



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

METODOLOGÍA PARA SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS LPWAN PARA DIVERSAS  
APLICACIONES DE INTERNET DE LAS COSAS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

EDUARDO ELÍ CARRASCO GALDAME

PROFESORA GUÍA:  
SANDRA CESPEDES UMAÑA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
ANDRÉS CABA RUTTE  
RODRIGO MUÑOZ LARA

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por ANID FONDECYT 1201893

SANTIAGO DE CHILE  
2020

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO  
POR: EDUARDO ELÍ CARRASCO GALDAME  
FECHA: 2020  
PROF. GUÍA: SANDRA CESPEDES UMAÑA

## METODOLOGÍA PARA SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS LPWAN PARA DIVERSAS APLICACIONES DE INTERNET DE LAS COSAS

El Internet de las Cosas (IoT, por su sigla en inglés) es una realidad que día a día se masifica más, considerándose una de las áreas de innovación que generará mayores capitales en los próximos años. Su popularidad ha venido de la mano con la aparición de nuevas tecnologías de comunicación como las Redes de Baja Potencia y Área Amplia (LPWAN), dos de ellas son objeto de investigación de este proyecto: LoRaWAN<sup>TM</sup>(en adelante, LoRaWAN) y Sigfox. Ambas redes cumplen con requisitos ideales para aplicaciones de Internet de las Cosas, como baja potencia, largo alcance y escalabilidad, lo que se equilibra con sus bajas velocidades de transmisión y limitación en la longitud de sus mensajes.

Las diferencias técnicas de estas tecnologías ha motivado su comparación en variados proyectos de investigación, sea por su funcionamiento en algunas aplicaciones específicas o por las técnicas utilizadas. El presente trabajo busca comparar su rendimiento a partir de perfiles distintos adoptados de rubros de aplicaciones IoT. Con esta información se levanta posteriormente una guía que pretende facilitar la elección técnica de tecnología de comunicación inalámbrica por parte de un desarrollador de aplicaciones IoT.

Para el levantamiento de la información de los requerimientos de aplicaciones IoT se contactó a algunos desarrolladores de la industria nacional y se buscaron proyectos referenciados en revistas internacionales del rubro. Con esta recopilación, se propusieron cuatro pruebas distintas que simulaban aplicaciones IoT, las cuales se sometieron a prueba en una tarjeta de desarrollo midiendo dos parámetros principales para ambas redes LPWAN: su fiabilidad que denota los mensajes enviados exitosamente y el uso de las baterías de los dispositivos. En ambos casos, el rendimiento de la red Sigfox fue levemente mayor a LoRaWAN, lo que tiene que ver con las diferentes infraestructuras de estas redes.

Finalmente, se desarrolló una guía de selección de tecnologías de comunicación inalámbrica, que toma la información de los requerimientos de una aplicación IoT a desplegar, y con base en ellas se realizan recomendaciones de cual tecnología utilizar. Estas recomendaciones diferencian entre los aspectos que requieren tecnologías de alta velocidad de transmisión y las tecnologías LPWAN, y en esta última realiza recomendaciones con base en la información y resultados hallados en las pruebas realizadas con LoRaWAN y Sigfox.

Entre las conclusiones de este trabajo se encuentra que la diferencia en los modelos de negocio de Sigfox y LoRaWAN son incidentes en la elección de estas como tecnología de comunicación, y se recomienda un uso eficiente de la transmisión de datos para aprovechar de mejor manera los recursos energéticos y las buenas características de estas redes de área amplia y baja potencia.



*Para el Dios que nos da salvación,  
porque de Él, por Él y para Él, son todas las cosas.*

*Para mis padres, Eduardo y Rebeca,  
que han brindado todo para que lleguemos aquí.*

*Para todos aquellos que siguen con sus proyectos  
en medio de soledades, confinamientos,  
u otras adversidades como la pandemia del Covid-19.*



# Agradecimientos

En primer lugar, comienzo expresando mi gratitud a Dios por llegar a este punto en mi carrera profesional, su gracia y su guía me trajeron a esta universidad, a esta carrera y a este trabajo de título en particular. Su voluntad no solo me permitió llegar hasta aquí como profesional, sino que me fue formando como persona a lo largo de todos estos años.

Se extiende agradecimiento al Centro Avanzado de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, AC3E, Proyecto Basal FB0008, ANID, por su apoyo en la adquisición del equipamiento experimental usado en esta memoria. Extiendo mi gratitud a mi profesora guía Sandra Céspedes por su labor acompañándome en este trabajo, por su paciencia y constante preocupación ante la situación única de confinamiento que estuvimos viviendo. Agradezco ser parte del equipo de WiNet que me permitió recibir ayuda de sus integrantes, en particular agradezco a Rodrigo Muñoz, miembro también de esta comisión, por las reuniones y ayudas en los ámbitos de conexión a las redes. También agradezco especialmente a la familia Hernández Castro, que abrieron la puerta de su casa para permitirme hacer pruebas con una antena colocada sobre su refrigerador.

Quiero agradecer a mi familia por todo este tiempo, a mi madre por su constante apoyo y ayuda durante estos años, recuerdo aún cuando de pequeño me iba a buscar al colegio y me mencionaba que su sueño es que sus hijos fuesen profesionales, este también es un logro tuyo. A mi padre, que se encargó de trabajar arduamente para que no faltase nada en casa y por esas noches de oración antes de los controles o exámenes que me brindaban contención y paz. Y también a mi hermano Esteban, que con su compañía me ayudó a amenizar las jornadas de estudio y trabajo académico de distintas maneras, sé que terminará con éxito esta etapa. También agradecer a mi amada Camila por su constante apoyo, por el ánimo que me brindó y por mantenerme acompañado a pesar de la distancia, no solo durante este tiempo, sino en todos los años que estuvimos cerca sin saber lo que estaba preparado para nosotros. Gracias por llegar a bendecir mi vida.

Agradezco a Danilo y Javiera, mis compañeros en la carrera con quienes compartimos sección y luego entramos juntos a la especialidad, gracias por todas esas jornadas académicas que compartimos. Estoy seguro que seguirán cosechando éxitos en sus proyectos académicos.

Finalmente, quiero agradecer al Grupo Bíblico Universitario de Chile, que me permitió entender la profundidad de la gracia de Dios y permitirme servir en la misión universitaria. Doy gracias por todos los amigos de vida que he tenido la oportunidad de conocer ahí y donde me faltarían hojas para agradecer a cada uno de ellos que hicieron de mi estancia en la universidad una experiencia maravillosa.



# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación y Antecedentes . . . . .	1
1.2. Descripción del problema . . . . .	2
1.3. Objetivos . . . . .	2
1.3.1. Objetivo General . . . . .	3
1.3.2. Objetivos Específicos . . . . .	3
1.4. Estructura de la Memoria . . . . .	3
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>4</b>
2.1. Caracterización de las tecnologías LPWAN . . . . .	4
2.1.1. Largo Alcance . . . . .	4
2.1.2. Baja Potencia y Bajo Costo . . . . .	5
2.2. LoRaWAN . . . . .	6
2.3. Sigfox . . . . .	8
2.4. Aplicaciones IoT . . . . .	9
2.4.1. Salud . . . . .	9
2.4.2. Smart Cities . . . . .	10
2.4.3. Sector Agropecuario . . . . .	10
2.4.4. Otras Aplicaciones . . . . .	11
2.5. Estado del Arte . . . . .	11
2.5.1. Comparación LoRaWAN v/s Sigfox . . . . .	11
2.5.2. Trabajos Previos . . . . .	11
<b>3. Metodología de la Investigación</b>	<b>14</b>
3.1. Levantamiento de Información de Aplicaciones IoT . . . . .	14
3.2. Pruebas de funcionamiento de las redes LPWAN . . . . .	15
3.2.1. Fiabilidad de la transmisión . . . . .	16
3.2.2. Uso de batería . . . . .	16
3.3. Elaboración de Guía de recomendación de tecnologías . . . . .	17
<b>4. Rubros y Aplicaciones IoT que utilizan LPWAN</b>	<b>18</b>
4.1. Proyectos en Chile . . . . .	18
4.2. Experiencia Internacional . . . . .	19
4.2.1. Proyectos de Cuidado de la Salud . . . . .	19
4.2.2. Proyectos en Agricultura y Ganadería . . . . .	20
4.2.3. LPWAN en Domótica . . . . .	20

4.2.4.	Proyectos en Smart Cities . . . . .	21
4.3.	Impacto de las redes LPWAN . . . . .	22
4.4.	Requerimientos de conexión de proyectos IoT . . . . .	22
4.4.1.	Cuidado de la Salud . . . . .	22
4.4.2.	Agricultura y Ganadería . . . . .	23
4.4.3.	Smart Cities . . . . .	24
4.4.4.	Largo de los mensajes . . . . .	24
4.4.5.	Tabla-resumen . . . . .	26
<b>5.</b>	<b>Implementación de las pruebas</b>	<b>27</b>
5.1.	Pruebas a implementar . . . . .	27
5.2.	Desarrollo de los nodos . . . . .	28
5.2.1.	Conexión a Sigfox . . . . .	29
5.2.2.	Conexión a LoRaWAN . . . . .	29
5.2.3.	Otras funciones MicroPython utilizadas . . . . .	31
5.3.	Adquisición de Resultados . . . . .	32
5.3.1.	Fiabilidad . . . . .	32
5.3.2.	Uso de la batería . . . . .	32
<b>6.</b>	<b>Resultados y análisis de funcionamiento</b>	<b>34</b>
6.1.	Fiabilidad . . . . .	34
6.1.1.	Prueba 1: Cuidado de la Salud, mensajes por minuto . . . . .	34
6.1.2.	Prueba 2: Agricultura, mensajes cada 30 minutos . . . . .	35
6.1.3.	Prueba 3: Smart Cities, mensajes por minuto . . . . .	35
6.1.4.	Prueba 4: Mensaje cada 6 horas . . . . .	35
6.2.	Consumo energético . . . . .	36
6.2.1.	Prueba 1: Cuidado de la Salud . . . . .	36
6.2.2.	Prueba 2: Agricultura . . . . .	38
6.2.3.	Prueba 3: Smart Cities . . . . .	39
6.2.4.	Prueba 4: Mensajes diarios . . . . .	40
6.3.	Análisis de Resultados . . . . .	41
<b>7.</b>	<b>Guía de selección de tecnologías de comunicación para Aplicaciones IoT</b>	<b>43</b>
7.1.	Primera Parte: Definiciones de la Aplicación IoT . . . . .	43
7.1.1.	Definiciones en sensores . . . . .	44
7.1.2.	Definiciones en actuadores . . . . .	46
7.2.	Segunda Parte: Redes LPWAN o de Alto Throughput . . . . .	47
7.2.1.	Características para utilizar alto <i>throughput</i> . . . . .	48
7.2.2.	Tecnologías de alto throughput . . . . .	48
7.3.	Tercera Parte: LoRaWAN, Sigfox u otra LPWAN . . . . .	49
<b>8.</b>	<b>Conclusiones y Trabajo Futuro</b>	<b>53</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>55</b>

# Índice de Tablas

2.1.	Resumen comparativo de las tecnologías Sigfox y LoRaWAN . . . . .	12
2.2.	Ventajas y desventajas del uso de LoRaWAN y Sigfox . . . . .	13
4.1.	Tipos de datos y sus tamaños en bytes . . . . .	24
4.2.	Tamaño de la representación de la información dada en los proyectos revisados	25
4.3.	Resumen de requerimientos de aplicaciones IoT . . . . .	26
6.1.	Resultados de fiabilidad de la transmisión para la Prueba 1 . . . . .	35
6.2.	Resultados de fiabilidad de la transmisión para la Prueba 2 . . . . .	35
6.3.	Resultados de fiabilidad de la transmisión para la Prueba 3 . . . . .	35
6.4.	Resultados de fiabilidad de la transmisión para la Prueba 4 . . . . .	36
6.5.	Consumo energético para la Prueba 1 . . . . .	37
6.6.	Consumo energético para la Prueba 2 . . . . .	39
6.7.	Consumo energético para la Prueba 3 . . . . .	40
6.8.	Consumo energético para la Prueba 4 . . . . .	41
7.1.	Tamaño en bytes estimado para distintos tipos de información . . . . .	45
7.2.	Ejemplos de frecuencias de envío . . . . .	46
7.3.	Tabla resumen de requerimientos de una aplicación . . . . .	47
7.4.	Máximo payload según Data Rate para la región AU915 en LoRaWAN . . .	51
7.5.	Proyectos que requieren altas fiabilidades . . . . .	52

# Índice de Ilustraciones

2.1. Estructura de un paquete LoRa . . . . .	6
2.2. Arquitectura LoRaWAN . . . . .	7
2.3. Arquitectura Sigfox . . . . .	8
2.4. Estructura de un paquete en Sigfox . . . . .	9
2.5. Arquitectura general de proyectos IoT en salud . . . . .	10
3.1. Características de la tarjeta LoPy4 . . . . .	15
3.2. Módulo de sensor de corriente ACS712 . . . . .	16
5.1. Elementos para energizar los dispositivos . . . . .	33
5.2. Conexión de la alimentación a tarjeta LoPy4 . . . . .	33
6.1. Gráfico de consumo de la Corriente Eléctrica en Sigfox para la Prueba 1 . . . . .	37
6.2. Gráfico de consumo de la Corriente Eléctrica en LoRaWAN para la Prueba 1 . . . . .	37
6.3. Gráfico de consumo de la Corriente Eléctrica en Sigfox para la Prueba 2 . . . . .	38
6.4. Gráfico de consumo de la Corriente Eléctrica en LoRaWAN para la Prueba 2 . . . . .	38
6.5. Gráfico de consumo de la Corriente Eléctrica en Sigfox para la Prueba 3 . . . . .	39
6.6. Gráfico de consumo de la Corriente Eléctrica en LoRaWAN para la Prueba 3 . . . . .	39
6.7. Gráfico de consumo de la Corriente Eléctrica en Sigfox para la Prueba 4 . . . . .	40
6.8. Gráfico de consumo de la Corriente Eléctrica en LoRaWAN para la Prueba 4 . . . . .	40
6.9. Comportamiento de la Corriente Eléctrica al enviar un mensaje en LoRaWAN y Sigfox . . . . .	42
7.1. Partes de una aplicación IoT . . . . .	44
7.2. Cobertura Sigfox en Santiago de Chile . . . . .	50

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación y Antecedentes

El Internet de las Cosas (en adelante, IoT por sus siglas en inglés) es un sistema que ya se ha implementado en el mundo actual siendo considerada como una plataforma fundamental de la denominada Cuarta Revolución Industrial [1]. Las proyecciones indican que para este año 2020 existirán más de 20 mil millones de dispositivos conectados a Internet [2], mientras que otras indican que en el año 2024 será una industria que genere ingresos por alrededor de 4,3 billones de dólares [3], a través de los diversos sectores en donde se está implementando. Este crecimiento exponencial ha hecho poner el foco, por parte de la industria y los sectores políticos, en estas nuevas tecnologías, generando inversiones y políticas públicas para así ser parte de la llamada “Revolución Digital” [4].

La posibilidad de interconexión de dispositivos (*Machine to Machine*, M2M), de compartir datos entre ellos sin intervención humana, entrega una gran gama de posibilidades que atraen la atención ante el paradigma IoT. Prácticamente todos los sectores de la industria se verán afectados de alguna u otra forma con la interconexión de sus dispositivos, siendo algunos de ellos la agricultura, las *smart cities*, la energía (*smart meters* y *smart grids*), el monitoreo industrial, la domótica, la telemedicina, el cuidado de la salud, el seguimiento de objetos y un largo etcétera.

Esta interconexión de dispositivos ha abierto un campo de estudios que se ha explorado durante las últimas décadas y que no ha dejado de crecer, y es que no solo se trata de que los dispositivos se conecten a Internet, sino que abre posibilidades de una mejor calidad de procesos y, por ende, mejor calidad de vida. Hay soluciones IoT que pueden disminuir los gastos energéticos en una ciudad en un 46 % y aumentar la vida de baterías en 8 años [5]; en la industria se espera que bajen los gastos operacionales de mantención [6] y que se desarrollen tecnologías de mantención que se adelanten a posibles fallas en una línea de producción, entre otras múltiples soluciones.

Los desafíos que trae interconectar millones de dispositivos ha generado la aparición de las redes de baja potencia y área ampliada LPWAN (del inglés *Low Power Wide Area Networks*). Las redes LPWAN son tecnologías de comunicación inalámbrica de largo alcance, baja po-

tencia y bajo costo monetario que cumplen con las necesidades principales de las soluciones IoT a gran escala, siendo ideales para permitir la ubicuidad de la conexión a Internet. Las soluciones IoT venían limitadas a redes celulares de alto gasto energético o a redes de corto alcance como el *WiFi* o *Bluetooth*, sin embargo, las características de los mensajes a compartir por estos dispositivos permitieron la aparición en el mercado de estas nuevas tecnologías. LoRaWAN, Sigfox, LTE-M, Narrowband IoT, Ingenu, Telensa, Qowiso, Amazon Sidewalk son algunas de las tecnologías LPWAN que se han desarrollado y demuestra la competencia que existirá en el mercado entre estas redes, además de los conflictos en el uso del espectro de radiofrecuencias que podrían existir entre ellas.

Hoy en día, muchos desarrolladores que utilizan LPWAN se han inclinado en el uso de LoRaWAN como red de comunicación, más de 500 compañías la han implementado sin contar a las personas independientes que también lo han hecho [7]. Por otra parte, la visión de Sigfox de convertirse en una red con cobertura mundial para el Internet de las Cosas la hace atractiva para la industria, esperando alcanzar los mil millones de dispositivos conectados a su red en el año 2023 [8]. Esta demanda por redes de baja potencia y área ampliada va a generar una competencia que puede ser aprovechada por los desarrolladores y usuarios finales a la hora de generar soluciones IoT, sin embargo, la diversidad de soluciones es tan amplia como objetos distintos existan en el mundo, esto implica que el estudio de las redes de comunicación debe ser constante a medida que el IoT siga desarrollándose.

## 1.2. Descripción del problema

Dentro del avance exponencial de dispositivos interconectados, las redes LPWAN aparecen como una solución de comunicación inalámbrica para esta necesidad emergente. Entre las tecnologías de la familia LPWAN, LoRaWAN ya tiene presencia en aproximadamente 142 países [7] mientras que Sigfox en cerca de 65 [9], esto las convierte en las tecnologías LPWAN con mayor presencia entre desarrolladores de soluciones de Internet de las Cosas [10]. Lo anterior presupone una adaptación desde los proveedores de esta tecnología como también de los desarrolladores, de manera que ambas puedan competir libremente y generar soluciones.

Si bien existen importantes diferencias tecnológicas entre LoRaWAN y Sigfox e investigaciones sobre ellas y sus comparativas técnicas (como se podrá revisar en el Capítulo 2), ambas logran satisfacer las mismas necesidades principales para lograr el despliegue masivo de dispositivos IoT: bajo uso energético, bajo costo, masividad y largo alcance. Desde el punto de vista de líneas de aplicación del Internet de las Cosas, hay requerimientos que pueden generar diferencias en el uso de estas tecnologías, no teniendo herramientas que puedan diferenciarlas desde un punto de vista experimental. Esto puede provocar que las soluciones IoT que se implementen no sean totalmente eficientes o que algunos proyectos no cumplan con los estándares que se les solicite por limitaciones de una de estas dos redes inalámbricas.

## 1.3. Objetivos

Para dar solución al problema identificado anteriormente, se establecen los siguientes objetivos, divididos en un objetivo general y objetivos específicos:

### 1.3.1. Objetivo General

Generar una metodología de evaluación comparativa del funcionamiento de las tecnologías LoRaWAN y Sigfox según los requerimientos de líneas de aplicaciones de Internet de las Cosas.

### 1.3.2. Objetivos Específicos

1. Identificar variables y requerimientos de comunicación inalámbrica de distintas aplicaciones IoT que sirvan como criterio de comparación para estas redes LPWAN en al menos tres áreas diferentes.
2. Analizar críticamente las características técnicas de las redes LoRaWAN y Sigfox a través de pruebas experimentales de transmisión de datos para ambas plataformas.
3. Sistematizar la comparación de las redes LoRaWAN y Sigfox, bajo métricas levantadas previamente, a través de reiteradas pruebas experimentales de transmisión de datos que sean consistentes en el tiempo.
4. Elaborar una metodología de evaluación de ambas tecnologías para desarrolladores de soluciones IoT que facilite la elección de una u otra tecnología LPWAN a partir de los requerimientos de la aplicación a desarrollar.

