low power wide area networks: An overview. *ieee communications surveys & tutorials*, 19(2):855–873, 2017.
- [18] IEEE 802.15 Work Group et al. Part 15.4: wireless medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications for low-rate wireless personal area networks (lr-wpans). *ANSI/IEEE Std*, 802(4), 2006.
- [19] Shahin Farahani. *ZigBee wireless networks and transceivers*. newnes, 2011.
- [20] Kamil Staniec and Kamil Staniec. Iot networks standardization and legal regulations. *Radio Interfaces in the Internet of Things Systems: Performance studies*, pages 33–60, 2020.
- [21] Sigfox. Sigfox 0g technology by unabiz. *URL: <https://www.sigfox.com/>*, 2017.
- [22] Telensa. The smart choice for street lighting. *URL: <https://www.telensa.com/>*.
- [23] LoRa-Alliance. Lorawan® transforms businesses by connecting wireless iot sensors simply and affordably. *URL: <https://lora-alliance.org/>*, 2019.
- [24] LoRa-Alliance. Lorawan® l2 1.0. 4 specification (ts001-1.0. 4). *white paper*, Octubre, 2020.
- [25] C Semtech. Lora and lorawan: A technical overview. *Semtech Corporation*. *URL: <https://www.semtech.com/>*, 2019.
- [26] Matt Knight. Reversing lora. *Bastille Networks*, 128, 2016.
- [27] Link-Labs. Enterprise asset visibility, 2021. *URL: <https://www.link-labs.com/>*.
- [28] J Pena Queralta, Tuan Nguyen Gia, Zhuo Zou, Hannu Tenhunen, and Tomi Westerlund. Comparative study of lpwan technologies on unlicensed bands for m2m communication in the iot: Beyond lora and lorawan. *Procedia Computer Science*, 155:343–350, 2019.
- [29] Olof Liberg, Marten Sundberg, Eric Wang, Johan Bergman, and Joachim Sachs. *Cellular Internet of things: technologies, standards, and performance*. Academic Press, 2017.
- [30] Ramon Sanchez-Iborra and Maria-Dolores Cano. State of the art in lp-wan solutions for industrial iot services. *Sensors*, 16(5):708, 2016.
- [31] Emilio Orsi and Sergio Nesmachnow. Smart home energy planning using iot and the cloud. In *2017 IEEE URUCON*, pages 1–4. IEEE, 2017.
- [32] Optima Ingeniería. Programas de reducción de agua no facturada (anf), gestión integral del agua no facturada (anf). <https://optima-ingenieria.com/productos-y-soluciones/programas-de-reduccion-de-agua-no-facturada-anf/>, 2023.
- [33] Ramirez Xavier. El agua perdida en españa durante su distribución equivale a varios embalses llenos. *iagua*, <https://www.iagua.es/blogs/xavi-duran-ramirez/agua-perdida-espana-durante-distribucion-equivale-varios-embalses-llenos>, 2017.
- [34] Wikipedia contributors. Non-revenue water — Wikipedia, the free encyclopedia. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Non-revenue_water&oldid=1169379763, 2023.
- [35] Obras Sanitarias del Estado OSE. Obras sanitarias del estado — uruguay. <http://www.ose.com.uy/>, 2023.

- [36] Obras Sanitarias del Estado OSE. El programa ranc de ose. <http://www.ose.com.uy/agua/el-programa-ranc-de-ose>, 2023.
- [37] ONU-Habitat. Comprender las dimensiones del problema del agua. <https://onuhabitat.org.mx/index.php/comprender-las-dimensiones-del-problema-del-agua>, 2021.
- [38] D Ziegler, P Fallis, K Hubschen, E Oertle, P Klingel, A Knobloch, J Baader, R Trujillo, and C Laures. Guía para la reducción de las pérdidas de agua: Un enfoque en la gestión de la presión. *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ)*, Eschborn, Alemania, 1, 2011.
- [39] Ali M Sadeghioon, Nicole Metje, David N Chapman, and Carl J Anthony. Smart-pipes: Smart wireless sensor networks for leak detection in water pipelines. *Journal of sensor and Actuator Networks*, 3(1):64–78, 2014.
- [40] Tomas Robles, Ramón Alcarria, Diego Martín de Andrés, Mariano Navarro de la Cruz, Rodrigo Calero, Sofia Iglesias, and Manuel Lopez. An iot based reference architecture for smart water management processes. *J. Wirel. Mob. Networks Ubiquitous Comput. Dependable Appl.*, 6(1):4–23, 2015.
- [41] Amarendra Goap, Deepak Sharma, A Krishna Shukla, and C Rama Krishna. An iot based smart irrigation management system using machine learning and open source technologies. *Computers and electronics in agriculture*, 155:41–49, 2018.
- [42] Wikipedia contributors. Chirp spread spectrum — Wikipedia, the free encyclopedia. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Chirp_spread_spectrum&oldid=1189215094, 2023. [Online; accessed 29-December-2023].
- [43] LoRa-Alliance. Lorawan® rp002-1.0.4 regional parameters. *white paper, Septiembre*, 2022.
- [44] Ferran Adelantado, Xavier Vilajosana, Pere Tuset-Peiro, Borja Martinez, Joan Melia-Segui, and Thomas Watteyne. Understanding the limits of lorawan. *IEEE Communications magazine*, 55(9):34–40, 2017.
- [45] Davide Magrin. Network level performances of a lora system. 2016.

