

## Trabajo Fin de Máster

Estudio de las redes LPWAN para IoT.  
Implementación de la tecnología Sigfox para  
aplicación de sensores medioambientales.

Study of LPWAN networks for IoT.  
Implementation of Sigfox technology for  
environmental sensor application.

Autor/es

Teresa Díez Bartolomé

Director/es

Carlos David Heras Vila

Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

2022



## Resumen

Internet de las cosas (IoT) está teniendo cada vez más presencia en nuestra sociedad y la industria apuesta por su desarrollo y evolución. IoT representa una nueva forma de comunicación entre máquinas sin requerir de interacciones humanas. El objetivo es conseguir que diferentes dispositivos y sensores sean capaces de transmitir datos a la red acerca del mundo físico y estos puedan ser analizados e interpretados, obteniendo así información útil que ayude a tomar decisiones, monitorizar o almacenar datos.

En la mayoría de los casos, estos dispositivos o sensores no se encuentran conectados a la red eléctrica y requieren de fuentes autónomas de energía para abastecerse. Esta circunstancia es relevante a la hora de poder desplegar redes que den cabida a estos dispositivos. Por ello, nuevas tecnologías han sido desarrolladas recientemente con el objetivo de permitir el correcto desarrollo y despliegue de estos dispositivos. Así surgieron las denominadas Low Power Wide Area Network. Estas tecnologías están diseñadas para poder ofrecer comunicaciones de largo alcance empleando una baja utilización de recursos energéticos. Dentro de estas tecnologías, dos ejemplos relevantes son SigFox y LoRaWAN.

El objetivo de este Trabajo Fin de Máster es el estudio de las principales tecnologías LPWAN para IoT. Dentro de las LPWAN nos vamos a centrar en el análisis de Sigfox y LoRaWAN con el fin de conocer sus principales características, limitaciones y estándares que permitan al grupo de tecnologías fotónicas de la Universidad de Zaragoza (GTF) conocer la información necesaria para disponer de estas tecnologías en los diferentes proyectos y casuísticas.

Una vez realizado el estudio, se llevará a cabo el montaje, configuración y puesta en marcha de un piloto de la tecnología Sigfox. De esta manera, se cubrirá una de las necesidades actuales en uno de los proyectos de GTF mientras se comprueba la validez del análisis previo realizado en un entorno real.



## Índice de contenidos

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1. <b>CONTEXTO DEL PROYECTO .....</b>	<b>1</b>
1.2. <b>OBJETIVO DEL PROYECTO .....</b>	<b>3</b>
1.3. <b>MÉTODO DE TRABAJO .....</b>	<b>4</b>
<b>2. TECNOLOGÍAS INALÁMBRICAS .....</b>	<b>5</b>
<b>3. TECNOLOGÍAS LPWAN .....</b>	<b>8</b>
3.1. <b>SIGFOX .....</b>	<b>8</b>
3.1.1. <i>Cobertura .....</i>	<i>9</i>
3.1.2. <i>Modulación y alcance.....</i>	<i>10</i>
3.1.3. <i>Sigfox Radio Configuration.....</i>	<i>11</i>
3.1.4. <i>Duty Cycle.....</i>	<i>12</i>
3.1.5. <i>Comunicación de datos .....</i>	<i>12</i>
3.1.6. <i>Consumo.....</i>	<i>14</i>
3.2. <b>LORAWAN .....</b>	<b>17</b>
3.2.1. <i>Cobertura. The Things Network .....</i>	<i>18</i>
3.2.2. <i>Modulación y alcance. LoRa.....</i>	<i>20</i>
3.2.3. <i>Clases de nodos .....</i>	<i>21</i>
3.2.4. <i>Duty Cycle.....</i>	<i>22</i>
3.2.5. <i>Comunicación de datos .....</i>	<i>23</i>
3.2.6. <i>Consumo.....</i>	<i>23</i>
3.2.7. <i>Frecuencias.....</i>	<i>24</i>
<b>4. ANÁLISIS Y COMPARATIVAS TECNOLOGÍAS LPWAN .....</b>	<b>25</b>
<b>5. TECNOLOGÍA LPWAN SELECCIONADA PARA EL PROYECTO: SIGFOX .....</b>	<b>27</b>
5.1. <b>IMPLEMENTACIÓN.....</b>	<b>28</b>
5.1.1. <i>Hardware Sigfox.....</i>	<i>29</i>
5.1.2. <i>Software Sigfox .....</i>	<i>31</i>
<b>6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS .....</b>	<b>39</b>
<b>7. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>40</b>
<b>ANEXO I. CÓDIGO FUENTE UTILIZADO. ....</b>	<b>44</b>

## Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Comparativa de tecnologías inalámbricas estandarizadas según Tasa de transmisión y Alcance. ....	7
Ilustración 2. Arquitectura de red Sigfox. ....	8
Ilustración 3. Mapa mundial de cobertura de la red Sigfox. ....	10
Ilustración 4. Espectro transmisión señal UNB Sigfox. ....	11
Ilustración 5. Ejemplo transmisión mensaje uplink Sigfox con diversidad en tiempo y frecuencia. ....	13
Ilustración 6. Trama física de datos para transmisión uplink en Sigfox. ....	13
Ilustración 7. Trama física de datos para transmisión downlink en Sigfox. ....	14
Ilustración 8. Gráfico consumo medio de energía y tiempo de vida en Sigfox según intervalos de tiempo entre mensajes enviados. ....	16
Ilustración 9. Arquitectura de red LoRaWAN. ....	17
Ilustración 10. Mapa de cobertura LoRaWAN. ....	19
Ilustración 11. Trama física de datos para transmisión uplink en LoRaWAN. ....	23
Ilustración 12. Espectro transmisiones Sigfox y LoRaWAN. ....	26
Ilustración 13. Planta solar PS10/PS20 y cobertura Sigfox en la ubicación de la misma ..... 28	28
Ilustración 14. Esquema de la solución desarrollada en Sigfox. ....	28
Ilustración 15. Placa arduino MKRFOX1200 y antena. ....	29
Ilustración 16. Pineado en la placa Arduino MKRFOX1200. ....	31
Ilustración 17. Captura de portal Backend de Sigfox. ....	32
Ilustración 18. Mapa de cobertura aproximada extraído del Backend de Sigfox. ....	33
Ilustración 19. Ejemplo de mensajes enviados correctamente a través de Sigfox visualizado desde Backend. ....	34
Ilustración 20. Backend para la configuración del Custom Payload de Sigfox. ....	35
Ilustración 21. Ejemplo de detalle de Callback en Backend de Sigfox. ....	35
Ilustración 22. Fotografía de la solución desarrollada en Sigfox para este proyecto colocada en la ubicación final para realizar las pruebas correspondientes. ....	36
Ilustración 23. Valores de RSSI de la señal extraídos del Backend de Sigfox. ....	37
Ilustración 24. Ejemplo de visualización de los datos de uno de los sensores de ThingSpeak. ...	37
Ilustración 25. Valores de temperatura obtenidos a través de los dos sensores durante el tiempo de vida de la solución desarrollada en Sigfox. ....	38
Ilustración 26. Comparativa de los valores de temperatura y humedad obtenidos por ambos sensores en 24 horas. ....	38

## Índice de Tablas

Tabla 1. Parámetros característicos ZigBee, Bluetooth, Z-Wave, WiFi, XBee .....	5
Tabla 2. Parámetros correspondientes con las diferentes Configuraciones Radio existentes en Sigfox. ....	11
Tabla 3. Configuraciones Radio Sigfox en los diferentes países.....	12
Tabla 4. Datos de consumo de energía de los diferentes componentes de Sigfox según estado de la placa Arduino.....	15
Tabla 5. Datos de consumo total de energía según estado en Sigfox.....	15
Tabla 6. Parámetros según Spreading Factor utilizado en LoRaWAN.....	20
Tabla 7. LoRaWAN. Sub-bandas europeas y Duty Cycle máximo correspondiente.....	22
Tabla 8. Datos de consumo de energía según datasheet de los diferentes componentes de LoRaWAN según estado. ....	23
Tabla 9. Comparativa parámetros característicos Sigfox y LoRaWAN. ....	25
Tabla 10. Parámetros característicos placa Arduino MKRFOX1200.....	30
Tabla 11. Antena utilizada para placa MKRFOX1200. ....	30
Tabla 12. Funciones de la librería Arduino Sigfox utilizadas para este proyecto.....	32
Tabla 13. Resultados obtenidos en el proyecto tras la puesta en marcha de la solución desarrollada en Sigfox. ....	36

## 1. Introducción

### 1.1. Contexto del proyecto

Los tipos de redes inalámbricas más comunes hoy en día son Bluetooth, usado normalmente en redes de área personal, Wi-Fi, para redes de área local, y redes celulares como 2G, 3G, 4G-LTE para redes de área amplia.

En la actualidad, se están desarrollando nuevos tipos de redes como son las redes de baja potencia y de área amplia Low-Power Wide-Area Network (LPWAN), las cuáles se proyectan como una alternativa sólida para soportar una parte importante de los miles de millones de dispositivos previstos para el Internet de las Cosas (IoT, Internet of Things).

El crecimiento de las redes y la continua implantación de sensores y dispositivos digitales requiere: minimizar el coste por unidad, optimizar el consumo de energía de los dispositivos, aumentar la escalabilidad de las redes y mayor cobertura de red. La necesidad de una mayor cobertura fue solucionada con las redes celulares, conexión por satélite (comunicaciones de larga distancia) etc. Sin embargo, el incremento de los costes y su consumo de potencia las hacen incompatibles para las redes de larga distancia y un número alto de dispositivos.

El concepto de Internet de las Cosas hace referencia a una red en la que una serie de objetos inteligentes interconectados generan continuamente datos y los transmiten a través de Internet. Sin embargo, debido a la heterogeneidad de los sistemas, una única tecnología no puede servir a todas las aplicaciones y volúmenes de dispositivos proyectados para IoT.

El grupo de tecnologías Fotónicas (GTF) desarrolla desde hace unos años diferentes sensores y medidores de parámetros medioambientales mediante sistemas ópticos y sistemas radar para ubicaciones en campo. En general, la localización en que se encuentran estos sistemas dispone de toma de corriente y conectividad LAN, de forma que el volcado de datos a centros de control se ha realizado hasta el momento por conexión directa a red de datos fija. Sin embargo, en los proyectos en los que el GTF actualmente está involucrado, los sensores a desarrollar tendrán ubicaciones remotas sin acceso a red LAN ni a puntos de alimentación.

Por ejemplo, en el ámbito de las centrales termo solares de generación de energías se están desarrollando sistemas ópticos para medida de atenuación atmosférica en las plantas de concentración de torre, o de fugas de aceites en las plantas de concentración por cilindro parabólicos. En el primer caso, dos equipos de medida se colocan en ubicaciones donde no está claro que se disponga de conectividad a red de datos. En el segundo caso, multitud de sensores de fuga se colocan a lo largo de los 50 km del lazo del tubo de colector, sin disponer de conexión a red de datos o red de alimentación. En otro ámbito, para aplicaciones medioambientales de control de los niveles de manto nivoso y de corrientes de aguas y ríos en cuencas hidrográficas, se están desarrollando sistemas basados en múltiples sensores radar que se geolocalizarán a lo largo de las extensiones de montañas y valles de las cuencas hidrográficas, en puntos sin acceso a red de datos fija. De acuerdo con este contexto, se plantea la necesidad de incorporar una tecnología de datos WAN que dé solución al volcado de datos desde múltiples sensores remotos, con condicionantes de poco consumo energético, y requerimiento de un nivel de datos bajo (unos pocos datos cada varios minutos).

Si bien el grupo GTF tiene amplia experiencia en redes de sensores conectadas por red LAN, 4G, 5G, así como por ZigBee, XBee y Bluetooth, no tiene un conocimiento o experiencia previa en estas tecnologías de conectividad WAN para IoT. Por ello, es necesario un primer estudio

para conocer las tecnologías disponibles, analizar sus capacidades y prestaciones, y poder decidir la más conveniente en cada caso. Debido a esto, se plantea un marco de trabajo global en GTF, realizando un estudio de las tecnologías LPWAN transversal a todos los proyectos del grupo.

## 1.2. Objetivo del proyecto

El IoT involucra aplicaciones desde electrónica personal hasta máquinas industriales y sensores que se conectan a Internet de forma inalámbrica. Al abarcar tantos casos de uso, en diversos entornos e industrias, no hay una solución que sobresalga como única.

Esta situación suele resultar compleja, ya que existen varios estándares, asociados a diferentes mercados y utilizando diferentes protocolos de comunicación, por lo que puede ser complicado elegir la tecnología adecuada para una aplicación IoT.

Tal y como se ha mencionado previamente, partimos de la premisa de una necesidad global que a su vez necesita tener en cuenta las características y necesidades futuras de cada uno de los diferentes proyectos. Por ello, el primer objetivo del presente proyecto es conocer las tecnologías LPWAN en cuanto a características de consumo energético, capacidades de transmisión, sencillez de manejo y disponibilidad en el mercado. De esta forma, GTF podrá disponer de la información y de las herramientas necesarias para seleccionar la tecnología apropiada a cada proyecto que implique despliegue de dispositivos en campo.

Para ello, se lleva a cabo un proceso exhaustivo de consultoría y análisis de los estándares y tecnologías actuales que permita valorar las diferentes opciones y poder plantear un piloto con aquella más adecuada a las necesidades planteadas por GTF. Concretamente, se evaluarán las principales características de dos de estas tecnologías disponibles actualmente en el mercado: LoRaWAN y Sigfox.

Una vez realizado un estudio completo, como segundo objetivo del proyecto, se considera dar solución a la problemática concreta del proyecto “Técnicas radar avanzadas para la medida en tiempo real y sin contacto de caudales de agua en canales abiertos y ríos (FlumenTech)”. Este proyecto está basado en múltiples sensores radar para medida del parámetro de velocidad del agua a diferentes profundidades en ríos. Los sensores estarían colocados en puntos remotos sin acceso a red de datos fija, con exigencias de bajo consumo. Se deberá reportar un dato (velocidad) espaciado un intervalo de tiempo de entre 10 minutos y una hora. Dadas las características señaladas, se seleccionará Sigfox, con un intercambio de datos bajo y bajo consumo de energía, y se implementará un sistema Sigfox piloto. Mediante la ejecución y puesta en marcha de este piloto, se podrá comprobar la validez de todo lo establecido anteriormente, detectando posibles imprevistos o corroborando lo afirmado en el diseño de acuerdo con las necesidades y objetivos del proyecto. Las pruebas para evaluar las capacidades y funcionamiento de la solución se realizarán en un entorno remoto disponible ubicado en Sanlúcar la Mayor (Sevilla), con envío de las medidas a un centro de control (Zaragoza) de dos parámetros ejemplo que serán temperatura y humedad.

### 1.3. Método de trabajo

Para hacer posibles los objetivos de este trabajo, se plantea un método de trabajo analítico basado en un estudio previo y un desarrollo posterior de una solución para probar las capacidades y el funcionamiento. De esta forma, mediante la ejecución y puesta en marcha del desarrollo, se podrá comprobar la validez de todo lo establecido anteriormente.

En primer lugar, se contemplan los requisitos y aspectos a tener en cuenta para la realización de este trabajo. A partir de aquí, se sondan las distintas alternativas tecnológicas existentes, configurando de esta forma la solución final. Como ya se ha indicado, previamente se realiza un estudio detallado de estas tecnologías.

El documento presenta la siguiente organización. El primer apartado introduce el contexto y los objetivos del presente proyecto. En el segundo y tercer apartado se profundiza en las tecnologías inalámbricas con un mayor enfoque en las tecnologías LPWAN donde se detallarán Sigfox y LoRaWAN, así como sus principales características clave para poder comprender su funcionamiento. Se estudiará el consumo de corriente y tiempo de vida de los dispositivos. El cuarto apartado se dedica a mostrar los resultados del estudio, así como las comparativas. En el quinto apartado se describe la implementación llevada a cabo para el desarrollo de la solución en Sigfox.. Se detallará las herramientas utilizadas, las plataformas y la configuración de estas. Para terminar, el sexto punto añadirá las conclusiones más destacadas valorando el trabajo global en conjunto y las posibles líneas futuras.

## 2. Tecnologías inalámbricas

En este apartado se van a describir y estudiar las distintas tecnologías inalámbricas estandarizadas al tiempo que se analiza la viabilidad de su uso.

