



TELECOMUNICACIÓN

Campus Sur  
POLITÉCNICA

# ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y SISTEMAS DE TELECOMUNICACIÓN

## PROYECTO FIN DE GRADO

**TÍTULO:** Aplicación para Transmisión de Datos en Internet de las Cosas

**AUTOR:** Miriam Laina Mingarro

**TITULACIÓN:** Grado en Ingeniería de Sistemas de Telecomunicación

**TUTOR:** Francisco Javier Ortega

**DEPARTAMENTO:** Teoría de la Señal y Comunicaciones

VºBº

**Miembros del Tribunal Calificador:**

**PRESIDENTE:** Salvador Sánchez

**TUTOR:** Francisco Javier Ortega

**SECRETARIO:** José Manuel Pardo

**Fecha de lectura:** 26 de Julio de 2018

**Calificación:**

El Secretario,



## **Resumen**

Este proyecto pretende establecer una serie de parámetros y condiciones idóneas para la transmisión de datos en el ámbito de Internet de las cosas, para lo que se sirve de un kit con dos módulos transmisores y receptores que cumplen las características principales empleadas en este tipo de comunicación. Este kit se empleará para realizar una serie de pruebas que permitan obtener unas conclusiones veraces.

Para poder realizar las pruebas de forma adecuada, se debe contextualizar la tecnología empleada y enmarcarla dentro del mundo de Internet de las cosas, que es extremadamente amplio y abarca múltiples aspectos, algunos de los cuales no resultan de interés para el presente proyecto.

Existen diversas especificaciones y tecnologías aplicables a Internet de las cosas, por lo que este proyecto se encarga de estudiarlas, compararlas y exponer sus características más relevantes, para después emplear una de ellas en un banco de pruebas del que se pueda extraer información relevante.

El aspecto de Internet de las cosas que se quiere destacar y estudiar en este caso es el relativo a la transmisión de datos. Se presta especial atención a los niveles de potencia usados para transmitir, así como en los niveles de potencia recibidos, y en la calidad de la señal, así como en los errores que pudiera haber en los mensajes que se envíen. No es parte de este proyecto estudiar el contenido de la información a transmitir.

El banco de pruebas desarrollado en este proyecto contempla la toma de medidas relativas a potencia recibida, relación señal a ruido y tasa de error en tres ámbitos distintos, con cinco configuraciones de parámetros de los dispositivos distintas, para cubrir la mayor cantidad de casos posible que se pueden desarrollar con el material empleado.

También se hace un pequeño estudio de protocolo de comunicaciones que utilizan los módulos transmisores y receptores que se utilizan para comunicarse con el ordenador, puesto que se trata de la herramienta que permite programar el banco de pruebas y recoger los resultados.

Con los datos obtenidos, primero se procesan de manera que pueda procederse a realizar un análisis que permita determinar que configuración es la más adecuada para cada tipo de transmisión y qué importancia tiene cada uno de los parámetros en los resultados obtenidos.

Este análisis permite establecer que debido a la variedad de aplicaciones que tiene el mundo de Internet de las cosas, existe también una amplia variedad de posibilidades a la hora de transmitir los datos y que resulta imprescindible determinar qué parámetros y características son prioritarias antes de elegir emplear una determinada tecnología o especificación, puesto que una buena elección de ella redundará en un buen resultado que satisfaga las necesidades del cliente.

El proyecto pretende ser una guía de transmisión de datos para Internet de las cosas, no sólo desde un punto de vista teórico, sino principalmente práctico, puesto que analiza en profundidad las características más relevantes de un sistema de comunicaciones y las contextualiza dentro del mundo de IoT.



## **Abstract**

This project expects to establish a series of ideal parameters and conditions for data transmission in the Internet of Things world. It uses a kit consisting of two radio modules that can transmit information obeying the main characteristics of this communication. This kit will be used to make some tests that allow obtaining true conclusions on the issue.

To carry out the test in an appropriate way, the technology used must be put in context. It is necessary to delimit it in the Internet of Things world because IoT is extremely wide and it covers multiple aspects, some of them not related to the project.

Diverse specifications and technologies related to the Internet of Things exist, so it is necessary to study them, compare them and explain their most relevant characteristics. One of the analysed technologies will be used to carry out the test bench which will provide interesting information.

The facet of the Internet of Things that are going to be outlined and studied in this project is data transmission. Power levels, signal quality, and error rate are the analysed parameters and the key of this project. However, the information sent is not relevant.

The carried-out test bench measures power level, signal to noise ratio and packet error rate in three different scenarios, using five different configurations of parameters of the radio modules. This allows studying a lot of possible cases and combinations.

A small study of the communication protocol used by the modules to communicate with the computer is also done. This study is important because the protocol is the tool that makes possible the visualization of the obtained data.

Once the measures are obtained, they must be processed. After processing them, they are analysed to determine which configuration is the most appropriate for each kind of communication and what is the importance of each parameter to the results obtained.

This analysis permits to establish that due to the variety of applications that the Internet of Things has there is also a great number of possibilities to configure the equipment used to transmit data. It is essential to determinate which parameters and characteristics are relevant before choosing one technology because a good choice will carry a good result.

The project hopes to be a data transmission guide for the Internet of Things, in a theoretical and practical way. It deeply analyses the most relevant characteristics of a communications system and relates them to the Internet of Things.



# Contenido

Resumen .....	3
Abstract .....	5
Acrónimos .....	9
Introducción .....	11
Marco tecnológico.....	13
1. Definición de Internet de las cosas.....	13
2. Aplicaciones de Internet de las cosas .....	13
3. Especificaciones 3GPP.....	14
3.1. Extended Coverage GSM for Internet of Things .....	14
3.2. Narrowband Internet of Things .....	14
3.3. LTE Machine Type Communication.....	15
3.4. Seguridad.....	15
4. Tecnologías LPWA a estudio.....	16
4.1. Sigfox .....	16
4.2. LoRa .....	18
5. Comparativa .....	20
6. Otras especificaciones .....	22
6.1 Z-Wave.....	22
6.1 ZigBee .....	22
6.3 WirelessHART .....	23
Especificaciones del diseño.....	25
1. Starter-Kit SK-iM880A.....	25
2. Modulación LoRa.....	26
2.1 Ancho de banda de la modulación .....	28
3. WiMOD LR Studio .....	29
3.1 Radio Link Test.....	29
3.2 Data Link Test.....	30
4. WiMOD LoRaWAN DevTool .....	31
Solución propuesta .....	33
1. Planteamiento .....	33
2. Realización.....	34
Resultados .....	37
1. Intercambio de mensajes HCI .....	37
2. 1 metro .....	41
2.1 Configuración 1.....	41

## Aplicación para Transmisión de Datos en Internet de las Cosas

2.2	Configuración 2.....	42
2.3	Configuración 3.....	43
2.4	Configuración 4.....	44
2.5	Configuración 5.....	45
2.6	Resumen.....	46
3.	40 metros.....	46
3.1	Configuración 1.....	47
3.2	Configuración 2.....	49
3.3	Configuración 3.....	50
3.4	Configuración 4.....	52
3.5	Configuración 5.....	54
3.6	Resumen.....	56
4.	200 metros.....	57
4.1	Configuración 1.....	57
4.2	Configuración 2.....	59
4.3	Configuración 3.....	61
4.4	Configuración 4.....	63
4.5	Configuración 5.....	65
4.6	Resumen.....	67
5.	Análisis de resultados.....	68
	Planos.....	71
	Presupuesto.....	75
	Conclusiones.....	77
	Bibliografía.....	79
	Anexos.....	81
1.	Comunicación HCI.....	81
1.1	Flujo de mensajes.....	81
1.2	Formato de los mensajes HCI.....	81
2.	Procesado de datos.....	82
	Índice de ilustraciones y tablas.....	85



## **Acrónimos**

AKA (*Authentication and Key Agreement*): Acuerdo de autenticación y clave.

CIoT (*Cellular IoT*): Internet de las cosas celular.

CRC (*Cyclic Redundancy Check*): Verificación por redundancia cíclica.

CSS (*Chirp Spread Spectrum*): Chirp de espectro ensanchado.

DBPSK (*Differential Binary Phase Shift Keying*): Modulación diferencial binaria por desplazamiento de fase.

DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*): Espectro ensanchado por secuencia directa.

EDGE (*Enhanced Data Rates for GSM Evolution*): Tasas de datos mejoradas para la evolución del GSM o GPRS mejorado.

eDRX (*extended Discontinuous Reception*): Modo extendido de recepción discontinua.

EPS (*Evolved Packet System*): Sistema evolucionado de paquetes.

ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*): Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones.

ETSIST: Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sistemas de Telecomunicación.

FSK (*Frequency Shifting Keying*): Modulación por desplazamiento de frecuencia.

GFSK (*Gaussian Frequency Shift Keying*): Modulación por desplazamiento de frecuencia gaussiana.

GSMK (*Gaussian minimum shift keying*): Modulación por desplazamiento mínimo gaussiano.

GPRS (*General Packet Radio Service*): Servicio general de paquetes vía radio.

GSM (*Global System for Mobile communications*): Sistema global para las comunicaciones móviles.

HART (*Highway Addressable Remote Transducer*): Transductor remoto direccionable de alta velocidad.

HCI (*Host Controller Interface*): Interfaz controladora del host.

ID (*Identifier*): Identificador.

IoT (*Internet of Things*): Internet de las cosas.

LPWAN (*Low Power Wide Area Network*): Red de área amplia de baja potencia.

LTE (*Long Term Evolution*).

OSI (*Open System Interconnection*): Interconexión de sistemas abiertos.

PAPR (*Peak to Average Power Ratio*): Índice de potencia pico a potencia media.

PER (*Packet Error Rate*): Tasa de paquetes erróneos.

PSM (*Power Saving Mode*): Modo de ahorro de energía.

R-FDMA (*Random-Frequency Division Multiple Access*): Acceso múltiple aleatorio por división de frecuencia.

RSSI (*Received Signal Strength Indicator*): Indicador de fuerza de la señal recibida.

SLIP (*Serial Line Internet Protocol*): Protocolo de Internet serie en línea.

SNR (*Signal-to-Noise Ratio*): Relación señal a ruido

TMSI (*Temporary Mobile Subscriber Identity*): Identificador móvil temporal de abonado.

UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*): Transmisor-Receptor Asíncrono Universal

UE (*User Equipment*): Equipamiento de usuario.

UICC (*Universal Integrated Circuit Card*): Tarjeta de circuito integrado universal.

UNB (*Ultra-NarrowBand*): Banda ultra estrecha.

WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*): Acceso múltiple por división de código de banda ancha.

WSN (*Wireless Sensor Network*): Red de sensores inalámbricos

3GPP (*3rd Generation Partnership Project*): Proyecto Asociación de Tercera Generación.

8PSK (*Phase Shift Keying*): Modulación por desplazamiento de fase.

## **Introducción**

El mundo de Internet de las cosas está ganando terreno e importancia en la actualidad, por lo que estudiar su funcionamiento y proporcionar soluciones que aprovechen todas las virtudes que esta tecnología posee es esencial.

El poco consumo energético de estos sistemas y su aprovechamiento del ancho de banda hacen que sea fundamental establecer una jerarquía de estos y realizar una comparativa profunda.

El principal objetivo de este proyecto es diseñar un banco de pruebas para estudiar la transmisión de datos que permita ver qué parámetros de radiocomunicaciones son importantes. Además, se quiere emplear una tecnología emergente como LoRa, para destacar las ventajas que tiene frente a otras alternativas

Asimismo, este proyecto quiere comparar, analizar y ordenar según sus características y relevancia los principales sistemas de transmisión empleados actualmente en el mundo de Internet de las cosas. De este modo, se podrá justificar la elección de la tecnología empleada para realizar las pruebas diseñadas.