## 1.4. Estructura de la Memoria

A continuación se presenta la estructura que tiene esta memoria de título, haciendo un repaso breve de cada uno de sus capítulos:

- En el **Capítulo 1** se presenta una introducción con la motivación y el problema a resolver, se resaltan los objetivos de este trabajo y la importancia de esta investigación.
- En el **Capítulo 2** se muestran los aspectos teóricos de las tecnologías LPWAN colocando especial atención en el desarrollo de las redes LoRaWAN y Sigfox, sus características y diferencias y los trabajos que previamente se han desarrollado comparándolas en el ámbito de aplicaciones IoT.
- El **Capítulo 3** muestra la metodología a seguir para cumplir con los objetivos de este proyecto, involucrando el levantamiento de datos de Aplicaciones IoT y las herramientas a utilizar.
- En el **Capítulo 4** se muestra el levantamiento de información de los requerimientos de aplicaciones IoT según sus rubros.
- En el **Capítulo 5**, se presenta la implementación del hardware utilizado para el levantamiento de la información
- El **Capítulo 6** muestra los resultados encontrados en las pruebas realizadas y un análisis de esta.
- El **Capítulo 7** presenta una guía metodológica para la elección de tecnologías de comunicación inalámbrica según los requerimientos de una aplicación IoT.
- Finalmente, el **Capítulo 8** muestra las conclusiones y el trabajo futuro de este proyecto.

# Capítulo 2

## Marco Teórico

### 2.1. Caracterización de las tecnologías LPWAN

*Low Power Wide Area Networks* (en español, Redes de Baja Potencia y Área Ampliada) son una serie de soluciones tecnológicas de comunicación inalámbrica para la conectividad de dispositivos propios del Internet de las Cosas (IoT) que han emergido en el último tiempo y que cumplen principalmente con especificaciones de bajo consumo energético, largo alcance y baja tasa de datos. Estas características las convierte en buenas soluciones para los requerimientos de varias aplicaciones en el rubro IoT.

Entre las herramientas de comunicación inalámbrica más populares se encuentran *Bluetooth* y *WiFi*, que cuentan con una buena tasa de datos pero son de corto alcance. Por otro lado, hay posibilidades de mayor alcance con las redes 3G, 4G y 5G, pero que demandan una alta energía en la transmisión de datos por parte de los dispositivos. Así, una solución para los dispositivos que requieren largo alcance y baja energía, son las redes LPWAN, que permiten la comunicación de varios kilómetros y, a su vez, baterías que duren unos 10 años o más [11]. Sin embargo, estas notables características son compensadas por una baja tasa de datos y una disponibilidad variable de las redes en el tiempo.

En las últimas décadas, las distintas generaciones de comunicación han buscado mejorar la tasa de datos de forma impresionante, esperándose en el caso de la conexión 5G velocidades de transmisión de datos de hasta 1 Gbps [12], sin embargo, la gran mayoría de las aplicaciones IoT requieren de la transmisión de mensajes cortos y en muchas ocasiones tolerables a retardo, de manera que las LPWAN son una solución factible para estos casos. Hay algunas aplicaciones de IoT en que la tasa de transmisión y la latencia son factores considerables y que se podrán implementar con otras tecnologías, como las redes 5G [13].

#### 2.1.1. Largo Alcance

Un enlace masivo de dispositivos implica cubrir una amplia área geográfica. Hoy existen redes LPWAN que pueden alcanzar más de 10 kms, dependiendo de su tecnología y si se implementa en una zona urbana, suburbana o rural. Estas distancias se pueden lograr gracias a las frecuencias del radio enlace que utilizan y las modulaciones para la transmisión de la

información.

En el caso de la frecuencia, se suelen utilizar bandas de frecuencia bajo 1 GHz, ya que ofrecen una comunicación robusta y confiable sin una gran exigencia en potencia. Una menor frecuencia tiene menor atenuación y desvanecimiento por trayectorias múltiples ante obstáculos en la ciudad u otros espacios (fenómeno conocido como *fading*). A su vez, son frecuencias en el espectro menos congestionado ya que llegando a 2.4 GHz, el espectro es ocupado por tecnologías como *Bluetooth*, *WiFi*, *ZigBee* u otros. La suma de estos factores permite que en la práctica estas comunicaciones sean más confiables, de mayor alcance y con menor gasto de potencia.

Otro factor importante en la capa física es la modulación, utilizada para poder transmitir la información, la cual suele ser de dos tipos: banda angosta (en adelante, *Narrowband*) y espectro ensanchado (*Spread Spectrum*). *Narrowband* utiliza un bajo ancho de banda que no supera los 25 kHz, asignando más eficientemente el espectro para múltiples enlaces. Hay tecnologías que utilizan *Ultra Narrowband* (UNB) ocupando apenas 100 Hz de ancho de banda permitiendo un mayor número de enlaces y menos posibilidad de ruido. En el caso del espectro ensanchado o *Spread Spectrum*, se extiende una señal de una banda angosta sobre una banda más ancha que luego es demodulada, así, la transmisión se vuelve más confiable y robusta ante interferencias u otros ataques. La eficiencia del uso del espectro disminuye al utilizar *spread spectrum* ya que son bandas más anchas pero se soluciona utilizando secuencias ortogonales.

### 2.1.2. Baja Potencia y Bajo Costo

La duración de las baterías es fundamental para mantener el bajo costo de mantenimiento de los proyectos a levantar con estas tecnologías, buscándose baterías que duren 10 años o más. En la mayoría de los casos, se utilizan topologías tipo estrella, que permite la conexión de los terminales a un nodo que funciona como *gateway*, de esta forma la información no tiene que pasar por otros terminales como en topologías tipo malla (*mesh*). Otra técnica utilizada es conocida como *Duty Cycling* que busca que los transceptores se enciendan únicamente cuando la información esté lista para ser transmitida, tanto para el *uplink* (subida de datos desde el terminal al *gateway*) como en el *downlink* (bajada de datos desde el *gateway* al terminal).

Por otro lado, se buscan protocolos de acceso al medio (conocido como MAC, *Medium Access Control*) que sean ligeros y no muy complejos como se dan en el caso de las redes celulares, que requieren de sincronización para la transmisión de la información y que pueden elevar el costo energético, a su vez, esta baja en la complejidad asegura menores costos en el desarrollo del hardware. Disminuir la complejidad de los dispositivos terminales es importante para el desarrollo de estas tecnologías con tal de evitar que estos realicen una gran cantidad de procesamiento que involucre mayor gasto energético. Así, los dispositivos intermedios o incluso los *gateways* realizan el mayor trabajo de procesamiento posible para que los terminales no tengan un hardware muy complejo disminuyendo su costo y asegurando su escalabilidad.

Por último, el uso de bandas de frecuencia libres ISM (que es la utilizada en la gran mayoría de los casos) va a reducir costos de operación, por lo que no se incurren en gastos

extras por contrato de licencias. En algunos casos, hay redes sostenidas por operadores que requieren de una previa inscripción para su uso (como Sigfox) y que no se pueden utilizar de forma libre como sí lo hacen algunas redes LoRaWAN.

## 2.2. LoRaWAN

LoRaWAN es el estándar LPWAN más utilizado y que cuenta con mayor cantidad de estudios, existiendo hasta el año 2018 más de 2000 publicaciones acerca de esta red [11]. La capa física trabaja bajo los fundamentos de LoRa (*Long Range*), que es la tecnología utilizada para transmitir la información, fue desarrollada por la compañía francesa Cycleo y más tarde adquirida por la estadounidense Semtech [14]. Se habla de LoRaWAN cuando se agrega a esta tecnología un protocolo MAC que permite la configuración de una red de dispositivos y que se estandarizó con LoRa-Alliance.

LoRa utiliza *Chirp Spread Spectrum*, una modulación de espectro ensanchado, en el que se produce una señal *chirp* que cambia su frecuencia entre  $f_0$  y  $f_1$  (siendo  $f_0 < f_1$ ) en un intervalo de tiempo  $T$ , todos los *chirps* producidos se dan en el mismo intervalo de tiempo. Se pueden tener dos tipos de *chirps*: el *up-chirp* donde la frecuencia va en aumento de un mínimo a un máximo ( $f_0$  a  $f_1$ ) y el *down-chirp* donde la frecuencia baja, desde un máximo a un mínimo ( $f_1$  a  $f_0$ ). Estos *chirps* se dividen a su vez en *chips* para codificar la información. Esta modulación aumenta la robustez ante interferencias, efectos *Dopplery fading* [15, 16].

El *Spreading Factor* ( $SF$ ), que puede tomar valores discretos entre 7 y 12 en el caso de LoRa, va a determinar el número de *chips* utilizados para representar un símbolo ( $2^{SF}$ ) y el número de bits que se utilizarán ( $SF$ ). Un alto  $SF$  puede incrementar el SNR, la sensibilidad y el rango de transmisión, sin embargo, también va a incrementar el *Time on Air* (ToA) de la transmisión [17]. A su vez, el paquete de transmisión en LoRa incluye una tasa de código que va de  $4/5$  a  $4/8$  para lidiar con la tasa de error de paquetes, esto nos da la siguiente ecuación que permite calcular la tasa de datos:

$$R_b = SF \cdot \frac{BW}{2^{SF}} \cdot CR$$

En donde,  $SF$  es el *Spread Factor*,  $BW$  el ancho de banda utilizado, y  $CR$  la tasa de código utilizado. En general, un alto  $SF$  va a disminuir la tasa de datos, lo que va a consumir mayor energía, pero es compensado con mayores alcances de transmisión.

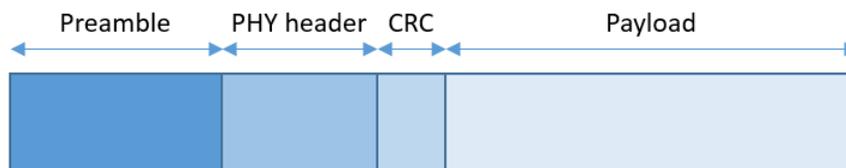


Figura 2.1: Estructura de un paquete LoRa

El paquete transmitido cuenta con una serie de bits de preámbulo que permiten sincronizar los terminales receptores con el transmisor, luego se transmite una cabecera junto a los códigos

de corrección y la información como tal que se está transmitiendo (*payload*) como se ve en la figura 2.1.

La frecuencia de operación de LoRa puede ser en 433, 868 o 915 MHz dependiendo de la norma que se utilice. En el caso chileno, se utiliza la norma AU915-928 (norma australiana), utilizándose en la banda entre los 915 y 928 MHz conforme a lo dictado por la Subsecretaría de Telecomunicaciones del Gobierno de Chile [18].

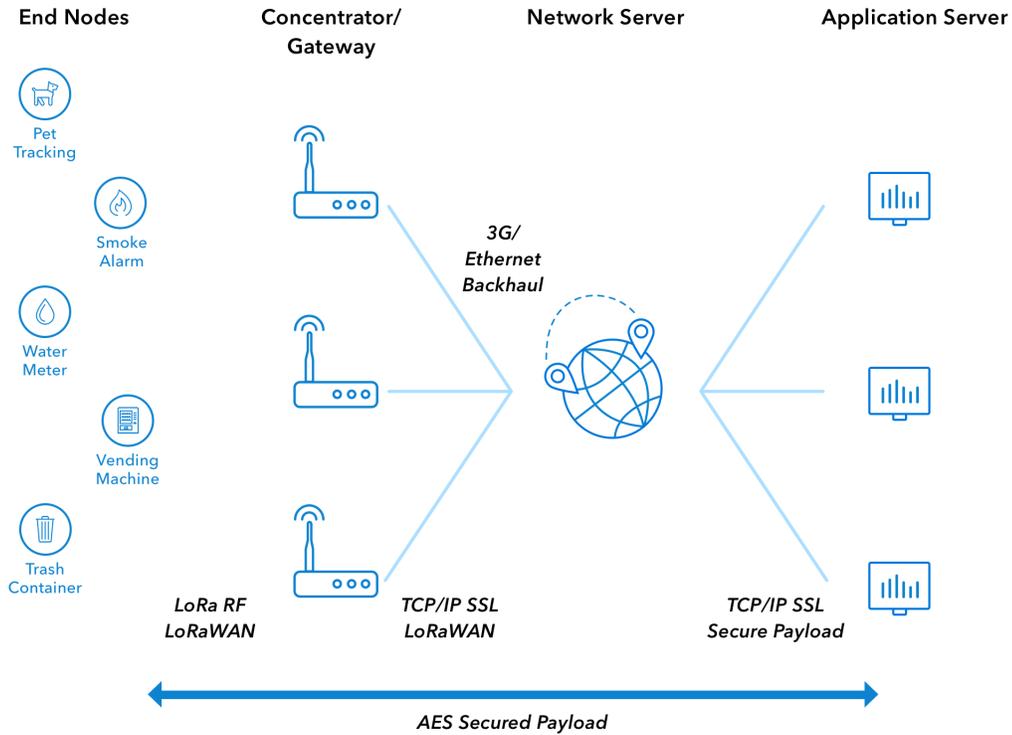


Figura 2.2: Arquitectura LoRaWAN. Tomada de [www.thethingsnetwork.org](http://www.thethingsnetwork.org)

Para la extensión de esta tecnología a una red masiva de dispositivos y transformarse así en una red de área ampliada, LoRaWAN utiliza una topología tipo estrella en el que cada terminal se comunica a un *gateway* que se conecta al *Network Server* como se observa en la figura 2.2. Así también, se definen clases para cada terminal conectado que permite gestionar la red ampliada:

- Clase A son aquellos con comunicación dual. Es la clase *default* soportado por todos los dispositivos LoRaWAN. Tiene la capacidad de iniciar la comunicación y por consiguiente es el más eficiente energéticamente.
- Clase B son aquellos que reciben mensajes en tiempos designados para ello y que deben ser sincronizados.
- Clase C pueden iniciar la comunicación en cualquier momento de manera que involucran el mayor gasto energético.

## 2.3. Sigfox

Sigfox es otra LPWAN que ha ganado popularidad dada la cobertura con la que cuenta, busca crear una red de telecomunicaciones mundial para Internet de las Cosas de manera que cualquier dispositivo se pueda conectar a Internet a través de su red desplegada en las principales ciudades del mundo. Actualmente, tiene presencia en 65 países y busca ser la red de pequeños mensajes (auto denominada red 0G) con la mayor cobertura en el mundo [9].

En la capa física, Sigfox utiliza una tecnología con un ancho de banda ultra delgado (*Ultra NarrowBand*, en adelante UNB) que, según la región, va a ser de 100 Hz o de 600 Hz, dependiendo de esto, puede alcanzar tasas de transmisión de 100 a 600 bps respectivamente. Utiliza para el *uplink* la modulación D-BPSK, que le da características robustas ante el ruido y sensibilidad en largos alcances [19]. La frecuencia utilizada en Chile está entre los 915 y los 923 MHz según datos entregados por Mintek, la operadora Sigfox en Chile [20]. La modulación trabajando en UNB le da mayor capacidad a la red aprovechando de mejor manera el espectro que utiliza.

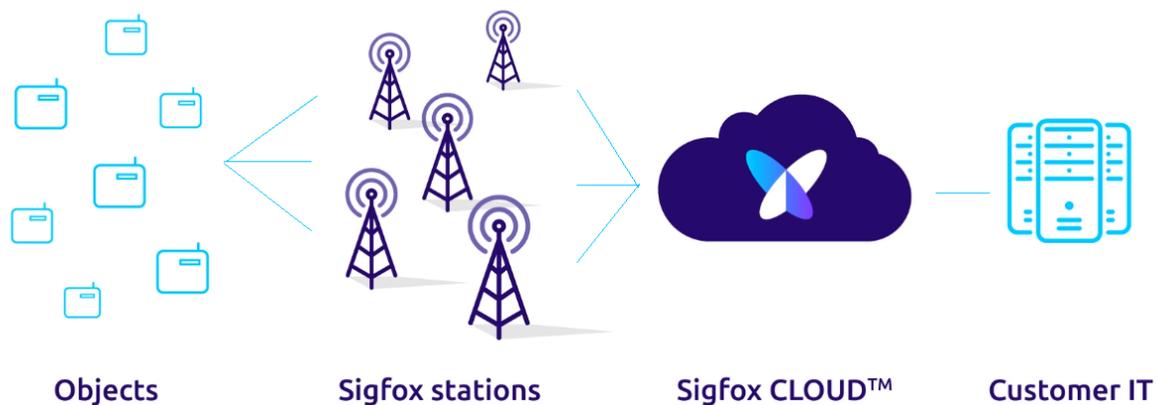


Figura 2.3: Arquitectura Sigfox. Adaptada de [www.sigfox.com](http://www.sigfox.com)

El modelo de negocio de Sigfox otorga licencias de uso para aquellos que desean utilizar su tecnología, dando así acceso a la red Sigfox a través de su *backend* disponible en la web. Esta licencia va a variar conforme a los contratos que se vayan realizando, permitiendo cierto número de dispositivos conectados a la red y con acceso al *backend* de Sigfox, sin embargo, todos los dispositivos tienen un límite de 140 mensajes diarios de *uplink* y 4 mensajes diarios en *downlink*, con un tamaño máximo de 12 bytes en subida y 8 bytes en bajada. La red de Sigfox utiliza una topología de estrella, en donde los distintos terminales se conectan a las estaciones base, como se observa en la figura 2.3, sin embargo, es la operadora que se encarga de generar la red para la conexión de los dispositivos, a diferencia de LoRaWAN que tiene sus *gateways* a disposición para que individuos puedan generar su red, permitiendo que sea pública o privada.

Finalmente, los mensajes de *uplink* de Sigfox contienen una cabecera con datos de la capa física y capa MAC del dispositivo, así se puede ver en la figura 2.4 en donde se observa el *payload* de hasta 12 bytes.

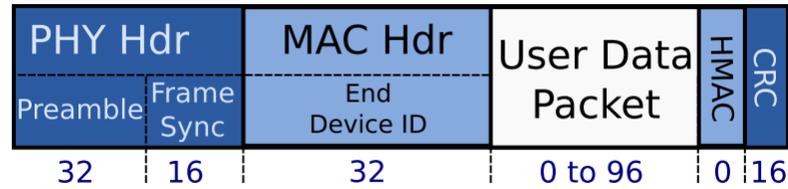


Figura 2.4: Estructura de un paquete en Sigfox. Tomada de [21]

## 2.4. Aplicaciones IoT

Las aplicaciones de Internet de las Cosas pueden ser sumamente variadas ya que prácticamente cualquier cosa puede estar conectada a la red de Internet e interactuar de alguna forma con ella. Sin embargo, se puede ordenar por rubros las aplicaciones IoT que se han ido desarrollando en el último tiempo. A continuación, y con base en publicaciones encontradas, se muestran en una visión generalizada las principales características de distintas aplicaciones de Internet de las Cosas divididas en cuatro áreas: Salud, *Smart Cities*, Sector Agropecuario y otros.

### 2.4.1. Salud

Desde que emergió el paradigma IoT que se ha trabajado en el área de la salud, bienestar y el cuidado de las personas, la posibilidad de la telemedicina y el seguimiento de datos sin un profesional presente la hacen un importante campo de estudios. En Chile y el mundo la población de la tercera edad se hace más grande y representativa, según proyecciones del Instituto Nacional de Estadísticas (INE), en el año 2050, en Chile, el 25% de la población será mayor de 64 años [22], siendo una estadística que se replica en gran parte del mundo. Así, el cuidado de pacientes con enfermedades crónicas o mayores de 60 años se vuelve un desafío importante, existiendo una serie de equipos y grupos de trabajo desarrollando soluciones y proyectos en el área *e-Health*, de manera de cuidar a distancia a pacientes críticos, generando una mejor atención para ellos y una mejor calidad de vida. Estas iniciativas tienen en común una arquitectura, que a grandes rasgos, se divide en tres niveles [23]:

1. **Sensores:** Los sensores o actuadores pueden ser enfocados hacia el cuerpo humano, como los que miden presión, pulso, electroencefalogramas, aceleraciones, etc. o también pueden ser ambientales, que se enfocan a medir los entornos del paciente, tales como cámaras, termómetros, sensores de movimiento, etc. y que se ubican en hospitales o residencias sanitarias.
2. **Gateway:** Los datos o metadatos generados por los sensores deben ser subidos a un servidor de Internet para luego poder ser visualizados, es así, como se requiere de un *gateway* que permita este cometido intermedio.
3. **Sistema de Monitoreo Remoto:** Los datos deben ser procesados y mostrados ante profesionales de la salud que puedan tomar decisiones con base en estos y/o validarlos, también se pueden generar alertas y utilizar herramientas de *Machine Learning* para procesarlos.

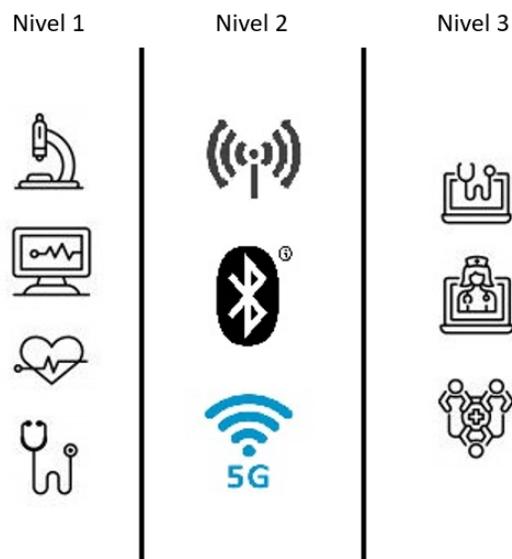


Figura 2.5: Arquitectura general de proyectos IoT en salud. Adaptado de [23]

### 2.4.2. Smart Cities

La planificación de las ciudades, los elementos de ellas y el monitoreo de cada una de sus partes es uno de los desafíos más interesantes en soluciones IoT. Desde el uso de estacionamientos, hasta el *delivery* de productos y servicios, un buen uso y planificación va a impactar directamente a quienes viven en estas ciudades. En este sentido, hay una gran cantidad de aplicaciones que pueden ayudar en el desarrollo de una *smart city*, e incluso deben existir muchas más que no se han pensado y que van a ir apareciendo en el mercado o en el estado del arte a medida que se sigan desarrollando soluciones en esta área.