Las tecnologías de transmisión inalámbrica se fundamentan principalmente en tres ejes, consumo energético, alcance o distancia entre nodo y antena y, por último, capacidad de transmisión o data rate. No existe actualmente una tecnología que cubra correctamente los tres ejes, si no que se sacrifica uno para potenciar a los demás. Por ello, se lleva a cabo este estudio para profundizar en la viabilidad de uso.

### Redes de corto alcance y bajo consumo

Este tipo de redes está diseñado para transportar pequeños paquetes de datos a cortas distancias manteniendo un bajo consumo de energía. Dentro de este tipo de redes, se encuentran las siguientes tecnologías:

- ✓ Zig-Bee
- ✓ WiFi/802.11
- ✓ Z-Wave
- ✓ Bluetooth
- ✓ XBee

Las redes de baja potencia y corto alcance están indicadas para hogares, oficinas y otros entornos de reducido tamaño. Normalmente, necesitan baterías pequeñas y su uso suele resultar económico. En la siguiente tabla se muestran algunos de los principales parámetros que caracterizan estas tecnologías [1], [2], [3], [4]:

Tecnología	Alcance	Tasa de datos	Frecuencia
<b>ZigBee</b>	10 – 100 metros	250 kbps	2.4 GHz
<b>Bluetooth</b>	10 metros	2 Mbps	2.402 y los 2.480GHz
<b>Z-Wave</b>	30 metros	100 kbps	900 MHz
<b>WiFi</b>	50 metros	150 – 600 kbps	2.4 y 5 GHz
<b>XBee</b>	Hasta 1 km	250 kbps	900 MHz y 2.4 GHz

*Tabla 1. Parámetros característicos ZigBee, Bluetooth, Z-Wave, WiFi, XBee*

Tanto Zigbee como Bluetooth y XBee son tecnologías que ya ha implementado el grupo GTF en proyectos anteriores, por lo que no es objetivo de este proyecto profundizar. GTF cuenta con amplia experiencia en este ámbito.

## **Redes de área extensa**

Concretamente, en este apartado nos centraremos en las redes WWAN [5]. Dentro de las redes inalámbricas de área extensa (WWAN) se pueden distinguir entre:

- Celulares. 2G, 3G, 4G.
- Redes de área extensa y bajo consumo. LPWAN. Sigfox, LoRa, NB-IoT.

En el caso de las redes de 2G, 3G y 4G tanto el consumo de potencia como los costes son elevados. Por ejemplo, 4G tiene muy buen alcance y data rate, pero consume mucha energía su transmisión. En el caso de querer alargar la batería se pone el móvil en modo avión.

Como ya se ha comentado en apartados anteriores, este proyecto se ha enfocado en el análisis y estudio de las redes de área extensa de bajo consumo (LPWAN). El término Low Power Wide Area Network (LPWAN) se forma a partir de la unión de dos frases Low Power (consumo de baja energía) y Wide Area Network (largo de comunicación), que describen sus dos características intrínsecas: bajo consumo de energía (es decir, mayor duración de la batería) y mayor alcance de la transmisión [6].

Estas características de la LPWAN, que incluyen el bajo coste y la baja velocidad de datos, la convierten en una tecnología de comunicación única para las comunicaciones inalámbricas y una opción preferida para aplicaciones IoT y M2M. Las redes LPWAN engloban una serie de tecnologías que se utilizan para conectar dispositivos de baja potencia, como sensores y controladores. La tecnología LPWAN puede operar en el espectro con o sin licencia y comprender opciones propietarias, de alianza o de estándar abierto [7].

El coste es otro punto fuerte en estas redes, su coste económico es realmente bajo en comparación con otras tecnologías como 3G, 4G o 5G.

Con todo esto, las LPWAN se presentan como una excelente elección donde los dispositivos necesiten enviar pocos datos sobre un área amplia y la autonomía de estos deba de ser considerable en términos de años.

Por sus características, estas tecnologías están posibilitando el despliegue de las mayores iniciativas IoT actuales. Al ser diseñadas específicamente para este entorno, permiten instalar decenas o centenares de nodos distribuidos por una gran área, alimentados con baterías que duran años y sin necesidad de grandes infraestructuras o costosas tiradas de cable.

Dentro de este tipo de redes con estas características, se encuentran las tecnologías LoRaWAN, SigFox y NB-IoT.

Las principales características de las tecnologías LPWAN necesarias para soportar con éxito el despliegue comercial de sistemas IoT y M2M son:

- Largo alcance de la comunicación.
- Bajo consumo de energía.
- Baja tasa de datos.
- Bajo coste del dispositivo y del despliegue.
- Topología de red y despliegue simplificados.
- Escalabilidad de la red para la ampliación de la capacidad.

Como se muestra en la *Ilustración 1*, algunas tecnologías de comunicación inalámbrica proporcionan una mayor velocidad de datos y largo alcance con un mayor requerimiento de

energía (LTE, WiMax) [8]. Algunas tecnologías de comunicación proporcionan una velocidad de datos más baja, de corto alcance y baja potencia (Bluetooth/BLE). Otras tecnologías de comunicación proporcionan una velocidad de datos más alta, de corto alcance y con mayor necesidad de energía (WiFi). Sin embargo, la mayoría de las soluciones IoT y M2M requieren una red de sensores inalámbricos que proporcione una tasa de datos más baja, de largo alcance y con un requisito de energía más bajo (mayor duración de la batería). Esto no queda cubierto por las tecnologías de comunicación inalámbricas existentes, como se ha explicado anteriormente [7]. Las tecnologías LPWAN están diseñadas para cumplir estos requisitos y, por lo tanto, son muy adecuadas para las comunicaciones IoT y M2M que envían pequeñas cantidades de datos a gran distancia, manteniendo al mismo tiempo una larga duración de la batería. Además, muchas tecnologías LPWAN funcionan bien tanto en entornos obstruidos, como en las ciudades y en entornos exteriores difíciles.

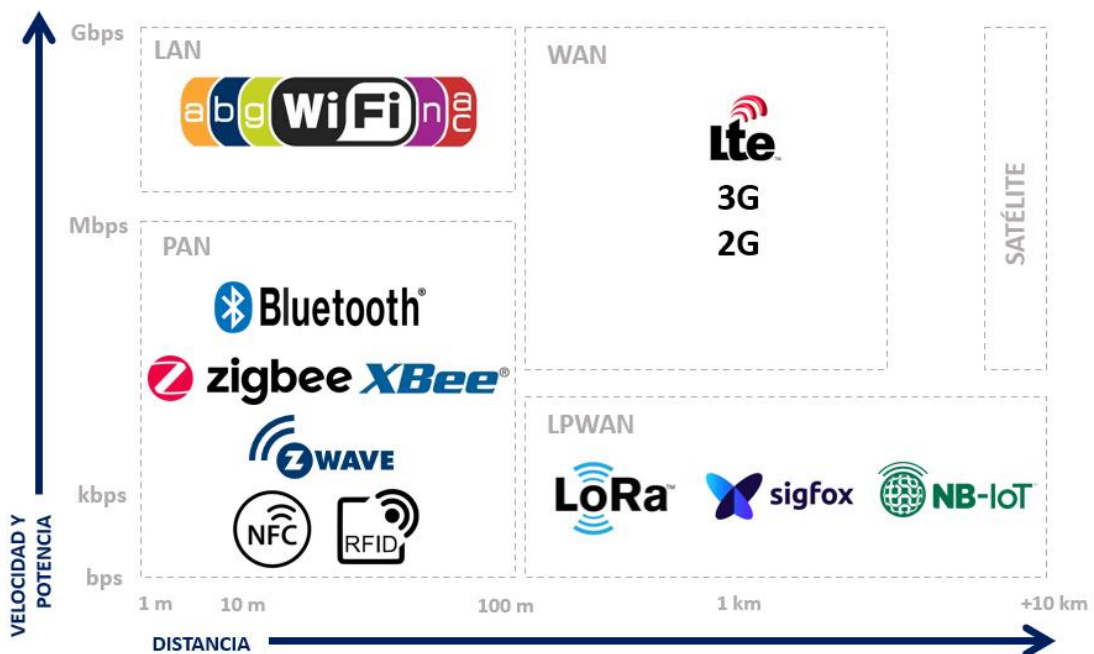


Ilustración 1. Comparativa de tecnologías inalámbricas estandarizadas según Tasa de transmisión y Alcance.

Debido a la naturaleza del proyecto y sus necesidades, el trabajo de análisis y consultoría se enfocará sobre las redes de tipo LPWAN (Low Power Wide Area Network).

### 3. Tecnologías LPWAN

Este capítulo introducirá las tecnologías Sigfox y LoRaWAN dentro del marco de las LPWAN. Se presentarán sus principales características con el fin de tener un conocimiento sobre su funcionamiento y llevar a cabo un análisis

#### 3.1. Sigfox

En este apartado se presentan las redes Sigfox que se encuentran dentro de las tecnologías LPWAN y son de las opciones elegidas a la hora de crear redes de sensores inalámbricos conectados a Internet.

Sigfox es una compañía francesa creada en 2009 que surge con el propósito de buscar la forma de conectar dispositivos de forma inalámbrica, sencilla, a bajo costo energético y de largo alcance [9]. Se trata de una de las redes con mayor despliegue en todo el mundo y opera sobre la banda de frecuencia pública. Concretamente, utiliza frecuencias inferiores a gigahercio, en las bandas ISM (Industrial, Scientific and Medical) [10].

Esta red cuenta con la particularidad de que es montada y desplegada por la propia empresa, por lo cual el usuario solo se encarga de adquirir los nodos finales. Si bien en cierto punto es una ventaja no tener que implementar y mantener la red uno mismo, se está supeditado a que el proveedor ofrezca cobertura en su país [11].

La topología de esta red se asemeja a la de una red celular donde hay una serie de antenas distribuidas en la ciudad e interconectadas entre sí y a internet. Estas se encargan de recibir y transmitir la información a los nodos finales (propiedad del usuario) y también a un servidor Sigfox en la nube [12].

En el diagrama de la *Ilustración 2* se presenta la forma básica de una red Sigfox. Los servidores back-end, como elementos centrales de la red, se encargan de la conectividad de datos entre las estaciones base e Internet, así como del control y la gestión de las estaciones base y dispositivos finales [13].

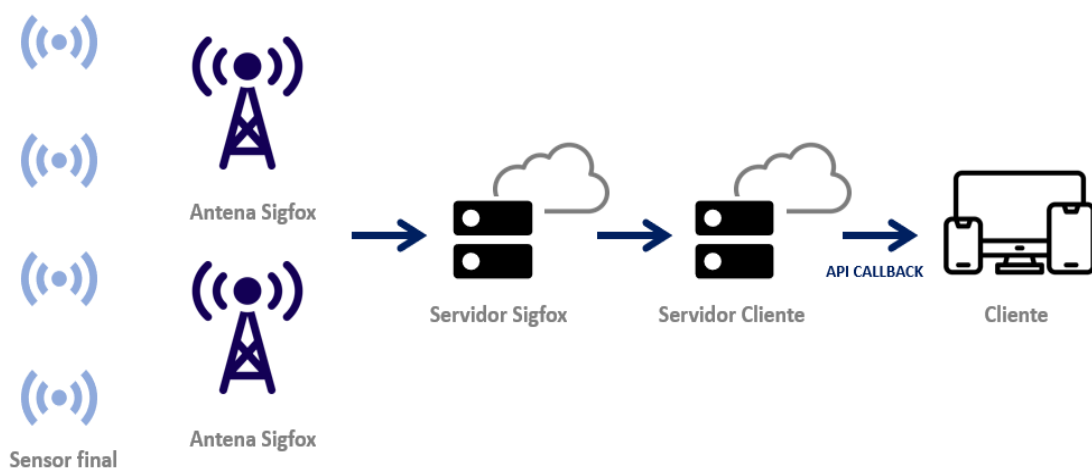


Ilustración 2. Arquitectura de red Sigfox.

Las características principales de Sigfox y que cumplen con lo esperado de una tecnología LPWAN son:

- Bajo consumo energético. Se elimina la necesidad de establecer y mantener la conexión permanente entre dispositivo y red.
- Larga autonomía debido al bajo consumo energético.
- Bajo coste. Numerosos proveedores sin costes de instalación ni despliegue.
- Largo alcance.
- Mensajes con bajo número de bytes.

Por lo tanto, teniendo en cuenta estas ventajas, Sigfox aplica en casos de uso en los que no se requiere una potencia elevada debido a que no existe un gran caudal de datos pero es necesario que la batería tenga la máxima autonomía posible.

La comunicación entre los dispositivos finales y las estaciones base puede darse de manera bidireccional, aunque habitualmente solo se realizan envíos uplink. La comunicación downlink, solo puede ocurrir después de una comunicación uplink [14].

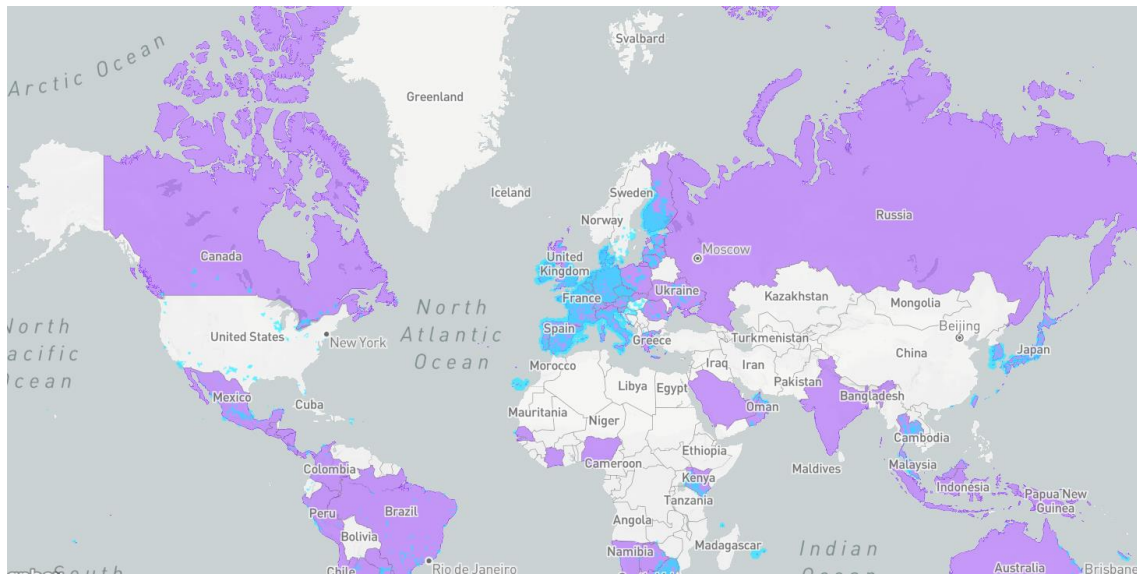
Sigfox funciona bajo el modelo one-contract one-network, permitiendo a un dispositivo poder conectarse en cualquier país, prescindiendo de la idea de roaming. Estos tampoco se asocian a una estación base determinada, sino que la información que reciben los servidores back-end puede llegar de una o varias estaciones base [15].

A continuación, se detallan y analizan distintos aspectos clave a estudiar sobre esta tecnología.

#### 3.1.1. Cobertura

Sigfox, junto con los distintos operadores encargados en cada país, ha creado una red de largo alcance y baja velocidad que permite la comunicación de datos entre dispositivos conectados sin pasar por un teléfono móvil o estar directamente ligado a la cobertura y disponibilidad de la red móvil.

Sigfox tiene una gran cobertura tanto a nivel nacional como a nivel europeo, donde la mayor parte de sus puntos están cubiertos al menos con tres estaciones base. Actualmente se encuentra desplegada en más de 70 países, cubriendo un área de 4 millones de kilómetros cuadrados y dándole conectividad a más de 1.3 millones de usuarios [16].



*Ilustración 3. Mapa mundial de cobertura de la red Sigfox.*

Como se puede observar en los mapas de cobertura, Sigfox tiene una gran cobertura a nivel peninsular. La mayor parte del territorio nacional se encuentra cubierta por más de una estación base.

Por otro lado, cabe destacar la existencia de diferentes equipamientos de refuerzo. En aquellos puntos en los que se requiere desplegar un proyecto y no se dispone de cobertura Sigfox, existe la posibilidad de utilizar dispositivos tales como estaciones base micro o repetidores de cobertura [17].