Para desarrollar este proyecto, en primer lugar, se exponen las principales especificaciones de 3GPP para IoT, después se explican las dos principales tecnologías LPWAN y se comparan con las ya mencionadas especificaciones. También se describen tres tecnologías más cuya relevancia es menor, pero que son ejemplos interesantes.

Posteriormente se detallan las características de todos los recursos que se van a emplear para realizar el banco de pruebas y analizar las medidas y se definen los test que se van a implementar.

Seguidamente, se recoge el detalle de las pruebas realizadas, los resultados obtenidos y el análisis de estos para poder extraer las conclusiones que permitan encuadrar el proyecto.



## **Marco tecnológico**

### **1. Definición de Internet de las cosas**

El mundo de Internet de las cosas es ya una realidad. Se trata de una tecnología en constante crecimiento y expansión que alcanza muchísimas áreas y se desarrolla en diversos ámbitos. Por todo ello, es conveniente tratar de definir de qué se trata exactamente.

Una definición genérica podría decir que IoT es la interacción entre lo físico y lo digital. El mundo digital interactúa con el mundo físico usando principalmente sensores y actuadores. Otra definición afirma que Internet de las cosas se trata de un paradigma en el que la capacidad de cálculo y comunicación están en el interior de cualquier tipo de objeto que se pueda concebir. Existen múltiples definiciones de IoT, que abarcan desde pequeños sistemas localizados, restringidos a una ubicación específica hasta un gran sistema global distribuido, compuesto por varios sistemas complejos.

La información que se envíe a través de aplicaciones IoT debe cumplir una serie de características generales:

- Bajo consumo energético
- Baja potencia
- Confirmación de recepción de mensajes no necesaria
- Uso eficiente del ancho de banda

Las características de esta tecnología hacen necesaria una comparativa entre los principales sistemas que la emplean para establecer un entorno de trabajo adecuado en el que desarrollar el presente proyecto.

Se van a presentar las distintas especificaciones que 3GPP ha desarrollado en el ámbito de Internet de las cosas: Extended Coverage GSM for IoT, Narrowband IoT y LTE-Machine Type Communication. Así mismo, se abordarán otras dos especificaciones: Sigfox y LoRa, por ser las dos más importantes dentro del área de LPWAN. En último lugar, se hablará de tres tecnologías más, con menor relevancia, pero que sirven para poner de manifiesto la gran variedad de opciones que hay en el mundo de Internet de las cosas.

El objetivo de este análisis es ofrecer un buen resumen del estado actual de las tecnologías en las que se fundamenta el Internet de las cosas y así ayudar en la toma de decisiones relacionadas con este mundo.

### **2. Aplicaciones de Internet de las cosas**

Existen múltiples aplicaciones de Internet de las cosas, que pueden agruparse de la siguiente manera:

- Seguridad
- Control de calidad y de gestión
- Monitorización y seguimiento

Estas áreas son comunes a distintas aplicaciones como la domótica, la industria energética, la ganadería o la agricultura. Cada una de ellas se beneficia de las ventajas que resulten relevantes para su propósito.

IoT utiliza dispositivos electrónicos capaces de medir magnitudes físicas o químicas y transformarlas en señales eléctricas (sensores). Por otro lado, también utiliza dispositivos capaces de utilizar señales eléctricas para activar un determinado proceso (actuadores). Estos dos tipos de dispositivos combinados con la capacidad de conexión forman la capa de hardware de IoT.

Las diversas posibilidades de aplicación de Internet de las cosas hacen que el proceso de elección de sistema de transmisión de datos sea especialmente sensible y deba hacerse con todo el detenimiento necesario.

### **3. Especificaciones 3GPP**

3GPP ha marcado una serie de objetivos que las tres especificaciones deben cumplir:

- Disminuir la complejidad y el coste del UE
- Disminuir el consumo energético
- Mejorar la cobertura (entre 15 y 20 dB)

Además, también se han definido unos objetivos más específicos para Extended Coverage GSM for IoT y Narrowband IoT:

- Proporcionar una tasa de datos de al menos 160 bps con una cobertura de 20 dB y un alcance mayor que el de GPRS.
- Escalabilidad para poder dar soporte a un gran número de MTC (más de 50.000 por celda).
- Mantener baterías con diez años de vida con una capacidad de 5 W/h.
- Reducir la complejidad de la red
- Evitar impactos negativos en la herencia de los sistemas GSM, LTE y WCDMA y adherirse a sus requerimientos espectrales.
- Minimizar el impacto en el hardware de las estaciones base de GPRS y EDGE.
- Usar un modelo simple de calidad de servicio.

#### **3.1. Extended Coverage GSM for Internet of Things**

Se trata de una tecnología basada en EDGE y diseñada para tener una gran capacidad, un largo alcance, poco consumo de energía y una baja complejidad a la hora de implementar sistemas celulares de IoT. Emplea modulaciones GSMK y 8PSK

Puede introducirse en redes GSM existentes sin necesidad de tener recursos exclusivamente dedicados a IoT. En cuanto a los dispositivos, puede emplearse en plataformas existentes de EGPRS o en versiones básicas de los mismos para reducir la complejidad de la red.

#### **3.2. Narrowband Internet of Things**

Esta tecnología reutiliza varios principios y bloques constructivos de la capa física de LTE y de las capas de protocolos de alto nivel. Está diseñada para ofrecer una cobertura extensa en

comparación a las redes GSM tradicionales y mejorar la capacidad de la red en zonas de mala cobertura mediante transmisiones de un único tono.

Para poder cumplir con los requerimientos de complejidad baja de los dispositivos y la extensa cobertura se han tenido que diseñar nuevos canales de sincronismo y acceso aleatorio.

La larga duración de las baterías es posible gracias al uso de determinados tipos de comunicación como PSM o eDRX y también gracias a algunas características de la capa física como la PAPR.

La complejidad de los dispositivos que emplean esta tecnología puede ser más baja que los que usan GSM debido a los cambios en las señales de sincronismo y a la simplificación de los procedimientos de la capa física, que facilitan el procesamiento de los datos recibidos, haciendo que se reduzcan costes. Narrowband IoT puede coexistir con LTE y en su modo de operación autónomo, con 2G, 3G y 4G.

### **3.3. LTE Machine Type Communication**

El objetivo principal de esta tecnología es reducir la complejidad de los dispositivos para que sea comparable a la de una estación móvil de GSM o GPRS, pudiendo reutilizar las instalaciones de LTE. Esta tecnología se desarrolla para permitir que dispositivos de Internet de cosas puedan conectarse directamente a una red 4G.

Su ancho de banda está limitado a seis bloques de recurso físicos (1,08 MHz) y debido a ello, se ha implementado un nuevo canal de control y un mecanismo de salto en frecuencia. Sin embargo, los sistemas de señalización y sincronización, así como la gestión de la información del sistema es heredada de LTE, por lo que estos aspectos no se han tenido que rediseñar.

También se ha especificado una nueva opción de amplificador de potencia de 20 dBm que junto al resto de reducciones de complejidad ayudan a que los sistemas puedan integrarse y se reduzcan costes.

Esta tecnología permite extender la vida de las baterías más de diez años en múltiples casos de comunicación de tipo máquina como la PSM, eDRX, CIoT y la EPS.

Incluso con la reducción de complejidad mencionada anteriormente, los UEs ofrecen características similares a las de los UEs de LTE, como modos de conexión con movilidad, planificación eficiente o latencia baja de paquetes en modo conectado. Todas estas características hacen posible la integración de voz en las aplicaciones IoT.

Se trata de una tecnología que está empezando a desplegarse, por ejemplo, en Estados Unidos de la mano de la empresa Verizon.

### **3.4. Seguridad**

Las tres tecnologías expuestas proporcionan mecanismos de seguridad similares que incluyen autenticación mutua de la red y los dispositivos, canales de comunicación seguros y almacenamiento seguro de la identidad de los dispositivos y sus credenciales.

Todas se sirven del uso de una UICC en los dispositivos implicados para que pueda haber una autenticación mutua. También emplean codificación de mensajes mediante los algoritmos

KASUMI y SNOW 3G para asegurar la protección de la integridad y de los datos personales de los usuarios de los sistemas.

## 4. Tecnologías LPWA a estudio

En este apartado se pretende detallar las dos tecnologías LPWA más relevantes actualmente, para así poder compararlas después con las especificaciones 3GPP y establecer una jerarquía.

### 4.1. Sigfox

Sigfox es un operador global de servicios de Internet de las cosas que tiene sus propias redes desplegadas y que presta servicio a las compañías que así lo requieran.

Se trata de una variación del sistema celular que permite a dispositivos conectarse a un punto de acceso mediante UNB.

Utiliza 200 kHz de la banda de los 868 a los 870 MHz para las transmisiones de datos, ya que esta no necesita licencia.

Los sistemas inalámbricos de Sigfox envían una cantidad muy pequeña de datos (12 bytes en el enlace descendente y 8 bytes en el ascendente) a baja velocidad (100 bit/s) empleando métodos de transmisión por radio estándar: DBPSK y GFSK. Debido al uso de estos parámetros y técnicas, los mensajes pueden alcanzar grandes distancias sin demasiada dificultad.

Los 12 bytes de enlace descendente permiten enviar la información recogida por los dispositivos, que normalmente corresponde a los datos que capta un sensor. Los 8 bytes del enlace ascendente permiten configurar los dispositivos y enviarles mensajes de control. Sigfox ofrece distintas modalidades de transmisión dependiendo de las necesidades del cliente, manteniendo fijas algunas características:

- Un dispositivo puede transmitir a cualquier otro, siempre que ambos estén en la misma banda de frecuencia.
- La transmisión entre los dispositivos y la red es asíncrona.
- Cada dispositivo emite tres veces los mensajes, usando tres frecuencias distintas (de la misma banda).
- La demodulación de señales se lleva a cabo por las estaciones base.

Las modalidades de transmisión ofrecidas por Sigfox, basándose en el número de dispositivos y el volumen de mensajes por día, son las siguientes.

- Platinum: de 101 a 140 mensajes + 4 enlaces de descarga.
- Gold: de 51 a 100 mensajes+ 2 enlaces de descarga.
- Silver: de 3 a 50 mensajes + 1 enlace de descarga.
- One: de 1 a 2 mensajes sin descarga.

La pila de protocolos Sigfox, que se muestra en la figura 1, es el software utilizado por los dispositivos conectados para generar tramas de radio y así transmitir mensajes a través de la red propia de Sigfox. Para acceder al medio, se hace uso de R-FDMA,.