Los principales desafíos para las *Smart Cities* tienen que ver principalmente con el uso de las baterías de sensores que se encuentren al aire libre y sin una directa conexión a redes eléctricas (como sensores de movimiento en estacionamientos al aire libre) además de su resistencia a los cambios de temperatura y de clima, las distancias kilométricas propia de una ciudad y la gran cantidad de sensores con los que se deben disponer si se quiere cubrir una gran área geográfica. Así, hay una serie de proyectos e iniciativas que de a poco se van abriendo paso en la industria, como se puede ver en [5] muchas empresas ya tienen sensores desplegados en ciudades para *Smart Parking* donde se usa LoRaWAN como tecnología de comunicación. A su vez, hay investigaciones que muestran el uso de redes LPWAN para rastrear drones y por consiguiente otros objetos [24] además de un sinnúmero de aplicaciones para el uso de luminarias [25], semáforos [26], *tracking* de objetos [27], y otros como levantamiento de datos de una ciudad [28].

### 2.4.3. Sector Agropecuario

El incremento de la población y la consecuente provisión de alimentos para todos los habitantes de una región hacen que el optimizar la producción de alimentos sea aún más importante. La entrada de sensores inalámbricos para la industrialización del sector agropecuario y su posterior optimización, la convierte en uno de los nichos de IoT más importantes, en donde los agricultores y ganaderos pasan de poner la vista no solo en la producción en

masa, sino también en el estado de cada una de sus plantaciones o animales.

La industrialización de la agricultura y ganadería ha dado paso a la introducción de diversas tecnologías, pero la introducción del IoT puede ser parte de soluciones tanto para las grandes como medianas empresas dada las oportunidades que ofrece. En general, el monitoreo de distintas variables como la humedad relativa, la temperatura, el pH del suelo, las condiciones atmosféricas, etc. Pero también se requiere mantener monitorizada la trazabilidad de los distintos activos, tanto desde su producción, almacenaje como distribución, en cada una de estas etapas se producen pérdidas. Por último, la detección temprana de enfermedades y plagas que pueden afectar a animales como a vegetales es necesaria para evitar que estas se expandan y produzcan pérdidas. Cada una de estas aplicaciones van a tener que lidiar con las vastas extensiones territoriales a ocupar como la necesidad de mantener dispositivos de adquisición de datos con una buena mantención, tanto en energía como también por la exposición que tienen [29, 30].

#### 2.4.4. Otras Aplicaciones

El paradigma del Internet de las Cosas tiene un sinnúmero de posibilidades, de manera que hay muchas otras áreas donde se pueden utilizar redes LPWAN, por nombrar algunas de ellas, hay utilización en el campo energético, como en *smart grids* y/o *smart meters*, para la prevención de incendios forestales [31] o para el manejo de acueductos o niveles de agua [32]. Así, en la mayoría de los casos se tienen los mismos requerimientos: bajo costo, larga duración de la batería, largo alcance y masividad de terminales. Las excepciones a lo anterior son los dispositivos que requieran baja latencia (como vehículos autónomos), alta tasa de datos (propia de 4G) o especificaciones de robustez muy exigentes que pueden satisfacerse por una LPWAN. Fuera de esos casos, es posible y recomendable utilizarlas, para lo demás se espera los resultados del desarrollo de 5G que pueden ayudar a este tipo de dispositivos de mayor exigencia.

## 2.5. Estado del Arte

### 2.5.1. Comparación LoRaWAN v/s Sigfox

Ambas tecnologías comparten aspectos que las hacen las más utilizadas y expandidas a nivel mundial dentro de las tecnologías LPWAN, Sigfox se ha propuesto ser la red de área ampliada y baja potencia con la mayor cobertura a nivel mundial mientras que LoRaWAN se ha expandido principalmente gracias a la comunidad abierta de desarrolladores que la ha llevado a todas partes del mundo. Usando distintas técnicas, Sigfox y LoRaWAN logran cubrir una gran área geográfica, mejorar la eficiencia energética de sus terminales a un bajo costo de los dispositivos. A continuación, en la tabla 2.1 se muestra un resumen general de Sigfox y LoRaWAN:

### 2.5.2. Trabajos Previos

A continuación se describen trabajos que con anterioridad han comparado distintas redes de área ampliada, colocando una especial atención en las redes LoRaWAN y Sigfox y la implicancia que tiene en aplicaciones de Internet de las Cosas.

	<b>Sigfox</b>	<b>LoRaWAN</b>
Modulación	BPSK	CSS
Frecuencia (en Chile)	915 MHz	915-928 MHz
Ancho de banda	100 Hz	125 a 500 kHz
Máxima tasa de datos	100 bps	50 kbps
Bidireccionalidad	Limitada / Half-Dúplex	Sí / Half-Dúplex
Mensajes diarios	140 (UL), 4 (DL)	Sin límite específico
Largo del mensaje	12 bytes (UL), 8 (DL)	243 bytes como máximo
Alcance	10 km (urbano), 40 km (rural)	5 km (urbano), 20 km (rural)
Interferencias	Poco probable	Poco probable
Encriptación	Opcional	Sí (AES128b)
Adaptative data rate	No	Sí
Estandarización	Sigfox Company	LoRa Alliance

Tabla 2.1: Resumen comparativo de las tecnologías Sigfox y LoRaWAN. Adaptado de [33]

En [34], publicado en abril del año 2019, se realiza una revisión comparativa gracias a distintas publicaciones que han trabajado con tecnologías LPWAN considerando LoRaWAN, Sigfox, WavIoT, Ingenu, LTE-M y NB-IoT. En este trabajo se utilizan modelos para simular en distintas condiciones el alcance de estas tecnologías, el consumo de baterías, la colocación de las antenas, la pérdida de datos y otras características de las redes de baja potencia bajo condiciones dadas por comparaciones técnicas previamente realizadas. Las simulaciones indican mejores rendimientos para LoRaWAN y Sigfox a mayores distancias mientras que en rangos cortos se observa un buen comportamiento para RPMA (de Ingenu) y LTE-M. Se menciona a su vez que un mejoramiento de la sensibilidad de los receptores aumenta la cobertura para estas tecnologías y que cualquiera de estas ven reducidas en la mitad la vida de sus dispositivos ante fuertes condiciones climáticas (como temperaturas bajo 0°C).

En [11], se presenta otro estudio que revisa el estado del arte de las tecnologías LPWAN, comparando una gran cantidad de estas y sometiéndolas a sus características teóricas a evaluación mediante métricas técnicas tales como confiabilidad, latencia, movilidad, escalabilidad, soporte de *roaming*, costo de terminales y calidad de servicio. El principal aporte de este trabajo está en que presenta las tecnologías LoRaWAN y Sigfox a partir de ventajas y desventajas que son adaptadas en la tabla 2.2.

Por otro lado, se han realizado estudios que buscan generar candidatos para el despliegue masivo de dispositivos IoT, en el caso de [35], se levantan datos desde la industria y de la academia en torno al uso de tecnologías LPWAN, entre las que destaca el uso de LoRaWAN y Sigfox para el uso masivo de objetos conectados. Una de las conclusiones más interesantes tiene que ver con usos de latencia específicos en la que LoRaWAN ofrece mejores especificaciones que Sigfox y limitaciones en esta última por el acotado tamaño de su *payload*.

Finalmente, se ha encontrado un estudio que busca comparar las tecnologías LoRaWAN, Sigfox y Narrowband-IoT (NB-IoT) [33] para distintas aplicaciones de Internet de las Cosas. Para ello, define de forma técnica la comparación de las tres tecnologías y con base en ello los autores sugieren una tecnología sobre otra conforme a las aplicaciones abordadas: para medición eléctrica (*smart meters*) e industria automática se sugiere el uso de NB-IoT por

	Ventajas	Desventajas
<b>LoRaWAN</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gran Cobertura</li> <li>- Tasa de Datos Adaptable</li> <li>- LPWAN de mayor impacto</li> <li>- Características Plug and Play</li> <li>- Plataforma de backend de uso gratuito y/o despliegue propio (The Things Network)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ineficiente detección de intrusos</li> <li>- Tiene un máximo de nodos por GW</li> </ul>
<b>Sigfox</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Busca cobertura mundial</li> <li>- Baja susceptibilidad al ruido</li> <li>- Millones de dispositivos por GW</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Limitación de mensajes</li> <li>- Uso casi únicamente para uplink</li> <li>- Infraestructura de backend privada</li> </ul>

Tabla 2.2: Ventajas y desventajas del uso de LoRaWAN y Sigfox. Adaptada de [11]

la disponibilidad de conexión a la red eléctrica; para agricultura se sugiere LoRaWAN o Sigfox dada las dificultades de cobertura de una red NB-IoT; y se sugiere LoRaWAN por sobre Sigfox en las aplicaciones de *tracking* ya que es la que ofrece mayor confianza ante el movimiento a altas velocidades. Las recomendaciones dadas en este trabajo se basan en una comparación teórica (sin comprobación experimental) del funcionamiento de las redes y que principalmente diferencia a LoRaWAN y Sigfox con NB-IoT, dejando esta última para los casos en que se cuenta con red eléctrica disponible.

Hay algunos casos en que se realizan comparaciones entre LoRaWAN y Sigfox a partir de evaluaciones experimentales, como se puede ver en [36] y [32], pero estas resultan ser para aplicaciones sumamente específicas (en este caso, para un tipo de algoritmo de geolocalización y para el uso eficiente de la crianza de peces, a través de telemetría acuosa). En la mayoría de las comparaciones publicadas se establecen claras diferencias entre la tecnología de LoRaWAN y Sigfox que permiten discriminar el uso de una o de la otra desde una perspectiva técnica, sin embargo, en ambas se logra el resultado de cualquier LPWAN: largo alcance, larga vida de baterías y masividad, es por eso que falta una comprobación experimental de estas mismas, de manera de tener desde capas superiores si una o la otra se ajusta mejor al uso que se le quiera dar, ya sea por la cantidad de paquetes mínimo que necesite, por latencia, movilidad u otros.

# Capítulo 3

## Metodología de la Investigación

Para dar cumplimiento a los objetivos de esta investigación se divide el trabajo en tres áreas principales: en primer lugar, el levantamiento de requerimientos de aplicaciones de Internet de las Cosas y sus conexiones inalámbricas, en segundo lugar, pruebas de funcionamiento de las redes LoRaWAN y Sigfox con base en esta última información, y por último, la generación de una guía metodológica que entregue recomendaciones para la elección de tecnologías de comunicación inalámbrica para aplicaciones de Internet de Las Cosas.

### 3.1. Levantamiento de Información de Aplicaciones IoT

Como se ha visto anteriormente hay una cantidad inmensa de aplicaciones que se pueden realizar bajo el concepto IoT, es por eso que para generar un acercamiento a la realidad del rubro en la industria chilena, se contacta con algunos desarrolladores de dispositivos y sus aplicaciones que de alguna u otra forma logran establecer conexiones inalámbricas entre dispositivos e Internet, así, se pretende obtener información de los proyectos e iniciativas que se han realizado en la industria chilena como también los principales desafíos en la conexión que estos tienen. Se realiza este contacto buscando los siguientes datos:

- Descripción del proyecto y dispositivo IoT en el que se ha trabajado.
- Rubro al cual pertenece el proyecto.
- Características de los mensajes a transmitir (tipo de datos, longitud del mensaje, frecuencia de transmisión, etc.)
- Conexión que se utiliza actualmente y las dificultades que se han encontrado.
- Impedimentos que se han encontrado para usar una LPWAN

Por otro lado, se levanta información a partir de artículos y revistas internacionales, que con base en las experiencias de sus desarrolladores y autores permita acotar aún más las técnicas utilizadas en esta área. Distintas investigaciones y artículos han utilizado tecnologías LPWAN para su uso dejando una evidencia de los casos en el que su utilidad es mayor que en otros. Esto también permitirá dilucidar qué requerimientos no puede cumplir una LPWAN pero sí otro tipo de tecnologías, en particular, aquellas que escapan de las características de las redes de baja potencia.

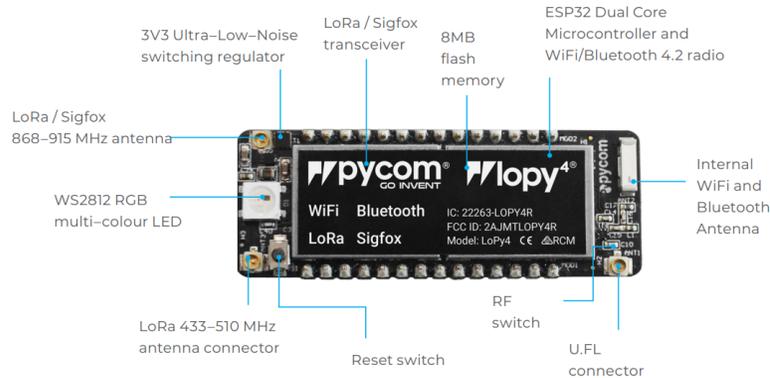


Figura 3.1: Características de la tarjeta LoPy4. Tomada de [37]

A partir de estos datos, se busca acotar el espectro de aplicaciones IoT en el que el uso de las tecnologías LPWAN tendrán un mayor impacto y que serían una solución de comunicación eficiente. Con esto, se escogen entre tres a cuatro proyectos debidamente documentados en revistas internacionales de tres rubros diferentes previamente escogidos, en base a los que tienen mayor información referenciada. Con estos se levantan tres perfiles diferentes simulando sus características al conectarse a la red LoRaWAN y a la red Sigfox.

## 3.2. Pruebas de funcionamiento de las redes LPWAN

Con el fin de analizar el funcionamiento de ambas redes, se realizan pruebas de transmisión de datos tanto en el ambiente LoRaWAN como Sigfox. Con estos resultados se podrá analizar algunas de las características técnicas expuestas en la tabla 2.1. Para esta conexión se utiliza la tarjeta de desarrollo LoPy4 de Pycom (figura 3.1), que utiliza *MicroPython* para su programación y que tiene cuatro tecnologías de conexión inalámbricas disponibles: LoRa, Sigfox, *WiFi* y *Bluetooth*. Con este terminal, se pueden simular sensores y actuadores con una conexión a LoRaWAN y a Sigfox y comparar su funcionamiento.

En el caso de la conexión con Sigfox, la infraestructura es provista por el operador de la empresa Sigfox en Chile (Mintek), contando actualmente con cobertura en prácticamente toda la zona urbana de Santiago de Chile y otros puntos del país [9]. Esta se implementa a través de estaciones base que la operadora va colocando en los distintos países en el que está entregando cobertura, buscando la generación de una red mundial de mensajes cortos ideal para el Internet de las Cosas. El modelo de negocios de Sigfox propone que la red esté disponible para cualquier persona en cualquier parte del mundo, esto coloca solo en manos de los operadores nacionales de Sigfox el levantamiento de las infraestructuras de red para su operación. Gracias a esto, la tarjeta de desarrollo LoPy4 podría conectarse en cualquier punto del radio urbano de Santiago, aunque con limitaciones que pueden darse por la ubicación de las estaciones base y la línea de vista que pueda tener. Las pruebas se realizan en la comuna de Peñalolén, en el sector oriente del radio urbano de Santiago de Chile.

Por otro lado, LoRaWAN cuenta con una red pública cuya infraestructura es levantada

por una comunidad abierta en el que cada individuo puede colocar un *gateway*, así, uno puede conectar dispositivos a *The Things Network* (en adelante, TTN), la cual cuenta con una consola para visualizar datos. Como no hay cobertura en la zona donde se realizan las pruebas, se desarrolla un *nano-gateway* con una segunda LoPy4 la cual servirá para hacer pruebas de funcionamiento utilizando TTN como *network server*. Cabe mencionar que existen otros servidores disponibles para LoRaWAN, como LORIoT<sup>1</sup> o ChirpStack<sup>2</sup>, pero se ha decidido utilizar *The Things Network* por la documentación disponible de esta y su accesibilidad.

Se realizarán pruebas de funcionamiento de las redes para los tres perfiles levantados en los tres rubros seleccionados previamente. Con ello, se obtendrán datos de la fiabilidad de la transmisión, el uso de las baterías y los comportamientos de un *backend* abierto como el provisto por *The Things Network* y el *backend* privado de Sigfox.

### 3.2.1. Fiabilidad de la transmisión

La fiabilidad de la transmisión se medirá según los paquetes que se reciban exitosamente al *backend* de Sigfox como también a la consola de *The Things Network* para LoRaWAN. Para cuantificarlo se mide el PDR (*Packet Delivery Ratio*) de cada transmisión realizada, comparando los paquetes recibidos con el total de enviados y expresándolos en forma de porcentaje.

$$Packet\ Delivery\ Ratio = \frac{\sum \text{Número Paquetes Recibidos}}{\sum \text{Número Paquetes Enviados}}$$

### 3.2.2. Uso de batería

El consumo de las baterías se estimará a partir de la intensidad de la corriente que se observe en la alimentación. Para medir la corriente eléctrica, se utilizará el sensor ACS712 que entrega mediciones en el cambio de corriente eléctrica. Con estos datos se podría estimar la duración aproximada de las baterías que se estén utilizando.

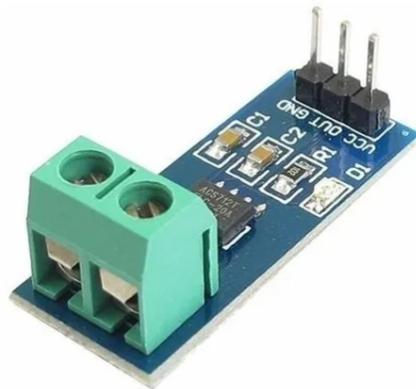


Figura 3.2: Módulo de sensor de corriente ACS712

---

<sup>1</sup>[www.loriot.io](http://www.loriot.io)

<sup>2</sup>[chirpstack.io](http://chirpstack.io)

Con los datos recogidos por el sensor se generan gráficos de Intensidad de Corriente (mA) v/s tiempo (s), con lo cual se recoge el área bajo la curva en el transcurso de una hora de funcionamiento de las redes. Con ello, se tiene una medida del consumo de la corriente eléctrica en el intervalo de una hora y así se puede estimar la duración de las baterías utilizadas a partir de la capacidad que tienen.

### 3.3. Elaboración de Guía de recomendación de tecnologías

El resultado final de este proyecto busca entregar una guía de recomendación del funcionamiento de las redes LoRaWAN y Sigfox, de manera de determinar el beneficio técnico de una o de otra y que sirva como una ayuda en el área de conexión inalámbrica de una aplicación IoT. Es común que las aplicaciones de Internet de las Cosas se conecten a la red a través de tecnologías inalámbricas tradicionales, como las redes 3G/4G o *WiFi*, esta guía busca determinar los requerimientos de comunicación de la aplicación y a partir de ellas deducir si requiere de tecnologías de alto *throughput* o le basta con lo que entrega una LPWAN, una vez escogida estas últimas, se realizará una comparación entre ambas dependiendo de los resultados arrojados en las pruebas mencionadas en el punto anterior.

La elaboración de la guía se hará en tres partes: En la primera se buscará definir la aplicación a desarrollar, en la segunda se encontrará indicadores que lleven a utilizar tecnologías distintas a LPWAN y entregar una breve descripción de otras tecnologías pertinentes, y finalizará con una comparativa entre LoRaWAN y Sigfox según su cobertura, cantidad de mensajes, fiabilidad y uso de las baterías. Para la elaboración de estos puntos se utilizará la información levantada en las aplicaciones IoT y los resultados de las pruebas generadas en los perfiles por rubro explicados con anterioridad.

# Capítulo 4

## Rubros y Aplicaciones IoT que utilizan LPWAN

En un primer lugar y como se observó en el capítulo 2 de esta investigación, cualquier elemento interconectado a la red de Internet puede considerarse como un dispositivo relacionado al Internet de las Cosas, de manera que sus aplicaciones son muy amplias. En esta investigación se han recogido propuestas en los siguientes rubros que luego se irán acotando conforme a las soluciones que una LPWAN puede entregar.

- **Smart Cities:** Dispositivos interconectados entre sí que permiten optimizar el quehacer de la ciudad, como luminarias interconectadas, estacionamientos inteligentes, vehículos autónomos, etc.
- **Cuidado de la Salud:** Sensores que monitorean los signos vitales de personas que requieren un cuidado constante a distancia.
- **Agricultura y Ganadería:** Sensores y dispositivos que optimicen el cuidado de plantaciones y ganado.
- **Domótica:** Más conocida por la automatización de dispositivos del hogar.

Con base en estos rubros se ha levantado información nacional e internacional de proyectos IoT, siendo *Smart Cities* el rubro que mayor cantidad de proyectos ha tenido usando LPWAN.