### 3.1.2. Modulación y alcance

Sigfox utiliza modulación por desplazamiento de fase binaria diferencial (DBPSK) como su modulación de enlace ascendente y modulación por desplazamiento de fase gaussiana (GFSK) en su enlace descendente [11].

Sigfox utiliza tecnología Ultra Narrow Band (UNB) y consiste en emplear canales estrechos del espectro para alcanzar grandes distancias con un requerimiento mínimo de energía. Ultra Narrow Band (UNB) es una tecnología que transmite por un canal de espectro muy estrecho. Ofrece un excelente balance de enlace debido a la concentración de potencia en una banda de frecuencia estrecha. En consecuencia, permite la cobertura de largo alcance con una larga duración de la batería.

En lo que respecta a la distancia de transmisión, se estima que en áreas rurales se pueden alcanzar entre 30 y 50 kilómetros, mientras que en sitios más densos ésta baja a entre 3 y 10 kilómetros aproximadamente.

La banda pública empleada para el intercambio de mensajes en SigFox es de 200 kHz. En esta banda, cada mensaje tiene un ancho de 100 Hz y puede ser transmitido a una de tasa desde 100 bits hasta 600 bits (dependiendo del país en donde se encuentre) [18].

Además, su alta densidad espectral de potencia crea resistencia contra las interferencias, lo que permite coexistencia amistosa de UNB en bandas de frecuencia compartidas [7], [19].

En la siguiente figura puede se puede observar el espectro correspondiente con la transmisión de un frame de la señal Sigfox. Un cambio de frame implica un cambio de portadora dentro de la banda de operación. La banda de operación en España es de 868.03 MHz hasta 868.230 MHz.

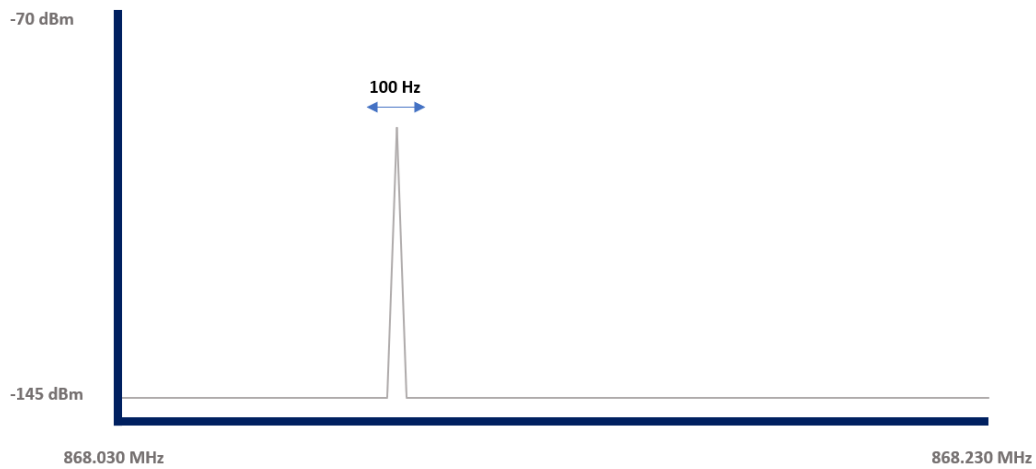


Ilustración 4. Espectro transmisión señal UNB Sigfox.

### 3.1.3. Sigfox Radio Configuration

Sigfox Radio Configuration (RC) define los parámetros de radio en los que operará el dispositivo. Estos parámetros se corresponden con frecuencias operativas de Sigfox, potencia de salida, mecanismo de acceso al espectro, rendimiento, coexistencia con otras tecnologías de radio, etc.

La red Sigfox trabaja globalmente dentro de los rangos de 862 a 928 MHz. Pero no todos los RC requieren un rango de operación tan amplio [20]. Actualmente hay siete zonas con configuraciones de radio Sigfox [20].

	RC1	RC2	RC3	RC4	RC5	RC6	RC7
<b>Frecuencia central uplink (MHz)</b>	868.130	902.200	923.200	920.800	923.300	865.200	868.800
<b>Frecuencia central downlink (MHz)</b>	869.525	905.200	922.200	922.300	922.300	866.300	869.100
<b>Velocidad de datos uplink (bit/s)</b>	100	600	100	600	100	100	100
<b>Velocidad de datos downlink (bit/s)</b>	600	600	600	600	600	600	600

Tabla 2. Parámetros correspondientes con las diferentes Configuraciones Radio existentes en Sigfox.

A cada país o región le corresponde un RC. Concretamente, en el caso de España y Europa la Configuración Radio Sigfox se corresponde con RC1.

<b>RC1</b>	Europa: Unión Europea, Andorra, Liechtenstein, Serbia, Suiza, Ucrania, Reino Unido. África: Botsuana, Kenia, Mauricio, Namibia, Nigeria, Omán, Senegal, Sudáfrica, Emiratos Árabes Unidos.
<b>RC2</b>	Brasil, Canadá, México, Puerto Rico, USA.
<b>RC3</b>	Japón
<b>RC4</b>	América Latina: Argentina, Chile, Colombia, Costa Rica, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Honduras, Nicaragua, Panamá, Paraguay, Perú, Trinidad & Tobago, Uruguay. Asia: Australia, Hong Kong, Indonesia, Malasia, Nueva Zelanda, Singapur, Taiwán, Tailandia.
<b>RC5</b>	Corea del Sur
<b>RC6</b>	India
<b>RC7</b>	Rusia

*Tabla 3. Configuraciones Radio Sigfox en los diferentes países.*

#### 3.1.4. Duty Cycle

El duty cycle hace referencia a la fracción de tiempo durante el cual el nodo está ocupado; es decir, está enviando o recibiendo información y, por consiguiente, se encuentra ocupando un canal. Para un buen uso de la red, este tiempo debe estar regulado y limitado por algún agente externo de forma que un nodo no pueda acaparar el canal durante mucho tiempo generando así congestión en la red.

Para la mayoría de las configuraciones Radio de Sigfox, incluido el RC1, existen especificaciones en cuanto al Duty Cycle. En estos casos, el ciclo de trabajo es 1% del tiempo por hora (36 segundos) [20].

Por ello, en Sigfox, el número de mensajes de subida está limitado a 140 mensajes por día (6 mensajes por hora) con un payload máximo de 12 bytes, mientras que el número de mensajes de bajada está limitado a 4 mensajes por día con un payload de 8 bytes. Debido a esta limitación, se suele utilizar en aplicaciones donde no se requiere enviar una gran cantidad de paquetes [10].

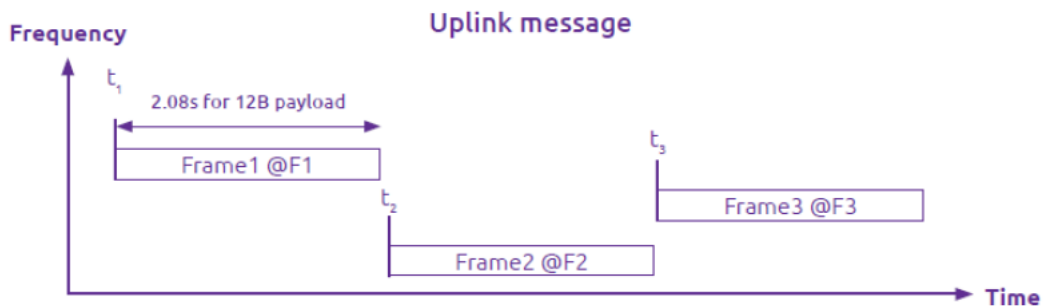
#### 3.1.5. Comunicación de datos

En Sigfox, los mensajes uplink son iniciados por el dispositivo final y son retransmitidos por una o varias estaciones base hacia los servidores back-end. Por otro lado, los mensajes downlink son aquellos enviados por el servidor back-end de la red hacia un único dispositivo final a través de una única estación base.

Como se ha comentado al comienzo de este capítulo, existe la posibilidad de solicitar un mensaje downlink que puede servir entre otros usos como comprobación de que el mensaje transmitido por el dispositivo ha sido recibido correctamente.

Un punto fuerte de la calidad de servicio de Sigfox reside en que la transmisión de un mensaje se realiza bajo lo que se conoce como diversidad en tiempo y frecuencia [21]. Sigfox transmite un mismo mensaje de manera triplicada, con diversidad temporal y con diversidad en frecuencia. De esta manera se garantiza en gran medida la entrega del mensaje, evitando así posibles interferencias en un canal determinado [22].

Como se puede observar en la *Ilustración 5*, cada frame se transmite en 2.08 segundos ya que se transmiten 29 bytes por trama (como máximo) con una tasa de transmisión de 100 bps en España.



*Ilustración 5. Ejemplo transmisión mensaje uplink Sigfox con diversidad en tiempo y frecuencia.*

Este hecho, así como que los mensajes pueden ser recibidos a la vez por varias estaciones base, representan los factores clave que hay detrás de la calidad de servicio en la red Sigfox. Las estaciones base monitorizan todo el espectro en búsqueda de señales UNB para demodular. No hay tráfico de sincronización ni señalización entre la red y el dispositivo (con el objetivo de ahorrar consumo y ancho de banda) [22].

Por otro lado, un dispositivo puede requerir de un mensaje downlink para, por ejemplo, realizar una acción, administrar un dispositivo o configurar los parámetros de la aplicación de forma remota. En este caso, un dispositivo dispuesto a recibir mensajes downlink abre una ventana fija para la recepción después de enviar la última réplica del mensaje uplink.

En Sigfox se definen diferentes formatos de trama física. Se contempla un formato para las transmisiones uplink y otro para las transmisiones downlink. A continuación, se especifican los campos para cada tipo de formato [23].



*Ilustración 6. Trama física de datos para transmisión uplink en Sigfox.*

La trama física uplink está compuesta de los siguientes campos:

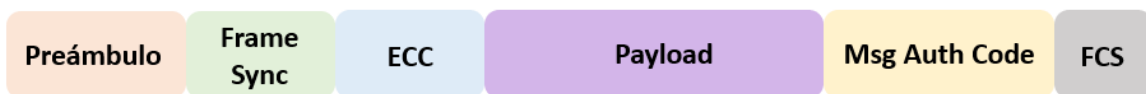
- ✓ Preámbulo: 19 bits
- ✓ Frame sync y header: 29 bits
- ✓ ID del dispositivo (Device ID): 32 bits
- ✓ Payload: 0-96 bits
- ✓ Autenticación (Message Authorization Code): 16-40 bits
- ✓ Frame Check Sequence (FCS): 16 bits (Cyclic Redundancy Check - CRC).

Así pues, una transmisión enviada desde un dispositivo final hacia una estación base podrá tener una longitud mínima de 14 bytes y una longitud máxima de 29 bytes. Los primeros bits de la trama (Preamble y Frame sync) se utilizan con fines de sincronización entre los dispositivos emisores y los receptores. Permite que un receptor sincronice el reloj para encontrar correctamente el comienzo de cada uno de los bits.

El campo Device ID es el identificador de dispositivo único Sigfox. A continuación, viene el Payload que contiene los datos transmitidos por el dispositivo, seguido del Msg Auth Code que sirve para poder autenticar el mensaje. Por último, el campo FCS se utiliza para comprobar que el mensaje mantiene su integridad.

Para el caso de las transmisiones downlink, la trama está compuesta por los siguientes campos:

- ✓ Preámbulo: 91 bits
- ✓ Frame sync y header: 13 bits
- ✓ ECC: 32 bits
- ✓ Payload: 0-64 bits
- ✓ Autenticación (Message Authorization Code): 16 bits
- ✓ Frame check sequence: 8 bits (Cyclic Redundancy Check (CRC)).



*Ilustración 7. Trama física de datos para transmisión downlink en Sigfox.*

En este caso, una transmisión enviada desde una estación base hacia un dispositivo final podrá tener una longitud mínima de 20 bytes y una longitud máxima de 28 bytes. La única diferencia con respecto al caso anterior la encontramos en el campo ECC (Error Correcting Code), utilizado para corrección de errores [23].

### 3.1.6. Consumo

Para conocer el consumo de Sigfox, se llevan a cabo una serie de cálculos teóricos. El objetivo de este apartado es modelar el consumo de corriente medio en transmisiones que no requieren mensajes de bajada. De aquí en adelante, nos referiremos a estas transmisiones como transmisiones sin ACK.

Se suponen dos estados principales en los que se encuentra el dispositivo.

- ACTIVE. Periodo de tiempo en cual el dispositivo envía datos
- SLEEP. Periodo de tiempo en el que el dispositivo permanece dormido.

El dispositivo por defecto permanecerá dormido y sólo estará en estado activo en el momento de la transmisión. Los periodos de tiempo en los que la placa MKRFOX1200 está ACTIVE son cortos, entorno a 6 segundos.

Para obtener la duración del periodo de tiempo en el que la placa está activa, se ha tenido en cuenta: el número de bytes de la trama, la tasa de transmisión y la transmisión del mensaje de manera triplicada debido a la diversidad en tiempo y frecuencia de Sigfox.

Para poder calcular el consumo de potencia de forma teórica, se hace uso de un valor aproximado teniendo en cuenta los diferentes componentes de la placa MKRFOX1200 y la antena. Para ello, se hace uso de las hojas de características de los diferentes componentes. Según el datasheet de MKRFOX1200, este Arduino se basa en el Atmel SAMD21 y un módulo ATA8520 Sigfox. Por ello, para este cálculo teórico aproximado se hace uso de las hojas de características de estos dos componentes dejando al margen el resto de las resistencias, condensadores, reguladores, cables, pistas etc.

Por otro lado, otro componente importante para tener en cuenta a la hora de realizar los cálculos de consumo es la antena utilizada para la transmisión de la información [24], [25].

<b>ATSAMD21G18A-48</b>	ACTIVE	~ 6 mA
	SLEEP	~ 12.8 $\mu$ A
<b>ATA8520</b>	ACTIVE	32.7 mA
	SLEEP	0.005 $\mu$ A
<b>ANTENA ARDUINO X000016</b>	ACTIVE	40 mA
	SLEEP	0.6 $\mu$ A

Tabla 4. Datos de consumo de energía de los diferentes componentes de Sigfox según estado de la placa Arduino.

Los datos utilizados para realizar los cálculos son los siguientes:

<b>Consumo SLEEP (mA)</b>	0,014
<b>Consumo ACTIVE (mA)</b>	78,7

Tabla 5. Datos de consumo total de energía según estado en Sigfox.

Estos datos se corresponden con condiciones controladas de temperatura y humedad. Conociendo estos datos, se puede analizar tanto el consumo de corriente del dispositivo final, como el tiempo de vida del dispositivo final.

Sabiendo que el tiempo mínimo entre mensajes consecutivos sería de 10 minutos debido a la restricción de 140 mensajes uplink al día, se tomará este valor como referencia a la hora de realizar los cálculos y se mostrarán también resultados con una menor periodicidad en el envío de datos [26].

El consumo de corriente es uno de los parámetros de rendimiento más importantes de los dispositivos finales. De su magnitud depende la duración de la batería instalada y por lo tanto la vida útil del dispositivo.

Así pues, es un factor a tener en cuenta a la hora de desplegar una red ya que influye notablemente en la toma de decisiones a la hora, como en la elección de las baterías para conseguir un tiempo de vida determinado. El consumo de corriente medio se ha calculado para el caso de transmisiones que no requieren mensajes de bajada, tal y como se ha comentado anteriormente. Para estos cálculos se han tenido en cuenta los dos posibles estados del Arduino planteados, siguiente la siguiente ecuación:

$$I_{avg} = \frac{1}{T_{notif}} T_{sleep} * I_{sleep} + T_{tx} * I_{tx} \quad (3.1.6.1)$$

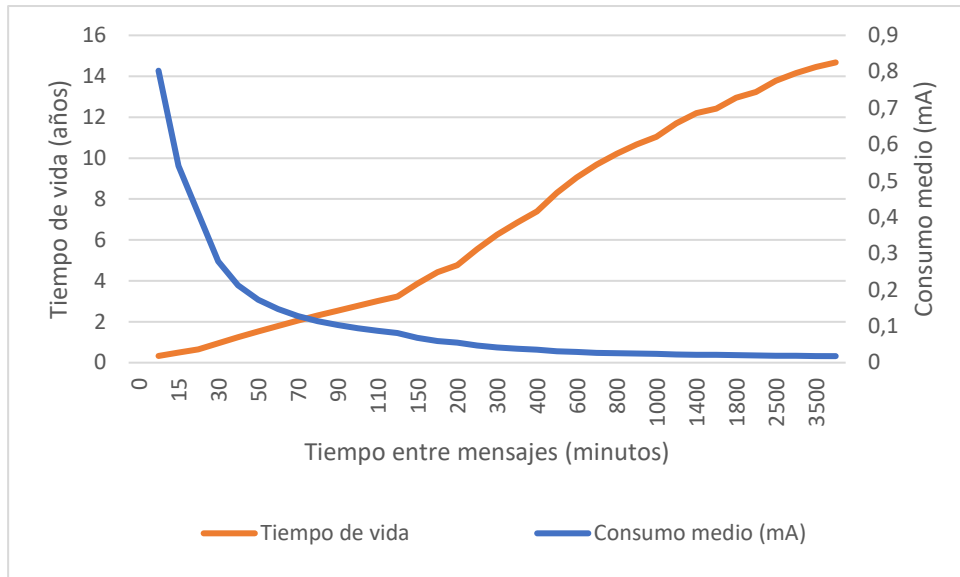


Ilustración 8. Gráfico consumo medio de energía y tiempo de vida en Sigfox según intervalos de tiempo entre mensajes enviados.