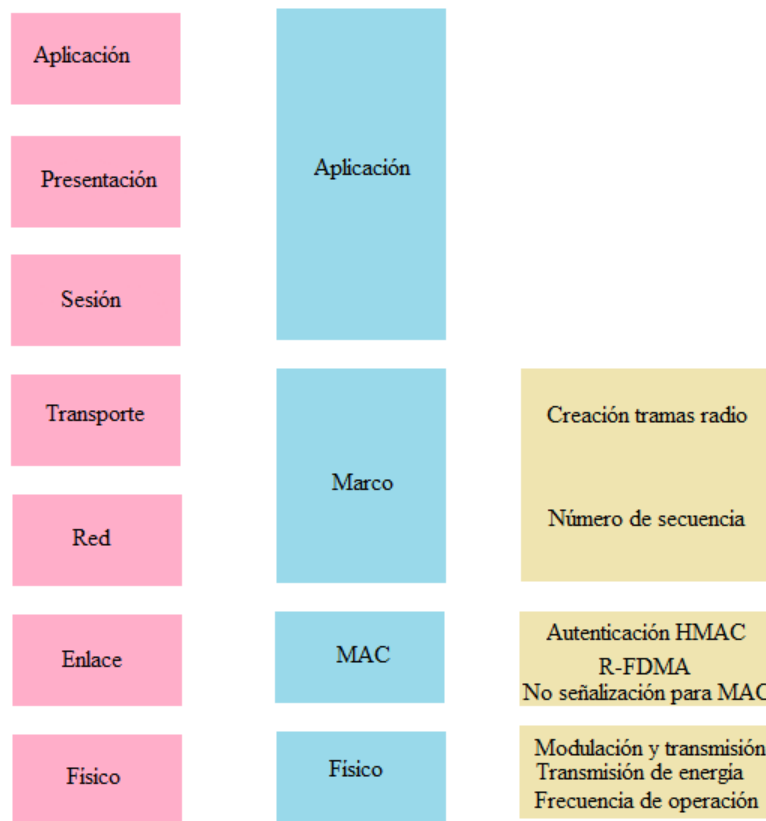
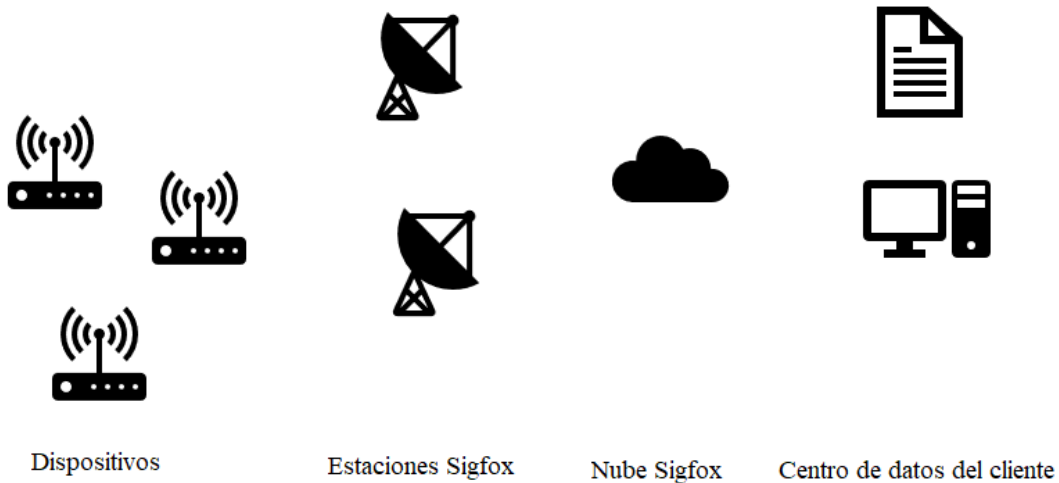


Ilustración 1. Pila de protocolos Sigfox comparada con modelo OSI.

La arquitectura de red se basa en la topología en estrella, tal y como se ve en la figura 2, donde un dispositivo no está conectado a una estación base específica, a diferencia de los protocolos de comunicaciones móviles clásicas. Los mensajes se reciben en cualquier estación base, dentro del rango de alcance. Los componentes de la red de Sigfox son:

- Objetos: transmiten mensajes a la red Sigfox.
- Estaciones Sigfox: están conectadas directamente a la nube de Sigfox, mediante enlaces punto a punto, y reciben los mensajes de los objetos. Detectan y demodulan los mensajes, para posteriormente enviarlos a la nube de Sigfox.
- Nube de Sigfox (Cloud): envía los mensajes a la plataforma del cliente.
- Plataforma del cliente: recibe los mensajes de los objetos a través de la red de Sigfox.



*Ilustración 2. Arquitectura Sigfox.*

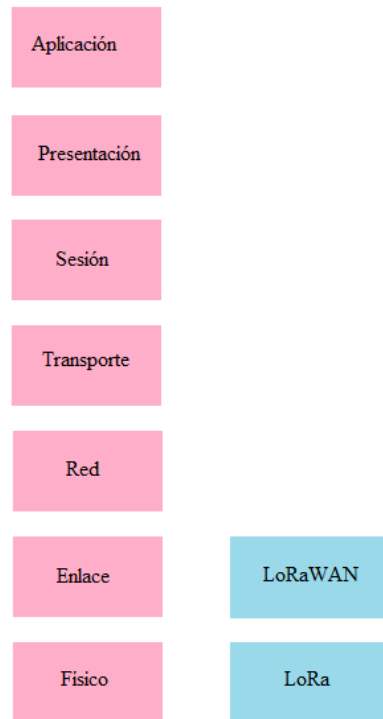
Algunas de las empresas que utilizan los servicios de Sigfox para desplegar sus funciones son Securitas Direct, Telefónica o Alizent.

## 4.2. LoRa

LoRa es una especificación pública LPWAN para dispositivos IoT desarrollada sin ánimo de lucro por los miembros de LoRa Alliance. Se caracteriza por el bajo coste de las estaciones base que emplea y por ser utilizado para poder dar servicio tanto a redes privadas de instalaciones concretas como redes públicas. Actualmente, las soluciones tecnológicas que ofrece pertenecen a Semtech.

LoRa por sí misma describe la capa física en la que se desarrollan las comunicaciones y LoRaWAN describe el protocolo de la capa de enlace, tal y como puede verse en la figura 3.

## Aplicación para Transmisión de Datos en Internet de las Cosas



*Ilustración 3. LoRa en el modelo OSI.*

LoRa se basa en la modulación chirp (frecuencia modulada pulsada) de espectro ensanchado, que mantiene las mismas características de baja potencia que FSK, pero mejora significativamente el alcance de la comunicación. Utiliza todo el ancho de banda del canal para enviar la señal, haciéndola resistente al ruido y al desplazamiento de frecuencia producido por el uso de cristales de bajo coste. LoRa puede demodular señales 19,5dB por debajo del suelo de ruido, mientras que normalmente los sistemas FSK necesitan una señal de entre 8 y 10 dB por encima del suelo de ruido para poder demodular la señal correctamente.

LoRaWAN, proporciona un mecanismo MAC, para permitir a los dispositivos comunicarse con un gateway utilizando la modulación que proporciona LoRa.

La arquitectura empleada por LoRa puede verse en la figura 4:

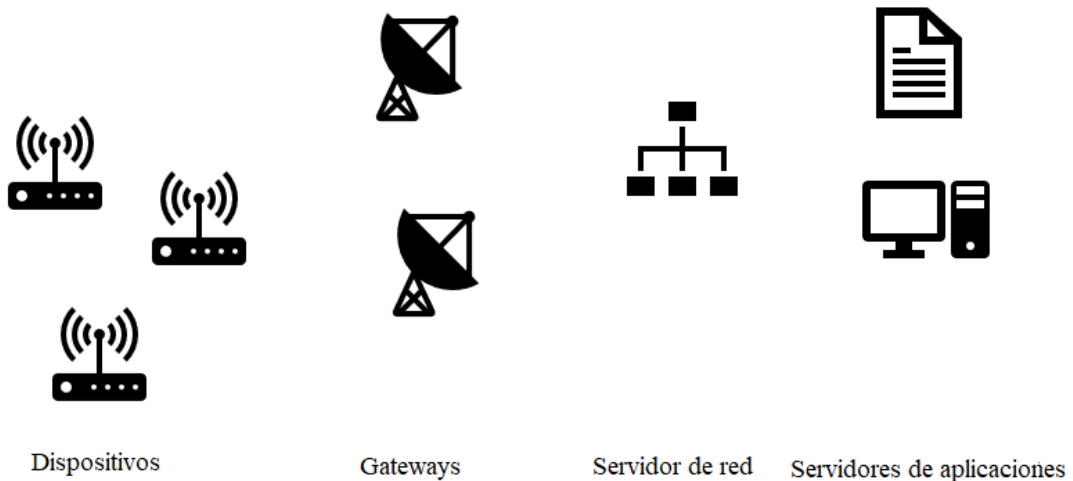


Ilustración 4. Arquitectura LoRa

Los dispositivos se comunican con gateways utilizando LoRa y LoRaWAN. Los gateways transmiten los datos de los dispositivos hasta un servidor sobre una interfaz que suele ser 3G o Ethernet. Como puede observarse, los gateways son los responsables de decodificar los paquetes enviados por los dispositivos y generar los mensajes que deberían ser devueltos a los mismos.

LoRa distingue tres clases de dispositivos finales cuya diferencia está en la programación del enlace descendente.

- Clase A (enlaces bidireccionales): cada transmisión del dispositivo hacia el gateway va seguida por dos ventanas de recepción de corta duración. Los dispositivos de clase A utilizan muy poca energía y son útiles para aplicaciones donde no es necesaria una comunicación constante con el dispositivo.
- Clase B (comunicaciones bidireccionales con periodos de recepción planificados): además de las dos ventanas de recepción, los dispositivos de clase B tienen conexiones de sincronización para que el servidor sepa qué dispositivo está escuchando en cada momento.
- Clase C (comunicaciones bidireccionales con ventanas de recepción máximas): los dispositivos de clase C disponen de ventanas de recepción que solo se cierran cuando hay transmisión de datos. Esta clase emplea una gran cantidad de energía, por lo que no es apta en casos de necesidad de bajo consumo

## 5. Comparativa

En la tabla 1 puede verse un resumen de las principales características de cada tecnología.

Tabla 1. Comparativa de tecnologías IoT.

	LTE-M	NB-IoT	EC-GSM-IoT	LoRaWAN	Sigfox
<b>Ancho de banda</b>	1,08 MHz	180 kHz	600 kHz	125 kHz	100 Hz
<b>Pérdidas por acoplamiento máximas</b>	160 dB	164 dB	164 dB	175 dB	153 dB

<b>Bandas de frecuencia típicas</b>	450 MHz a 3,5 GHz	450 MHz a 3,5 GHz	850 a 900 MHz y 1800 a 1900 MHz	Por debajo de 1 GHz	Por debajo de 1 GHz
<b>Máxima tasa de datos descendente</b>	1 Mbps	250 kbps	74 kbps	50 kbps	600 bps
<b>Máxima tasa de datos ascendente</b>	1 Mbps	250 kbps	74kbps	50 kbps	100 bps
<b>Rendimiento típico diario descendente</b>	Limitado por la batería	Limitado por la batería	Limitado por la batería	200 B	24 B
<b>Rendimiento típico diario ascendente</b>	Limitado por la batería	Limitado por la batería	Limitado por la batería	200 kB	1,64 kB
<b>Coste típico de los módulos</b>	Medio	Bajo	Bajo	Bajo	Muy bajo
<b>Identificador global universal</b>	IMSI	IMSI	IMSI	Opcional (Dispositivos EUI)	Sí (32 bit)
<b>Autenticación de dispositivos o usuarios</b>	UICC o eUICC	UICC o eUICC	UICC o eUICC	Dispositivo o usuario	Dispositivo
Autenticación de la red	AKA	AKA	AKA	Opcional	No
Protección de la identidad	TMSI	TMSI	TMSI	Parcial (dirección del dispositivo)	No
Confidencialidad de datos	Sí (EEAx)	Sí (EEAx)	Opcional (GEEA4/5)	Sí (Clave de sesión de aplicación)	No
Seguridad en intermediarios	No	No	A una red ya visitada	Sí (Clave de sesión de aplicación)	No

Las especificaciones propuestas por 3GPP ofrecen mucha versatilidad en cuanto a los proyectos que pueden realizarse con ellas, pero no están implantadas de manera eficaz en la actualidad y se podría considerar que siguen en fase de desarrollo puesto que se siguen modificando algunos de sus parámetros y normas, mientras que Sigfox y LoRa están mucho más extendidas y pueden resultar una opción más interesante a la hora de poder implementar soluciones en el presente.