### 4.1. Proyectos en Chile

En nuestro país hay proyectos, *start-ups* y emprendedores que han generado valor a través de dispositivos IoT. Para conocer su experiencia en los asuntos de conexión inalámbrica con ellos, se logró establecer contacto con tres desarrolladores en algún rubro IoT. Un primer caso es el desarrollo de los *Capta Flow Telemetry* de la empresa *CaptaHydro*<sup>1</sup>, quienes trabajan en la telemetría de canales de agua enviando datos de los niveles de los canales a Internet a través de redes 3G/4G para luego ser visto por los usuarios en un software propio llamado *Amaru*. Su conexión inalámbrica a la red no es posible de realizar por tecnologías LPWAN dado que no

---

<sup>1</sup>CaptaHydro: [www.captahydro.com](http://www.captahydro.com)

cuentan con coberturas en los canales de regadío que suelen estar en lugares más inaccesibles teniendo ya algunos problemas con las redes celulares, de manera que la implementación de LoRaWAN o Sigfox por ejemplo depende de la instalación de sus respectivas infraestructuras. Algo similar sucede con Lazarillo App <sup>2</sup> que a través de técnicas de posicionamiento vía *Bluetooth* permite dar orientación en la ciudad a personas con discapacidad visual, en este caso, la adopción de una tecnología LPWAN queda descartada por la disponibilidad de otras tecnologías en los *smartphones* de los usuarios siendo solo estas las posibles a utilizar pensando en el usuario final.

Un caso distinto es el de *Citysense*<sup>3</sup>, que ha establecido una red interconectada de sensores en la ciudad para medir datos de desplazamiento de personas, automóviles, calidad del aire, entre otros. Conforme a los datos de su página web, sus dispositivos cuentan con distintos sistemas de comunicación entre los que cuentan LPWANs como LoRaWAN y Sigfox, lo que responde a la masividad de sus dispositivos y también a la disponibilidad de cobertura que puede tenerse en una ciudad como la capital chilena.

Con estos casos locales, es necesario explorar soluciones que se encuentran en el ambiente internacional, en lugares donde las redes LPWAN tienen mayor masificación y donde se han levantado una mayor cantidad de productos y aplicaciones como las mismas Sigfox y LoRa Alliance lo indican.

## 4.2. Experiencia Internacional

A continuación, se revisan algunos proyectos que han sido realizados utilizando LoRaWAN o Sigfox como tecnologías de comunicación, de manera que nos permita entender el uso que hoy se les está dando a ambas plataformas.

### 4.2.1. Proyectos de Cuidado de la Salud

En el Cuidado de la Salud, las tecnologías LPWAN se han utilizado para la constante vigilancia de activos físicos en laboratorios, como las condiciones ambientales de infraestructuras clínicas y hospitales. Dada la contingencia de la pandemia del Covid-19 se han generado dispositivos que monitorean las condiciones ambientales de residencias sanitarias y otros recintos para pacientes contagiados del virus<sup>4</sup>. Otra posibilidad que se ofrece es el *tracking* y seguimiento de adultos mayores con enfermedades como el Alzheimer, en [38] se puede encontrar un ejemplo de investigación de esta área utilizando LoRa.

Las limitaciones de las tecnologías LPWAN pueden verse afectadas en aplicaciones de cuidado de la salud que requieran una muy baja latencia. En general, las tecnologías LPWAN pueden generar alertas con un desfase de unos pocos segundos. De manera que cualquier alerta o dato que se requiera de forma inmediata en casos de alto riesgo debe ser desarrollado con otra tecnología. El mismo caso resulta para aplicaciones de telemedicina que requiere de altas tasas de transmisión de datos y baja latencia en donde el 5G puede dar buenos resultados. Fuera de estos casos, hay distintas innovaciones en el área siendo principalmente

---

<sup>2</sup>App Lazarillo: [lazarillo.app/es/](http://lazarillo.app/es/)

<sup>3</sup>Citysense: [citysense.co](http://citysense.co)

<sup>4</sup>Disponible en: [pages.services/pages.lora-alliance.org/covid-19-lorawan-solutions/](http://pages.services/pages.lora-alliance.org/covid-19-lorawan-solutions/)

el monitoreo de pacientes y sus datos de salud las más difundidas como se puede ver en la página de Semtech<sup>5</sup> propietaria de la tecnología LoRa. Otras aplicaciones que se expandirán con el uso del 5G pueden revisarse en [39] que visualiza la evolución de esta tecnología.

### 4.2.2. Proyectos en Agricultura y Ganadería

La agronomía y la ganadería son rubros que se han visto transformados gracias a la introducción de tecnologías y donde es imperante el monitoreo constante de los distintos parámetros que intervienen en el desarrollo de esta industria. Es importante notar que hay niveles del uso de la tecnología que van a depender de la especialización industrial de los proveedores de alimentos y sus niveles de inversión, a pesar de las grandes diferencias que pueden existir entre multinacionales y agricultores más pequeños, las tecnologías LPWAN pretenden estar al alcance de los dos lados del espectro.

El mercado ya ofrece una serie de sensores y dispositivos para medir variables del agua, el suelo y las condiciones atmosféricas, a su vez, hay dispositivos que se adhieren a rebaños y que permiten saber tanto su posición como también como identificador para conocer la evolución de ellos en el tiempo. Ambas utilizadas extensamente en la industria agropecuaria pero no necesariamente con una conexión de estos sensores.

En general, el constante monitoreo que se requiere en la industria agropecuaria la convierten en un nicho para proyectos del tipo IoT, sin embargo, el desafío radica en las coberturas que requieren para su funcionamiento. Usualmente, las industrias de este tipo se encuentran en zonas rurales y en algunos casos de difícil acceso (un ejemplo es en la geografía chilena) que ya las convierte en lugares de poco acceso tecnológico. Sin embargo, la ventaja que generan las LPWAN en este contexto, es que al existir menos edificaciones que en zonas urbanas, el alcance de sus *gateways* y estaciones bases es mayor.

Así, LoRa-Alliance muestra en su página web<sup>6</sup> dispositivos para medir la irrigación, el cuidado de activos, condiciones climáticas a los que se exponen animales y la vegetación, entre otros. Por su lado, también Sigfox en su página web<sup>7</sup> muestra casos de uso de la tecnología en sensores adoptados para la industria agropecuaria.

### 4.2.3. LPWAN en Domótica

En general, los proyectos de domótica (casas automatizadas) buscan la automatización de los activos de un hogar como también puede ser en la industria. De esta manera, los dispositivos interconectados entre sí, permiten el control de luces, cortinas, electrodomésticos, como también aportar en seguridad y eficiencia. En este sentido, las tecnologías LPWAN no son utilizadas (en general, para los casos de automatización), ya que requiere de una constante subida y bajada de datos. Las tecnologías más populares en este rubro están basadas en comunicaciones inalámbricas de corto alcance, como el *WiFi*, *Bluetooth* y, especialmente en este rubro, *ZigBee*.

Sin embargo, las tecnologías LPWAN ofrece la posibilidad del monitoreo de activos y de

---

<sup>5</sup>[www.semtech.com/lora/lora-applications/smart-healthcare](http://www.semtech.com/lora/lora-applications/smart-healthcare)

<sup>6</sup>[lora-alliance.org/lorawan-vertical-markets/agriculture](http://lora-alliance.org/lorawan-vertical-markets/agriculture)

<sup>7</sup>[www.sigfox.com/en/agriculture](http://www.sigfox.com/en/agriculture)

características que pueden ser útiles en el hogar como en la industria. Sigfox ha levantado desarrollos<sup>8</sup> en los cuales ha sido útil para el monitoreo de las condiciones de un hogar lo que aporta en el eficiente uso energético y también en aplicaciones de seguridad, como en el caso de *tracking* de vehículos. De esta forma, estas tecnologías se recomiendan en el uso del monitoreo general, tanto en hogares como instalaciones industriales, pero no así para el manejo de luces o actuadores que operen en tiempo real.

#### 4.2.4. Proyectos en Smart Cities

El concepto de las *Smart Cities* son las que más pueden desarrollarse gracias a la introducción del Internet de las Cosas. La cantidad de aplicaciones pensadas para la ciudad son múltiples y ya un buen número de metrópolis tienen aspectos que la hacen inteligente, un ejemplo de eso, es la transformación que ha tenido el transporte público con tecnología GPS para su ubicación, las aplicaciones de transporte urbano y las incipientes empresas de *delivery* que, aprovechando la masificación de los *smartphones* y de las conexiones a Internet, han penetrado en el mercado del transporte de productos [40].

Las características propias de aparatos inteligentes distribuidos en la ciudad hacen de las tecnologías LPWAN como los medios ideales de comunicación inalámbrica. Los vastos espacios de la ciudad, la cantidad de dispositivos y la necesidad de un largo uso de baterías hacen de este el mejor nicho para la utilización de redes LPWAN como Sigfox y LoRaWAN. Así lo muestra la compañía Sigfox en su página web<sup>9</sup> en donde enumera proyectos en estacionamientos, escuelas, depósitos de basura y otros ejemplos más. Lo mismo hace LoRa-Alliance<sup>10</sup> destacando proyectos similares que se han realizado con su tecnología.

Como vemos, las aplicaciones dentro de las ciudades también son múltiples, prácticamente cualquier proyecto o dispositivo que mejore de alguna forma el rendimiento y eficiencia de algún aspecto dentro de la ciudad se puede considerar como un aporte a las ciudades inteligentes. Los ejemplos más recurrentes son luminarias interconectadas, el *smart-parking*, semáforos interconectados entre sí, medidores de la calidad del aire, vehículos autónomos, etc. En cada uno de estos casos, se requiere de una tecnología que provea la interconexión de cientos de miles de dispositivos y en la mayoría de los casos con un bajo consumo.

En el caso de los vehículos autónomos y otros proyectos similares, hay un requisito de latencia y tasa de transmisión que no permite en ellas la introducción de LPWAN's. Un automóvil autónomo va a requerir de toma de decisiones en un tiempo que va en el orden de los milisegundos, que no es posible con las tecnologías que aquí se están estudiando. Es en esos casos en el que se requiere de tecnologías que ofrecerán las redes 5G, que buscan una muy baja latencia y una tasa de transmisión de varios órdenes de magnitud. La tecnología 5G, que de a poco se está abriendo paso, conllevará un alto consumo energético (se está estudiando como mejorar el rendimiento [41]), por lo que a pesar de su masificación, las redes LPWAN seguirán siendo útiles para los dispositivos masivos y que requieren bajo consumo energético.

---

<sup>8</sup><https://www.sigfox.com/en/home-lifestyle>

<sup>9</sup><https://www.sigfox.com/en/smart-cities>

<sup>10</sup><https://loro-alliance.org/lorawan-vertical-markets/cities>

### 4.3. Impacto de las redes LPWAN

Con esta revisión centrada en el aporte de las LPWAN dentro de las aplicaciones IoT, se puede ver que sobresale su uso en el monitoreo de activos como de condiciones medioambientales, rara vez para la automatización dentro de la industria sino para un constante levantamiento de datos de donde estén dispuestas. En este sentido, los mensajes de *downlink* se utilizan con más frecuencia para cambiar algún valor del funcionamiento de los dispositivos más que para generar alguna respuesta de algún actuador, aunque sí es posible realizarlo. Para el caso de Sigfox, este funcionamiento es ideal dado los pocos mensajes de *downlink* que permite (solo 4 diarios), siendo LoRaWAN la que permite mayor cantidad de mensajes de *downlink* en el caso de requerir utilizarlos. En el caso de las aplicaciones del cuidado de la salud, se podrán monitorear y generar alertas utilizando tecnologías de comunicación LPWAN siempre y cuando no sean casos críticos donde la baja latencia y baja tasas de transmisión puedan ser un factor de riesgo.

Así, las aplicaciones que utilizan la tecnología LPWAN exigen que sus características más llamativas puedan satisfacer las necesidades que se revisaron anteriormente: un uso eficiente de las baterías, que permitan cambiarlas en largos períodos de tiempo, masividad de los dispositivos y con ello un costo menor de construcción por terminal y una buena cobertura para los distintos lugares donde los dispositivos se alojarán. Estas notables características de las LPWAN se ven contrapesadas con la baja tasa de transmisión, el largo en bits de los mensajes transmitidos y la fiabilidad de la conexión.

De esta forma, las aplicaciones de Internet de las Cosas que busque monitorizar activos y gran masividad son candidatas ideales para utilizar tecnologías LPWAN (no por eso las únicas). Estas aplicaciones tendrán su propia información a transmitir, su propia frecuencia de envío de datos y sus propias características especiales que le harán escoger entre una u otra LPWAN.

### 4.4. Requerimientos de conexión de proyectos IoT

Con el fin de tomar requerimientos y condiciones que estas aplicaciones deben cumplir para su buen funcionamiento, se han tomado casos de uso en los tres grandes rubros en el que se ha encontrado mayor cantidad de información respecto a levantamiento de proyectos IoT: Cuidado de la Salud, Agricultura y Smart Cities. Para cada uno de ellos se ha buscado el mensaje a enviar a partir de los datos que sus sensores entregan, la frecuencia de envío de sus mensajes conforme a los datos entregados en sus publicaciones, la expectativa de fiabilidad, el uso de sus baterías y otros aspectos que sean relevantes en cada dispositivo y que se encuentre disponible.

#### 4.4.1. Cuidado de la Salud

Se tomaron tres proyectos de Cuidado de la Salud en el que se utilizan tecnologías LPWAN para su comunicación, dos de ellos corresponden a dispositivos que monitorean signos vitales y uno que emite alerta en una situación de riesgo:

En el caso de [42] se muestra un proyecto realizado con un dispositivo de *e-health* desarro-

llado por Libellium <sup>11</sup> que establece un puente entre dispositivos de medición de signos vitales y una conexión a Internet, cuentan incluso con videos-tutoriales para el uso de dispositivos en casa. El proyecto realiza la conexión a través de LoRaWAN y mide niveles de glucosa, presión arterial y temperatura. Tal como indican los videos entregados por Libellium esta medición de datos se hace diariamente, de manera que se envía uno o dos mensajes diarios conforme a las necesidades médicas.

El segundo caso es de [43] en el que se ha construido un dispositivo que monitorea la actividad cardiaca. A partir de unos cuantos datos de diástole y sístole, se genera un estadístico denominado HRV que permite identificar el estado cardiaco del paciente sin un envío continuo del latido del corazón sino con un envío cada minuto de esta estadística. La generación de este dato requiere un continuo funcionamiento de los sensores cardiacos.

El último caso es de [44] que es distinto a los anteriores ya que constituye parte de un sistema de alerta ante posibles extravíos en parques nacionales, si una persona va a entrar a un parque se le entrega este dispositivo con anterioridad. En caso del extravío de una persona, un dispositivo con tecnología LPWAN envía una notificación con la posición GPS de la persona que porta el dispositivo y permite su búsqueda de forma temprana.

En todos los casos anteriores, se requieren altas fiabilidades de las tecnologías de comunicación y un uso de baterías que dure semanas, de manera que se requiera poca recarga de estas sobretodo en casos donde los pacientes no puedan realizarlo con regularidad.

#### 4.4.2. Agricultura y Ganadería

El sector agropecuario suele requerir monitoreo de sus activos, en este caso, se monitorean las condiciones ambientales para plantaciones, las condiciones del estado de agua de regadío y por último, la geolocalización de rebaños en campos extensos.

El primero de ellos que está documentado en [45] busca monitorear los niveles de luminosidad, temperatura, humedad y presión atmosférica de la zona donde se ha colocado, en particular, en plantaciones. Estos datos no son críticos y no tienen cambios bruscos en el tiempo, de manera que basta con un envío por hora.

El segundo basado en [46] recolecta datos de la calidad de agua, como niveles de pH, oxígeno disuelto, temperatura y niveles de turbiedad. A diferencia de los anteriores, los cambios de estos datos pueden ser más fuertes en el tiempo, lo que deriva en una frecuencia de mensajes un poco mayor, entre quince a treinta minutos entre mensajes.

El último aporte que vemos en [47], corresponde al *tracking* de ganado utilizando GPS, estos dispositivos requieren un funcionamiento de siete meses conforme a lo publicado en [47], de manera que se adopta un mensaje por hora para lograr este último cometido.

Así, en el caso del sector agropecuario, la longitudes de los mensajes va a depender de la cantidad de sensores a utilizar y también la resolución de estos. Los requerimientos de batería van a ser mayores, teniendo que durar por meses o años, en esto, ayuda que la frecuencia del envío de los mensajes sea baja ya que aumentan los tiempos de descanso y baja el consumo

---

<sup>11</sup>[www.libellium.com/](http://www.libellium.com/)

de potencia de los dispositivos.

### 4.4.3. Smart Cities

El caso de las *Smart Cities* es el más diverso pero que en prácticamente todos sus casos requiere de monitoreo. Para este caso se han considerado ejemplos en la polución del aire, *smart parking*, *tracking* y semáforos inteligentes:

En [48] se presenta un proyecto de monitoreo de contaminación acústica y ambiental desarrollado en Tailandia utilizando NB-IoT. Los mensajes de este proyecto se envían diariamente con datos de niveles de ozono, decibeles (ruido), dióxido de carbono, monóxido de carbono y material particulado PM<sub>10</sub>.

En [49] vemos un caso de estacionamiento inteligente que presenta dispositivos que solo miden la presencia o no de un vehículo en su determinado espacio lo que permite una administración mejor de estos. Este dispositivo no necesariamente envía datos cada cierto tiempo sino que lo hace cada vez que hay un cambio en su estado.

El caso de semáforos inteligentes se visualiza en [26], que busca establecer la presencia de vehículos utilizando sensores magnéticos. Estos datos permitirían a un semáforo establecer si requiere de cambios o no. En este caso, se requiere una alta frecuencia de envío de datos, siendo de alrededor de un mensaje por minuto.

El último caso está documentado en [27] que involucra el seguimiento de activos en la ciudad a través de mensajes GPS que se envía cada minuto para tener detalles de la distribución de algún producto.

Al igual que en el caso agropecuario, el largo de los mensajes va a depender de la cantidad de sensores que sean colocados en los casos de monitoreo. En este rubro, se ven que hay aplicaciones que requieren de una frecuencia mayor de envío de mensajes que en los casos anteriores lo que lleva a exigir mayores recursos de las redes de comunicación inalámbrica.

### 4.4.4. Largo de los mensajes

Tipo de dato	Tamaño en memoria	Rango de valores
byte	1 byte	0 a 255
char (con bit de signo)	1 byte	-128 a 127
word	2 bytes	0 a 65535
int (con bit de signo)	2 bytes	-32768 a 32767
unsigned long	4 bytes	0 a 4294967295
long (con bit de signo)	4 bytes	-2147483648 a 2147483647

Tabla 4.1: Tipos de datos y sus tamaños en bytes

Para las tecnologías que se están trabajando aquí, se utilizan mensajes cuya longitud está medida en bytes, siendo posible compartir *payloads* de 12 bytes en Sigfox y hasta 242 bytes en LoRaWAN (en condiciones específicas). Es por esta razón que cada aplicación que utilice una de estas tecnologías debe codificar la información y posteriormente el receptor debe

decodificarla en datos útiles. Para la representación de la información, se utilizan algunas variables que permiten que los mensajes sean representados y que se trabajan usualmente en los ambientes de programación y se revisan en la tabla 4.1. En base a estos tipos de datos se representa la información que entregan los proyectos anteriores y se llega a un estimado de largo de mensajes.

Así, los sensores que utilizan por ejemplo un sensor de temperatura corporal requieren de mediciones que representen entre 25 a 42 grados Celsius (para el rango del ser humano), y que puede tener un decimal de precisión, es decir, va a requerir de 170 datos para representarlo y que con una variable tipo *int* es representable. Los datos de GPS van de -180 a 180 en longitud y -90 a 90 en latitud. Lo que es representable (según la cantidad de decimales a utilizar) con dos variables *long*, lo que son 8 bytes. Así, se toman las condiciones dadas por los autores y sus respectivos sensores y la representación acorde al caso, esta recopilación se encuentra resumida en la tabla 4.2.

Sensor	Datos a representar	Variable	Tamaño
GPS	-90 a 90 en latitud -180 a 180 longitud	2 variables long	8 bytes
Temperatura corporal	Entre 20 a 50 °C	word	2 bytes
Presión Arterial	0 a 140 mmHg para diástole y sístole	2 variables byte	2 bytes
Glucómetro	0 a 110 mg/dL	byte	1 byte
HRV	Estadística entre 0 y 4 con tres decimales	word	2 bytes
Luminosidad	Entre 0 a 64000 lux, con dos decimales	unsigned long	4 bytes
Temperatura Ambiental	Entre -10 y 85 °C con dos decimales	int	2 bytes
Humedad	Entre 0 y 90 %, con dos decimales	word	2 bytes
Presión Atmosférica	Entre 20 a 110 kPa	unsigned long	4 bytes
Oxígeno disuelto	Entre 0 y 20 mg/L con tres decimales	word	2 bytes
pH	1 a 14 con dos decimales	word	2 bytes
Turbiedad	Uso de ADC de 10 bits	word	2 bytes
Ozono	10 a 1000 ppb	word	2 bytes
Ruido	30 a 100 dB	byte	1 byte
Dióxido de Carbono	Usa ADC de 10 bits	word	2 bytes
Material particulado	Usa ADC de 10 bits	word	2 bytes
Monóxido de Carbono	Representado en 12 bits	word	2 bytes

Tabla 4.2: Tamaño de la representación de la información dada en los proyectos revisados

#### 4.4.5. Tabla-resumen

Finalmente, y conforme a los requerimientos levantados anteriormente en este capítulo, en la tabla 4.3 se presenta un resumen con los requerimientos de aplicaciones IoT en los rubros de Cuidado de la Salud, Agricultura y *Smart Cities*. El largo de los mensajes, la frecuencia de transmisión de estos y la duración de la batería requerida se basan en un mínimo y máximo dictado por las aplicaciones revisadas anteriormente.