En el caso de realizar transmisiones con ACK, se reduciría claramente el tiempo de vida en comparación con este caso. Como es lógico, el tiempo de vida crece a medida que aumenta el tiempo entre mensajes. Como se puede observar, la corriente media tiende asintóticamente hacia el consumo correspondiente con el estado sleep ( $\approx 16 \mu\text{A}$ ) [27]. Esto es debido a que, a medida que crece el tiempo entre mensajes, el dispositivo permanece más tiempo en este estado mientras se reduce el tiempo en los estados de mayor consumo.

Aparte del consumo de corriente en las transmisiones, el tiempo de vida de los dispositivos depende en gran parte de la elección de la batería. El tipo de batería utilizado para realizar los cálculos se corresponde con dos pilas AAA. La capacidad típica de las pilas AAA es entre 900 y 1155 mAh [28].

Tal y como se ha comentado, la duración de la batería de los dispositivos finales es un factor importante a la hora de evaluar las prestaciones de la red. Una vez tenemos la intensidad media de una transmisión, se puede calcular el tiempo de vida en horas. Se calcula el tiempo de vida haciendo uso de la siguiente fórmula:

$$T_{lifetime} = \frac{C_{battery}}{I_{avg}} \quad (3.1.6.2)$$

Teniendo en cuenta que los cálculos se han realizado con una batería correspondiente a dos pilas AAA, si se enviase un mensaje cada 24 horas, el tiempo de vida del dispositivo se encontraría alrededor de los 12 años (en el caso de no utilizar ACK). Para un tiempo entre mensajes de 15 minutos, obtendríamos un tiempo de vida de medio año.

### 3.2. LoRaWAN

En este apartado se estudian y analizan las redes LoRa/LoRaWAN que se encuentran dentro de las tecnologías LPWAN. Permiten conectar una variedad de dispositivos, requieren de un bajo consumo y debido a la tecnología utilizada para la comunicación (LoRa) permiten un largo alcance.

En marzo de 2015, un grupo de empresas de electrónica y telecomunicaciones crean LoRa Alliance con el fin de poder incentivar a los investigadores a realizar desarrollos utilizando modulación LoRa. LoRa es un tipo de modulación de señales de radiofrecuencia que fue desarrollada por Semtech para aplicaciones IoT y que por la forma que tiene de procesar las señales, permite alcanzar grandes distancias con baja potencia [29].

LoRaWAN es una especificación creada y mantenida por la LoRa Alliance. Especifica el uso de los canales, el ancho de banda, el cifrado de los datos y la capa MAC en el enlace gateway-nodo. LoRaWAN utiliza la tecnología LoRa para el envío de datos entre gateway y nodo ya que permite comunicaciones de largo alcance. Esta especificación apunta a aplicaciones de red de área amplia de bajo consumo, con características específicamente diseñadas para soportar comunicaciones bidireccionales, seguridad y bajo coste [30].

Una Red de LoRa se compone de:

- **Nodos:** Dispositivos finales que envían y reciben datos
- **Gateway:** Dispositivo intermedio que actúa como plataforma entre la red LoRa e internet, permitiendo conectar los Nodos con el Network Server.
- **Network Server:** Gestiona y administra los distintos dispositivos, así como las comunicaciones y permite la integración con terceros.

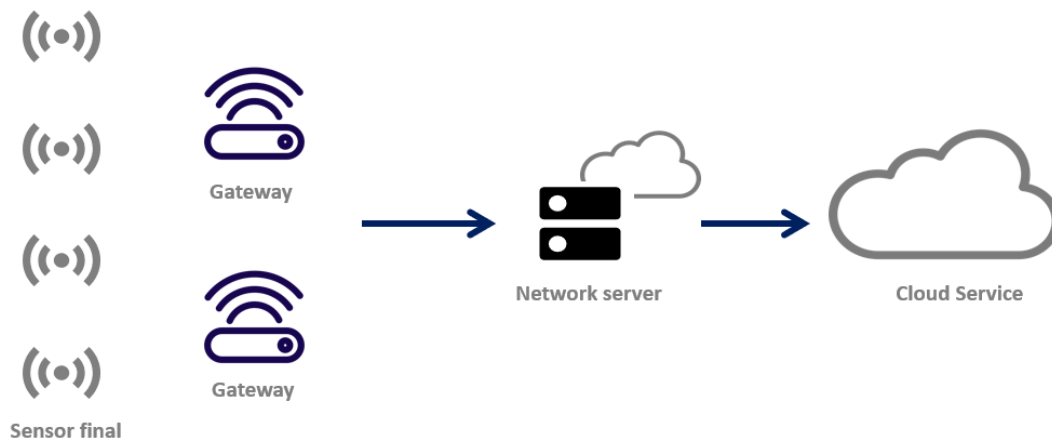


Ilustración 9. Arquitectura de red LoRaWAN.

El nodo envía información a través de radiofrecuencia utilizando LoRa hacia el gateway. En el gateway, la especificación LoRaWAN arma el paquete con el payload y lo envía encapsulado sobre una red UDP/IP. En síntesis, el gateway funciona como puente entre los dispositivos finales (nodos) y el servidor, encargándose de transformar paquetes de radiofrecuencia en paquetes UDP/IP y viceversa [30].

**El Network Server simplifica las tareas de procesamiento de datos.** Tal y como funcionan las comunicaciones LoRa, el dispositivo difunde el mensaje a través del canal LoRa y este mensaje será recibido por cada dispositivo LoRa que esté lo suficientemente cerca. Esto significa que más de un Gateway recibirá el mismo mensaje. El Network Server descarta los mensajes duplicados, de modo que la infraestructura de la nube sólo recibirá cada mensaje una vez. El Network Server también puede manejar situaciones en las que uno o más gateways no están disponibles, por los que los mensajes no dejarán de fluir hacia la infraestructura de la nube [30].

Una red LoRaWAN puede ser de tres tipos según su implementación [31]:

**Basada en el operador:** Modelo similar al de un proveedor de telefonía celular donde este realiza el despliegue de la red y luego se comercializa la posibilidad de conectarse y enviar tráfico por ella.

**Privada:** Una empresa o un particular monta su propia red privada y tiene el control y uso de esta. En estos casos se suelen utilizar equipamientos más económicos que en el modo anterior.

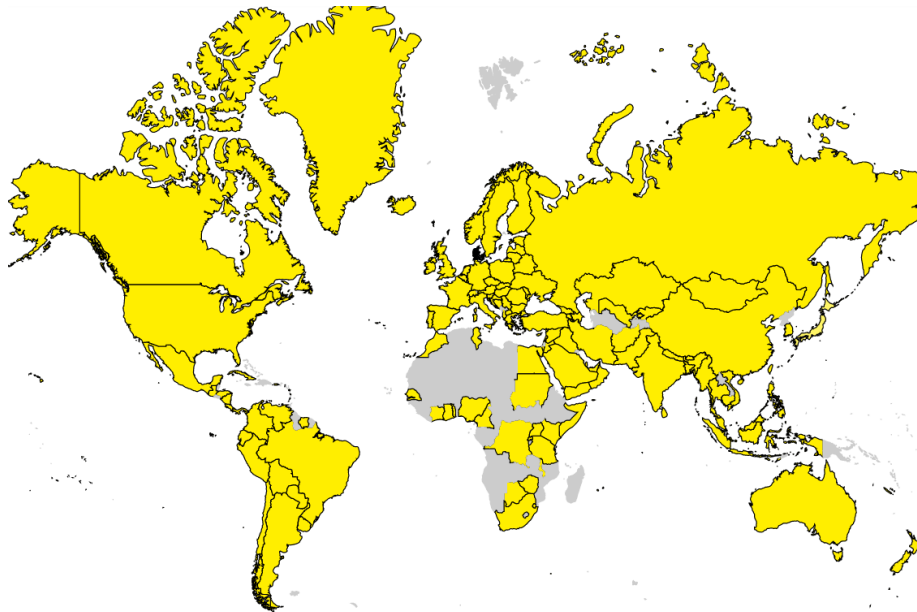
**Híbrido:** Debido a su uso libre del espectro, LoRaWAN es de las pocas tecnologías que permiten este modo. Consiste en que el operador proporciona la cobertura exterior, pero ante la solicitud de las empresas o particulares interesados, se les ofrece una mayor cobertura para cubrir sus necesidades. Esto se debe a que mediante las claves de red y aplicación se permite el envío de paquetes propios por medio de gateways de terceros, de forma que se hace un uso compartido de la red.

A continuación, se detallan y analizan distintos aspectos clave sobre este estándar de comunicación inalámbrica.

### 3.2.1. Cobertura. The Things Network

Para identificar todas las redes LoRaWAN, LoRa Alliance ha estandarizado diferentes definiciones de red. La cobertura de red global es la agrupación de cualquier tipo de red LoRaWAN existente. En el mapa de la *Ilustración 11* se pueden encontrar los países que LoRa Alliance indica que presentan actividad de Red LoRaWAN de todos los modelos de negocio: comunidad abierta, red privada o red impulsada por un operador [29].

- Un operador de red es cualquier red LoRaWAN destinada a monetizar abiertamente la conectividad o los servicios extremo a extremo a terceros. Los operadores de red son miembro de LoRa Alliance y se consideran operadores de red pública de LoRaWAN.
- Las comunidades abiertas de LoRaWAN se corresponden con comunidades de desarrolladores.
- Las redes privadas son utilizadas por ciudades inteligentes o empresas que implementan sus propias redes LoRaWAN. Estas redes no están abiertas a la monetización de terceros.



*Ilustración 10. Mapa de cobertura LoRaWAN.*

En lo que respecta a comunidades abiertas, TTN o The Things Network [32] es una plataforma gratuita formada por más de 175.000 miembros cuya finalidad es proporcionar a los usuarios un servidor de red y de aplicaciones.

Uno de los principales objetivos de sus creadores fue desplegar una red LoRaWAN mundial con la ayuda de los propios usuarios, los cuales añaden su gateway a la red y estos pasan a ser de conocimiento público. Esto implica que un nodo puede enviar tráfico (en caso de tener las claves necesarias) a través del concentrador de un tercero. Los paquetes viajan cifrados, por lo que la comunicación sigue siendo segura ya que solo puede ser leída quien conoce sus credenciales.

Es necesario tener algunas particularidades que presenta The Things Network. En primer lugar, TTN presenta una limitación en cuanto a la cantidad de paquetes de downlink que se pueden enviar (10 mensajes nodo por día). Por otro lado, en el caso de los mensajes de uplink, el servidor permite hasta 30 segundos de tiempo en el aire por nodo por día. Sabiendo el tiempo en el aire de cada paquete, es posible determinar cuántos paquetes se pueden transmitir en ambos sentidos por día y así calcular en el nodo el tiempo entre envíos para no superar esta restricción diaria [33].

En la actualidad, The Things Network supone una parte importante de LoRaWAN debido a su gran popularidad y continua evolución llevada a cabo por sus propios desarrolladores.

### 3.2.2. Modulación y alcance. LoRa

LoRa es un tipo de modulación en radiofrecuencia patentado por Semtech y forma parte de la capa física del modelo OSI. LoRa opera en las bandas de radio ISM sin licencia que están disponibles en todo el mundo. ISM son las siglas de Industrial, Scientific and Medical (ISM). La UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) había reservado originalmente una parte del espectro de RF a nivel mundial para aplicaciones industriales, científicas y médicas [30].

La base de LoRa está fundada en modulación chirp, la cual consiste en deformar los pulsos en señales más anchas de período fijo. Este tipo de modulación está fuertemente vinculada al concepto de Spreading Factor (SF). El Spreading Factor indica la magnitud del ensanchado de las señales [30]. En la *Tabla 6* se puede apreciar cómo cambia el valor de otros parámetros en LoRaWAN al variar el valor del SF. A mayor SF, mayor será el alcance, pero menor la cantidad de información que se podrá enviar debido a la interferencia entre símbolos.

Spreading Factor	Bitrate	Range	Max Payload (bytes)
SF7	5470 bps	2 km	222
SF8	3125 bps	4 km	222
SF9	1760 bps	6 km	115
SF10	980 bps	8 km	51
SF11	440 bps	10 km	51
SF12	290 bps	+12 km	51

*Tabla 6. Parámetros según Spreading Factor utilizado en LoRaWAN.*

El bitrate (velocidad de transmisión) se puede calcular como indica la ecuación.

$$Br = SF \cdot \frac{BW}{2^{SF}} \cdot CR \text{ [bits/s]} \quad (3.2.2.1)$$

El coding rate (CR) es un dato utilizado para la redundancia. Se expresa en k/n donde por cada “k” bits de información, se generan “n” bits de datos de forma que n-k son redundantes. Este puede tomar los siguientes valores: “4/5”, “4/6”, “4/7” o “4/8”. LoRaWAN utiliza SF entre 7 y 12 aunque empíricamente se ha demostrado que no es muy eficiente un valor de Spreading Factor superior a 10, ya que el consumo de batería es bastante mayor y su rendimiento no es considerablemente mejor [34].

LoRaWAN cuenta con un largo alcance. Está diseñado para trabajar en ciudades y poder pasar a través de los edificios y obstáculos. Puede llegar en estas condiciones hasta unos 3 Km. En el caso de zonas abiertas puede llegar hasta más de 12 km.

En cuanto a las tasas de transmisión, las tasas de transferencia de datos que van de los 300 a los 5000 bits por segundo.

### 3.2.3. Clases de nodos

La existencia de diferentes clases de nodos en LoRaWAN se trata de uno de los aspectos más importantes, ya que el comportamiento del nodo dependerá de la clase elegida.

Los tipos de clases existentes son tres (A, B o C) y si bien difieren en varias cosas, la más relevante es en cuanto al consumo de energía que presentan cada una de ellas [30]. En la gran mayoría de los casos se suele utilizar la clase A y en el caso de no estar especificado, se asume que es esta la utilizada. Sin embargo, es necesario también conocer las clases B y C, las cuales surgieron como una mejora dentro de las redes LoRaWAN y que para algunos casos específicos pueden ser útiles.

Por último, a la hora de decidir por cuál optar, hay que asegurarse que los gateways a los cuales se van a conectar los endpoints también acepten esta configuración ya que los equipos de gama baja y/o media suelen ser compatibles solo para los de clase A.

#### **Clase A**

Esta clase es la que se suele utilizar debido a que, dado las características que presentan las aplicaciones de IoT para las cuales se requiere LoRa, es la que mejor se adapta a ellas.

En primer lugar, el tipo de comunicación que se puede implementar es bidireccional, por lo tanto, permite no solo enviar información del nodo al servidor, sino que también es posible escuchar paquetes y a partir de ello ejecutar una tarea.

En cuanto al consumo, esta clase es la óptima en caso de que el nodo funcione con baterías ya que solamente escucha en el caso de que el nodo haya transmitido previamente un mensaje. El resto del tiempo permanece en modo sleep, estado en el que el consumo es mínimo.

#### **Clase B**

Esta clase de nodos es menos utilizada. Esto se debe a que la gran mayoría de los gateways no la soportan. Esto se debe a que se requiere una mayor precisión y procesamiento de información. Además de tener que ser capaces de recibir y transmitir información, también precisan mantener una sincronización de la red mediante paquetes de beacon.

La clase B surge con el propósito de ser utilizada en aplicaciones que requieran que el nodo se encuentre en movimiento y para que esto funcione, ellos deben poder hacer roaming entre varios gateways para que la comunicación no se interrumpa.