Sigfox es una buena opción si se requiere realizar un proyecto, pero no se desea controlar el proceso intermedio o si se carece de los conocimientos necesarios para implementarlo desde cero, puesto que la empresa se encarga de todo.

Por otro lado, LoRa es mucho más flexible y ofrece mucha versatilidad a las personas que la utilicen como tecnología, ya que tiene la posibilidad de personalizar muchas de sus características, haciendo que se puedan realizar multitud de proyectos con ella,

En el caso del presente proyecto, dado que lo que se busca es poder comprobar que un sistema de comunicaciones cumple unos determinados requisitos y determinar los mejores parámetros de transmisión de datos, se necesita flexibilidad. LoRa dispone de varios dispositivos para transmitir

datos, por lo que resulta obvio utilizar esta especificación y todo el material que proporciona para realizar las pruebas que se plantean.

## 6. Otras especificaciones

En este apartado se explican con menor detalle otras tecnologías empleadas en el mundo de Internet de las cosas, pero cuya relevancia es menor y cuyo uso es más limitado.

### 6.1 Z-Wave

Se trata de una tecnología de comunicación basada en radiofrecuencia, diseñada específicamente para controlar, monitorizar y comprobar el estado de aplicaciones en entornos residenciales y comerciales. Es un estándar maduro, probado en multitud de escenarios y desplegado en muchos lugares.

Z-Wave permite la realización transmisiones seguras, con una baja latencia y baja velocidad de transmisión de pequeños paquetes de datos (hasta 100kbits/s). Está destinada a aplicaciones que utilizan sensores y actuadores. A diferencia de Wi-Fi y otras redes, en este protocolo la distancia máxima entre los dispositivos es de cien metros, de manera que los mensajes de un dispositivo pueden pasar por varios hasta llegar al controlador

Este estándar se encuentra, principalmente, en la industria domótica, que lo ha adoptado debido a su simplicidad.

Entre las características principales pueden destacarse:

- Tecnología de comunicaciones de baja potencia basada en radiofrecuencia que soporta redes de tipo malla.
- Opera en la banda de 868 MHz y es insensible a la interferencia de Wi-Fi.
- Emplea encriptado AES128, IPV6 y operación multicanal.

### 6.1 ZigBee

Se trata de una especificación de alto nivel para redes tipo IEEE 802.15.4. Describe todas las capas de protocolo partiendo de las capas física y de acceso al medio (MAC) del estándar IEEE 802.15.4.

ZigBee ha sido diseñado para satisfacer la necesidad de crear redes de baja potencia que cubran grandes áreas. La gran mayoría de los dispositivos ZigBee están alimentados por baterías, por lo que el consumo de energía es un factor crítico. Los dispositivos ZigBee permiten la construcción de redes de nodos con topología de tipo malla.

ZigBee opera en la banda de 2,4 GHz y en la de 868 MHz, con una tasa de transferencia que puede llegar a los 255 kbps. Permite la encriptación AES-128 y otros métodos de distribución de claves. Las redes ZigBee pueden llegar a estar compuestas de miles de nodos, que no tienen que estar al alcance de todos los demás para transmitir mensajes correctamente. Utiliza dos topologías: tipo estrella y tipo malla, para evitar que la pérdida de un nodo no sea crítica para la red.

La ZigBee Alliance, fundada en 2002, está compuesta por varios cientos de compañías y fabricantes como Texas Instruments, Cisco y Huawei y mantiene y actualiza los estándares con regularidad.

### **6.3 WirelessHART**

Se trata de una tecnología WSN que se basa en el protocolo HART. Está diseñada para dispositivos que empleen sensores y su topología de tipo malla permite que se autoorganice y auto-repare si es necesario.

Opera en la banda de 2,4 GHz utilizando el estándar IEEE 802.15.4, al igual que ZigBee. En una red WirelessHART, cada dispositivo establece su propia red, actuando simultáneamente como repetidor y como transmisor. El dispositivo original envía un mensaje al dispositivo que tenga más cerca, el cual pasará el mensaje hacia otros dispositivos, hasta que el mensaje alcance la estación base deseada y finalmente, el destinatario.

Si un mensaje no puede ser transmitido por una ruta, la red crea una alternativa de manera automática, reduciendo así la pérdida de paquetes. Además, también se hace uso de rutas de redundancia para aumentar la fiabilidad de la red.

WirelessHART incorpora saltos de canal para evitar interferencias. Esto permite operar, incluso en presencia de otras redes en la banda correspondiente. Posee mecanismos de seguridad, como encriptación AES128, gestión de código, y autenticación, para proteger la red.





## Especificaciones del diseño

Tal y como se ha mencionado anteriormente, las soluciones tecnológicas de LoRa pertenecen a Semtech. Entre estas soluciones se encuentran diversos dispositivos de comunicaciones cuyo objetivo es el de explorar las diversas características y posibilidades que ofrece LoRa al mundo de Internet de las cosas.

Para el desarrollo de este proyecto, se va a emplear el Starter-Kit SK-iM880A y su software asociado: WiMOD LR Studio y WiMOD LoRaWAN DevTool. A continuación, se detallan las principales características de cada elemento y su relevancia para el proyecto.

### 1. Starter-Kit SK-iM880A

Este kit se basa principalmente en módulo de radio iM880A. Este módulo se trata de un dispositivo compacto, de baja potencia, bidireccional y emplea la banda de los 868 MHz usando la modulación LoRa.

El módulo proporciona una comunicación de largo alcance basada en espectro ensanchado que tiene una alta inmunidad a las interferencias y minimiza el consumo de energía.

En la tabla 2 se puede ver un resumen de sus principales características.

*Tabla 2. Características Starter-Kit SK-iM880A*

Tamaño	20 x 25 x 2 mm
Modulación	LoRa
Sensibilidad	Hasta -137 dBm
Interfaz	UART, SPI e IC
E/S	Entradas analógicas y digitales, salidas digitales
Alimentación	De 2,4 a 3,6 V
Potencia de salida	Hasta 20dBm
Alcance	Hasta 15000 m
Certificación	EN 300 220

Se puede observar que la potencia de transmisión que ofrece no es muy elevada, una de las condiciones de IoT.

Para incrementar la robustez del enlace de radio, el iM880A proporciona codificación cíclica contra errores con diferentes tasas. El uso de este esquema de codificación mejora la detección y corrección de errores sin repercutir muy negativamente en la carga del enlace de comunicaciones, tal y como puede verse en la tabla 3.

*Tabla 3. Tasas de codificación del Starter-Kit SK-iM880A*

Tasa de codificación	Tasa de codificación cíclica	Índice de sobrecarga
1	4/5	1,25
2	4/6	1,5
3	4/7	1,75
4	4/8	2

Los módulos radio del kit tienen el aspecto que se muestra en la siguiente figura.

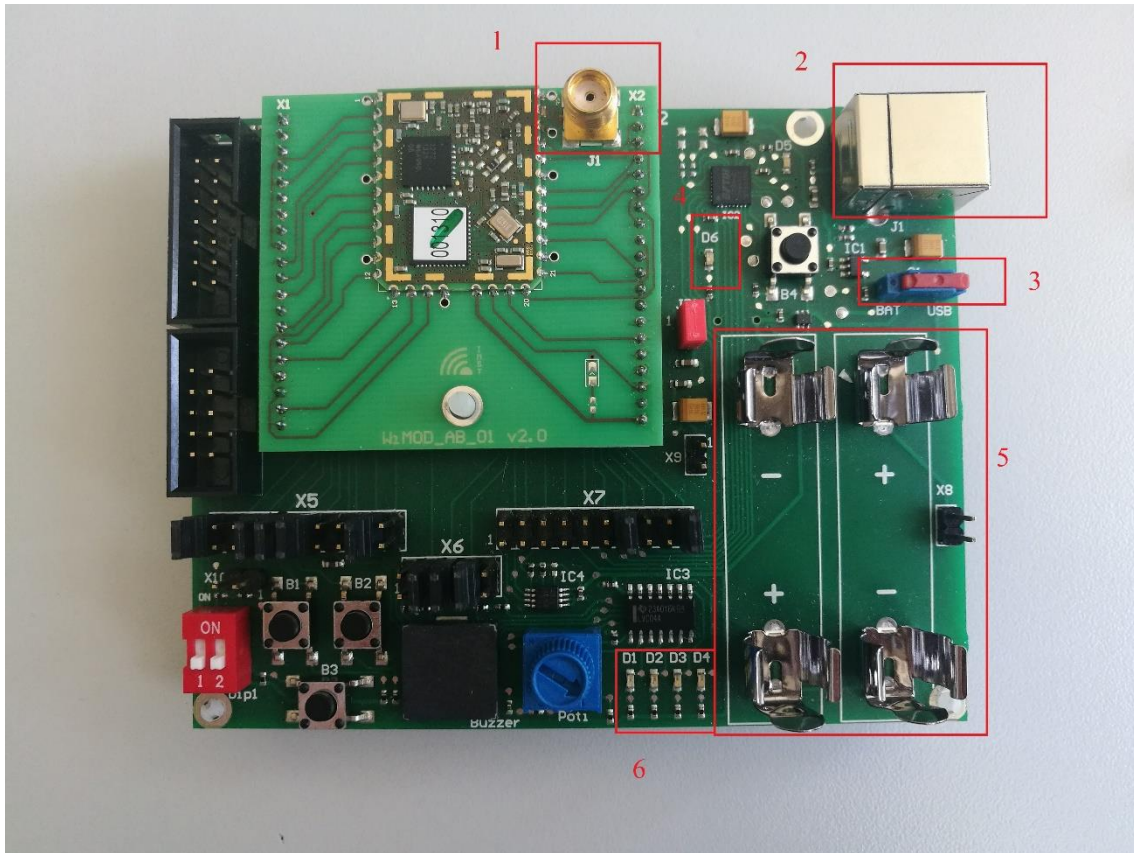


Ilustración 5. Módulo iM880A.

Los elementos más importantes del módulo son:

1. Conexión para poner una antena
2. Conexión para el cable que va al ordenador
3. Selector de alimentación por batería o por cable
4. Indicador de encendido
5. Lugar para conectar baterías en caso de usarlas
6. LEDs de envío y recepción de mensajes

## 2. Modulación LoRa

La modulación LoRa procede de la modulación CSS. Esta modulación antepone la sensibilidad a la tasa de datos transmitida, por lo que es idónea para internet de las cosas. Es una modulación que puede usar diversas tasas de datos, permitiendo a aquellas personas que la utilicen, adaptarla a sus necesidades, manteniendo un ancho de banda constante. Puede alcanzar 8 dB de sensibilidad más que la modulación FSK.

Se trata de una implementación de la capa física del modelo OSI que no depende de las capas superiores, por lo que puede coexistir y operar con múltiples arquitecturas de red.