<b>Aplicación</b>	<b>Largo Mensaje</b>	<b>Frecuencia de mensajes</b>	<b>Duración batería</b>
<b>Salud</b>	2 a 8 Bytes	1 mensaje por minuto a 1 mensaje por día	Semanas
<b>Agricultura</b>	8 a 12 Bytes	1 mensaje cada 15 minutos a 1 mensaje por hora	Meses a años
<b>Smart Cities</b>	1 a 11 Bytes	1 mensaje por minuto a 1 mensaje diario	Meses a años

Tabla 4.3: Resumen de requerimientos de aplicaciones IoT

# Capítulo 5

## Implementación de las pruebas

Para simular dispositivos en las áreas de Cuidado de la Salud, Agricultura y Ganadería y *Smart Cities*, se usan tarjetas de desarrollo que se utilizan para el prototipado de productos IoT. Con base en los perfiles levantados anteriormente, se programan estas tarjetas de modo que puedan transmitir los datos que enviaría un dispositivo en cada rubro y así visualizar el comportamiento de los nodos al conectarse a las redes Sigfox y LoRaWAN, midiendo de forma específica la fiabilidad obtenida y el uso de las baterías.

Los resultados de estas pruebas se podrán utilizar de manera posterior para el levantamiento de recomendaciones para desarrollar aplicaciones IoT, de manera de ayudar a desarrolladores en la elección de estas tecnologías y como debiesen programarse al querer utilizarlas y sacar el mayor provecho de ellas.

### 5.1. Pruebas a implementar

Con base en el capítulo anterior, se han levantado tres perfiles que se pueden revisar en la tabla 4.3. A modo de resumen se pueden establecer los siguientes comportamientos por rubro:

- **Cuidado de la Salud:** En este rubro se buscan levantar datos que ayuden en el tratamiento médico de personas. Se han detectado dos modos de uso principales de dispositivos IoT: el primero en el que se envían datos de forma continua en poco tiempo (del orden de mensajes por minutos) que mide alguna variable en particular (usualmente signos vitales) y otros casos en que se envían datos diarios de una serie de sensores que toman los signos de una persona una o dos veces al día, siendo aquí varios los datos a compartir (largos *payload*). Se utilizan únicamente mensajes de *uplink* a excepción de casos en que se necesite envíos de alertas o de confirmación de la comunicación.
- **Agricultura:** La mayoría de los dispositivos encontrados aquí, envían datos de una serie de sensores a una razón de un mensaje cada 15 minutos a una hora, siendo usualmente mensajes largos que puedan llevar la mayor información posible de distintos sensores bastando para ello 10 bytes según las aplicaciones observadas. Se envían solo mensajes de *uplink*.

- **Smart Cities:** Las *Smart Cities* suelen tener sensores que se comunican con la red con uno o dos mensajes diarios, sobretodo para la monitorización de parámetros medioambientales, excepto para aplicaciones más críticas, como en el caso del uso de semáforos y estacionamientos inteligentes, en donde el uso de los mensajes marcando la presencia de vehículos requiere una mayor frecuencia (del orden de mensajes por minuto).

Buscando simular las condiciones de cada una de estas, se emplean cuatro pruebas de funcionamiento, cada una realizada tres veces, una para Sigfox, otra para LoRaWAN utilizando *Spread Factor 7* y una final para LoRaWAN utilizando *Spread Factor 12*, dejando un total de 12 experimentos a realizar. Las pruebas se han enumerado del 1 al 4 sin ser realizadas en este orden necesariamente:

- **Prueba N°1:** Simulando el caso de envío de un dato de un signo vital en Cuidado de la Salud, se envían 2 bytes elegidos aleatoriamente, con una espera de un minuto por mensaje sin utilizar la función de baja energía (función *deepsleep* que deja al dispositivo con un consumo bajo), esto ya que los sensores toman datos continuamente sin tiempos de pausa. En el caso de Sigfox se implementará la prueba por 2 horas y 30 minutos (aprovechando sus 140 mensajes diarios), mientras que se implementará por el doble de tiempo en el caso de LoRaWAN para aprovechar su ilimitación en el número de mensajes para estos casos (de la misma manera en la Prueba 3).
- **Prueba N°2:** Se simula el caso de la agricultura enviando un mensaje de 10 bytes (generados de forma aleatoria) representando el *payload* de varios sensores que envían información conjunta. Para el ahorro de consumo energético se utiliza la función *deepsleep* del dispositivo, enviando un mensaje cada 30 minutos. La prueba se realiza por 36 horas en ambas redes para la adquisición de alrededor de 72 datos.
- **Prueba N°3:** La prueba 3 es similar a la prueba 1 con la diferencia que se utiliza la función *deepsleep* entre mensajes ya que no requiere de una generación continua de datos, simulando así los datos de presencia vehicular para *Smart Cities*, necesitando solamente de 1 byte para ello. Al igual que en la prueba 1 se realiza por 2 horas y 30 minutos con Sigfox y por 5 horas con LoRaWAN.
- **Prueba N°4:** La última prueba simulará aquellos dispositivos que utilizan rangos mayores de espera, con uno o dos mensajes diarios. Se enviará un mensaje de 12 bytes cada 6 horas, pudiendo enviar la información codificada de varios elementos a la vez en cuatro espacios del día. Con la finalidad de obtener 10 datos se realiza esta prueba por red durante 60 horas, utilizando el modo *deepsleep* que es el de mínima energía entre los espacios de descanso.

Cada una de las pruebas se realiza con Sigfox y LoRaWAN a través de la tarjeta de desarrollo LoPy4 y utilizando un Arduino que captura los datos del sensor de corriente para observar el comportamiento de sus baterías.

## 5.2. Desarrollo de los nodos

Para simular los nodos de las pruebas anteriores se ha utilizado la tarjeta de desarrollo LoPy4 montada en una placa de expansión que permite su conexión e intercambio de archivos con un computador, adherida a ella se encuentra una antena con un rango de operación en

la banda de frecuencia de LoRaWAN y Sigfox (915-928 MHz). La programación y conexión de estas a las respectivas redes se encuentran explicadas a continuación:

### 5.2.1. Conexión a Sigfox

La conexión a Sigfox se realiza obteniendo el identificador del dispositivo (*Identifier ID*) y su identificador PAC (*Porting Authorization Code*), estos se pueden obtener luego de actualizar el firmware del dispositivo cuyas instrucciones están documentadas en la página de Pycom<sup>1</sup>. Estos identificadores son entregados al *backend* de Sigfox donde previamente se ha configurado una suscripción para el uso de su plataforma, con estos datos ya se pueden enviar mensajes al *backend* por parte de este nodo.

Para programar el envío de los mensajes, se contó con dos librerías para *MicroPython*: Sigfox y *socket*. La librería Sigfox se programó con la zona de configuración de radio 4 (RCZ4) que es para el caso chileno. Luego se abrió un nuevo *socket*, se configuró para el caso de Sigfox y se bloqueó para que pudiese cumplir con el envío antes de seguir con otros procesos. Como solo se envían mensajes de *uplink*, el *downlink* se desactiva. La configuración se puede ver a continuación con un ejemplo de envío de 3 bytes.

```
from network import Sigfox
import socket

sigfox = Sigfox(mode=Sigfox.SIGFOX, rcz=Sigfox.RCZ4)
s = socket.socket(socket.AF_SIGFOX, socket.SOCK_RAW)
s.setblocking(True)
s.setsockopt(socket.SOL_SIGFOX, socket.SO_RX, False)
s.send(bytes([0, 1, 2]))
```

### 5.2.2. Conexión a LoRaWAN

La conexión a LoRaWAN requiere de un *gateway* que conecte el dispositivo a Internet. Como no se contaba con uno en la zona donde se realizaron las pruebas, se levantó un *nanogateway* con la ayuda de una segunda LoPy4 que, aprovechando una conexión a *WiFi*, sube los datos a la red de Internet. En este apartado se divide la configuración del nodo y la configuración del *nanogateway*, las cuales comparten un archivo que se explica a continuación.

#### Nanogateway LoRaWAN

El *nanogateway* levantado en este apartado se realizó gracias a un proyecto desarrollado por Pycom que contiene tres archivos principales: *config.py*, *main.py* y *nanogateway.py*. Estos pueden encontrarse en el repositorio de Pycom indicado en su página web<sup>2</sup>, sus tareas se resumen a continuación:

- **config.py** Este archivo contiene las variables para conexión a *WiFi* (SSID y clave de la red *WiFi*) y algunas configuraciones para la región utilizada por LoRaWAN, como

---

<sup>1</sup>Disponible en: docs.pycom.io

<sup>2</sup>pycom.io

la banda de frecuencia a utilizar, el *Spread Factor* y el Ancho de Banda, en este caso se utilizaron dos configuraciones, la primera para *Spread Factor* 7:

```
LORA_FREQUENCY = 916800000
LORA_GW_DR = "SF7BW125"
LORA_NODE_DR = 5
```

Y la segunda configuración utiliza *Spread Factor* 12:

```
LORA_FREQUENCY = 916800000
LORA_GW_DR = "SF12BW125"
LORA_NODE_DR = 0
```

Este mismo archivo se utiliza en el nodo LoRaWAN para asegurar el uso de los mismos parámetros.

- **main.py** Este archivo inicializa el nanogateway y es el que comienza a correr en la LoPy4 una vez energizada. Toma los datos del archivo *config.py* e inicializa la clase *nanogateway.py*.
- **nanogateway.py** Este archivo contiene la clase nanogateway y todas las funciones asociadas a su uso, incluyendo la conexión a *WiFi* y la recepción de paquetes LoRaWAN para subirlos a la red de Internet.

Este último dispositivo se instaló a unos 250 metros del lugar donde se realizaron las pruebas con algunas edificaciones entre medio, sin línea de vista directa. En el lugar, contaba con una red *WiFi* administrándole conexión a la red de forma constante. Una vez instalado y conectado, se inscribió el dispositivo en la consola de TTN y pudo comenzar a subir datos a este.

Una de las dificultades encontradas en este dispositivo, es que pierde la conexión a partir de cierto momento que es utilizado, teniendo que reiniciarse para un funcionamiento constante de este. Para solucionar este problema, se instaló un Arduino con un Relé entre la Tarjeta de Desarrollo y la alimentación, de manera que el Arduino reiniciaba a través del Relé el funcionamiento de la LoPy4 cada cierta cantidad de tiempo y lo reconectaba luego de períodos de inactividad.

## Nodo LoRaWAN

El nodo debe autenticarse con la red y este puede hacerlo mediante dos mecanismos: OTAA (*Over-The-Air Activation*) o ABP (*Activation By Personalisation*). Se utiliza ABP que al inscribir la aplicación en TTN entrega dos llaves: *Network Session Key* (nwkSKey) y *Application Session Key* (appSKey), estas claves expresadas de forma hexadecimal se integran en el programa del nodo LoRaWAN para realizar la activación del dispositivo. Una vez realizado, se pueden enviar mensajes a la consola de TTN.

La configuración en el nodo es similar al caso de Sigfox, salvo que hay que agregar algunos pasos para la activación del dispositivo. Al igual que en el caso anterior, existe la librería LoRa, la que se inicializa en modo LoRaWAN con la región respectiva en la que se levanta (AU915 en el caso de Chile). También se configura el nodo para que trabaje en los tres primeros canales de la frecuencia seleccionada, estos parámetros se encuentran en el archivo

*config.py* levantado en el *nanogateway*, de manera que se ocupa este mismo archivo para asegurar el uso de los mismos parámetros.

```
from network import LoRa
import socket
import binascii
import struct
import config

lora = LoRa(mode=LoRa.LORAWAN, region=LoRa.AU915)

# Activacion por ABP
dev_addr = struct.unpack(">I", binascii.unhexlify('26011F2B'))[0]
nwk_skey = binascii.unhexlify('DDA72EF15716F45F9F83DA52D9379EAA')
app_skey = binascii.unhexlify('D76BE692998F3AFFB45C82C19289F42F')

# Se eliminan todos los canales
for channel in range(0, 72):
    lora.remove_channel(channel)

# Se agregan los primeros 3 canales
for channel in range(0, 3):
    lora.add_channel(channel, frequency=config.LORA_FREQUENCY,
                    dr_min=0, dr_max=5)

lora.join(activation=LoRa.ABP, auth=(dev_addr, nwk_skey,
app_skey))

# Configuracion del socket y envio
s = socket.socket(socket.AF_LORA, socket.SOCK_RAW)
s.setsockopt(socket.SOL_LORA, socket.SO_DR, config.LORA_NODE_DR)
s.setblocking(True)
s.send(bytes([0, 1, 2]))
```

### 5.2.3. Otras funciones MicroPython utilizadas

Se utilizaron otras dos funciones de *MicroPython* implementadas en LoPy4 que permitieron acercarse al funcionamiento de las aplicaciones que aquí se están poniendo a prueba:

- **uos.urandom(n)** Esta función permite generar una serie de **n** bytes aleatorios, simulando así la generación de mensajes de las aplicaciones IoT. Como forma de simular el tiempo que toman los sensores en la adquisición de los datos, se implementaba un tiempo de *sleep* justo después en el código para simular este intervalo de toma de datos.
- **machine.deepsleep(t)** Esta función mantiene a la tarjeta de desarrollo LoPy4 en un modo de consumo ultra bajo durante **t** milisegundos, permitiendo ahorro de la batería en los intervalos que no se están enviando mensajes.

Los códigos utilizados en las cuatro pruebas para ambas redes pueden revisarse en los anexos de este documento.

## 5.3. Adquisición de Resultados

Los resultados a medir en estas pruebas corresponden a la fiabilidad (identificando la cantidad de paquetes que se reciben exitosamente) y al uso de la batería de los dispositivos al trabajar en estas redes.

### 5.3.1. Fiabilidad

Tanto la consola de TTN como el *backend* de Sigfox se han integrado con Ubidots<sup>3</sup> plataforma web que permite la administración de distintos dispositivos IoT. De esta forma, cada dato que llega a TTN o a Sigfox, es decodificado y enviado a la plataforma de Ubidots, pudiendo así revisar los datos que han sido efectivamente enviados y deduciendo cuantos se han perdido. Esto también puede revisarse en el *backend* de Sigfox, no así en la consola de TTN ya que no están disponibles luego de un tiempo, quedando sí guardados en la plataforma de Ubidots.

Una vez creada una sesión en Ubidots, este entrega un *Token* que se le provee a los *Callbacks* de Sigfox, en este apartado también se puede decodificar el mensaje Sigfox y dejar el mensaje JSON que se va a enviar a la plataforma, el que puede indicar algunos otros parámetros del mensaje. En este caso se enviaba la data decodificada, el tiempo de llegada, y el número de secuencia. El caso de TTN es un símil del anterior, donde también se entrega el *Token* de Ubidots y se envía el dato decodificado a la plataforma. Con esto se tiene un conteo seguro de los datos enviados por LoRaWAN y Sigfox.

### 5.3.2. Uso de la batería

Cada prueba se realizó con el nodo conectado a un arreglo de dos baterías en serie de ión Litio JYD, entregando un total de 7.4 Volts y con una capacidad aproximada de 3400 mAh. Para administrar energía al dispositivo, se pasaba este voltaje por un circuito *Step-Down* LM2596 que deja el voltaje de alimentación en 5 Volts para energizar la tarjeta de desarrollo LoPy4.

Para medir el uso de las baterías se implementa un amperímetro a través del sensor de efecto *Hall* ACS712 que detecta el campo magnético generado al correr la corriente eléctrica a través de él. Este elemento se coloca en serie a la alimentación para medir lo que está consumiendo la LoPy4 mientras realiza sus operaciones. Este sensor, a través de un puerto analógico de un Arduino UNO, permite leer la corriente eléctrica consumida por el dispositivo. El puerto analógico del Arduino UNO cuenta con un ADC de 10 bits, lo que permite la lectura de intensidad de corriente con una sensibilidad de alrededor de 10 mA. Para disminuir el ruido de las mediciones, el puerto *Serial* de Arduino se ha configurado para que entregue el promedio de 2500 muestras, las cuales son capturadas por un *script* de Python que se puede

---

<sup>3</sup><https://ubidots.com/>



(a) Baterías



(b) Step-Down 5V

Figura 5.1: Elementos para energizar los dispositivos

encontrar en los anexos a este documento. Los datos son guardados en un archivo CSV que luego son graficados para la captura de resultados.

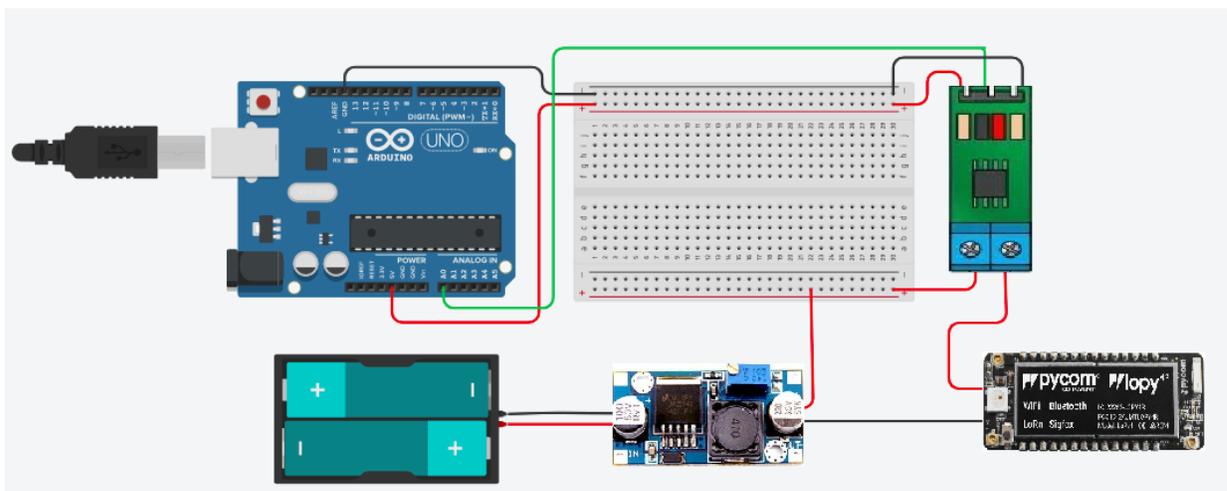


Figura 5.2: Conexión de la alimentación a tarjeta LoPy4

# Capítulo 6

## Resultados y análisis de funcionamiento

A continuación se recopilan los resultados del rendimiento de las redes LoRaWAN y Sigfox una vez fueron sometidas a cuatro pruebas de funcionamiento conforme a los requerimientos presentados en los capítulos anteriores. Por cada una de las pruebas realizadas para cada red LPWAN, se verifica la fiabilidad de la transmisión (mensajes exitosamente transmitidos) y el consumo eléctrico de los nodos implementados.

### 6.1. Fiabilidad

La fiabilidad de las redes indican el nivel de confianza que se puede depositar en ellas en el momento de una exitosa transmisión de sus datos. Para medir la fiabilidad de las transmisiones, se contrasta la cantidad de mensajes a enviar con los que efectivamente se transmitieron al *backend* de Sigfox y a la consola de TTN, en ambos casos, se respaldó la información de los mensajes en la plataforma de administración de dispositivos IoT *Ubidots*, donde se guarda un registro de los datos exitosamente enviados al *network server* de las redes. Dado que el alcance de la transmisión de mensajes por LoRaWAN está sujeta al *Spread Factor* utilizado, se realizaron pruebas usando el factor mínimo y el máximo, esto es, *Spread Factor* 7(SF7) y *Spread Factor* 12(SF12).

#### 6.1.1. Prueba 1: Cuidado de la Salud, mensajes por minuto

En esta prueba se exigió una gran frecuencia para las redes LPWAN, dado el límite de mensajes de la red Sigfox, se realizó durante 2 horas y 30 minutos con tal de ocupar los 140 mensajes diarios que permite, y dado que no hay un límite fijo para LoRaWAN, la prueba se realizó por mayor tiempo para probar su funcionamiento en una ventana mayor. Las fiabilidades encontradas se muestran en la tabla 6.1. En el caso de LoRaWAN se han contado 174 mensajes a enviar con *Spread Factor* 7 y 184 mensajes con *Spread Factor* 12. Lo anterior porque existieron períodos de inactividad del *nanogateway* utilizado durante algunos minutos, por lo que no se consideraron los mensajes enviados en esas ventanas de tiempo.