Otra diferencia respecto a la clase A, es que en este modo se pueden enviar mensajes de manera multicast. Esto facilita la comunicación en caso de querer controlar varios dispositivos con un mismo comando.

Debido a la mayor cantidad de ventanas de transmisión y recepción que se utilizan en estos tipos de nodos y los constantes mensajes necesarios para mantener a estos sincronizados, el consumo de batería es mayor a los de la clase anterior. Sin embargo, todavía es admisible pensar en alimentar esta clase de nodos mediante baterías.

### **Clase C**

Al igual que para el caso de los nodos de clase B, existen muy pocos endpoints que estén configurados en clase C. Los motivos son los mismos que para los del tipo B, sumado a que en este caso el consumo de batería es mucho más elevado. Este elevado consumo se debe a que el 100% del tiempo se encuentran escuchando o enviando mensajes. Por ello, solo se recomienda utilizar esta clase si los nodos se encuentran conectados directamente a la red eléctrica y no por medio de baterías.

#### 3.2.4. Duty Cycle

El duty cycle [30] hace referencia a la fracción de tiempo durante el cual el nodo está ocupado; es decir, está enviando o recibiendo información y, por consiguiente, se encuentra ocupando un canal. Para un buen uso de la red, este tiempo debe estar regulado y limitado por algún agente externo de forma que un nodo no pueda acaparar el canal durante mucho tiempo generando así congestión en la red. A modo de ejemplo, en Europa existe el standard ETSI EN300.220 el cual se encarga de controlar esto. Este valor depende de muchos factores entre los cuales se destaca la región donde se encuentre funcionando el nodo.

Para el caso de EU863-870MHz el duty cycle es entre 0,1% y 1%. Esto significa que, si un nodo utiliza cierta cantidad de milisegundos de un canal para enviar información, luego debe esperar 99 veces este tiempo para volver a utilizarlo [35].

Sub-bandas Europa	Duty Cycle Máximo
<b>g (863.0 – 868.0 MHz)</b>	1%
<b>g1 (868.0 – 868.6 MHz)</b>	1%
<b>g2 (868.7 – 869.2 MHz)</b>	0.1%
<b>g3 (869.4 – 869.65 MHz)</b>	10%
<b>g4 (869.7 – 870.0 MHz)</b>	1%

Tabla 7. LoRaWAN. Sub-bandas europeas y Duty Cycle máximo correspondiente.

La ecuación muestra de forma más simple cómo se calcula el tiempo de indisponibilidad del canal.

$$T_{off} = \left( \frac{Time\ on\ air}{Duty\ Cycle} \right) - Time\ on\ air \quad (3.2.3.1)$$

### 3.2.5. Comunicación de datos

El paquete LoRa tiene la forma que se presenta en la *Ilustración 12*. Consta de un preámbulo (serie de bits necesarios para el sincronismo en tiempo y frecuencia entre el receptor y transmisor), un encabezado y payload, ambos seguidos por su correspondiente CRC (Cyclic Redundancy Check) para asegurar la transmisión [36], [37].



*Ilustración 11. Trama física de datos para transmisión uplink en LoRaWAN.*

La carga útil es el elemento donde se encuentran los datos proporcionados por los sensores y que se pretenden enviar hacia el servidor. De acuerdo con el estándar LoRaWAN, la longitud máxima de esta parte de la trama en número de bytes depende del tipo de configuración de SF que se utilice.

### 3.2.6. Consumo

El consumo medio en LoRaWAN depende de una serie de variables parametrizables como son: la clase del nodo seleccionado, el Spreading Factor utilizado, el tamaño de payload y el tipo de gateway utilizado (red privada o pública). Por ello, resulta complicado realizar unos cálculos estandarizados teóricos del consumo en LoRaWAN. De hecho, la información publicada relacionada con el consumo de potencia en el caso de LoRaWAN es escasa.

Para disponer de un dato de referencia, se ha utilizado como fuente de información un trabajo fin de grado [38] en el que muestra el consumo reportado por los fabricantes en las hojas de características de los diferentes componentes y se realiza una medida experimental de consumo. En este trabajo, los cálculos de consumo se han realizado con endpoints que cuentan con la funcionalidad ADR (Adaptative Data Rate). ADR es una funcionalidad que permite conseguir la máxima eficiencia en los nodos ya que permite optimizar el data rate, el time on air y el consumo de la batería. Con esta función activada, el dispositivo presenta un mejor rendimiento ya que a partir de los últimos 20 mensajes de uplink, este es capaz de detectar algún cambio en el nivel de señal e ir tomando decisiones que influyen positivamente en el data rate. Para ello mide el nivel de señal-ruido y lo compara con el nivel requerido para demodular a dicha velocidad. A partir de esta diferencia toma la decisión de aumentar el data rate o disminuir la potencia de transmisión según corresponda. La configuración del Spreading Factor se realiza de manera automática mediante el uso de ADR.

<b>Microcontrolador (atmega328p)</b>	SLEEP	0.005 mA
	ACTIVE	3.3 mA
<b>Modulo LoRa</b>	SLEEP	0.0002 mA
	ACTIVE	120 mA
<b>Oscilador</b>	-	0.006 mA
<b>LDO</b>	-	0.08 mA

*Tabla 8. Datos de consumo de energía según datasheet de los diferentes componentes de LoRaWAN según estado.*

Estos valores extraídos del data sheet tienen en cuenta la ventana de transmisión estándar, por lo que no se tiene en cuenta el número de bytes de la carga útil. La ventana de transmisión queda abierta en este caso con independencia del número de bytes que se estén enviando. No se tienen en cuenta las optimizaciones en el tiempo de transmisión.

Este estudio se realizó con un nodo clase A por lo cual, pasado el periodo de transmisión, el nodo entra en modo sleep durante un tiempo prolongado. Conociendo estos valores y sabiendo la duración aproximada del periodo de transmisión, es posible estimar el tiempo que estarán en funcionamiento las baterías antes de precisar que ser remplazadas. Suponiendo que el nodo toma una medida y la envía al gateway cada 2 horas, una batería de 2300mAh (correspondiente a 2 pilas AAA) presentará una duración de 3 años y medio.

### 3.2.7. Frecuencias

LoRaWAN utiliza frecuencias por debajo del gigahercio, lo cual permite alcanzar largas distancias y tener buen poder de penetración de la señal ante objetos interferentes que se encuentran entre el emisor y el receptor.

Aunque utiliza parte del espectro libre para la transmisión y recepción de los paquetes, existen tres grandes bandas de frecuencias donde se suele utilizar esta tecnología. Estas son 433 MHz, 868 MHz y 915 MHz. La elección de cuál utilizar la hace el usuario en función del país en el que se vaya a implementar la red [30].

En Europa, para LoRa la banda legal a usar es la de 868 MHz.

LoRa no trabaja en una frecuencia fija, sino que lo hace en un rango, por lo cual, en caso de que exista una interferencia en alguna de ellas, el sistema podrá seguir funcionando sin problemas ya que cuenta con el resto para poder comunicarse sin inconvenientes. A su vez, al haber 8 canales disponibles para el enlace ascendente, el usuario puede utilizar el que le resulte óptimo.

## 4. Análisis y comparativas tecnologías LPWAN

Como rápidamente se observa, para proyectos IoT donde se requiere un operador, se tiene que estudiar con detenimiento qué tecnología es la que más se ajusta a las necesidades y presupuesto que manejamos.

En este apartado se procede a resumir y a comparar la información analizada en los apartados anteriores sobre las tecnologías de Sigfox y LoRa.

De esta forma, el Grupo de Tecnologías Fotónicas podrá evaluar qué tecnología se ajusta y cubre de una mejor forma las necesidades de cada uno de sus diferentes proyectos.

La elección entre Sigfox y LoRa dependerá notablemente de los activos que se deseen monitorizar. Como se ha comentado anteriormente, Sigfox se trata de una red pública. También conocido como operador OG. Sigfox cuenta con una infraestructura de comunicaciones a nivel mundial consolidada y estable. Por el contrario, en el caso de LoRa es necesario la instalación de gateways como plataforma entre la red LoRa e internet o hacer uso de gateways o redes de terceros [39].

Se muestra a continuación una tabla resumen comparativa de ambas tecnologías [40]:

	SigFox	LoRa
<b>Modulación</b>	UNB DPSK (UL), GFSK (DL)	CSS
<b>Bandas de frecuencia</b>	ISM: EU (868 MHz), US (902 MHz)	ISM: EU (868 MHz), US (915 MHz), ASIA (430 MHz)
<b>Tasa de transmisión</b>	100 bps (UL), 600 bps (DL)	0.3 – 37.5 kbps (LoRa), 50 kbps FSK
<b>Alcance</b>	10 km (urbano), 50 km (rural)	5 km (urbano), 15 km (rural)
<b>Tamaño de payload</b>	12 bytes (UL), 8 bytes (DL)	Hasta 250 bytes (dependiendo de SF y región)
<b>Cobertura (Sensibilidad EB)</b>	-142 dBm	De -120 a -138 dBm
<b>Resistencia frente a interferencias</b>	Alta	Media

*Tabla 9. Comparativa parámetros característicos Sigfox y LoRaWAN.*

Debido a la necesidad de instalación de gateways, existen casos de uso en los que la utilización de LoRa podría presentar puntos débiles:

- El activo que se desea monitorizar se mueve de la zona de cobertura de los gateways de tu red privada. En estos casos, puede perderse medición.
- La zona que se desee monitorizar es muy grande o con puntos muy dispersos. En casos como estos, serían necesarios un gran número de gateways para poder llevar a cabo la monitorización o una buena cobertura de redes públicas ya existentes a lo largo de toda la zona.

Por el contrario, Sigfox tiene instaladas sus propias antenas de manera global, por lo que no se requiere cubrir la zona con gateways. Otro aspecto importante que hay tener en cuenta es la resistencia frente a interferencia. En el caso de LoRa su funcionamiento es muy bueno en redes privadas. En cambio, no escala de la misma manera en redes públicas. Debido a esto, se establecen las limitaciones en cuanto al duty cycle visto en el apartado 3.2.4.

En el caso de Sigfox, si hay un número elevado de dispositivos transmitiendo de manera simultánea, el número de paquetes perdidos debido a colisiones es muy bajo. Esto se debe a la modulación utilizada por Sigfox y su tecnología Ultra Narrowband (UNB). En cambio, en el caso de LoRa, si hay simultaneidad en el envío de datos, la pérdida de paquetes de datos es muy elevada.

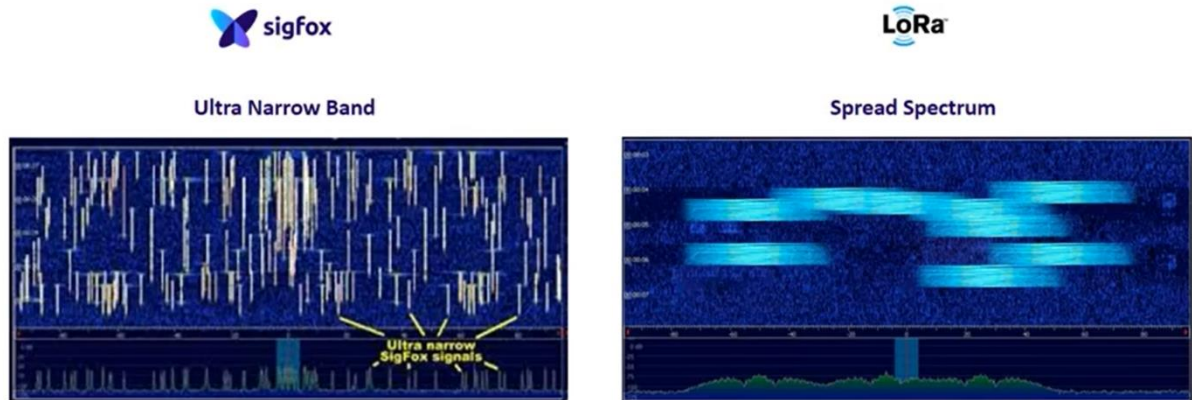


Ilustración 12. Espectro transmisiones Sigfox y LoRaWAN.

Por otro lado, Sigfox presenta una mayor limitación en cuanto a número de bytes que se pueden enviar. En el caso de LoRaWAN, existe una mayor flexibilidad respecto a la cantidad de datos de carga útil, teniendo en cuenta la configuración del resto de parámetros.

Como conclusiones:

- Sigfox y LoRaWAN utilizan tecnologías similares. Utilizando protocolos totalmente diferentes se obtienen un rendimiento semejante.
- Sigfox emplea un protocolo sencillo para dispositivos sencillos. LoRaWAN presenta protocolos y configuraciones de mayor complejidad.
- LoRaWAN es una tecnología y solo TTN o proveedores nacionales pueden proporcionar una red. Por el contrario, Sigfox es una red.
- Sigfox tiene una única red común formada actualmente por 75 países constituida por estaciones base ubicadas estratégicamente. No es necesario roaming. Esto no es así en LoRaWAN ya que no hay una única red.
- Sigfox y LoRaWAN son ambas tecnologías propietarias. Sin embargo, tienen presencia en diferentes puntos de la cadena de valor. Sigfox es propietario en el ámbito de la conectividad, se trata del proveedor único de estaciones base basado en acuerdos exclusivos con operadores de telecomunicaciones en los diferentes países. Por el contrario, LoRaWAN está abierto en el ámbito de la conectividad y cualquier persona puede instalar un nuevo gateway.
- LoRaWAN permite el envío de un mayor número de bytes de carga útil.

## 5. Tecnología LPWAN seleccionada para el proyecto: Sigfox

La realización de este análisis detallado de las dos tecnologías LPWAN más utilizadas actualmente en el mercado nos permite tener toda la información necesaria en cuanto a consumo energético, normativas, costes, ventajas y problemáticas. De esta forma, se podrá seleccionar para cada proyecto aquella que mejor se ajuste.

Concretamente, dentro de este trabajo se hace uso del análisis realizado para seleccionar la solución más adecuada a uno de los proyectos que actualmente se está desarrollando dentro de GTF, el proyecto “Técnicas radar avanzadas para la medida en tiempo real y sin contacto de caudales de agua en canales abiertos y ríos (FlumenTech)”. En este proyecto se plantea dar solución a la medida de las corrientes de los ríos en las cuencas gestionadas por la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE). Hasta el momento, el control de las cuencas se está realizando mediante dispositivos sensores mecánicos no automatizados que reportan solo medidas en momentos puntuales (debido a la necesidad de la presencia del operario que realiza la medida) y de precisión no muy alta. Los problemas de crecidas, de control de cantidad de agua embalsada o desembalsada, etc. requieren de un sistema automatizado de toma de datos con sensores de mayor precisión. En esta línea, GTF ha propuesto un sistema de medida basado en señales radar FM-CW y detección de velocidades por efecto Doppler para determinar con precisión la velocidad de las corrientes a distintos niveles de profundidad del agua. Este sistema requiere la colocación de múltiples sensores en puntos estratégicos para la CHE a lo largo de la cuenca, para controlar en tiempo real los caudales.

Dado que las ubicaciones de los sensores son remotas, sin acceso a red fija de datos ni a alimentación de corriente, una parte del proyecto requiere dar solución a la comunicación o reporte de datos medidos por los sensores a los centros de control. Las condiciones o necesidades son, en este caso, un bajo consumo (el sensor trabajará con batería propia posiblemente recargable con una pequeña placa fotovoltaica), ubicaciones remotas en valles y montañas a distancias que pueden ser de varios kilómetros entre los sensores y las localidades más próximas, una periodicidad para la transmisión de datos de exigencia baja (suficiente con actualización de datos cada 10 o 20 minutos según necesidades de la CHE) y una tasa de transmisión baja, que incluya el dato de 3 medidas de la velocidad de la corriente a tres profundidades distintas (el procesado de las señales se realizará en el propio sensor, reportando únicamente el dato final calculado de velocidad de la corriente).

Bajo estas condiciones, se evidencia a partir del análisis expuesto en el punto anterior, que la solución adecuada debe estar basada en la tecnología Sigfox, ya que encaja en capacidad y en periodicidad de la transmisión. Los principales aspectos clave tenidos en cuenta para la elección de la tecnología adecuada son los siguientes:

- La tasa de transmisión requerida es baja y cantidad de datos a transmitir es igual o inferior a 12 bytes.
- Se requiere tener cobertura a lo largo de grandes extensiones de terreno localizadas en lugares remotos de España.
- Necesidad de bajo consumo de energía para lograr grandes autonomías.