En esta modulación, el espectro ensanchado se obtiene generando una señal chirp cuya frecuencia varía de forma continua. Este método tiene como ventaja que el offset del transmisor es igual que el del receptor, disminuyendo considerablemente la complejidad a la hora de diseñar el receptor de dicho sistema. El ancho de banda de la frecuencia de la señal chirp será el ancho de banda espectral de la señal.

El ensanchamiento del espectro que ofrece LoRa se realiza mediante la representación de cada bit de información a transmitir mediante varios chips de información.

En primer lugar, se aumenta la tasa de datos de la señal a modular y seguidamente se modula dentro de la chirp.

Existe una relación entre el régimen binario de la señal, el régimen de símbolo y el régimen de chip que puede expresarse de la siguiente forma:

$$R_b = SF * \frac{1}{\left(\frac{2^{SF}}{BW}\right)} \text{ (bit/s)} \quad (1)$$

Donde  $SF$  es el factor de ensanchamiento (*spreading factor*) y  $BW$  el ancho de banda de la señal a modular.

Si se define el periodo de símbolo  $T_s$  como  $\frac{2^{SF}}{BW}$  (s) y el régimen de símbolo es el inverso de este periodo  $R_s = \frac{1}{T_s} = \frac{BW}{2^{SF}}$  (símbolos/s) podemos definir el régimen de chip como  $R_c = R_s * 2^{SF}$  (chip/s)

Con esto y sabiendo que se envía un chip por segundo y por Hertzio de ancho de banda, se puede hacer lo siguiente:

$$R_c = R_s * 2^{SF} = \frac{BW}{2^{SF}} * 2^{SF} = BW \quad (2)$$

Tal y como se había mencionado anteriormente.

Esta modulación incluye una variable para corrección de errores que aumenta la robustez de la señal transmitida, siendo el único coste para ello de redundancia. Así, el régimen de bit sería:

$$R_b = SF * \frac{\left\lfloor \frac{4}{4+CR} \right\rfloor}{\left\lfloor \frac{2^{SF}}{BW} \right\rfloor} \text{ bit/s} \quad (3)$$

Donde  $SF$  es el factor de ensanchamiento,  $CR$  el índice de código y  $BW$  el ancho de banda de la modulación.

En la tabla 4 se pueden ver los distintos valores que puede adoptar el factor de ensanchamiento y su efecto en diversos parámetros.

Tabla 4. Factores de ensanchamiento en la modulación LoRa

Factor de ensanchamiento	Chips/Símbolo	SNR (dB)
7	128	-7,5
8	256	-10
9	512	-12,5
10	1024	-15
11	2048	-17,5
12	4096	-20

Es importante destacar que el factor de ensanchamiento debe ser conocido tanto por el transmisor como por el receptor ya que los distintos factores son ortogonales entre sí. Además, debe vigilarse la relación señal a ruido requerida en el receptor puesto que la capacidad de recibir señales con SNR negativa es la que incrementa la sensibilidad, y por consiguiente el alcance, de la comunicación.

## 2.1 Ancho de banda de la modulación

El iM880A ofrece tres opciones de ancho de banda: 125 kHz, 250 kHz y 500 kHz, que junto con los factores de ensanchamiento dan lugar a distintas combinaciones de ancho de banda de modulación, tal y como puede verse en la tabla 5.

Tabla 5. Anchos de banda y factores de ensanchamiento en la modulación LoRa

Potencia	Ancho de banda fijado	Factor de ensanchamiento	Ancho de banda de modulación
14 dBm	125 kHz	7	191 kHz
14 dBm	125 kHz	8	180 kHz
14 dBm	125 kHz	9	177 kHz
14 dBm	125 kHz	10	175 kHz
14 dBm	125 kHz	11	176 kHz
14 dBm	125 kHz	12	175 kHz
20 dBm	125 kHz	7	207 kHz
20 dBm	125 kHz	8	201 kHz
20 dBm	125 kHz	9	195 kHz
20 dBm	125 kHz	10	192 kHz
20 dBm	125 kHz	11	191 kHz
20 dBm	125 kHz	12	190 kHz
14 dBm	250 kHz	7	354 kHz
14 dBm	250 kHz	8	346 kHz
14 dBm	250 kHz	9	331 kHz
14 dBm	250 kHz	10	331 kHz
14 dBm	250 kHz	11	326 kHz
14 dBm	250 kHz	12	328 kHz
6 dBm	500 kHz	7	655 kHz
6 dBm	500 kHz	8	624 kHz
6 dBm	500 kHz	9	571 kHz
6 dBm	500 kHz	10	565 kHz
6 dBm	500 kHz	11	568 kHz
6 dBm	500 kHz	12	569 kHz
14 dBm	500 kHz	7	740 kHz
14 dBm	500 kHz	8	718 kHz
14 dBm	500 kHz	9	687 kHz
14 dBm	500 kHz	10	675 kHz
14 dBm	500 kHz	11	676 kHz
14 dBm	500 kHz	12	676 kHz

### 3. WiMOD LR Studio

El WiMOD LR Studio es una aplicación para Windows que permite explorar las capacidades del iM880A. La interfaz gráfica del WiMOD LR Studio ofrece una manera muy cómoda de poder configurar las características del kit.

La comunicación entre el WiMOD LR Studio y el módulo radio conectado al ordenador se realiza mediante mensajes HCI a través de una interfaz serie. La traducción de las llamadas a funciones a mensajes se implementa mediante la librería dinámica de Windows WiMODLR\_HCI.dll.

El WiMOD LR Studio permite realizar pruebas de diversa índole que se detallan a continuación.

#### 3.1 Radio Link Test

Este test se puede emplear para verificar la calidad del enlace de radio existente entre los dos módulos iM880A. Puede medir la tasa de paquetes erróneos mediante el conteo de paquetes transmitidos y recibidos tanto en el módulo local como en el par. Debe configurarse el tamaño de los paquetes enviados y el número de estos.

La PER se calcula de la siguiente manera:

$$PER = 100 * \left( 1 - \left( \frac{\text{Paquetes recibidos}}{\text{Paquetes transmitidos}} \right) \right) \quad (4)$$

El enlace se divide en dos dependiendo de la dirección de la información: ascendente si va del módulo par al local y descendente si va del local al par. Por cada paquete descendente recibido, uno ascendente similar es esperado. El módulo par cuenta el número de paquetes transmitidos y recibidos y envía la información al módulo local en el intervalo de tiempo correspondiente. Finalmente, el módulo local realiza la operación inversa y une toda la información para presentarla.

A continuación, en la figura 5, se presenta un pequeño esquema de las direcciones de comunicación con los términos que se emplearán en los sucesivos capítulos.

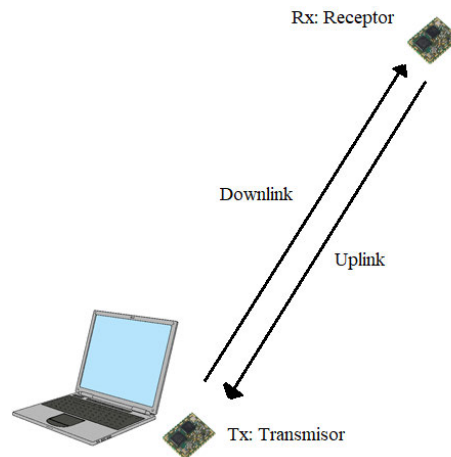


Ilustración 6. Esquema de comunicación entre los módulos radio.

Se ha decidido emplear los términos transmisor y receptor para una simplificación del lenguaje, aunque ambos módulos envíen y reciban mensajes.

En la figura 6 se puede observar la forma en la que el programa presenta la información relativa a este tipo de pruebas:

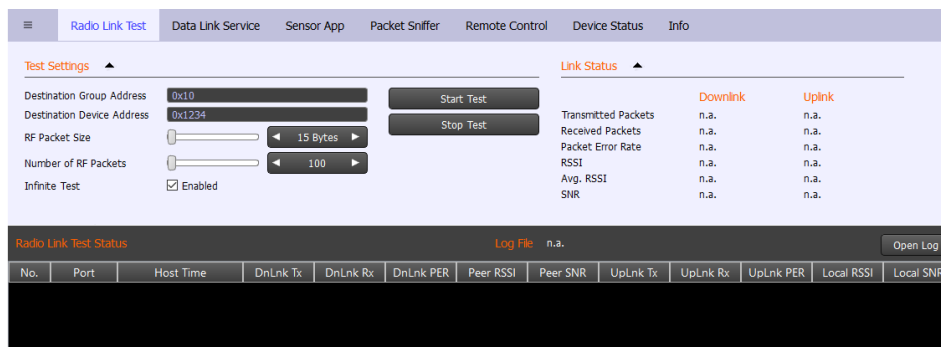


Ilustración 7. Aspecto de la herramienta Radio Link Test y los resultados que muestra por pantalla.

### 3.2 Data Link Test

Esta herramienta se puede emplear para enviar mensajes entre dos módulos iM880A de una manera cómoda. Los mensajes son del tipo poco fiable (tal y como viene definido por el fabricante). Los mensajes pueden seleccionarse desde un fichero de configuración o bien crearse siguiendo unas directrices:

- Carga
- Dirección de grupo de destino (8 bits)
- Dirección de dispositivo de destino (16 bits)

Los mensajes se pueden enviar de uno en uno sin seguir ningún tipo de periodicidad, pero también pueden enviarse de forma programada.

Es posible ver los mensajes que se van recibiendo de otros dispositivos de manera ordenada y visualizar también sus atributos: ID de dispositivo, dirección radio objetivo, dirección radio fuente y carga. También es posible ver la RSSI, SNR y la marca de fecha de un mensaje recibido, tal y como se ve en la figura 7.

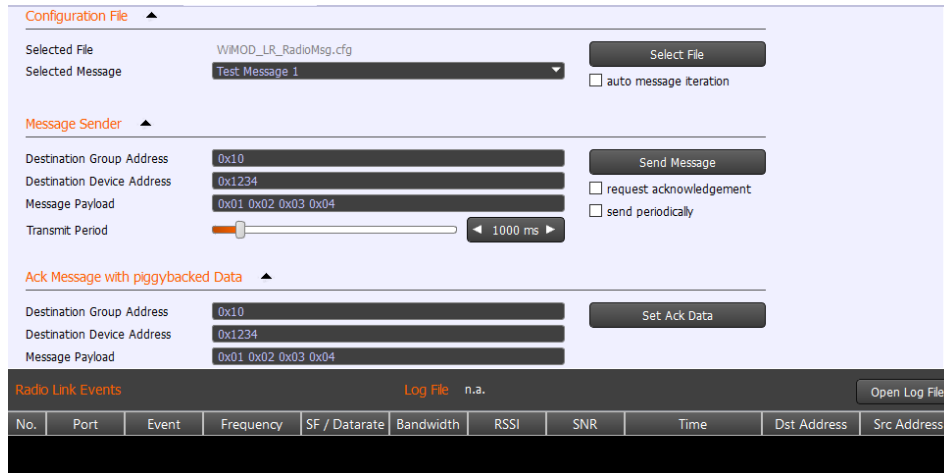


Ilustración 8. Aspecto de la herramienta Data Link Test y de los resultados que muestra por pantalla.