LPWAN	Mensajes a enviar	Mensajes Recepcionados	PDR [%]
Sigfox	140	140	100 %
LoRaWAN (SF7)	174	105	60,3 %
LoRaWAN (SF12)	184	180	97,8 %

Tabla 6.1: Resultados de fiabilidad de la transmisión para la Prueba 1

### 6.1.2. Prueba 2: Agricultura, mensajes cada 30 minutos

La Prueba 2 tiene una frecuencia de envío considerada óptima para las redes LPWAN que, en general, recomiendan en su funcionamiento frecuencias de envíos de algunos minutos. Los resultados de esta prueba para las redes LoRaWAN (utilizando dos factores) y Sigfox se recopilan en la tabla 6.2.

LPWAN	Mensajes a enviar	Mensajes Recepcionados	PDR [%]
Sigfox	72	72	100 %
LoRaWAN (SF7)	72	51	70,8 %
LoRaWAN (SF12)	56	50	89,3 %

Tabla 6.2: Resultados de fiabilidad de la transmisión para la Prueba 2

### 6.1.3. Prueba 3: Smart Cities, mensajes por minuto

Si bien esta prueba es similar a la primera, su diferencia radica en que se implementa la función *deepsleep* entre mensajes, consumiendo así una baja energía y provocando mayor duración de la batería, por lo que su efecto mayor se verá en resultados posteriores de consumo. Cambia también la longitud del mensaje siendo de solamente 1 Byte. Las fiabilidades encontradas para este caso se recopilan en la tabla 6.3.

LPWAN	Mensajes a enviar	Mensajes Recepcionados	PDR [%]
Sigfox	140	140	100 %
LoRaWAN (SF7)	174	126	72,4 %
LoRaWAN (SF12)	144	140	97,2 %

Tabla 6.3: Resultados de fiabilidad de la transmisión para la Prueba 3

### 6.1.4. Prueba 4: Mensaje cada 6 horas

Los mensajes cada 6 horas logran una transmisión de los mensajes en 4 momentos del día, siendo representativo para el monitoreo de largos períodos en rubros de la salud y las ciudades inteligentes que requieren de envíos de largas longitudes una o dos veces al día. Su implementación fue medida durante 60 horas, por lo que se pretendían enviar 10 mensajes en total. Los envíos exitosos están representados en la tabla 6.4

LPWAN	Mensajes a enviar	Mensajes Recepcionados	PDR [%]
Sigfox	10	10	100 %
LoRaWAN (SF7)	10	7	70 %
LoRaWAN (SF12)	10	10	100 %

Tabla 6.4: Resultados de fiabilidad de la transmisión para la Prueba 4

## 6.2. Consumo energético

El consumo energético de las redes se mide a través de un sensor el cual entrega la corriente utilizada por la tarjeta LoPy4 mientras realiza cada una de las pruebas. El sensor de corriente eléctrica ACS712 utilizado, de acuerdo a su hojas de datos, entrega 2,5 Volts para una corriente nula, mientras que desde ese punto sube de forma lineal de acuerdo a su sensibilidad (185 mV por ampere según *datasheet*), así, el voltaje entregado por el sensor responde a la ecuación indicada a continuación.

$$V = 0,185I + 2,5 \quad (6.1)$$

El voltaje es capturado por un puerto ADC de 10 bits de un Arduino UNO, por lo que se puede representar en 1024 niveles distintos ( $2^{10}$ ). Para disminuir el ruido del sensor, se programó el Arduino para que entregue el promedio de 2500 datos cada 300 milisegundos. Por último, antes de cada medición de corriente se calibraba el *offset* del sensor, tomando 200 muestras con el sensor midiendo 0 Amperes, con este dato, se aproximó a una recta con los que se puede calcular la corriente eléctrica a partir de los bits entregados por el sensor.

Mientras se realizaban las pruebas, la tarjeta LoPy4 estaba adherida al sensor de corriente como se explicó en el capítulo anterior. A medida que se recogían estos datos, se guardaba en el ordenador los niveles de batería en bits, los cuales se pasaron a amperes según la recta calculada previamente. Teniendo también el tiempo que tomaba cada medición, se pudo estimar el nivel de consumo de la LoPy4 en cada una de las doce pruebas abordadas.

### 6.2.1. Prueba 1: Cuidado de la Salud

En este caso, la tarjeta de desarrollo se mantuvo encendida en todo momento simulando los casos de Cuidado de la Salud que requieren de sensores con constante toma de datos. Se observa el comportamiento de la corriente eléctrica en un lapso de cinco minutos en las figuras 6.1 para Sigfox y 6.2 para LoRaWAN, en donde los *peaks* de corriente indican los momentos de envío de los datos. Por otro lado, el consumo energético del dispositivo durante la toma de ambas pruebas queda resumida en la tabla 6.5. La estimación de duración de las baterías se hace con base en una batería de 3400 mAh, que fueron las utilizadas en este experimento.

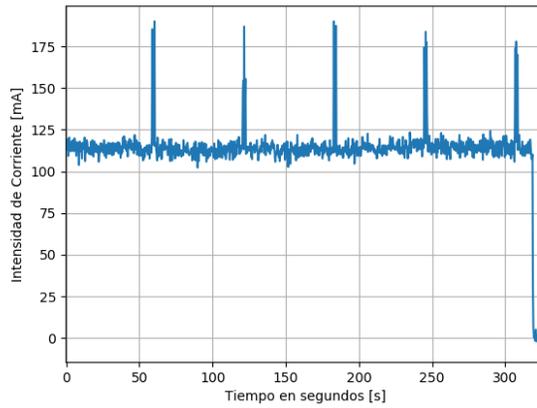
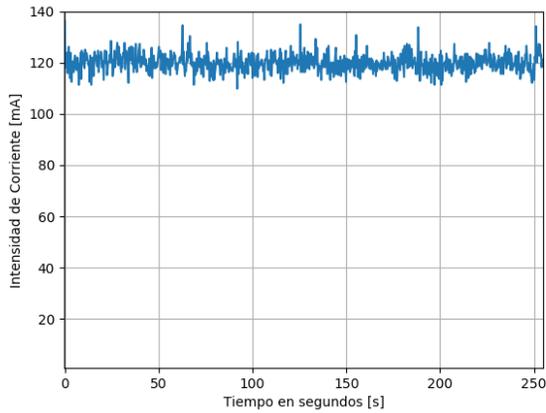
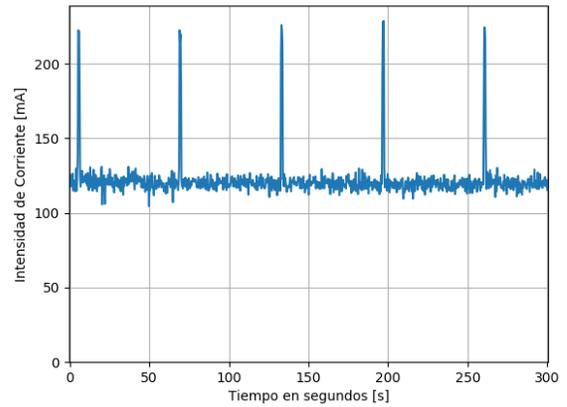


Figura 6.1: Gráfico de consumo de la Corriente Eléctrica en Sigfox para la Prueba 1



(a) Spread Factor 7



(b) Spread Factor 12

Figura 6.2: Gráfico de consumo de la Corriente Eléctrica en LoRaWAN para la Prueba 1

LPWAN	Consumo mAh	Duración aprox. para 3400 mAh
Sigfox	120.73	28,16 horas
LoRaWAN (SF7)	119.97	28,34 horas
LoRaWAN (SF12)	121,69	27,94 horas

Tabla 6.5: Consumo energético para la Prueba 1

## 6.2.2. Prueba 2: Agricultura

Para esta prueba, la tarjeta LoPy4 se mantuvo en bajo consumo (*deepsleep*) por mayor cantidad de tiempo (alrededor de 30 minutos) y con mensajes de mayor longitud (10 bytes), antes del envío de cada mensaje, el dispositivo tomaba un tiempo de 10 segundos de *sleep*. El comportamiento de la corriente eléctrica consumida por el dispositivo en el envío de un mensaje (se muestran ventanas de tiempo de 5 minutos) se pueden visualizar en las figuras 6.3 para Sigfox y 6.4 para LoRaWAN. En ambos casos se visualizan los 10 segundos de encendido del dispositivo posterior al tiempo de *deepsleep* utilizado. A su vez, en la tabla 6.6 se presenta el cálculo de consumo energético de forma homóloga a la prueba anterior.

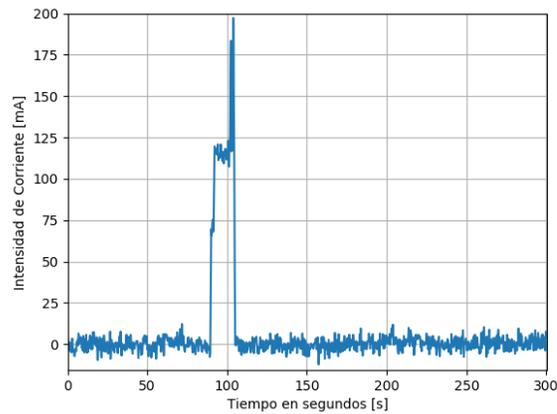
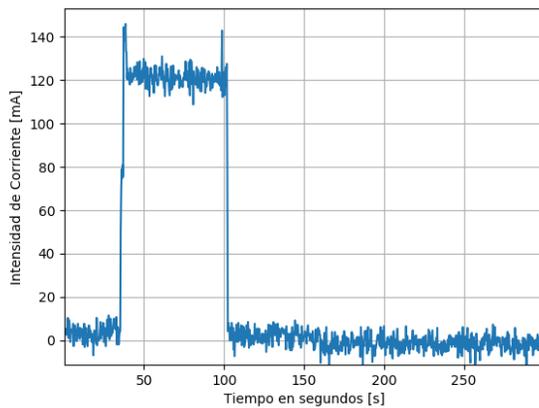
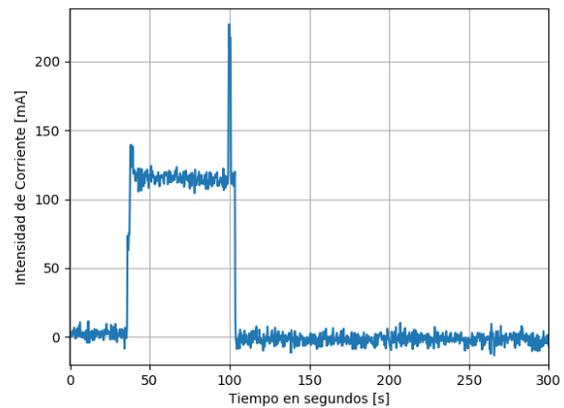


Figura 6.3: Gráfico de consumo de la Corriente Eléctrica en Sigfox para la Prueba 2



(a) Spread Factor 7



(b) Spread Factor 12

Figura 6.4: Gráfico de consumo de la Corriente Eléctrica en LoRaWAN para la Prueba 2

LPWAN	Consumo mAh	Duración aprox para 3400 mAh
Sigfox	4.98	28.45 días
LoRaWAN (SF7)	8.52	16.63 días
LoRaWAN (SF12)	8.53	16.61 días

Tabla 6.6: Consumo energético para la Prueba 2

### 6.2.3. Prueba 3: Smart Cities

En esta prueba se utilizó la función *deepsleep* entre los mensajes enviados cada minuto, lo que se ve reflejado en el comportamiento de la corriente eléctrica consumida. A su vez, solo se envían mensajes con un *payload* de 1 byte. En la figura 6.5 se observa el comportamiento de la corriente eléctrica en un lapso de cinco minutos para Sigfox y de forma homóloga en la figura 6.6 para LoRaWAN considerando los dos *Spread Factor* utilizados. Finalmente, la estimación de duración de las baterías se visualiza en la tabla 6.7

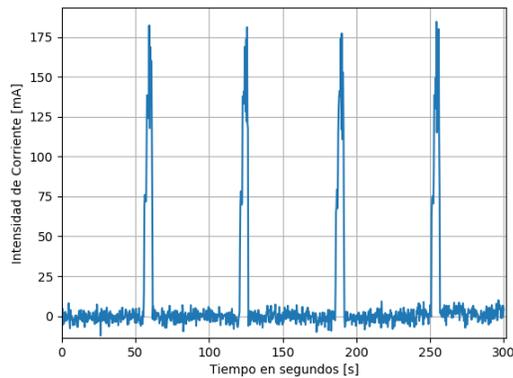


Figura 6.5: Gráfico de consumo de la Corriente Eléctrica en Sigfox para la Prueba 3

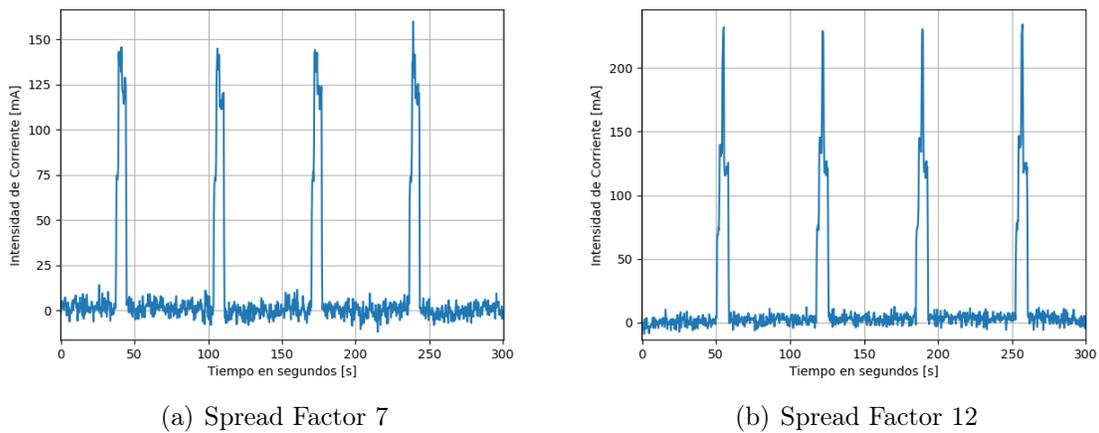


Figura 6.6: Gráfico de consumo de la Corriente Eléctrica en LoRaWAN para la Prueba 3

LPWAN	Consumo mAh	Duración aprox para 3400 mAh
Sigfox	14.01	10,12 días
LoRaWAN (SF7)	15.37	9.21 días
LoRaWAN (SF12)	17.37	8.16 días

Tabla 6.7: Consumo energético para la Prueba 3

### 6.2.4. Prueba 4: Mensajes diarios

La prueba 4 es de duración más extensa tomándose una gran cantidad de datos en un total de 180 horas para todas las pruebas. Las figuras 6.7 y 6.8 muestran el comportamiento de la corriente para Sigfox y LoRaWAN respectivamente en el envío del mensaje, tomando una ventana de algunos minutos para visualizar su forma, el resto del tiempo el dispositivo se encontraba en reposo. Finalmente y al igual que los casos anteriores, la tabla 6.8 muestra el consumo calculado para estos casos.

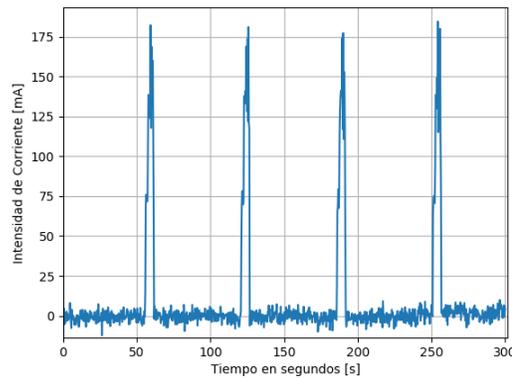


Figura 6.7: Gráfico de consumo de la Corriente Eléctrica en Sigfox para la Prueba 4

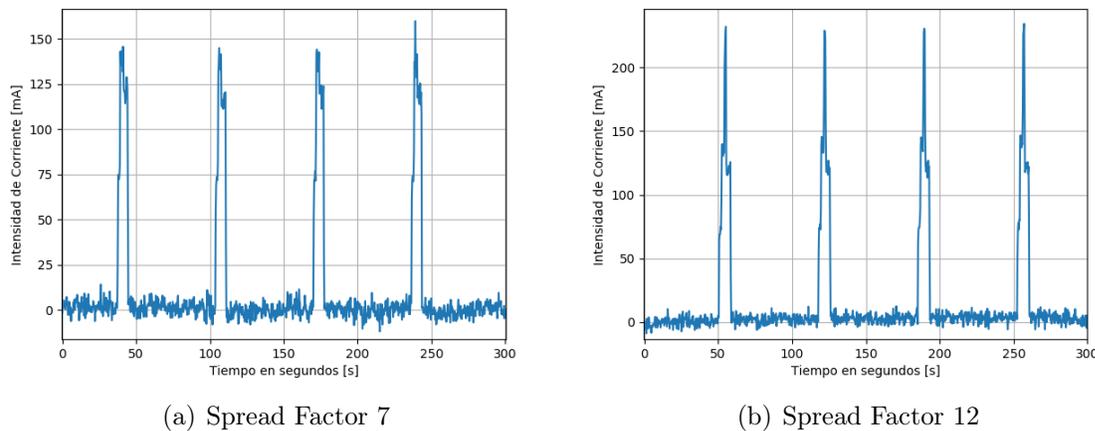


Figura 6.8: Gráfico de consumo de la Corriente Eléctrica en LoRaWAN para la Prueba 4

LPWAN	Consumo mAh	Duración aprox para 3400 mAh
Sigfox	3.58	39,57 días
LoRaWAN (SF7)	3.66	38,71 días
LoRaWAN (SF12)	4.03	35,15 días

Tabla 6.8: Consumo energético para la Prueba 4

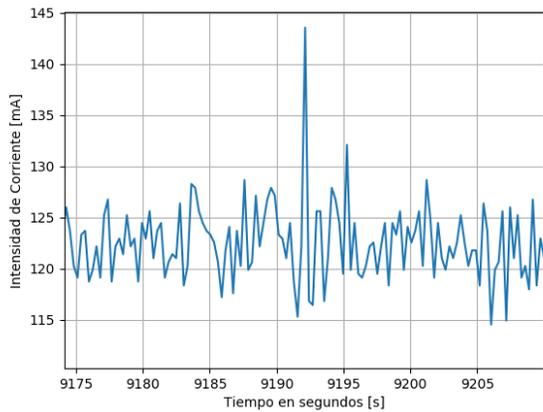
### 6.3. Análisis de Resultados

Los resultados al medir la fiabilidad claramente muestran un exitoso desempeño en las transmisiones de la red Sigfox, logrando la llegada de todos los mensajes a su *backend*, distinto al caso de LoRaWAN donde su desempeño depende del *Spread Factor* utilizado, siendo en promedio cercano al 70 % en el caso de *Spread Factor* 7 y llegando a 95 % en promedio para *Spread Factor* 12. Y si bien esto podría sugerir que una red se desempeña mejor que la otra, en realidad tiene que ver con las infraestructuras distintas con la que se cuenta en ambos casos. Mientras que Sigfox tiene una red de varias estaciones base instaladas en la Región Metropolitana, las cuales dan cobertura prácticamente a todo el sector urbano de la capital chilena, la red LoRaWAN instalada para este experimento contó solo con un *nanogateway* colocado al interior de una casa que le brindaba conexión a través de WiFi, sin dejar la antena al exterior. El *nanogateway* permitía el intercambio de información pero sin la posibilidad de contar con múltiples frecuencias y múltiples *Spread Factor* como lo haría un *gateway* comercial de LoRaWAN.

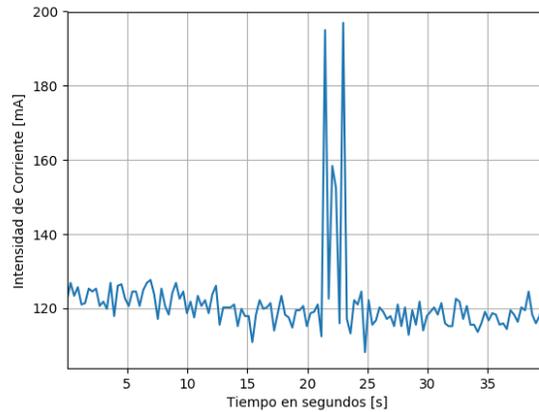
No solo existía la imposibilidad de contar con un *gateway* multi-frecuencias para LoRaWAN y algunos períodos de inactividad del *nanogateway* implementado, sino que también esto generaba el uso de solo una frecuencia de envío y solo un *Spread Factor*, el cual debía estar pre-establecido en ambos, es por ello que se realizan los experimentos con dos *Spread Factor* por separado, un proceso que el *network server* puede realizar automáticamente si se le indica. El uso de *Data Rate* Adaptativo (ADR, *Adaptive Data Rate*), permite a la red encontrar el mejor *Spread Factor* y Ancho de Banda para el nodo utilizado, estimando su uso a partir de los niveles de señal encontrados. Las pruebas anteriores se realizaron con *Spread Factor* 7, teniendo así el mayor *Data Rate*, pero a la vez un menor alcance y luego con *Spread Factor* 12, teniendo el menor *Data Rate* pero el mayor alcance.

Por otro lado, el consumo energético de los nodos es similar en ambas redes, siendo en general levemente mayor en el caso de LoRaWAN y que al ponerlo en una perspectiva larga en el tiempo arroja mayor duración para la conexión con Sigfox. La excepción solo se da en la Prueba 1 donde todas las configuraciones tienen un consumo similar y la mayor diferencia se da en la Prueba 2 ya que representa un *payload* de mayor tamaño en dos oportunidades cada hora. Se puede visualizar el comportamiento de la corriente eléctrica en el envío de un mensaje a ambas redes en la figura 6.9.