## 5.1. Implementación

Una vez realizada la selección de Sigfox, dentro del trabajo también se plantea la realización de unas primeras pruebas para validar el uso de la tecnología en esta aplicación y en otras que puedan surgir dentro de GTF. Para ello, se implementa una solución en Sigfox para dos sensores remotos. Dado que, en el momento de la realización de este trabajo, el proyecto de desarrollo de los sensores radar está en su inicio y no se dispone todavía de los sensores de medida de velocidad de las corrientes, se decide probar la solución Sigfox con dos sensores de temperatura y humedad (que emulan los datos de velocidad de las corrientes), que se colocarán en una ubicación remota a la que GTF tiene acceso, la planta solar PS10 de Sanlúcar la Mayor (Sevilla). Hay que señalar que el uso de estos sensores y su ubicación en una planta Solar son simplemente por disponibilidad de GTF de este entorno de campo de pruebas, que puede ser “similar” al que se tendrá en la aplicación final de los ríos (ubicación lejana a localidades y al centro de control).

Como primer paso previo a la implementación, se comprueba la cobertura Sigfox de la ubicación en la que se van a realizar estas pruebas de campo.

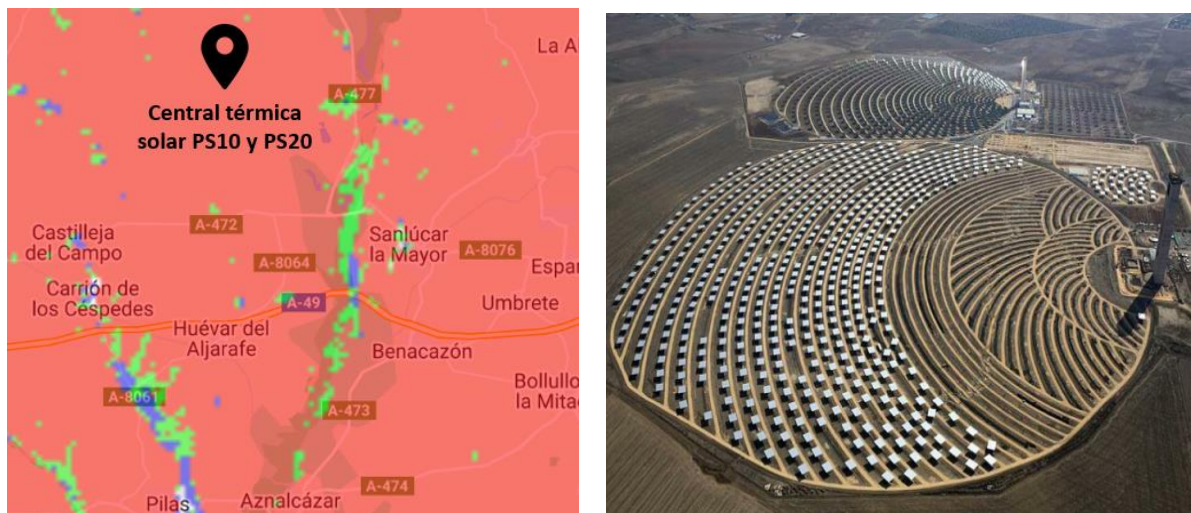


Ilustración 13. Planta solar PS10/PS20 y cobertura Sigfox en la ubicación de la misma

Las zonas azules del mapa se corresponden con aquellas cubiertas por una estación base. En verde, las zonas cubiertas por dos estaciones base. Las zonas en rojo son aquellas cubiertas por tres estaciones base o más [16]. Como se puede observar en la imagen, la planta solar está cubierta al menos por tres estaciones base, por lo que se podrá llevar a cabo correctamente la ejecución del piloto en este campo de pruebas.

El esquema de la solución desarrollada en Sigfox es el siguiente:



Ilustración 14. Esquema de la solución desarrollada en Sigfox.

En primer lugar, a través de los sensores se obtendrá la temperatura y la humedad de la localización. Este sensor es de tipo DHT11. El Arduino MKRFOX1200 permitirá la recogida de datos a través de los sensores conectados y su posterior envío a la nube de Sigfox.

Tal y como se han configurado los dispositivos, se realizará la conexión a SigFox y se enviará un mensaje cada 15 minutos. El máximo permitido son 140 mensajes al día (equivalen a 1 cada 10 minutos aproximadamente). Dentro de SigFox, se configurará una Callback para que cada vez que reciba un mensaje lo envíe de forma automática a ThingSpeak, la plataforma en la nube para el IoT de MathWorks. Esta información la podremos visualizar en cualquier dispositivo en tiempo real [41].

#### 5.1.1. Hardware Sigfox

Una vez elegida la tecnología inalámbrica con la que trabajar en el desarrollo de la solución, se requiere una fase de análisis, valoración y elección de los dispositivos y material para llevar a cabo el piloto del proyecto. Hay muchos kits de desarrollo y fabricantes de kits de desarrollo en el mercado para elegir poder. Para la elección de un kit de desarrollo, hay que tener en cuenta los siguientes aspectos [42]:

En primer lugar, se debe elegir un kit de desarrollo que coincida con el RC del proyecto: RC1 en Europa, Oriente Medio y África; RC2 para América del Norte; RC4 para América Latina y Asia-Pacífico; etc. En segundo lugar, se debe elegir un kit para el desarrollo de la solución que use un entorno de desarrollo conocido. Arduino, C, Python, etc. En tercer lugar, tener en cuenta qué tipo(s) de conectividad debe admitir además de Sigfox. BLE, WiFi, GPS, etc. Varios kits de desarrollo existentes funcionan con más de una tecnología de red.

Para realizar las pruebas necesarias sobre esta tecnología, se ha optado por utilizar los elementos hardware (plataforma y antena) descritos a continuación.

Arduino MKRFOX 1200 ha sido la placa de desarrollo hardware utilizada. Esta plataforma integra un microcontrolador y un módulo con RF apto para comunicarse con la red Sigfox.

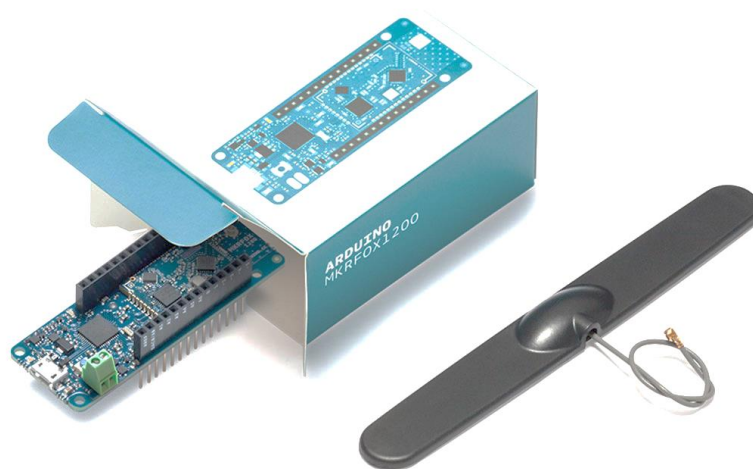


Ilustración 15. Placa arduino MKRFOX1200 y antena.

Sus características principales son las siguientes:

- ✓ Recomendada por Sigfox
- ✓ RC1 – Europa
- ✓ Lenguaje de desarrollo: Arduino
- ✓ Disponibilidad inmediata para su compra

Como microcontrolador, la plataforma MKRFOX1200 utiliza el Atmel SAMD21 de 32 bits y el módulo Atmel ATA8520 compatible con Sigfox. A continuación, se detallan las principales características de la plataforma y estos componentes [43], [44].

Característica	Valor
<b>Microcontrolador</b>	SAMD21 Cortex-M0+ 32-bit low power ARM MCU
<b>Alimentación placa (USB/VIN)</b>	5V
<b>Baterías soportadas</b>	2x AA o AAA
<b>Voltaje de funcionamiento</b>	3.3V
<b>Digital I/O Pines</b>	8
<b>Entradas analógicas Pines</b>	7 (ADC 8/10/12 bit)
<b>Salidas analógicas Pines</b>	1 (DAC 10 bit)
<b>Corriente DC para I/O Pin</b>	7 mA
<b>Memoria flash</b>	256 kB
<b>SRAM</b>	32 kB
<b>Rango de frecuencias operacionales</b>	868 MHz – 868.6 MHz
<b>Longitud</b>	67.64 mm
<b>Ancho</b>	25 mm
<b>Peso</b>	32 gr.

*Tabla 10. Parámetros característicos placa Arduino MKRFOX1200.*

Cabe destacar que, con la adquisición de esta plataforma obtenemos dos años de suscripción a la red Sigfox con la posibilidad de enviar hasta 140 mensajes por día, 1 cada 10 minutos aproximadamente, lo que supone un total máximo de 1680 bytes de datos útiles enviados por día.

La placa se alimenta mediante USB a 5 V. Sólo es recomendable alimentar así a la placa cuando se programa. La placa está diseñada para alimentarse a 3 V a través del bornero, en este caso se podría utilizar un porta pilas y utilizar dos pilas AA o AAA. Para la implementación de este piloto, se alimentará la placa MKRFOX1200 con dos pilas AAA.

Además de la placa, se requiere el uso de una antena para el envío de datos. Para realizar las transmisiones, se ha utilizado la antena suministrada junto a la placa. Dicha antena también es compatible con GSM (850 / 900 / 1800 / 1900 MHz) y es apta para usar con la placa de desarrollo MKRFOX1200. Se conecta a la placa de desarrollo a través de un conector Micro U.FL. Tiene una ganancia de 2 dB y un tamaño reducido (130 mm x 16 mm x 5 mm), no tiene plomo y cumple con la directiva RoHS.

Lo más destacado es que opera en el rango de frecuencias de 868.0 MHz y 868.6 MHz y su bajo consumo, 40 mA cuando transmite un mensaje y en modo apagado un máximo de 600 nA [10]. Concretamente, para esta solución en Sigfox, se adquieren dos placas Arduino MKRFOX1200 con sus correspondientes antenas y un licenciamiento Sigfox de un año de duración.

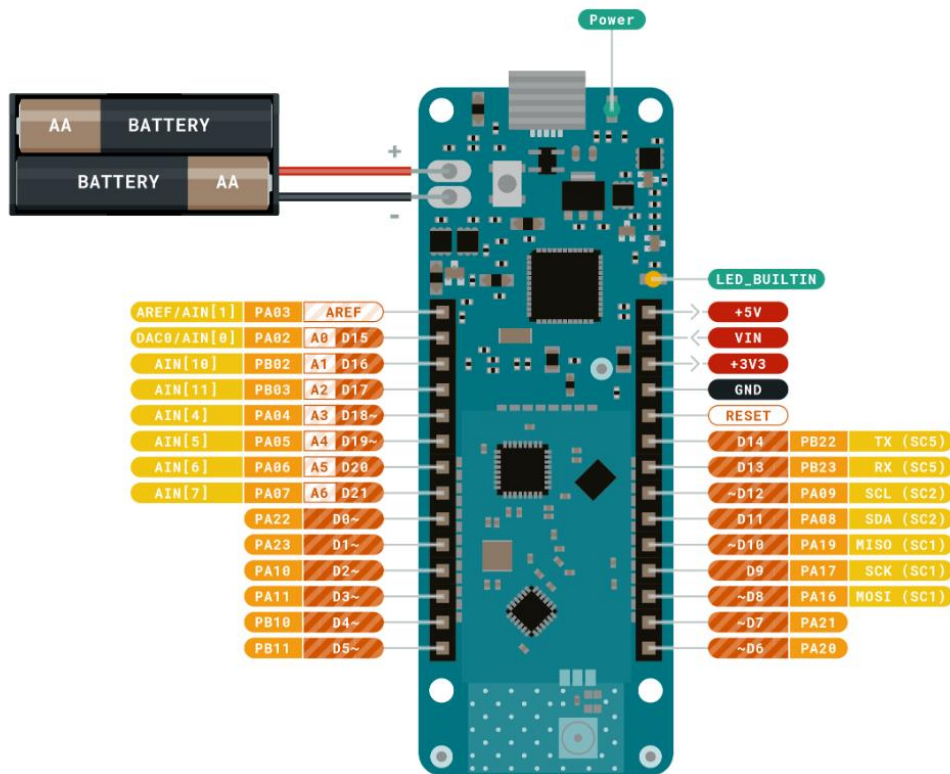


Ilustración 16. Pinado en la placa Arduino MKRFOX1200.

### 5.1.2. Software Sigfox

En esta sección se describen las herramientas software utilizadas y el desarrollo de código necesario para las pruebas realizadas con la tecnología Sigfox.

#### Arduino IDE

Para trabajar con la plataforma y programarla, se ha utilizado el entorno de programación Arduino IDE. En primer lugar, tenemos que instalar las siguientes librerías y el driver de la placa:

- Arduino Sigfox for MKRFox1200
- Arduino Low Power

El entorno Arduino IDE permite gestionar la conexión con el dispositivo y poder editar código escrito en C, para después flashearlo en la memoria del dispositivo y correr el programa.

#### Registro de dispositivo MKRFOX1200 En Sigfox

Antes de poder enviar mensajes a la red Sigfox, debemos registrar el dispositivo en la plataforma. Cada dispositivo que se conecta a Sigfox tiene un identificador único llamado ID que identifica a dicho dispositivo en la red Sigfox de forma única.

Por otro lado, también tenemos que proporcionar el PAC (Porting Authorization Code). Este código se asocia al propietario del dispositivo y sólo él lo conoce. Se puede entender como algo temporal que nos permite visualizar y gestionar un dispositivo. Sirve para que nadie, salvo el

propietario que conoce el código PAC, pueda añadir ese dispositivo a un grupo y tomar el control de este. Estos dos parámetros se extraen de la propia memoria del módulo de ATA8520.

En resumen, para poder activar la placa es necesario:

- Indicar la empresa de la placa entre el listado de empresas que tienen algún kit o placa compatible con Sigfox.
- Indicar el país donde va a estar la placa.
- Introducir ID y PAC.

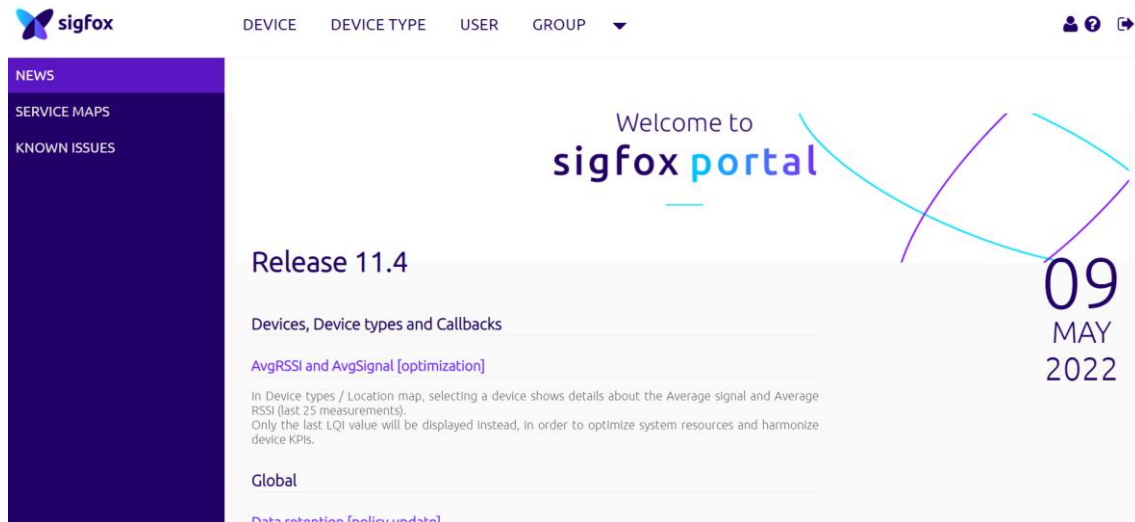


Ilustración 17. Captura de portal Backend de Sigfox.

### Librería Sigfox

Para poder desarrollar los diferentes códigos a cargar en el dispositivo, se ha utilizado la librería Arduino Sigfox. En ella se definen diferentes funciones para poder realizar comunicaciones con la red. La siguiente tabla muestra algunas de las funciones más relevantes y utilizadas para este proyecto.