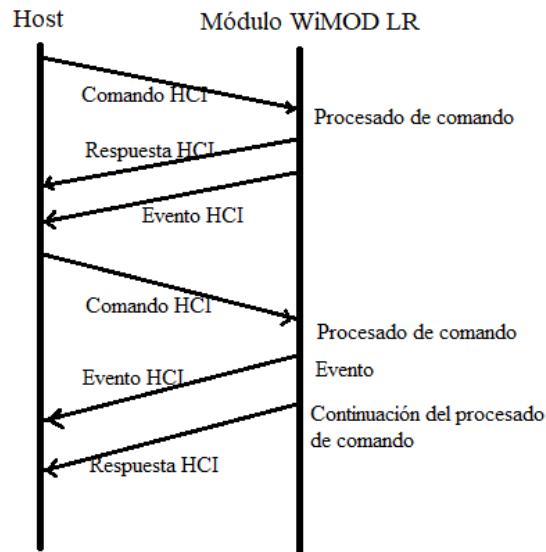
## 4. WiMOD LoRaWAN DevTool

El programa WiMOD LoRaWAN DevTool permite implementar las funciones del host en la comunicación con el módulo radio involucrado.

Esta herramienta deja que el usuario elija el puerto serie a través del que se realizarán las comunicaciones, proporciona una lista de comandos HCI que pueden enviarse al módulo radio, así como sus parámetros internos, y permite que el propio usuario cree sus comandos siguiendo las especificaciones necesarias. (Incluidas en el Anexo)

Los mensajes enviados por el host se distinguen de los recibidos por el color de estos, permitiendo que se pueda seguir el intercambio de información fácilmente.

La comunicación entre el host y el módulo sigue el esquema que puede verse en la figura 8.



*Ilustración 9. Intercambio de mensajes HCI entre el host y el módulo radio.*

Con esta herramienta se pueden observar todas las partes de los mensajes HCI que se pueden intercambiar el host y el módulo radio y así profundizar más en la importancia de este protocolo para el sistema de comunicaciones empleado.



## Solución propuesta

### 1. Planteamiento

Se pretende implementar un banco de pruebas con ayuda de las herramientas anteriormente descritas que permita evaluar si los módulos radio cumplen los requisitos para poder utilizarse en el entorno de Internet de las cosas, y, además, poder definir qué parámetros de los que son configurables son relevantes para la transmisión de datos y en qué medida afectan a esta.

Se usarán los módulos como transmisores y receptores, estando uno siempre conectado al ordenador y otro de forma autónoma, tal y como se ha mostrado anteriormente.

Haciendo uso de los modos Radio Link Test y Data Link Service se realizarán tres pruebas en las que se variará la distancia entre los dos módulos radio, permaneciendo uno de ellos conectado a un ordenador para poder recoger los datos. Las distancias que se plantean para estas pruebas son de 1 m, 40 m y 200 m, de manera que se puedan abarcar los distintos escenarios previstos en el mundo de Internet de las cosas.

Se usarán cinco configuraciones diferentes en cada caso para poder estudiar en profundidad los efectos de cada configuración y el impacto de la distancia entre los módulos radio a la hora de comunicarse entre sí.

Para poder recoger la información generada mediante los test se hará uso de la herramienta de fichero de registro, así como de capturas de pantalla y anotación de datos manual que posteriormente se procesarán y plasmarán en este documento.

Mediante la herramienta DevTool se podrá analizar el intercambio de mensajes HCI entre el módulo radio y el ordenador y profundizar más en este tipo de comunicación, así como en su relevancia para el área que se trata en este proyecto. En este caso la distancia a la que estén los módulos entre sí no es relevante ya que el intercambio de mensajes que se pretende analizar es el realizado entre el ordenador y el módulo conectado a él.

Las pruebas a realizar pueden sintetizarse en la tabla de la tabla 6.

*Tabla 6. Resumen de pruebas a realizar.*

Herramienta	Distancia	Objetivo
Radio Link Test	1 m	Comprobar que se cumplen unos mínimos de potencia y calidad en términos de radiocomunicación y que la transmisión de datos es fiable.
	40 m	
	200 m	
DevTool	No aplica	Profundizar en la comunicación host – módulo radio.

Las cinco configuraciones de los módulos radio pueden verse en la tabla 7, en la que aparecen los parámetros que permite configurar el WiMOD LR Studio.

*Tabla 7. Parámetros de las configuraciones empleadas.*

Configuración	Modulación	Ancho de banda	Factor de ensanchamiento	Velocidad	Corrección frente a errores
1	LoRa	125 kHz	12	-	4/8
2	FSK	125 kHz	-	100 kbps	-
3	LoRa	250 kHz	9	-	4/8
4	LoRa	500 kHz	7	-	4/8
5	LoRa	125 kHz	12	-	4/5

La frecuencia de trabajo no cambia en ninguna de las configuraciones y se encuentra en la banda de los 868 MHz, siendo concretamente de 869,525 MHz en el caso de la señal portadora.

La potencia transmitida es, en todos los casos, la misma: 20 dBm. Se emplea esta porque es la que recomienda el fabricante.

Los lugares elegidos para realizar las medidas son el laboratorio de radiocomunicaciones, en la cuarta planta del bloque VIII de la ETSIST y la Biblioteca Universitaria del Campus Sur.

## 2. Realización

El procedimiento para realizar las pruebas es el mismo en los tres casos:

- Se configuran los dos módulos radio de manera que tengan los mismos parámetros y que las direcciones a las que deben enviar los mensajes coincidan con las del módulo emparejado.
- Se deja uno de los módulos conectado al ordenador y se abren los ficheros .log correspondientes para que se guarde la información en ellos.
- Se activa el envío de mensajes
- Se mueve el otro módulo hasta el punto elegido, observando que la comunicación se esté llevando a cabo.
- Se retorna al punto de partida, parando en el envío de mensajes y se cierran los ficheros .log.
- Se comprueba que la información se ha recogido de manera correcta y se pasa a la siguiente configuración.

La ventana de configuración de los módulos se muestra en las siguientes figuras.

## Aplicación para Transmisión de Datos en Internet de las Cosas

**Radio Settings** ▲

Radio Mode: 0 : Standard  
Group Address: 0x10  
Device Address: 0x3333  
Destination Group Address: 0x10  
Destination Device Address: 0x3333

Frequency Band:  EU 868 MHz  US 915 MHz

RF Carrier Frequency: 869 524 963 Hz

Frequency Register Values: D9 61 99 (MSB, MID, LSB)

Modulation: 0 : LoRa  
Signal Bandwidth: 0 : 125 kHz  
Spreading Factor: 12 : SF12  
Error Coding: 1 : 4/5

Transmitter Control:  Tx Narrow Filter on/off  
 Listen before Talk(LBT) on/off

Tx Power Level: 20 dBm  
LBT Threshold: 0 dBm

Buttons: Read Settings, Write Settings, store in non-volatile memory, Restore Settings, Load Settings, Save Settings

Ilustración 10. Ventana de configuración 1.

Rx Control:  Rx off  
 Rx always on  
 Rx Window enabled

Rx Window Time: 3000 ms

LED Control:  Rx Packet Event  
 Tx Packet Event  
 Alive Indicator  
 Button Pressed Indicator

Miscellaneous Options:  Extended RF Packet HCI Output Format  
 RTC on/off (off recommended for power saving!)  
 HCI TX Indication  
 HCI Power-Up Indication  
 HCI Button Pressed Indication  
 AES-Encryption/Decryption on/off

Automatic Power Saving:  on/off (RTC off recommended!)

Please note the guidelines in iM880A\_AN012\_RFSettings !

Ilustración 11. Ventana de configuración 2.

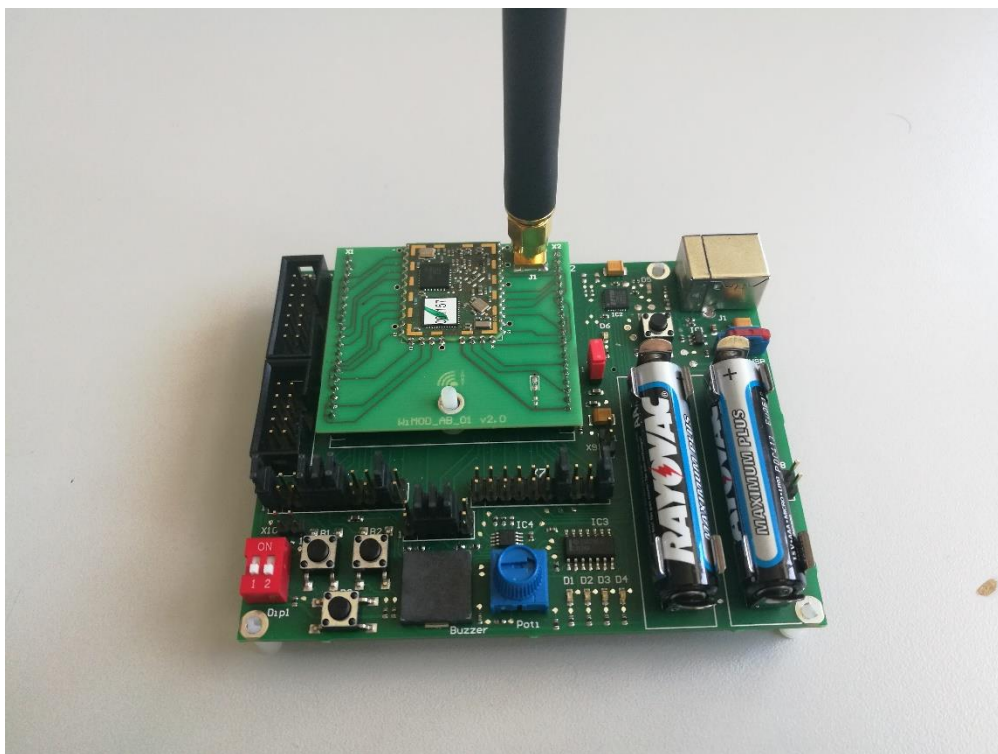
Los resultados de las medidas recogidos en ficheros .log posteriormente se procesan en Excel para un mejor manejo y visualización de la información. (El procesado de los datos mediante el uso de hojas de cálculo se detalla en el Anexo).

## Aplicación para Transmisión de Datos en Internet de las Cosas

En las siguientes imágenes se puede observar la disposición de los módulos, tal y como se ha dicho, uno de ellos permanece conectado al ordenador (Ilustración 12) y otro no, por lo que necesita alimentarse mediante baterías. (Ilustración 13)



*Ilustración 12. Módulo conectado al ordenador.*



*Ilustración 13. Módulo no conectado y alimentado por baterías.*

# Resultados

En primer lugar, se trata la parte de protocolo HCI y el intercambio de mensajes entre el ordenador y el módulo radio que ejerce de transmisor. Posteriormente, se detallan los resultados de las pruebas de transmisión de datos, ordenadas según la distancia que separa los módulos.

## 1. Intercambio de mensajes HCI

El protocolo de comunicación que emplea el ordenador para comunicarse con el módulo radio que se le conecta es HCI. Existen dos maneras de poder visualizar los mensajes intercambiados entre los dispositivos.