De esta forma y por lo que se observa en la figura 6.9, la corriente eléctrica utilizada por el nodo LoRaWAN al envío de un mensaje llega a un *peak* de unos 140 mA que se mantiene por unos milisegundos (puede llegar a más de 200 mA si se aumenta su *Spread Factor*), contrariamente, en Sigfox se tiene una serie de *peaks* y valles, que van de los 120 mA hasta 200 mA. De esta forma, en el promedio, un envío del nodo a la red Sigfox es levemente menor



(a) LoRaWAN SF7



(b) Sigfox

Figura 6.9: Comportamiento de la Corriente Eléctrica al enviar un mensaje en LoRaWAN y Sigfox

que en el caso de LoRaWAN (con *Spread Factor 7*), diferencia que se va acentuando cuando se extiende en el tiempo al subir la cantidad de mensajes enviados. Es también fácil notar que el consumo sube al subir a *Spread Factor 12* llegando a *peaks* más altos que en *Spread Factor 7*. Sin embargo, no observan saltos demasiado grandes, aumentando en un 14% como máximo respecto a *Spread Factor 7* y casi sin cambios como en el último caso.

Aún así, en todas estas pruebas no se han alcanzado condiciones que entregue duración de baterías por meses o años (como usualmente suele decirse de estas redes), el mayor resultado fue de casi 40 días en la Prueba 4, lo que es insuficiente para los requerimientos de batería levantados en la tabla 4.3 al menos con baterías de esta capacidad. Esto demuestra que a pesar de ser redes de baja potencia, esto no implica necesariamente una solución para aquellas aplicaciones que requieren dispositivos con baterías que duren una gran cantidad de tiempo. Se tiene que disponer de baterías de alta capacidad, sensores que sean también de bajo consumo y uso de microcontroladores y una programación que permita una larga duración en el tiempo, que en el caso de estos experimentos se realiza con *deepsleep* y bajando la frecuencia de envío de mensajes.

# Capítulo 7

## Guía de selección de tecnologías de comunicación para Aplicaciones IoT

Como aporte central de este proyecto, y gracias a las características estudiadas previamente, así como a las pruebas de desempeño realizadas, en esta sección se propone una metodología que permita ayudar a desarrolladores de aplicaciones IoT en la selección de tecnologías de comunicación inalámbrica para el proyecto que lleven a cabo. Hoy en día, las tecnologías más conocidas para IoT son *WiFi*, *Bluetooth* y las redes celulares 3G/4G, sin embargo, hay un buen segmento de aplicaciones de Internet de las Cosas que no requieren de algunas de las buenas características que ofrecen estas, además, el uso de otras tecnologías de comunicación inalámbrica permiten una descongestión del espectro electromagnético y de los canales de las redes antes mencionadas.

La guía aquí propuesta considera proyectos que requieren comunicación con Internet utilizando redes que tienen ese propósito final, aquellos que requieren visualización o recolección de datos de manera directa por parte de un *smartphone* o computador tendrá que utilizar tecnologías de comunicación que vengan integrados a estos últimos como *WiFi*, *Bluetooth* u otro elemento no necesariamente inalámbrico (como USB o *Ethernet*). De la misma forma, tampoco se contabiliza elementos que requieren de comunicación sin el uso de Internet, como la comunicación por voz a través de la telefonía celular o la mensajería SMS.

Esta guía contará con tres partes principales: en la primera de ellas se buscará definir los parámetros de comunicación que la aplicación requiere teniendo un espacio para definir si estos requerimientos son óptimos o no, en la segunda parte y a partir de los datos levantados anteriormente se busca establecer si las redes LPWAN logran cumplir con las necesidades anteriores o se debe optar por tecnologías mencionadas anteriormente, y la tercera parte, busca generar recomendaciones entre las LPWAN vistas hasta aquí: LoRaWAN o Sigfox.

### 7.1. Primera Parte: Definiciones de la Aplicación IoT

Cualquier aplicación IoT contará con un microcontrolador o CPU (Unidad Central de Procesamiento) que dirigirá las tareas del dispositivo a utilizar, contará con una fuente de

alimentación, con un transceptor de comunicación que dependerá de la tecnología a utilizar y, opcionalmente, puede tener o solo sensores, solo actuadores o sensores y actuadores.

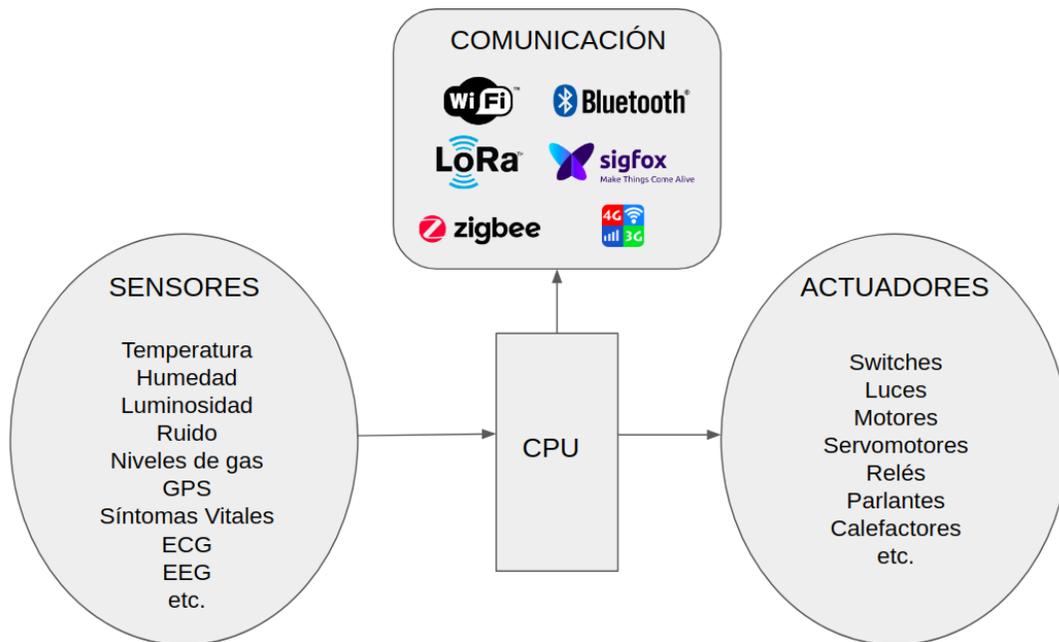


Figura 7.1: Partes de una aplicación IoT

Conforme al diagrama que se observa en la figura 7.1 se deben identificar cada una de las partes que tendrá la aplicación a desarrollar, cuáles son los sensores que este tiene y los datos que va a recolectar. Por otra parte, de ser necesario se deben identificar los actuadores que tendrá la aplicación y como trabajarán estos según sus estados y modos de activación. A continuación se profundizará de forma separada entre ambos.

### 7.1.1. Definiciones en sensores

Los sensores de una aplicación IoT están directamente relacionados con la toma de datos de este, se encargan de tomar la información de variables físicas y codificarlas en bits para poder procesarlas y trabajar con ellas. De esta forma, se deben identificar las variables que se requiere medir, escoger los sensores que levantarán esta información y realizar las siguientes preguntas (omitir si la aplicación no levanta datos desde sensores):

#### 1. ¿Qué tipos de datos se deben enviar?

Se deben identificar los tipos de datos que se enviarán a la red, ya sean videos, imágenes, audios o cadenas de datos alfanuméricos. Esto va a depender directamente del tipo de sensores que se van a tener, en la mayoría de los casos, los sensores levantan datos alfanuméricos, mientras que cámaras y micrófonos generan otro tipo de datos que, si bien se representan en bytes, pueden ser de tamaño comparativamente grandes a los sensores mencionados anteriormente.

## 2. ¿Qué tamaño en bytes tienen los datos a enviar?

Como se ha visto, un byte de información corresponde a 8 bits con lo que se pueden representar hasta 256 niveles de información, lo que para algunos sensores puede ser suficiente para la representación de sus variables. Las tablas 4.1, 4.2 y 7.1 de a continuación, pueden servir como guía para estimar el tamaño de los datos que se necesitan enviar a los servidores de Internet. Cabe destacar que en este apartado solo se piensa en los datos recolectados por los sensores de la aplicación y no en como este se empaqueta para ser enviado (que pueden ser en mensajes JSON por ejemplo). Esta información resulta útil para optimizar los mensajes con los que la aplicación trabajará.

Data	Tamaño
Estado ON/OFF	1 bit
Una letra (en código ASCII)	1 byte
Temperatura ambiental	2 bytes
Posición GPS	8 bytes
Serie de sensores	12 bytes
Un mensaje SMS	100 bytes
Audio de 5 segundos	10 kB
Imágenes de media resolución	100 kB
Audio de alta calidad de 1 minuto	1 MB
Webcam Full HD por 1 hora	2 GB

Tabla 7.1: Tamaño en bytes estimado para distintos tipos de información

## 3. ¿Se puede optimizar el tamaño de los datos de la aplicación?

Mientras mayor sea el tamaño de los datos de la aplicación, mayores serán los recursos que tomará la tecnología de comunicación que se utilice. Es por ello que la optimización del tamaño permitirá mejorar las condiciones de transmisión y del dispositivo. Se hace necesario entonces aprovechar la información que se puede enviar, 1 byte de información permitirá 256 niveles de representación, 2 bytes permitirá 65536, etc. Si se utiliza, por ejemplo, un termómetro ambiental que vaya desde  $-20^{\circ}C$  a  $60^{\circ}C$  utilizará 80 niveles, agregando una resolución de  $0,5^{\circ}C$  se tienen 160 niveles, lo que alcanza perfectamente en un byte siendo más óptimo para el envío de datos, de manera que si no se requiere de mayor resolución, se puede utilizar un byte.

Para optimizar la información se recomienda: primero, observar los límites mínimos y máximos de la variable a medir, segundo, establecer la resolución más adecuada para enviar la información y por último, establecer los bytes necesarios para su representación. Un ejemplo de esto se realiza en la tabla 4.2 donde se podría optimizar aún más algunos de los datos ahí mostrados pero que va a depender de lo más adecuado para el usuario final.

## 4. ¿Cuál es la frecuencia de envío de mensajes?

La frecuencia de envío de mensajes a la red va a incidir directamente en el consumo eléctrico de los dispositivos dada la cantidad de mensajes que se utilizarán a diario, y si es muy alta, pueden existir pérdidas de mensajes dependiendo de la red que se utilice. Esta

frecuencia no debe ser necesariamente fija, hay casos en el que el envío de estos mensajes será gatillado por algún evento, sobretodo en los dispositivos que requieren enviar alertas. En estos casos, se recomienda estimar un máximo de mensajes que pueda enviarse a diario, lo que entrega un estimado de frecuencia a utilizar.

Determinar la frecuencia va a depender de múltiples factores que tendrán que ver con el usuario final y las mediciones que se quieran mostrar a este, como también, de la resolución de la información que se quiera obtener. En la mayoría de los casos se van a querer frecuencias altas de mensajes para obtener todos los detalles de las variables a medir, sin embargo no es necesario para todas las variables físicas que se quieren medir, siendo útil verificar cuánto cambia esta variable física en el tiempo.

Para determinar la frecuencia de envío de mensajes, la tabla 7.2 ofrece ejemplos que se encontraron en referencias a proyectos explicados en capítulos anteriores. Se debe tener en cuenta que hay tecnologías que no soportan altas frecuencias de transmisión, en esos casos, se deberá evaluar bajar la frecuencia que se esté utilizando.

<b>Frecuencia</b>	<b>Ejemplos</b>
Muy Alta (Mensajes por segundo)	- Signos vitales de pacientes críticos. - Tracking de objetos en tiempo real.
Alta (Mensajes por minuto)	- Seguimiento de signos vitales no críticos - Presencia de móviles en Smart Cities
Media (Mensajes cada 15-30 min)	- Condiciones ambientales en ciudades e industria. - Condiciones ambientales y de suelo en agricultura
Baja (Mensajes por hora)	- Tracking de rebaños - Presencia vehicular en estacionamientos
Muy Baja (Mensajes diarios)	- Monitoreo de activos industriales - Reportes promedio de sensores en un día

Tabla 7.2: Ejemplos de frecuencias de envío

### 7.1.2. Definiciones en actuadores

Los actuadores de la aplicación que se esté desarrollando pueden requerir mensajes de *downlink* como también de buenas latencias para su funcionamiento, en este sentido, hay que hacer dos preguntas principales.

## 1. ¿Se requieren mensajes de *downlink*?

Los mensajes de *downlink* tienden a utilizarse de distintas formas: pedir reportes al dispositivo, realizar cambios en la adquisición de datos y también que el dispositivo realice una acción a través de sus actuadores. Sin embargo, no todos los dispositivos requieren de actuadores (casos de solo monitoreo), ni tampoco de mensajes de *downlink* para activarlos, ya que no requieren de acciones remotas para ello y se pueden activar gracias a un procesamiento local. Si el accionamiento es remoto, la aplicación requerirá mensajes de *downlink*. La velocidad de respuesta va a depender de la latencia de la red.

## 2. ¿Es importante la latencia de la red?

La latencia de las redes va a ser determinante en la velocidad de respuesta del dispositivo ante mensajes de subida y bajada a Internet. Es por ello que si el dispositivo requiere de respuestas rápidas por parte de sus actuadores ante mensajes de la red, es necesario que trabaje con tecnologías que entreguen buenas latencias. Así también, hay casos en que se requieren mensajes de *downlink* para la activación de algún dispositivo, sin embargo, no es necesaria una respuesta rápida, sino que pueden pasar unos segundos antes de su activación sin que existan problemas con ello. Un claro ejemplo de esto, son las respuestas muy rápidas que han de tener los vehículos autónomos en presencia de otros móviles en las ciudades, cuya latencia requerida espera encontrarse en redes 5G. Cualquier dispositivo que requiere ser controlado continuamente a distancia requerirá bajas latencias, pero si este control no es continuo, y solo busca accionamiento de algunos actuadores donde no hay problema que se tarde algunos segundos en iniciar, la latencia no tiene que ser necesariamente un factor relevante, sí lo será la fiabilidad de la red, asegurando la recepción de mensajes *downlink*.

## Resumen Parte 1

En resumen, se tienen hasta aquí el tipo de enlace que usará la aplicación, el tamaño, cantidad y frecuencia de envío de los mensajes y la latencia de estos dispositivos, resumen que se puede hacer en la tabla 7.3

<b>Tipo de Enlace</b>	Solo uplink, solo downlink, ambos
<b>Tamaño de los mensajes</b>	Estimado en Bytes
<b>Frecuencia de envío de mensajes</b>	Cantidad de mensajes en un espacio de tiempo
<b>Latencia</b>	Alta, baja o indiferente.

Tabla 7.3: Tabla resumen de requerimientos de una aplicación

## 7.2. Segunda Parte: Redes LPWAN o de Alto Throughput

Con los datos obtenidos anteriormente ya se pueden tomar decisiones respecto a la velocidad de transmisión o *throughput* necesario para estos dispositivos. Como se ha visto anteriormente, las redes LPWAN son de bajo *throughput*, suficiente para un gran número de aplicaciones, pero insuficientes para aquellas que tienen un gran tamaño de mensajes, altas frecuencias de transmisión y necesitan de latencias bajas.

### 7.2.1. Características para utilizar alto *throughput*

Basta que en uno de los siguientes puntos existan características de alto *throughput* para inclinarnos por una de estas tecnologías. Al final se explica brevemente las características de cuatro de estas y en qué espacios se ajustan mejor.

#### 1. Gran tamaño de los mensajes

Las aplicaciones que utilizan mensajes que sobrepasan los 256 Bytes de información comienzan a generar problemas en los *payload* de las tecnologías LPWAN y requieren de otro tipo de tecnologías, no necesariamente por la velocidad de estos sino por la amplia capacidad de datos que tienen. Es por eso el hincapié que se realiza en bajar el tamaño de los datos utilizados. Actualmente se trabaja en definir mecanismos de fragmentación de paquetes sobre redes LPWAN [50] que podría contribuir a eliminar esta limitación sobre el tamaño de los *payloads*.

#### 2. Alta frecuencia de envío de mensajes

Las aplicaciones con una muy alta frecuencia de envío (en el orden de un mensaje cada ciertos segundos) van a requerir una alta velocidad para subir estos datos a la red de Internet.

#### 3. Bajas Latencias

Las aplicaciones que requieren de muy bajas latencias, tanto para controlar actuadores como para un envío rápido de información, tendrán que escoger plataformas de alta velocidad. Teniendo en cuenta que las latencias en LPWAN están en el orden de unos cuantos segundos, mientras que en otras tecnologías están en el orden de unos cuantos milisegundos.

### 7.2.2. Tecnologías de alto *throughput*

A continuación se da una breve descripción de algunas de las tecnologías de comunicación inalámbrica que pueden brindar soluciones en caso de necesitarse altas velocidades de transmisión.

#### Bluetooth

La tecnología *Bluetooth* se creó principalmente para la conexión entre dispositivos y la creación de pequeñas redes inalámbricas. Trabaja en la banda de los 2,4 GHz, ofreciendo velocidades de 1 Mbps y alcance de 10 metros aproximadamente. La últimas versiones de este se conocen como *Bluetooth Low Energy*, permitiendo conexiones con un consumo menor de energía. Ampliamente utilizado para la conexión entre dispositivos y conexión con dispositivos de audio.

#### Redes Celulares 3G/4G

La tecnología 3G y 4G abrieron el paso al Internet móvil alcanzando velocidades (en el caso de 4G) de hasta 1 Gbps en condiciones de baja movilidad. Su principal ventaja es que funciona como una red de largo alcance, permitiendo conexión en gran parte del territorio

nacional a excepción de zonas geográficas apartadas. Su principal desventaja es su gran gasto energético que en uso continuo no dura más de un día como sucede en los *smartphones*.

## ZigBee

Zigbee es una tecnología de corto alcance y que llega a velocidades de transmisión de unos 250 kbps. Sus características la hacen ser ampliamente utilizadas en aplicaciones domóticas, siendo una de las tecnologías mayormente utilizadas para la generación de ambientes en casas inteligentes cumpliendo con niveles rápidos de respuesta.

## WiFi

Le tecnología *WiFi* ha sido la herramienta que ha permitido un desarrollo mayor de prototipos de Internet de las Cosas. Luego de la salida al mercado del chip de la empresa Espressif<sup>1</sup> ESP8266 de bajo costo, la inclusión de *WiFi* en dispositivos fue mayor. Sus principales características radican en la alta velocidad de transmisión que permite y trabajo con paquetes IP de alta carga de datos. Su principal deficiencia recae en el gasto energético y su corto alcance, siendo posible utilizarlo solo en zonas con cobertura *WiFi*.

## 7.3. Tercera Parte: LoRaWAN, Sigfox u otra LPWAN

Una vez que se ha identificado que se pueden utilizar redes de baja potencia y área ampliada en esta aplicación, se pueden generar recomendaciones de cual de estas utilizar. Como se ha visto en los capítulos precedentes, estas redes tienen características de funcionamiento similares, por lo que a continuación se presentan sus diferencias y que según los requerimientos de la aplicación levantados anteriormente va a decantar en una u otra o, también, en cualquiera de las dos.

### 1. Cobertura y alcance

En un primer paso, se debe verificar la cobertura de ambas redes. En el caso de Sigfox, la operadora nacional de la red se encarga de la entrega de la cobertura en Chile (Mintek Ltda.) y se puede revisar la disponibilidad de la red en la página de Sigfox company<sup>2</sup>, la cual entrega un mapa con zonas de cobertura y verifica según la ubicación del usuario si su zona cuenta con cobertura. En nuestro país, y acorde a los datos de esta última página, se cuenta con cobertura en las cercanías de los radios urbanos de las ciudades de Arica, Antofagasta, Valparaíso, Santiago (figura 7.2), Rancagua, San Fernando, Temuco, Valdivia, Osorno y Puerto Montt.

Y si bien actualmente no hay cobertura en todo el territorio nacional, parte de los objetivos de la red Sigfox es convertirse en una red de cobertura mundial, en esta línea, los proyectos y dispositivos que utilicen LPWAN pueden convertirse en precursores de esta red en otras partes del país.

---

<sup>1</sup><https://www.espressif.com/>

<sup>2</sup><https://www.sigfox.com/en/coverage>



Figura 7.2: Cobertura Sigfox en Santiago de Chile. Tomada de [9]

En el caso de LoRaWAN, existen opciones públicas para acceder a la red de *The Things Network* y que se puede observar en sus comunidades, sin embargo, esto no garantiza que se pueda acceder a ella ya que dependerá del posicionamiento espacial del *Gateway*.