Función	Descripción
<b>begin()</b>	Inicializa el módulo y la librería.
<b>beginPacket()</b>	Comienza el proceso de mandar un paquete.
<b>write()</b>	Manda datos binarios al backend de Sigfox.
<b>end()</b>	Cierra el módulo y la librería.
<b>endPacket()</b>	Finaliza el proceso de enviar paquetes iniciado con beginPacket().
<b>PAC()</b>	Devuelve el PAC del módulo, que es la clave secreta correspondiente al ID. El PAC no es transferible y debe regenerarse al cambiar de dueño el módulo
<b>ID()</b>	Devuelve el Sigfox ID del módulo que es único.
<b>Read()</b>	Lee los datos entrantes de Sigfox.

Tabla 12. Funciones de la librería Arduino Sigfox utilizadas para este proyecto.

Para mayor detalle del código empleado véase ANEXO I. CÓDIGO FUENTE UTILIZADO MKRFOX1200.

## **Backend Sigfox**

A partir de ahora, pasaremos a trabajar con la plataforma Backend de Sigfox. Esta plataforma permite la gestión en todo lo relativo a la gestión de grupos, usuarios y dispositivos. Desde esta plataforma se podrá:

- Gestionar usuarios y permisos
- Gestionar grupos de dispositivos
- Comprobar el estado de cada uno de los dispositivos dados de alta y su correspondiente información
- Consultar información sobre los envíos de datos realizados
- Gestionar configuraciones de los dispositivos

Desde el backend de Sigfox, se comprueba el correcto funcionamiento de estos envíos configurados periódicamente. En las siguientes capturas se muestran algunos ejemplos de los datos que se han podido obtener y visualizar en el backend de Sigfox tras la ejecución del piloto.



*Ilustración 18. Mapa de cobertura aproximada extraído del Backend de Sigfox.*

Entre otras cosas, el backend muestra en un mapa la ubicación aproximada del dispositivo. Además, muestra una leyenda de colores de la cobertura en la zona donde se encuentra el dispositivo.

## **Envío de mensajes a SigFox desde Arduino MKRFOX1200**

SigFox es muy estricto cuando hablamos de datos. Como ya se ha comentado anteriormente, en este sentido sólo admite mensajes con un máximo de 12 bytes. Por eso es muy importante ajustarnos al rango del valor que vamos a leer de los sensores.

Para enviar los datos de temperatura y humedad, se enviarán dos datos de tipo *float* al tratarse de valores no enteros. Las variables de tipo *float* ocupan 32 bits, por lo que, en este caso el campo de payload ocupará 64 bits (8 bytes) cumpliendo con las restricciones de Sigfox.

Para comenzar el proceso para transmitir los mensajes utilizamos la función *SigFox.beginPacket()*. Esto abre el canal de comunicación con Sigfox. Lo siguiente es escribir el mensaje con la función *SigFox.write()* a la que pasamos como argumento las variables donde hemos guardado la información.

Para finalizar el proceso, llamamos a la función *SigFox.endPacket()*. Esto completa el proceso de enviar el mensaje a Sigfox. Esta función devuelve un entero. Si el resultado es 1 quiere decir que el mensaje se ha enviado correctamente. Si es un 0 quiere decir que ha habido algún tipo de problema. Para más detalle del código fuente, ver Anexo.

Una vez cargado el código en la placa MKRFOX1200, se envían los datos cada 15 minutos, tal y como se ha realizado la configuración. Para comprobar su correcto funcionamiento, así como la calidad de la señal, se hace uso del backend de Sigfox en el que se puede ver el detalle.

2022-08-04 16:33:12	4084	33330d4200001842			
2022-08-04 16:18:02	4083	9a99094200001442			
2022-08-04 16:02:52	4082	0000084200001042			
2022-08-04 15:47:42	4081	cdcc044200001042			
2022-08-04 15:32:32	4080	6666064200001842			
2022-08-04 15:17:22	4079	6666024200001c42			

*Ilustración 19. Ejemplo de mensajes enviados correctamente a través de Sigfox visualizado desde Backend.*

### **Envío de datos a ThingSpeak**

Dentro de Sigfox se configura una Callback para que cada vez que reciba un mensaje lo envíe de forma automática a ThingSpeak, la plataforma en la nube para el IoT de MathWorks. Esta información la podremos visualizar en cualquier dispositivo en tiempo real. ThingSpeak también ofrece aplicaciones que permiten analizar y visualizar tus datos en MATLAB y actuar sobre los datos.

Un Callback es una llamada a otro servicio. En este caso, la plataforma de Sigfox hace de puente para poder comunicarse con otra plataforma. Para hacer esta llamada se debe tener claro qué tipo de datos se van a transmitir.

Un aspecto clave para el envío correcto de los datos desde Sigfox a otra plataforma, es la correcta configuración del *Custom payload*. Se trata del patrón del mensaje que se transmite. De esta manera, se podrá decodificar la carga útil en variables distintas.

Callbacks

Type **DATA** | **UPLINK**

Channel **URL**

Custom payload config **temperatura::float:32:little-endian humedad::float:32:little-endian**

URL syntax: `http://host/path?id={device}&time={time}&key1={var1}&key2={var2}...`  
Available variables: `device, time, data, seqNumber, deviceTypeId`  
Custom variables: `customData#temperatura, customData#humedad`

Url pattern `https://api.thingspeak.com/update?api_key=HTEGXX4RTXPWZZTX&field1={custom}`

Use HTTP Method **GET**

Send SNI  (Server Name Indication) for SSL/TLS connections

Headers header value

Ilustración 20. Backend para la configuración del Custom Payload de Sigfox.

Además, es necesario configurar la llamada HTTP a ThingSpeak para la correcta recepción y visualización de los datos obtenidos de las mediciones.

```
Callback - OK [X]

[OK]

200 - - #1

GET https://api.thingspeak.com/update?api_key=V0X3YOCFH21W42UF&field1=26.0&field2=54.0
HTTP/1.1
host: api.thingspeak.com
accept-language: fr
accept-encoding: gzip,deflate
accept-charset: UTF-8;q=0.9,*;q=0.7
user-agent: SIGFOX
```

Ilustración 21. Ejemplo de detalle de Callback en Backend de Sigfox.

En la figura puede verse el detalle de uno de los callbacks enviado correctamente a ThingSpeak en el que puede verse la API con la que se comunica, así como los datos que se están enviando.

### **Resultados obtenidos**

Una vez realizadas todas las configuraciones. Se inicia una fase de pruebas, ajustes y correcciones. Durante esta fase, se realizan pruebas en diferentes localizaciones de Zaragoza para comprobar el correcto funcionamiento de Sigfox y la recepción de datos.

Por otro lado, se comienza a realizar pruebas de autonomía. En una primera iteración, haciendo uso de pilas AAA se obtiene una autonomía de las placas MKRFOX1200 de 7 días. Debido a esto, se realiza un trabajo de ajuste y optimización del código y se reconfigura la placa con el objetivo de conseguir mayores autonomías.

Tras esta fase de pruebas y refinamiento, se realiza la soldadura de los diferentes componentes en vista a su puesta en marcha en la localización establecida para llevar a cabo las pruebas de campo.

Por último, ambas placas se trasladan a Sevilla y se colocan en dos localizaciones próximas, tal y como se ha comentado anteriormente. Desde este momento, se comienza a realizar el reporte de los datos medidos de temperatura y humedad.



Ilustración 22. Fotografía de la solución desarrollada en Sigfox para este proyecto colocada en la ubicación final para realizar las pruebas correspondientes.

Ambos sensores se activan en el mismo rango temporal, obteniendo resultados ligeramente diferentes debido a la diferencia de localización.

Sensor 1		Sensor 2	
Fecha de puesta en marcha	30/06/2022	Fecha de puesta en marcha	30/06/2022
Fecha fin envío de datos	26/07/2022	Fecha fin envío de datos	05/08/2022
Paquetes recibidos	2391	Paquetes recibidos	2999
Temperatura máxima registrada	54.9 °C	Temperatura máxima registrada	43.8 °C
Temperatura mínima registrada	15.1 °C	Temperatura mínima registrada	17.5 °C
Humedad máxima registrada	79 g/m <sup>3</sup>	Humedad máxima registrada	85 g/m <sup>3</sup>
Humedad mínima registrada	6 g/m <sup>3</sup>	Humedad mínima registrada	7 g/m <sup>3</sup>

Tabla 13. Resultados obtenidos en el proyecto tras la puesta en marcha de la solución desarrollada en Sigfox.

La fecha de finalización de envío de datos se corresponde con la fecha en que ambas placas dejan de tener autonomía. Como se puede observar, las dos placas igualmente configuradas y con la misma alimentación muestran autonomías diferentes. Esto se debe a la diferencia de las condiciones ambientales de exposición. Concretamente, en la hoja de características de los diferentes componentes de la placa MKRFOX1200 se especifican diferentes consumos de energía (consumos mayores a temperaturas elevadas).

Estos valores obtenidos se corresponden con lo esperado debido al espacio en el que actualmente están ubicados los dispositivos. Se trata de un espacio cerrado sin refrigeración que alcanza temperaturas muy elevadas.

En el backend de Sigfox podemos obtener información detallada de los resultados obtenidos tras la puesta en marcha de la solución desarrollada en Sigfox.

Por un lado, se puede comprobar el correcto funcionamiento en cuanto a la recepción de paquetes desde su fecha de puesta en marcha el 30 de junio hasta que el dispositivo deja de tener autonomía. Diariamente se recibían 96 medidas de temperatura y humedad, correspondiéndose con lo esperado según la configuración de las placas MKRFOX1200.

Por otro lado, con una tasa de transmisión de 100 bps, la sensibilidad máxima de las antenas es de -142 dBm. Desde el backend, podemos ver como el nivel de señal recibido durante el periodo de ejecución de la prueba es bueno. Esto se debe al uso de tecnología Ultra Narrow Band (UNB). Ofrece un excelente balance de enlace debido a la concentración de potencia en una banda de frecuencia estrecha.

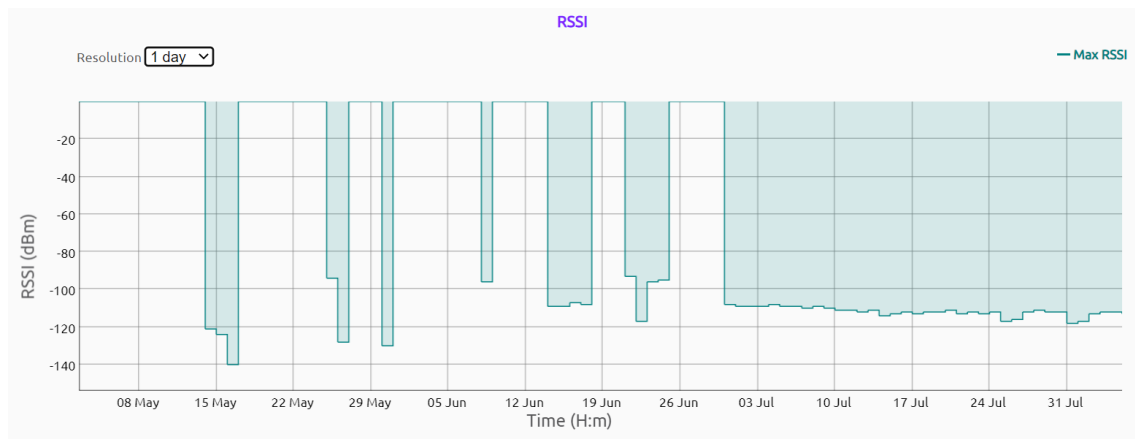


Ilustración 23. Valores de RSSI de la señal extraídos del Backend de Sigfox.

En lo que respecta a la visualización de datos, a través de los callbacks configurados a ThingSpeak se consultan los datos en tiempo real. Además, se permite exportar todos los datos registrados para su posterior análisis y tratamiento.

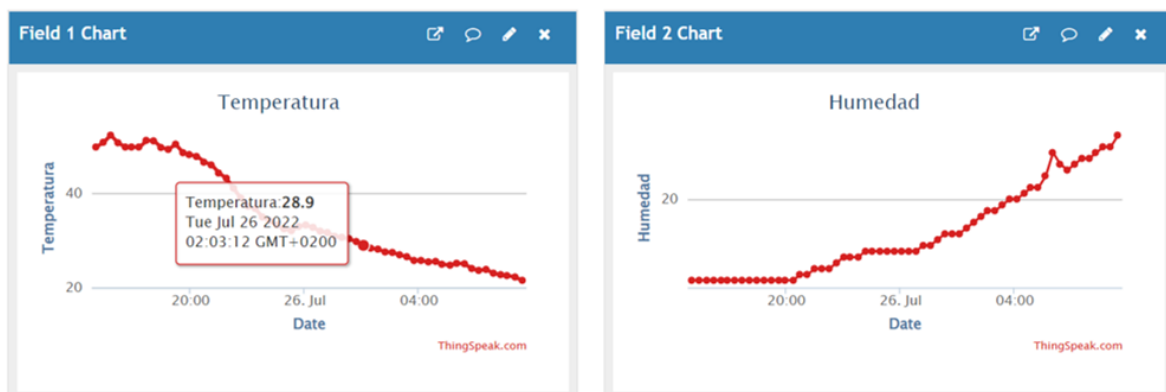


Ilustración 24. Ejemplo de visualización de los datos de uno de los sensores de ThingSpeak.

A continuación, se muestran algunas de las gráficas representadas a partir de los registros de datos obtenidos a través de los sensores y recibidos gracias a Sigfox.

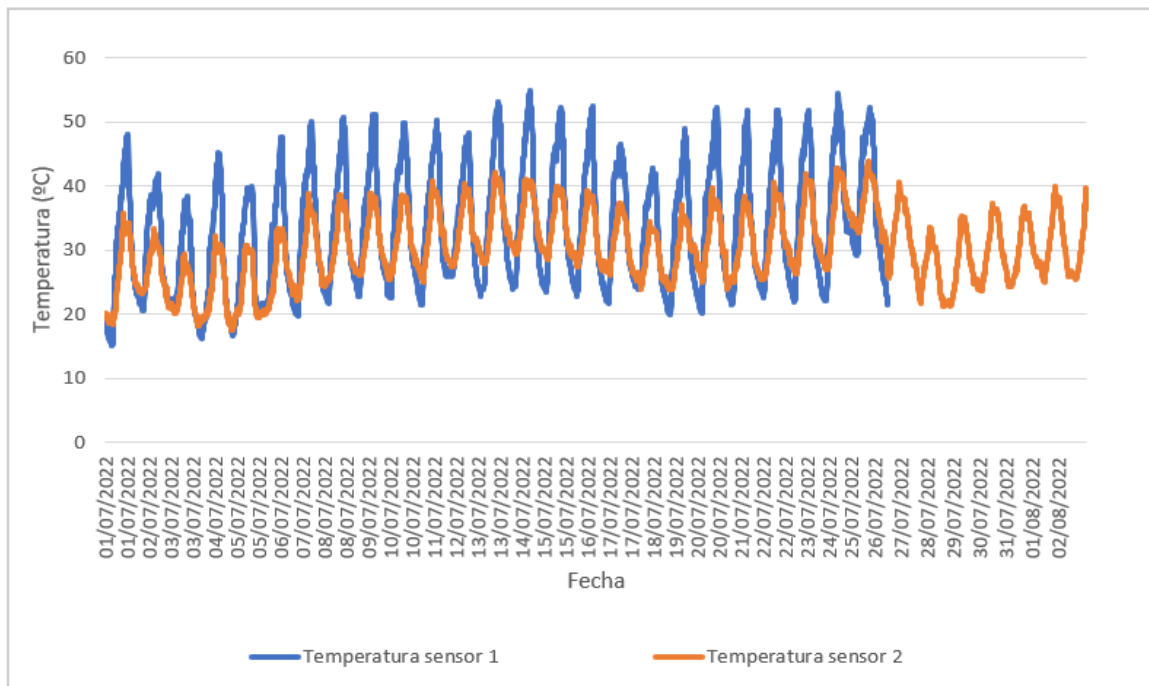


Ilustración 25. Valores de temperatura obtenidos a través de los dos sensores durante el tiempo de vida de la solución desarrollada en Sigfox.