La primera es mediante el uso de un fichero .log que almacena los mensajes. Este fichero tiene un aspecto como el que se muestra a continuación.

```

2018-06-27;12:25:28.193;log file opened: C:/Users/mirla/OneDrive/Documentos/WIMOD_LR_Studio_27062018_122511.log
-----
2018-06-27;12:25:47.596;COM4:LR Base Node:DeviceMgmt:Command:send a test command
2018-06-27;12:25:47.598;COM4:LR Base Node:DeviceMgmt:SapID:0x01
2018-06-27;12:25:47.599;COM4:LR Base Node:DeviceMgmt:MsgID:0x01
2018-06-27;12:25:47.600;COM4:LR Base Node:DeviceMgmt:MsgPayload:00-01-02-03-04-05-06-07-08-09-0A-0B-0C-0D-0E-0F
2018-06-27;12:25:47.603;COM4:LR Base Node:WIMODLRHCI:Tx Event:C0 01 00 01 02 03 04 05 06 07 08 09 0A 0B 0C 0D 0E 0F F5 7E C0
2018-06-27;12:25:47.604;COM4:LR Base Node:DeviceMgmt:Result: OK
2018-06-27;12:25:47.626;COM4:LR Base Node:WIMODLRHCI:Rx Event:C0 01 02 00 A0 AF C0
2018-06-27;12:25:47.626;COM4:LR Base Node:WIMODLRHCI:warning - unexpected or unsupported message received
2018-06-27;12:25:47.627;COM4:LR Base Node:WIMODLRHCI:RxMsg:SapID:01;MsgID:02;Length:1;Payload:00
-----
2018-06-27;12:26:13.760;COM4:LR Base Node:DeviceMgmt:Command:send a test command
2018-06-27;12:26:13.762;COM4:LR Base Node:DeviceMgmt:SapID:0x01
2018-06-27;12:26:13.763;COM4:LR Base Node:DeviceMgmt:MsgID:0x01
2018-06-27;12:26:13.764;COM4:LR Base Node:DeviceMgmt:MsgPayload:00-01-02-03-04-05-06-07-08-09-0A-0B-0C-0D-0E-0F
2018-06-27;12:26:13.765;COM4:LR Base Node:WIMODLRHCI:Tx Event:C0 01 00 01 02 03 04 05 06 07 08 09 0A 0B 0C 0D 0E 0F F5 7E C0
2018-06-27;12:26:13.769;COM4:LR Base Node:DeviceMgmt:Result: OK
2018-06-27;12:26:13.798;COM4:LR Base Node:WIMODLRHCI:Rx Event:C0 01 02 00 A0 AF C0
2018-06-27;12:26:13.805;COM4:LR Base Node:WIMODLRHCI:warning - unexpected or unsupported message received
2018-06-27;12:26:13.805;COM4:LR Base Node:WIMODLRHCI:RxMsg:SapID:01;MsgID:02;Length:1;Payload:00
-----
2018-06-27;12:26:30.367;COM4:LR Base Node:DeviceMgmt:Command:get radio configuration
2018-06-27;12:26:30.368;COM4:LR Base Node:WIMODLRHCI:Tx Event:C0 01 13 85 34 C0
2018-06-27;12:26:30.392;COM4:LR Base Node:WIMODLRHCI:Rx Event:C0 01 14 00 00 10 10 55 55 33 33 00 99 61 D9 00 0C 01 14 00 01 88 08 07 03 01 00 00 00 E9 F7 C0
2018-06-27;12:26:30.394;COM4:LR Base Node:DeviceMgmt:Result: OK
2018-06-27;12:26:30.396;COM4:LR Base Node:DeviceMgmt:RadioMode:0
2018-06-27;12:26:30.397;COM4:LR Base Node:DeviceMgmt:RxGroupAddress:0x10
2018-06-27;12:26:30.397;COM4:LR Base Node:DeviceMgmt:TxGroupAddress:0x10
2018-06-27;12:26:30.399;COM4:LR Base Node:DeviceMgmt:RxDeviceAddress:0x5555
2018-06-27;12:26:30.400;COM4:LR Base Node:DeviceMgmt:TxDeviceAddress:0x3333
2018-06-27;12:26:30.401;COM4:LR Base Node:DeviceMgmt:Modulation:0
2018-06-27;12:26:30.402;COM4:LR Base Node:DeviceMgmt:Frequency:14246297
2018-06-27;12:26:30.403;COM4:LR Base Node:DeviceMgmt:Bandwidth:0
2018-06-27;12:26:30.404;COM4:LR Base Node:DeviceMgmt:Spreading:12
    
```

*Ilustración 14. Vista de un fichero .log con mensajes HCI.*

## Aplicación para Transmisión de Datos en Internet de las Cosas

```
No.;Port;Host Time;HCI Event;SLIP encoded Message;SAP ID;MSG ID;P-Length;Message Payload;CRC16
31;COM4;2018-06-27 12:25:47.603;Tx Event;C0 01 01 00 01 02 03 04 05 06 07 08 09 0A 0B 0C 0D 0E 0F F5 7E C0;DeviceMgmt (01);PingReq (01);16;00 01 02 03 04 05 06 07 08 0
32;COM4;2018-06-27 12:25:47.626;Rx Event;C0 01 02 00 A0 AF C0;DeviceMgmt (01);PingRsp (02);1;00;A0 AF
33;COM4;2018-06-27 12:26:13.765;Tx Event;C0 01 01 00 01 02 03 04 05 06 07 08 09 0A 0B 0C 0D 0E 0F F5 7E C0;DeviceMgmt (01);PingReq (01);16;00 01 02 03 04 05 06 07 08 0
34;COM4;2018-06-27 12:26:13.798;Rx Event;C0 01 02 00 A0 AF C0;DeviceMgmt (01);PingRsp (02);1;00;A0 AF
35;COM4;2018-06-27 12:26:30.368;Tx Event;C0 01 13 85 34 C0;DeviceMgmt (01);GetRadioConfigReq (13);0;85 34
36;COM4;2018-06-27 12:26:30.392;Rx Event;C0 01 14 00 00 10 10 55 55 33 33 00 09 61 D9 00 0C 04 14 00 01 B8 0B 07 03 01 00 00 00 E9 F7 C0;DeviceMgmt (01);GetRadioConfig
37;COM4;2018-06-27 12:26:53.395;Tx Event;C0 01 11 01 00 10 10 55 55 33 33 00 09 61 D9 00 0C 04 14 00 01 B8 0B 07 03 01 00 00 00 E3 A9 C0;DeviceMgmt (01);SetRadioConfig
38;COM4;2018-06-27 12:26:53.462;Rx Event;C0 01 12 00 31 3A C0;DeviceMgmt (01);SetRadioConfigRsp (12);1;00;31 3A
39;COM4;2018-06-27 12:26:53.484;Tx Event;C0 01 13 85 34 C0;DeviceMgmt (01);GetRadioConfigReq (13);0;85 34
40;COM4;2018-06-27 12:26:53.509;Rx Event;C0 01 14 00 00 10 10 55 55 33 33 00 09 61 D9 00 0C 04 14 00 01 B8 0B 07 03 01 00 00 00 CA 77 C0;DeviceMgmt (01);GetRadioConfig
41;COM4;2018-06-27 12:26:53.565;Tx Event;C0 01 03 04 24 C0;DeviceMgmt (01);GetDeviceInfoReq (03);0;04 24
42;COM4;2018-06-27 12:26:53.582;Rx Event;C0 01 04 00 92 55 55 10 00 1E 05 00 00 0D 26 C0;DeviceMgmt (01);GetDeviceInfoRsp (04);10;00 92 55 55 10 00 1E 05 00 00;0D 26
43;COM4;2018-06-27 12:26:53.602;Tx Event;C0 01 05 32 41 C0;DeviceMgmt (01);GetFirmwareInfoReq (05);0;32 41
44;COM4;2018-06-27 12:26:53.621;Rx Event;C0 01 06 00 0E 01 5F 00 32 36 2E 30 36 2E 32 30 31 37 57 69 4D 4F 44 5F 4C 52 5F 42 61 73 65 3C 37 C0;DeviceMgmt (01);GetFirmw
45;COM4;2018-06-27 12:26:53.666;Tx Event;C0 01 08 4C A8 C0;DeviceMgmt (01);GetOperationModeReq (08);0;4C A8
46;COM4;2018-06-27 12:26:53.685;Rx Event;C0 01 0C 00 00 C6 45 C0;DeviceMgmt (01);GetOperationModeRsp (0C);2;00 00;C6 45
47;COM4;2018-06-27 12:26:53.700;Tx Event;C0 01 13 85 34 C0;DeviceMgmt (01);GetRadioConfigReq (13);0;85 34
48;COM4;2018-06-27 12:26:53.717;Rx Event;C0 01 14 00 00 10 10 55 55 33 33 00 09 61 D9 00 0C 04 14 00 01 B8 0B 07 03 01 00 00 00 CA 77 C0;DeviceMgmt (01);GetRadioConfig
49;COM3;2018-06-27 12:26:56.811;Rx Event;C0 01 13 85 34 C0;DeviceMgmt (01);GetRadioConfigReq (13);0;85 34
50;COM3;2018-06-27 12:26:56.811;Rx Event;C0 01 14 00 00 10 10 33 33 55 55 00 09 61 D9 00 0C 01 14 00 01 B8 0B 07 03 01 00 00 00 BF C0;DeviceMgmt (01);GetRadioConfig
51;COM3;2018-06-27 12:27:27.963;Tx Event;C0 01 11 01 00 10 10 33 33 55 55 00 09 61 D9 00 0C 04 14 00 01 B8 0B 07 03 01 00 00 00 BA E1 C0;DeviceMgmt (01);SetRadioConfig
52;COM3;2018-06-27 12:27:28.031;Rx Event;C0 01 12 00 31 3A C0;DeviceMgmt (01);SetRadioConfigRsp (12);1;00;31 3A
53;COM3;2018-06-27 12:27:28.045;Tx Event;C0 01 13 85 34 C0;DeviceMgmt (01);GetRadioConfigReq (13);0;85 34
54;COM3;2018-06-27 12:27:28.063;Rx Event;C0 01 14 00 00 10 10 33 33 55 55 00 09 61 D9 00 0C 04 14 00 01 B8 0B 07 03 01 00 00 00 93 3F C0;DeviceMgmt (01);GetRadioConfig
55;COM3;2018-06-27 12:27:28.083;Tx Event;C0 01 03 04 24 C0;DeviceMgmt (01);GetDeviceInfoReq (03);0;04 24
56;COM3;2018-06-27 12:27:28.094;Rx Event;C0 01 04 00 92 33 33 10 00 85 04 00 00 F3 60 C0;DeviceMgmt (01);GetDeviceInfoRsp (04);10;00 92 33 33 10 00 85 04 00 00;F3 60
57;COM3;2018-06-27 12:27:28.116;Tx Event;C0 01 05 32 41 C0;DeviceMgmt (01);GetFirmwareInfoReq (05);0;32 41
58;COM3;2018-06-27 12:27:28.127;Rx Event;C0 01 06 00 0E 01 5F 00 32 36 2E 30 36 2E 32 30 31 37 57 69 4D 4F 44 5F 4C 52 5F 42 61 73 65 3C 37 C0;DeviceMgmt (01);GetFirmw
59;COM3;2018-06-27 12:27:28.159;Tx Event;C0 01 08 4C A8 C0;DeviceMgmt (01);GetOperationModeReq (08);0;4C A8
60;COM3;2018-06-27 12:27:28.176;Rx Event;C0 01 0C 00 00 C6 45 C0;DeviceMgmt (01);GetOperationModeRsp (0C);2;00 00;C6 45
61;COM3;2018-06-27 12:27:28.190;Tx Event;C0 01 13 85 34 C0;DeviceMgmt (01);GetRadioConfigReq (13);0;85 34
62;COM3;2018-06-27 12:27:28.207;Rx Event;C0 01 14 00 00 10 10 33 33 55 55 00 09 61 D9 00 0C 04 14 00 01 B8 0B 07 03 01 00 00 00 93 3F C0;DeviceMgmt (01);GetRadioConfig
63;COM3;2018-06-27 12:27:35.659;Tx Event;C0 01 13 85 34 C0;DeviceMgmt (01);GetRadioConfigReq (13);0;85 34
64;COM4;2018-06-27 12:27:35.679;Rx Event;C0 01 14 00 00 10 10 55 55 33 33 00 09 61 D9 00 0C 04 14 00 01 B8 0B 07 03 01 00 00 00 CA 77 C0;DeviceMgmt (01);GetRadioConfig
```

*Ilustración 15. Vista de un fichero .log con mensajes HCI.*

Esta forma de visualizar la información no resulta práctica, por lo que estos ficheros se procesan en Excel para poder obtener lo siguiente.