En este sentido, la ventaja de LoRaWAN está en que su infraestructura puede levantarse en cualquier espacio donde el desarrollador le convenga, generando así su propia cobertura y su propia red de acceso. Para ello, se debe contar con un *gateway* y colocarlo en un espacio que entregue cobertura a la zona que se vaya a cubrir. Para contar con coberturas mayores, se recomienda dejar estos dispositivos al exterior y con la mayor altitud posible, de manera de aumentar la línea de vista entre estos y sus nodos, esto porque la distancia de alcance va a depender de los obstáculos existentes, las antenas que se utilicen y la configuración de *Spread Factors* que se vayan a implementar en los dispositivos terminales, pudiendo así llegar a los estándares kilométricos que permite LoRa y revisados en el Capítulo 2 de este proyecto.

## 2. Cantidad de mensajes y tamaño

Como ya se ha revisado anteriormente, el tamaño de los mensajes en la red Sigfox se encuentra limitado a 12 bytes en *uplink* y 8 bytes en *downlink*, y si bien LoRaWAN permite hasta 242 bytes de transmisión, este va a depender del *Spread Factor* y Ancho de Banda utilizado, a mayor *Spread Factor* es menor el tamaño de bytes a transmitir como se observa en la tabla 7.4.

De esta forma, si los mensajes a transmitir no pueden ser optimizados y ocupar un tamaño acorde a estas tecnologías, se deberá pensar en las tecnologías vistas en la sección anterior.

Por otro lado, existe en el caso de Sigfox una limitación de 140 mensajes diarios para asegurar el comportamiento multinodal de su red. Este número permite durante 24 horas enviar un mensaje cada 10 minutos aproximadamente. En aplicaciones donde se requiere un mensaje por minuto, Sigfox puede funcionar hasta por dos horas y media, lo que puede ser suficiente en el caso del cuidado de la salud para la toma de datos durante un corto período de tiempo, como pueden ser rutinas de entrenamiento o exámenes que toman datos por un tiempo determinado. Por otra parte, los mensajes de *downlink* en Sigfox se encuentran

Data Rate	Tamaño máximo del payload [Bytes]
0,1,2	51
3	115
4,5,6	242
7	No definido
8	53
9	129
10,11,12,13	242
14,15	No definido

Tabla 7.4: Máximo payload según Data Rate para la región AU915 en LoRaWAN. Tomada de [51]

limitados a 4 mensajes diarios, lo que si bien puede parecer poco no es necesario un mayor número en aplicaciones que requieren de uno o dos mensajes de *downlink* diarios dadas sus características. Si la aplicación requiere una mayor cantidad de mensajes, ya sea en *uplink* como en *downlink*, se debe optar por LoRaWAN que no tiene un límite de mensajes diarios, sin embargo, se debe tener en cuenta que si se suman dispositivos en un mismo espacio ocupando el mismo *gateway* y enviando muchos mensajes se van a comenzar a producir colisiones de la información lo que va a llevar a una reducción en la fiabilidad de la transmisión.

### 3. Fiabilidad

La fiabilidad de las tecnologías indican la robustez que tiene cada una de estas al enviar mensajes a sus respectivas *network server*. Conforme a las pruebas realizadas en el capítulo anterior, la fiabilidad es mayor en una que en otra red, sin embargo, al igual como se explicó anteriormente este va a depender de la infraestructura instalada. Si se cuenta con buena cobertura de Sigfox, la fiabilidad encontrada será como las vistas en las pruebas anteriores, y lo mismo sucede si se logra establecer una buena cobertura LoRaWAN en el espacio en que se encuentren sus dispositivos y utilizando un adecuado Spread Factor que puede ser otorgado por el mismo servidor.

Ahora bien, si ambas pueden lograr buenas fiabilidades, es necesario establecer si la aplicación que se está levantando requiere de fiabilidades cercanas al 100 %. Esto va a depender en gran medida del tipo de aplicación a utilizar, y lo crítica que es la información a levantar. En términos de prioridad, usualmente las altas fiabilidades son para dispositivos que trabajan en el Cuidado de la Salud y para aquellos que requieren de alta actualización para la toma de decisiones. La tabla 7.5 muestra las fiabilidades que se deben tener en cuenta por tipo de proyecto, en los casos más críticos se recomienda el uso de Sigfox dado los buenos resultados obtenidos en las condiciones aquí trabajadas. En general, se buscan fiabilidades por sobre el 90 % ya que menores a esta implicarían grandes ventanas de información perdidas.

Por último, y a pesar de los buenos rendimientos que puedan tener ambas redes en este punto, hay opciones de confirmación de mensajes tanto en *uplink* como en *downlink*, es por ello, que si se requiere alta fiabilidad de los dispositivos, se pueden utilizar estas opciones que tomará mayores recursos (sobretudo energéticos con mayor cantidad de mensajes enviados) pero asegurará exitosos trasposos de información.

Fiabilidad	Proyectos IoT
Crítica (99-100 %)	- Sensado de signos vitales - Alertas por datos que pasan límites - Monitoreo en hospitales
Aceptable (>90 %)	- Monitoreo de condiciones ambientales - Monitoreo de algunos activos físicos

Tabla 7.5: Proyectos que requieren altas fiabilidades

#### 4. Duración de la Batería

Es necesario preguntarse si el dispositivo que vamos a utilizar requerirá de una batería, y si efectivamente es así, cada cuanto tiempo se espera su recarga y mantención. Si se está en el orden de varios días, meses u años, las redes LPWAN son las candidatas ideales, sin embargo, su duración va a depender en gran medida de la programación que se realice de esta.

Conforme a los datos obtenidos en el capítulo anterior, ambas redes tienen un consumo de corriente eléctrica similar en donde Sigfox es levemente menor, sin embargo, no es la tecnología necesariamente la que asegure menor consumo, sino los tiempos de envío y de reposo que tenga el dispositivo. Para que los dispositivos utilicen sus baterías por extensos períodos de tiempo, se deben tener largos períodos de reposo con el menor consumo posible y tiempos de envío cuando sean estrictamente necesarios.

Conforme a los resultados vistos anteriormente, en mayores períodos de tiempo, la red Sigfox tiene mejor eficiencia energética que en el caso de LoRaWAN. Sin embargo, van a ser los siguientes puntos los que generen mejores rendimientos del consumo eléctrico cualquiera sea la LPWAN utilizada:

- Maximizar el tiempo de reposo, buscando el mínimo consumo en estos puntos (en el orden de los microampéres)
- Envío de datos el tiempo que sea estrictamente necesario.
- Utilizar sensores de baja potencia
- Mensajes de bajo *payload* y con el *Spread Factor* más bajo posible en el caso de LoRaWAN.

En cuanto a la frecuencia de envío de mensajes, los resultados indican que el consumo energético varía muy poco entre las pruebas realizadas, a excepción cuando se envían mensajes cada 30 minutos de 10 bytes, en ese caso en particular, la red Sigfox podía llegar a durar casi el doble que en el caso de LoRaWAN. Sin embargo, se debe poner énfasis en el diseño del envío de los mensajes para obtener buenos resultados energéticos.

# Capítulo 8

## Conclusiones y Trabajo Futuro

En este trabajo se ha recopilado información respecto al funcionamiento de las redes LPWAN en distintos rubros de aplicación. Con ello, se han realizado pruebas experimentales del funcionamiento de las redes LoRaWAN y Sigfox en cuatro situaciones que simulan las características de conexión de aplicaciones de Internet de las Cosas según sus rubros, completando así un total de 12 pruebas realizadas. Finalmente, se ha propuesto una metodología que guía la elección de tecnologías de comunicación en el desarrollo de aplicaciones de Internet de las Cosas, la que entrega recomendaciones según la información recopilada y los datos de fiabilidad y baterías obtenidos en los resultados de este trabajo.

Las redes LPWAN en general han demostrado ser redes que se adecuan de mejor manera a las necesidades de las aplicaciones de Internet de las Cosas, siendo consideradas fundamentales en el desarrollo de esta técnica hoy en día. LoRaWAN y Sigfox tienen características de área ampliada con alcances kilométricos, dispositivos de baja potencia y gran escalabilidad. Y así también, las aplicaciones revisadas aquí, muestran que los dispositivos de Internet de las Cosas requieren en su mayoría las características que estas LPWAN ofrecen.

Las pruebas realizadas en este trabajo arrojaron mejores rendimientos para el caso de Sigfox, siendo levemente más eficiente energéticamente en el envío de mensajes (que permite mayor duración de baterías en el largo plazo) que en el caso de la red LoRaWAN, y teniendo en general mayor fiabilidad para este caso experimental. Sin embargo, hay que destacar que ambas redes funcionan a través de modelos de negocio radicalmente distintos, mientras Sigfox cuenta con un número de estaciones base que provee de buena cobertura la zona oriente de Santiago de Chile donde se realizaron las pruebas, la red LoRaWAN se habilitó con un *nanogateway* que permitía la comunicación en solo una frecuencia y un Spread Factor a la vez, elemento importante en la comunicación utilizada por LoRaWAN.

El levantamiento de una guía de recomendaciones tecnológicas dio indicaciones para el uso de una tecnología de comunicación inalámbrica conforme a la aplicación IoT que se quiera levantar. Teniendo en cuenta los requerimientos de la aplicación, se propone el uso de tecnologías de alto *throughput* para aplicaciones cuyos requerimientos no pueden ser soportados por una LPWAN. En esta guía se contempla que la principal diferencia entre las redes LoRaWAN y Sigfox recae en su cobertura, mientras que Sigfox dispone de infraestructura limitada

a ciertas zonas geográficas del país, LoRaWAN puede levantar su infraestructura tecnológica en cualquier lugar donde pueda colocar un *gateway* (debe contar con energía eléctrica y conexión a Internet) y así generar cobertura.

Finalmente, cabe mencionar que las redes LPWAN que se mencionan en este trabajo se destacan en la industria por ser de baja potencia y de alcances kilométricos, sin embargo, estas se dan en condiciones especiales que no siempre son mencionadas. Los alcances kilométricos de 5 o 10 kilométricos se dan especialmente si las estaciones bases y los *gateways* se encuentran a buena altura generando las mejores condiciones de línea de vista, y en el caso de la baja potencia, efectivamente son redes que consumen poco pero no por ello alcanzará duraciones de largos meses o años, dependerá de la frecuencia en el envío de mensajes, los tiempos de reposo del dispositivo y el consumo de los sensores que se utilicen.

Independiente de las limitaciones que se generaron por la contingencia de una pandemia durante este año se logra generar la oportunidad para demostrar que se pueden levantar dispositivos IoT con estas tarjetas de desarrollo sin necesidad de contar con ambientes de laboratorio. A continuación se plantea como trabajo futuro realizar pruebas de cobertura y de movilidad de los dispositivos para ambas redes agregándolas a la guía aquí expuesta, proponer métodos de ahorro de energía para estas redes LPWAN, generar paradigmas de aplicaciones IoT que utilicen LPWAN en la industria y un análisis económico del uso de LoRaWAN y Sigfox para diversas líneas de aplicación.

# Bibliografía

- [1] V. Perasso, “Qué es la cuarta revolución industrial (y por qué debería preocuparnos),” octubre 2016, disponible en: [bbc.com/mundo/noticias-37631834](http://bbc.com/mundo/noticias-37631834).
- [2] I. Jang, D. Lee, J. Choi, and Y. Son, “Knowledge of things: A novel approach to share self-taught knowledge between iot devices,” in *2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, 2018, pp. 1–2.
- [3] U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, “Low power wide area networks: An overview,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 855–873, 2017.
- [4] IDC, “New idc forecast expects the internet of things spending in asia/-pacific\* to reach usd 398.6 billion by 2023,” julio 2019, disponible en: <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prAP45362119>.
- [5] M. Jarrah and F. Al-Shrida, “A multi-objective evolutionary solution to improve the quality of life in smart cities,” in *2017 14th International Conference on Smart Cities: Improving Quality of Life Using ICT IoT (HONET-ICT)*, 2017, pp. 36–39.
- [6] Internet of Business, “5 reasons why manufacturers are embracing iot,” available: <https://internetofbusiness.com/5-reasons-manufacturers-are-embracing-the-iot/>.
- [7] [Online]. Available: <https://lora-alliance.org/>
- [8] N. Dahad, “A billion devices connected to sigfox ‘attainable’ by 2023,” noviembre 2019, disponible en: <https://www.eetasia.com/A-Billion-Devices-Connected-to-Sigfox-Attainable-by-2023/>.
- [9] [Online]. Available: <https://www.sigfox.com/en/coverage>
- [10] IoT Eclipse, “Iot developer survey results,” abril 2017, disponible en: <https://iot.eclipse.org/community/resources/iot-surveys/assets/iot-developer-survey-2017.pdf>.
- [11] H. Haxhibeqiri, E. De Poorter, I. Moerman, and J. Hoebeke, “A survey of lorawan for iot: From technology to application,” *SENSORS*, 2018.
- [12] 3GPP, “Summary of rel-15 work items (release 15),” septiembre 2019.

- [13] G. Naik, B. Choudhury, and J. Park, “Ieee 802.11bd 5g nr v2x: Evolution of radio access technologies for v2x communications,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 70 169–70 184, 2019.
- [14] M. Bembe, A. Abu-Mahfouz, M. Masonta, and T. Ngqondi, “A survey on low-power wide area networks for iot applications,” *Telecommunications Systems*, vol. 71, no. 2, pp. 249–274, 2019.
- [15] F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, J. Melia-Segui, and T. Watteyne, “Understanding the limits of lorawan,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 9, pp. 34–40, 2017.
- [16] A. Berni and W. Gregg, “On the utility of chrip modulation for digital signaling,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 21, no. 6, pp. 748–751, 1973.
- [17] M. Turmudzi, A. Rakhmatsyah, and A. A. Wardana, “Analysis of spreading factor variations on lora in rural areas,” in *2019 International Conference on ICT for Smart Society (ICISS)*, vol. 7, 2019, pp. 1–4.
- [18] [Online]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/frequencies-by-country.html>
- [19] L. Oliveira, S. Kozlov, and R. Rabêlo, “Mac layer protocols for internet of things: A survey,” *Future Internet*, vol. 11, no. 1, 2019.
- [20] Mintek, “Desarrollo red iot sigfox en chile,” disponible en: <https://wisely.cl/wp-content/uploads/2020/06/Presentación-Mintek-Meetup.pdf>.
- [21] E. Morin, M. Maman, R. Guizzetti, and A. Duda, “Comparison of the device lifetime in wireless networks for the internet of things,” *IEEE Access*, vol. 5, pp. 7097–7114, 2017.
- [22] Instituto Nacional de Estadísticas, “Estimaciones y proyecciones de la población de chile 2002-2035 totales regionales, población urbana y rural,” disponible en: <https://www.ine.cl/estadisticas/sociales/demografia-y-vitales/proyecciones-de-poblacion>.
- [23] M. Mardini, I. Youssef, and N. Agoulmine, “A survey of healthcare monitoring systems for chronically ill patients and elderly,” *Journal of Medical Systems*, vol. 43, no. 3, pp. 1–21, 2019.
- [24] P. A. Catherwood, M. Little, D. Finlay, and J. McLaughlin OBE, “Recovery of incapacitated commercial delivery drones using lpwan technology,” *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, vol. 12, no. 2, pp. 6–19, 2020.
- [25] R. Ramesh, S. Acharya, V. Rajaraman, A. Babu, A. Joglekar, A. Sharma, B. Amrutur, and P. Namekar, “Interoperable middleware for smartcities streetlighting on lorawan as a case study,” in *2019 11th International Conference on Communication Systems Networks (COMSNETS)*, 2019, pp. 550–552.
- [26] R. F. A. M. Nor, F. H. K. Zaman, and S. Mubdi, “Smart traffic light for congestion

- monitoring using lorawan,” in *2017 IEEE 8th Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC)*, 2017, pp. 132–137.
- [27] D. F. Carvalho, A. Depari, P. Ferrari, A. Flammini, S. Rinaldi, and E. Sisinni, “On the feasibility of mobile sensing and tracking applications based on lpwan,” in *2018 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, 2018, pp. 1–6.
- [28] R. N. Murty, G. Mainland, I. Rose, A. R. Chowdhury, A. Gosain, J. Bers, and M. Welsh, “Citysense: An urban-scale wireless sensor network and testbed,” in *2008 IEEE Conference on Technologies for Homeland Security*, 2008, pp. 583–588.
- [29] Y. Duan, C. Zhao, and Z. Tian, “Application of the internet of things technology in agriculture,” *Applied Mechanics and Materials*, vol. 687-691, pp. 2395–2398, 2014.
- [30] Ji-chun Zhao, Jun-feng Zhang, Yu Feng, and Jian-xin Guo, “The study and application of the iot technology in agriculture,” in *2010 3rd International Conference on Computer Science and Information Technology*, vol. 2, 2010, pp. 462–465.
- [31] S. Adibi, “Bushfire disaster monitoring system using low power wide area networks (lpwan),” *Technologies*, vol. 5, no. 4, p. 65, 2017.
- [32] K. Burt, D. Webb, D. Dorson, and A. Williams, “Telemetry receiver and acoustic command system,” in *Ocean '74 - IEEE International Conference on Engineering in the Ocean Environment*, 1974, pp. 53–56.
- [33] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, and F. Meyer, “A comparative study of lpwan technologies for large-scale iot deployment,” *ICT Express*, vol. 5, no. 1, pp. 1–7, 2019.
- [34] A. Ikpehai, B. Adebisi, K. M. Rabie, K. Anoh, R. E. Ande, M. Hammoudeh, H. Gacanin, and U. M. Mbanaso, “Low-power wide area network technologies for internet-of-things: A comparative review,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 2, pp. 2225–2240, 2019.
- [35] D. Sjöström, “Unlicensed and licensed low-power wide area networks: Exploring the candidates for massive iot,” Master’s thesis, KTH Royal Institute of Technology, 2017.
- [36] M. Aernouts, R. Berkvens, K. Van Vlaenderen, and M. Weyn, “Sigfox and lorawan datasets for fingerprint localization in large urban and rural areas,” *Data*, vol. 3, no. 2, p. 13, 2018.
- [37] Pycom, disponible en: <https://docs.pycom.io/>.
- [38] J. P. Queralta, T. N. Gia, H. Tenhunen, and T. Westerlund, “Edge-ai in lora-based health monitoring: Fall detection system with fog computing and lstm recurrent neural networks,” in *2019 42nd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, 2019, pp. 601–604.
- [39] H. Magsi, A. H. Sodhro, F. A. Chachar, S. A. K. Abro, G. H. Sodhro, and S. Pirbhulal, “Evolution of 5g in internet of medical things,” in *2018 International Conference on*

*Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET)*, 2018, pp. 1–7.

- [40] C. Cúneo, “Cambios y tendencias en la canasta de consumo del chileno,” disponible en: [mba.americaeconomia.com/biblioteca/presentaciones/cambios-y-tendencias-en-la-canasta-de-consumo-del-chileno](http://mba.americaeconomia.com/biblioteca/presentaciones/cambios-y-tendencias-en-la-canasta-de-consumo-del-chileno).
- [41] S. Rizvi, A. Aziz, M. T. Jilani, N. Armi, G. Muhammad, and S. H. Butt, “An investigation of energy efficiency in 5g wireless networks,” in *2017 International Conference on Circuits, System and Simulation (ICCSS)*, 2017, pp. 142–145.
- [42] A. Mdhaftar, T. Chaari, K. Larbi, M. Jmaiel, and B. Freisleben, “Iot-based health monitoring via lorawan,” in *IEEE EUROCON 2017 -17th International Conference on Smart Technologies*, 2017, pp. 519–524.
- [43] D. Wu, C. Sun, K. Chun, Y. Lin, and Y. Lin, “System integration of lomb hrv analysis using ppg sensor based on lorawan iot,” in *2017 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, 2017, pp. 493–498.
- [44] G. B. Tayeh, J. Azar, A. Makhoul, C. Guyeux, and J. Demerjian, “A wearable lora-based emergency system for remote safety monitoring,” in *2020 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*, 2020, pp. 120–125.
- [45] F. Pitu and N. C. Gaitan, “Surveillance of sigfox technology integrated with environmental monitoring,” in *2020 International Conference on Development and Application Systems (DAS)*, 2020, pp. 69–72.
- [46] A. Bhawiyuga and W. Yahya, “Ma lpwan based wireless sensor node for aquaculture water quality monitoring system,” in *2018 International Conference on Sustainable Information Engineering and Technology (SIET)*, 2018, pp. 252–256.
- [47] A. Llaría, G. Terrasson, H. Arregui, and A. Hacala, “Geolocation and monitoring platform for extensive farming in mountain pastures,” in *2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2015, pp. 2420–2425.
- [48] S. Duangsuwan, A. Takarn, R. Nujankaew, and P. Jamjareegulgarn, “A study of air pollution smart sensors lpwan via nb-iot for thailand smart cities 4.0,” in *2018 10th International Conference on Knowledge and Smart Technology (KST)*, 2018, pp. 206–209.
- [49] M. O. Farooq and D. Pesch, “Analyzing lora: A use case perspective,” in *2018 IEEE 4th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, 2018, pp. 355–360.
- [50] IETF, “Ipv6 over low power wide area networks (lpwan).” [Online]. Available: <https://datatracker.ietf.org/wg/lpwan/about/>
- [51] LoRa Alliance, “Lorawan 1.1 regional parameters,” 2018 January.

# Anexos

Los códigos utilizados en este documento se encuentran alojados en el siguiente repositorio de Github:

- <https://github.com/EduCarrasco/Codigos-utilizados-en-Trabajo-de-Titulo>