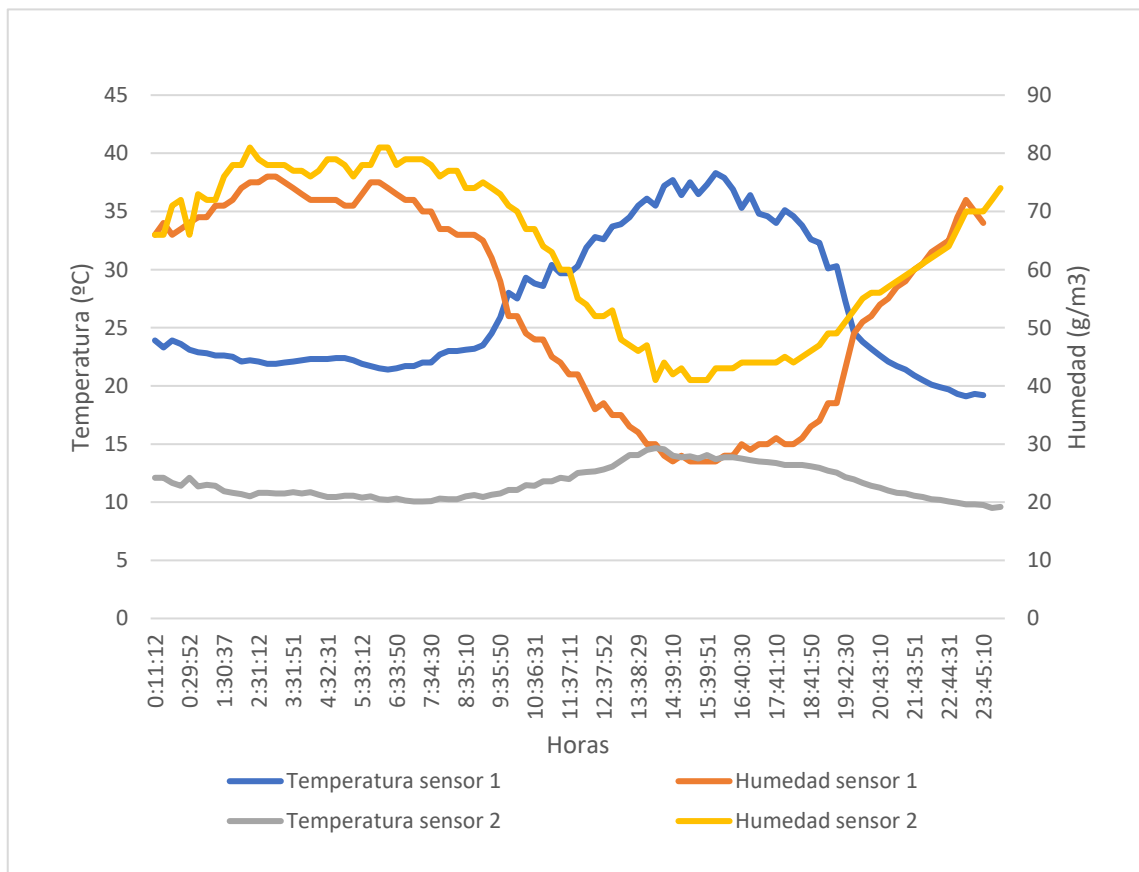


Ilustración 26. Comparativa de los valores de temperatura y humedad obtenidos por ambos sensores en 24 horas.

## 6. Conclusiones y líneas futuras

En el presente proyecto se ha realizado un estudio sobre las tecnologías LPWAN en cuanto a características de consumo energético, capacidades de transmisión, sencillez de manejo y disponibilidad en el mercado. Debido a la variedad de estándares, el principal objetivo de este estudio se centra en facilitar la elección del estándar de comunicación que mejor se adecue a la casuística de cada proyecto del Grupo de Tecnologías Fotónicas. De esta forma, se podrá disponer de la información y de las herramientas necesarias para seleccionar la tecnología apropiada a cada proyecto. Concretamente, se han evaluado las principales características de dos de estas tecnologías disponibles actualmente en el mercado: LoRaWAN y Sigfox.

Una vez realizado este estudio y en base al conocimiento adquirido en el mismo, se ha elegido la solución Sigfox como la más adecuada a la problemática concreta del proyecto “Técnicas radar avanzadas para la medida en tiempo real y sin contacto de caudales de agua en canales abiertos y ríos (FlumenTech)”. Este proyecto está basado en múltiples sensores radar para medida del parámetro de velocidad del agua a diferentes profundidades en ríos, colocados en puntos remotos sin acceso a red de datos fija, con exigencias de bajo consumo.

Para comprobar la viabilidad del uso de Sigfox, se ha implementado un sistema piloto Sigfox capaz de reportar datos medidos por sensores (temperatura y humedad por sencillez), transmitirlos y visualizarlos en ThingSpeak. Para ello, se han aprendido todos los detalles sobre la instalación de un dispositivo en la red de Sigfox; desde la elección de los componentes hardware necesario hasta su posterior configuración, instalación y puesta en marcha. Este sistema piloto Sigfox se ha probado en una ubicación remota a la que se ha tenido acceso, la planta solar PS10 de Sanlúcar la Mayor, reportando datos a un centro de control en Zaragoza.

Mediante la ejecución y puesta en marcha de esta solución desarrollada, se ha podido comprobar la validez de todo lo establecido anteriormente, detectando posibles imprevistos o corroborando lo afirmado en el diseño de acuerdo con las necesidades y objetivos del proyecto. Una de las conclusiones de esta prueba es la vulnerabilidad en cuanto a consumo de energía de los componentes hardware en situaciones de temperaturas altas, que reducen considerablemente las premisas iniciales de tiempo de vida sin recarga.

A partir de los resultados obtenidos, se puede concluir que la consecución del proyecto se valora como positiva ya que se ha conseguido lograr los objetivos fijados, y el proyecto realizado servirá para futuros proyectos de características similares.

En lo que respecta a líneas futuras en Sigfox, se valoran y plantean una serie de mejoras para conseguir un incremento de autonomía de los dispositivos. Para ello, se deberá trabajar en las siguientes líneas:

- Realización de pruebas en condiciones de temperatura y humedad controladas para ratificar y cuantificar su vulnerabilidad en cuanto a consumo de energía.
- Realización de pruebas con disminución de la periodicidad de envío de datos para contrastar con el estudio teórico y poder realizar un modelado del consumo de manera empírica.
- Trabajar en una optimización del código de configuración de las placas MKRFOX1200 para el envío de datos.
- Realización de pruebas con sistema de recarga de baterías por célula solar.

## 7. Bibliografía

- [1] "XBee," 2020. <https://en.wikipedia.org/wiki/XBee>
- [2] B. Ghazal and K. Al-Khatib, "Smart home automation system for elderly, and handicapped people using XBee," *Int. J. Smart Home*, vol. 9, no. 4, pp. 203–210, 2015, doi: 10.14257/ijsh.2015.9.4.21.
- [3] "ZigBee/XBee," 2016. <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/2016/11/16/zigbeexbee/>
- [4] R. Adeva, "Tecnologías inalámbricas: diferencias y usos de WiFi, Bluetooth, Zigbee y Z-Wave," 2020. <https://www.adslzone.net/reportajes/tecnologia/estandares-conexion-inalambrica/>
- [5] K. D, "¿Qué es la red inalámbrica WWAN?- Características, función y campos de uso," 2021, [Online]. Available: <https://aprendecomohacerlo.com/red-inalambrica-wwan-caracteristicas-funcion-campos-uso>
- [6] F. Campos, "LPWAN: qué son y para qué se utilizan," 2020. <https://www.m2mlogitek.com/lpwan-que-son-y-para-que-se-utilizan/>
- [7] N. Naik, "LPWAN Technologies for iot systems: choice between ultra narrow band and spread spectrum," *4th IEEE Int. Symp. Syst. Eng. ISSE 2018 - Proc.*, 2018, doi: 10.1109/SysEng.2018.8544414.
- [8] A. Bassi, "Introducción a Protocolos IoT," 2021. [https://www.gotoiot.com/pages/articles/iot\\_protocols\\_intro/index.html](https://www.gotoiot.com/pages/articles/iot_protocols_intro/index.html)
- [9] "Sigfox España." <https://www.sigfox.es/>
- [10] L. del V. Hernández, "Introducción Arduino MKRFOX1200 SigFox y redes LPWAN", [Online]. Available: <https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/arduino-mkrfox1200-sigfox-lpwan/>
- [11] "Tecnología Sigfox." <https://www.sigfox.es/?que-es-iot>
- [12] "¿Qué es Sigfox?", [Online]. Available: <https://sigfox.com.py/que-es-sigfox/>
- [13] "[IoT] Sigfox - Arquitectura de red," 2018. <https://www.youtube.com/watch?v=VPEEbBylia0>
- [14] S. Support, "Downlink information." <https://support.sigfox.com/docs/downlink-information>
- [15] "Admiral Blue." <https://www.sigfox.com/en/admiral-blue>
- [16] "Cobertura Sigfox." <https://www.sigfox.com/en/coverage>
- [17] "Sigfox Equipamiento." <https://www.sigfox.es/equipamiento>
- [18] "¿Qué es SigFox y cómo funciona?," 2017, [Online]. Available: <https://blog.330ohms.com/2017/05/11/que-es-sigfox-y-como-funciona/>
- [19] "Sigfox. IoT. Industria 4.0," 2020. <https://www.aprendiendoarduino.com/tag/sigfox/>
- [20] "Configuraciones Radio Sigfox", [Online]. Available: <https://build.sigfox.com/sigfox-radio-configurations-rc>

- [21] B. M. Flores, "Sigfox: La red del IoT," 2019, [Online]. Available: <https://agelectronica.blog/2019/09/18/sigfox-la-red-del-iot/>
- [22] Blockchainiotnews, "Como funciona la red LPWAN Sigfox," 2018, [Online]. Available: <https://es.paperblog.com/como-funciona-la-red-lpwan-sigfox-5195930/>
- [23] AprendiendoArduino, "Arduino y Sigfox," 2018, [Online]. Available: <https://www.aprendiendoarduino.com/2018/03/05/arduino-y-sigfox/>
- [24] "ATA8520", [Online]. Available: <https://www.microchip.com/en-us/product/ATA8520>
- [25] L. del V. Hernández, "Consumo de corriente en proyectos del IoT con Arduino MKRFOX1200", [Online]. Available: <https://programarfacil.com/podcast/consumo-mkrfox1200/>
- [26] P. Martres, "Particularidades de la red Sigfox", [Online]. Available: <https://ude.edu.uy/particularidades-de-la-red-sigfox/>
- [27] T. D. E. L. Tfg, N. Titulaci, J. Carlos, V. Revelles, and M. Fecha, "Trabajo final de grado," 2018.
- [28] "Pila AAA", [Online]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Pila\\_AAA](https://es.wikipedia.org/wiki/Pila_AAA)
- [29] "LoRa Alliance", [Online]. Available: <https://lora-alliance.org/>
- [30] "Conceptos de actualidad: LoRa y LoRaWAN," 2021, [Online]. Available: <https://www.2cigroup.com/es/conceptos-de-actualidad-lora-y-lorawan/>
- [31] J. Jimenez, "Diferencias entre redes LoRaWAN públicas y privadas," 2020, [Online]. Available: <https://www.redeszone.net/tutoriales/redes-wifi/redes-lorawan-publicas-privadas/>
- [32] "The Things Network", [Online]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org>
- [33] "LoRaWAN Airtime Calculator", [Online]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/airtime-calculator>
- [34] J. Rivas, "Parámetros de transmisión de LoRa," 2021, [Online]. Available: <http://lora-panama.com/parametros-de-transmision/>
- [35] "The Things Network - Duty Cycle", [Online]. Available: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/duty-cycle/>
- [36] M. Angel, M. Latorre, L. Marcela, B. Márquez, and J. Hernández-gutiérrez, "Redes LoRaWAN. Revisión de componentes funcionales en aplicaciones IoT."
- [37] G. Carracedo, "Ciberseguridad en LoRa y LoRaWAN – Contexto y un poco de historia," 2020, [Online]. Available: <https://www.tarlogic.com/es/blog/ciberseguridad-en-lora-y-lorawan-contexto-y-un-poco-de-historia/>
- [38] U. Católica, "Implementación y estudio de una red LoRaWAN," 2018.
- [39] A. Spiess, "Sigfox vs. LoRaWAN (TTN): Which one is better?", [Online]. Available: [https://www.youtube.com/watch?v=\\_Pj0nGPgN3s](https://www.youtube.com/watch?v=_Pj0nGPgN3s)
- [40] "WEBINAR: Differences between Sigfox, LoRa and NB-IoT", [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=vqHOyQK6jJ8&t=716s>
- [41] "ThingSpeak", [Online]. Available: <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/2018/11/23/thingspeak/>

- [42] “Technical Quickstart”, [Online]. Available: <https://build.sigfox.com/technical-quickstart>
- [43] “Introducing the Arduino MKRFOX1200,” 2017, [Online]. Available: <https://blog.arduino.cc/2017/04/18/introducing-the-arduino-mkrfox1200/?queryID=undefined>
- [44] “MKRFOX1200”, [Online]. Available: <https://docs.arduino.cc/hardware/mkr-fox-1200>



## Anexo I. Código fuente utilizado.

### Código para la obtención del ID y PAC

```
#include <SigFox.h>
#include <ArduinoLowPower.h>

/*

SigFox First Configuration

This sketch demonstrates the usage of MKRFox1200 SigFox module.

Since the board is designed with low power in mind, it depends directly on ArduinoLowPower library

This example code is in the public domain.

*/

void setup() {

  Serial.begin(9600);

  while (!Serial) {};

  // Uncomment this line and comment begin() if you are working with a custom board

  //if (!SigFox.begin(SPI1, 30, 31, 33, 28, LED_BUILTIN)) {

  if (!SigFox.begin()) {

    Serial.println("Shield error or not present!");

    return;

  }

  // Enable debug led and disable automatic deep sleep

  SigFox.debug();

  String version = SigFox.SigVersion();

  String ID = SigFox.ID();

  String PAC = SigFox.PAC();

  // Display module information

  Serial.println("SigFox FW version " + version);

  Serial.println("ID = " + ID);
  Serial.println("PAC = " + PAC);
  Serial.println("");

  Serial.print("Module temperature: ");

  Serial.println(SigFox.internalTemperature());

  delay(100);

}

void loop()
{
}
```

## Código cargado en las placas MKRFOX1200 para la obtención y envío de datos

```
#include <SigFox.h>
#include <ArduinoLowPower.h>
#include "DHT.h"

#define DHTTYPE DHT11 // DHT 11
// #define DHTTYPE DHT22 // DHT 22 (AM2302), AM2321
// #define DHTTYPE DHT21 // DHT 21 (AM2301)

const int DHTPin = 4; // Pin conectado
DHT dht(DHTPin, DHTTYPE);

// Estructura para almacenar datos
typedef struct __attribute__((packed)) sigfox_message {
    float bmpt;
    float bmpH;
} SigfoxMessage;

SigfoxMessage msg;

void setup() {
    // Configuración del monitor serie
    Serial.begin(9600);
    delay(500);

    dht.begin();

    // Iniciamos módulo SigFox
    // Esto lo hacemos para comprobar que podemos conectarnos a SigFox
    // En caso contrario no tiene sentido continuar
    if (!SigFox.begin()) {
        Serial.println("Error al iniciar módulo SigFox");
        return;
    }

    // Apagamos el módulo
    SigFox.end();

    // Activamos el modo debug en el módulo SigFox
    SigFox.debug();
}

void loop() {
    // Iniciamos el módulo SigFox
    SigFox.begin();
    // Esperamos 100 ms hasta que se conecte
    delay(2000);

    // Lectura de temperatura y humedad
    float h = dht.readHumidity();
    float t = dht.readTemperature();
    if (isnan(h) || isnan(t)) {
        Serial.println("Failed to read from DHT sensor!");
        return;
    }
}
```

```
// Mostamos en el monitor serie la temperatura
Serial.print("Temperatura: ");
Serial.println(t);
Serial.print("Humedad: ");
Serial.println(h);

// Limpieza de todas las interrupciones pendientes
SigFox.status();
delay(1);

// Almacenamos la información para enviar
msg.bmpt = t;
msg.bmph = h;

// Comenzamos el proceso para transmitir el mensaje
SigFox.beginPacket();

// Escribimos el mensaje
SigFox.write(msg);

// Terminamos el proceso de enviar el mensaje
int resultado = SigFox.endPacket();

// Comprobamos el resultado
if(resultado == 0){
    Serial.println("Mensaje enviado !!!");
}else{
    Serial.println("Error al enviar el mensaje");
}

// Apagamos el módulo
SigFox.end();

//Dormimos la placa 15 minutos hasta el proximo envio de datos
LowPower.sleep(15 * 60 * 1000);
}
```