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Índice de tablas

2.1. Comparación entre MQTT y CoAP	23
3.1. Objetivos de desempeño CIoT.	41
3.2. Comparación de Especificaciones de Tecnologías.	44
4.1. Tasas de Codificación (Coding Rate).	55
4.2. Especificaciones de Data Rate en LoRa.	56
4.3. Cálculo de tiempo en el aire de mensaje con LoRa Tool.	58
4.4. Banda de Frecuencia US902-928 Uplink.	60
4.5. Banda de Frecuencia US902-928 Downlink.	60
4.6. Banda de Frecuencia AU915-928 Uplink.	61
4.7. Comparación de Tecnologías LPWAN.	65
5.1. Ubicación Geográfica de Localidades/Sectores.	68
5.2. Parámetros de Configuración.	74
5.3. Especificaciones del Sensor/Nodo y el Gateway.	74
5.4. Tipos de Gateways.	75
5.5. Ejemplos de Dispositivos LoRa.	75
5.6. Ubicación Geográfica de Medidas 1.	91
5.7. Valores de Medida 1.	91
5.8. Ubicación Geográfica de Medidas 2.	92
5.9. Valores de Medida 2.	92

Esta página ha sido intencionalmente dejada en blanco.

Índice de figuras

1.1. IoT Aplicaciones (fuente: [2]).	3
1.2. Tecnología de Comunicación Rangos (fuente: [4]).	5
2.1. Capas según el IoT World Forum (IoTWF) Standardized Architecture (fuente: [5]).	10
2.2. Arquitectura IoT Simplificada (fuente: [3]).	11
2.3. Diagrama de Bloque de un Nodo.	15
2.4. Modelo Básico de Propagación.	16
2.5. Mecánismo de Propagación (fuente: [9]).	18
2.6. IoT Gateway.	19
2.7. Arquitectura MQTT (fuente: [11]).	21
2.8. Modelo MQTT de publicación/subscripción (fuente: [12]).	21
2.9. Protocolo CoAP (fuente: [13]).	22
2.10. Intercambio de Información con Protocolo CoAP (fuente: [13]).	23
2.11. Bloque de Sistemas de Fiware (fuente: [14]).	24
2.12. The Things Stack (fuente: [16]).	26
3.1. Tecnologías LPWAN (fuente: [17]).	31
3.2. Canales IEEE 802.15.4 (fuente: [18]).	32
3.3. Arquitectura de Capas IEEE 802.15.4 (fuente: [18]).	32
3.4. Capas Zigbee.	33

Índice de figuras

3.5. LTN Network ETSI GS LTN 001 V1.1.1 (2014-09) (fuente: [20]).	35
3.6. Arquitectura Sigfox (fuente: [21]).	37
3.7. capas de LoRa/LoRaWAN (fuente: [24]).	38
4.1. Recuperación de Agua No Contabilizada [32].	50
4.2. RANC Pérdidas en Países (fuente: [34]	51
4.3. Gestion de la presión [38].	52
4.4. Una frecuencia lineal modulada up-chirp en el dominio del tiempo (fuente [42]).	54
4.5. Canales frecuencia US902-928 (fuente: [43]).	59
4.6. Canales frecuencia AU915-928 (fuente: [43]).	60
5.1. Red de distribución área de Herten, Subsector Ricaldoni.	69
5.2. Red de distribución Norte, Subsector Oeste.	70
5.3. Topología Red LoRa/LoRaWAN (fuente: [45]).	71
5.4. Arquitectura Red LoRa/LoRaWAN RANC.	71
5.5. Rango de cobertura obtenido con CloudRF.	73
5.6. Gateway y Módulo LoRaWAN RAK.	76
5.7. Módulo LoRa Dragino.	76
5.8. Gateway LoRa RAK 831.	77
5.9. Diagrama de bloques Gateway LoRa.	78
5.10. Módulo ADC 4-20 mA.	79
5.11. Gateway MAC Address.	79
5.12. Versión de Raspbian Instalado.	80
5.13. Estado Operativo del Gateway LoRa.	81
5.14. Pin Mapping para LoRa.	83
5.15. Conexión del Nanoshield ADC a la tarjeta Arduino.	84
5.16. Nanoshield ADC conexión con sensor 4-20 mA.	84
5.17. Packet Broker para Conectar con Redes LoRaWAN [16].	85

Índice de figuras

5.18. Registro de Gateway en The Things Stack.	86
5.19. Recepción de Información del Nodo en TTS.	87
5.20. Recepción de Datos Sensados en TTS.	88
5.21. Recepción de Parámetros LoRa en TTS.	88
5.22. Recepción de Valores de Transmisión en TTS.	88
5.23. Suscripción al Tópico y Recepción de Datos.	90
5.24. Esquema de la Solución.	90
5.25. Prueba de Transmisión 1	91
5.26. Prueba de Transmisión 2.	92
5.27. Prototipo LoRa/LoRaWAN.	93
A.1. Modelado de Línea de Vista Subsector Municipio Oeste.	99
A.2. Modelado de Línea de Vista Entrada Subsector Ricaldoni.	100
A.3. Modelado de Línea de Vista Entrada Herten.	100
A.4. Modelado de Línea de Vista Entrada Asentamiento.	101
A.5. Perfil de Elevación Entrada Herten.	102
A.6. Perfil de Elevación Entrada Subsector Ricaldoni.	102
A.7. Perfil de Elevación Subsector Municipio Oeste.	103
A.8. Perfil de Elevación Subsector Oeste.	103
A.9. Perfil de Elevación Asentamiento.	104

Esta es la última página.
Compilado el lunes 9 diciembre, 2024.
<http://iie.fing.edu.uy/>