	A	B	C
1	Fecha	Hora	Evento
2	43278	12:25:28.193	log file opened: C:/Users/mirla/OneDrive/Documentos/WIMOD_LR_Studio_27062018_122511.log
3			-----
4	43278	12:25:47.596	COM4:LR Base Node:DeviceMgmt:Command:send a test command
5	43278	12:25:47.598	COM4:LR Base Node:DeviceMgmt:SapID:0x01
6	43278	12:25:47.599	COM4:LR Base Node:DeviceMgmt:MsgID:0x01
7	43278	12:25:47.600	COM4:LR Base Node:DeviceMgmt:MsgPayload:00-01-02-03-04-05-06-07-08-09-0A-0B-0C-0D-0E-0F
8	43278	12:25:47.603	COM4:LR Base Node:WiMODLRHCI:Tx Event:C0 01 01 00 01 02 03 04 05 06 07 08 09 0A 0B 0C 0D 0E 0F F5 7E C0
9	43278	12:25:47.604	COM4:LR Base Node:DeviceMgmt:Result: OK
10	43278	12:25:47.626	COM4:LR Base Node:WiMODLRHCI:Rx Event:C0 01 02 00 A0 AF C0
11	43278	12:25:47.626	COM4:LR Base Node:WiMODLRHCI:warning - unexpected or unsupported message received
12	43278	12:25:47.627	COM4:LR Base Node:WiMODLRHCI:RxMsg:SapID:01 MsgID:02 Length:1 Payload:00
13			-----
14	43278	12:26:13.760	COM4:LR Base Node:DeviceMgmt:Command:send a test command
15	43278	12:26:13.762	COM4:LR Base Node:DeviceMgmt:SapID:0x01
16	43278	12:26:13.763	COM4:LR Base Node:DeviceMgmt:MsgID:0x01
17	43278	12:26:13.764	COM4:LR Base Node:DeviceMgmt:MsgPayload:00-01-02-03-04-05-06-07-08-09-0A-0B-0C-0D-0E-0F
18	43278	12:26:13.765	COM4:LR Base Node:WiMODLRHCI:Tx Event:C0 01 01 00 01 02 03 04 05 06 07 08 09 0A 0B 0C 0D 0E 0F F5 7E C0
19	43278	12:26:13.769	COM4:LR Base Node:DeviceMgmt:Result: OK
20	43278	12:26:13.798	COM4:LR Base Node:WiMODLRHCI:Rx Event:C0 01 02 00 A0 AF C0
21	43278	12:26:13.805	COM4:LR Base Node:WiMODLRHCI:warning - unexpected or unsupported message received
22	43278	12:26:13.805	COM4:LR Base Node:WiMODLRHCI:RxMsg:SapID:01 MsgID:02 Length:1 Payload:00

*Ilustración 16. Vista de un fichero Excel con mensajes HCI.*



## Aplicación para Transmisión de Datos en Internet de las Cosas

A	B	C	D	E	F	G	H	
No.	Port	Host Time	HCI Event	SLIP encoded Message	SAP ID	MSG ID	P-Length	Message Payload
31	COM4	2018-06-27 12:25:47.603	Tx Event	C0 01 01 00 01 02 03 04 05 06 07 08 09 0A 0B 0C 0D 0E 0F F5 7E C0	DeviceMgmt (01)	PingReq (01)	16	00 01 02 03 04 05 06 07 08 09 0A 0B 0C
32	COM4	2018-06-27 12:25:47.626	Rx Event	C0 01 02 00 A0 AF C0	DeviceMgmt (01)	PingRsp (02)	1	
33	COM4	2018-06-27 12:26:13.765	Tx Event	C0 01 01 00 01 02 03 04 05 06 07 08 09 0A 0B 0C 0D 0E 0F F5 7E C0	DeviceMgmt (01)	PingReq (01)	16	00 01 02 03 04 05 06 07 08 09 0A 0B 0C
34	COM4	2018-06-27 12:26:13.798	Rx Event	C0 01 02 00 A0 AF C0	DeviceMgmt (01)	PingRsp (02)	1	
35	COM4	2018-06-27 12:26:30.368	Tx Event	C0 01 13 85 34 C0	DeviceMgmt (01)	GetRadioConfigReq (13)	0	
36	COM4	2018-06-27 12:26:30.392	Rx Event	C0 01 14 00 00 10 10 55 55 33 33 00 99 61 D9 00 0C 01 14 00 01 B8 0B	DeviceMgmt (01)	GetRadioConfigRsp (14)	26	00 00 10 10 55 55 33 33 00 99 61 D9 00
37	COM4	2018-06-27 12:26:53.395	Tx Event	C0 01 11 01 00 10 10 55 55 33 33 00 99 61 D9 00 0C 04 14 00 01 B8 0B	DeviceMgmt (01)	SetRadioConfigReq (11)	26	01 00 10 10 55 55 33 33 00 99 61 D9 00
38	COM4	2018-06-27 12:26:53.462	Rx Event	C0 01 12 00 31 3A C0	DeviceMgmt (01)	SetRadioConfigRsp (12)	1	
39	COM4	2018-06-27 12:26:53.484	Tx Event	C0 01 13 85 34 C0	DeviceMgmt (01)	GetRadioConfigReq (13)	0	
40	COM4	2018-06-27 12:26:53.509	Rx Event	C0 01 14 00 00 10 10 55 55 33 33 00 99 61 D9 00 0C 04 14 00 01 B8 0B	DeviceMgmt (01)	GetRadioConfigRsp (14)	26	00 00 10 10 55 55 33 33 00 99 61 D9 00
41	COM4	2018-06-27 12:26:53.565	Tx Event	C0 01 03 04 24 C0	DeviceMgmt (01)	GetDeviceInfoReq (03)	0	
42	COM4	2018-06-27 12:26:53.582	Rx Event	C0 01 04 00 92 55 10 00 1E 05 00 00 0D 26 C0	DeviceMgmt (01)	GetDeviceInfoRsp (04)	10	00 92 55 10 00 1E 05 00 00
43	COM4	2018-06-27 12:26:53.602	Tx Event	C0 01 05 32 41 C0	DeviceMgmt (01)	GetFirmwareInfoReq (05)	0	
44	COM4	2018-06-27 12:26:53.621	Rx Event	C0 01 06 00 0E 01 5F 00 32 36 2E 30 36 2E 32 30 31 37 57 69 4D 4F 44	DeviceMgmt (01)	GetFirmwareInfoRsp (06)	28	00 0E 01 5F 00 32 36 2E 30 36 2E 32 30
45	COM4	2018-06-27 12:26:53.666	Tx Event	C0 01 0B 4C A8 C0	DeviceMgmt (01)	GetOperationModeReq (0B)	0	
46	COM4	2018-06-27 12:26:53.685	Rx Event	C0 01 0C 00 00 C6 45 C0	DeviceMgmt (01)	GetOperationModeRsp (0C)	2	00 00
47	COM4	2018-06-27 12:26:53.700	Tx Event	C0 01 13 85 34 C0	DeviceMgmt (01)	GetRadioConfigReq (13)	0	
48	COM4	2018-06-27 12:26:53.717	Rx Event	C0 01 14 00 00 10 10 55 55 33 33 00 99 61 D9 00 0C 04 14 00 01 B8 0B	DeviceMgmt (01)	GetRadioConfigRsp (14)	26	00 00 10 10 55 55 33 33 00 99 61 D9 00
49	COM3	2018-06-27 12:26:56.784	Tx Event	C0 01 13 85 34 C0	DeviceMgmt (01)	GetRadioConfigReq (13)	0	
50	COM3	2018-06-27 12:26:56.811	Rx Event	C0 01 14 00 00 10 10 33 33 55 55 00 99 61 D9 00 0C 01 14 00 01 B8 0B	DeviceMgmt (01)	GetRadioConfigRsp (14)	26	00 00 10 10 33 33 55 55 00 99 61 D9 00
51	COM3	2018-06-27 12:27:2.963	Tx Event	C0 01 11 01 00 10 10 33 33 55 55 00 99 61 D9 00 0C 04 14 00 01 B8 0B	DeviceMgmt (01)	SetRadioConfigReq (11)	26	01 00 10 10 33 33 55 55 00 99 61 D9 00
52	COM3	2018-06-27 12:27:28.031	Rx Event	C0 01 12 00 31 3A C0	DeviceMgmt (01)	SetRadioConfigRsp (12)	1	

Ilustración 17. Vista de un fichero Excel con mensajes HCI.

La segunda forma de poder visualizar este intercambio de mensajes es mediante el uso de la herramienta WiMOD LoRaWAN DevTool. Este programa permite configurar los mensajes HCI que se desean enviar desde el ordenador hasta el módulo y ver la respuesta detallada.

Los tres mensajes HCI más importantes que se intercambian son los de información del módulo, estado del módulo y ping. Los tres se muestran a continuación, siendo la parte en rojo el mensaje del ordenador al módulo y la azul el mensaje del módulo al ordenador.

```

12:07:43 TX -> LoRaWAN-HCI-Frame
  Dst:      01      [DevMgmt]
  MsgID:    17      [Get Device Status Req]
  Pay: [000]
  CRC:      Al 72  [OK]
Raw-Frame: [004]: 01 17 Al 72
Slip-Frame: [006]: C0 01 17 Al 72 C0

-----
12:07:43 RX -> LoRaWAN-HCI-Frame
  Dst:      01      [DevMgmt]
  MsgID:    18      [Get Device Status Rsp]
  Pay: [040] 00 01 F0 21 52 00 EB 61 6C 4B 08 00 C6 09 18 03 D7 00 00 00 D4 00 00 00 05 00 00 00 D1 00 00 00 00 00 00 00
00 00

  Status      : [1] 00 (0x00)
  SysTick Resolution: [1] 01 (0x01)
  SysTick Counter : [4] F0 21 52 00 (0x005221F0)
  RTC Time      : [4] EB 61 6C 4B (0x4B6C61EB)
  NVM Status    : [2] 08 00 (0x0008)
  Battery Status : [2] C6 09 (0x09C6)
  Extra Status  : [2] 18 03 (0x0318)
  TX U-Data     : [4] D7 00 00 00 (0x000000D7)
  TX C-Data     : [4] D4 00 00 00 (0x000000D4)
  TX Error      : [4] 05 00 00 00 (0x00000005)
  RX1 U-Data    : [4] D1 00 00 00 (0x000000D1)
  RX1 C-Data    : [4] 00 00 00 00 (0x00000000)
  RX1 MIC-Error : [4] 00 00 00 00 (0x00000000)
  RX2 U-Data    : [4] Payload Error!
  CRC:         17 3E [OK]
Raw-Frame: [044]: 01 18 00 01 F0 21 52 00 EB 61 6C 4B 08 00 C6 09 18 03 D7 00 00 00 D4 00 00 00 05 00 00 00 D1 00 00 00 00 00 00
00 00 00 00 17 3E
Slip-Frame: [046]: C0 01 18 00 01 F0 21 52 00 EB 61 6C 4B 08 00 C6 09 18 03 D7 00 00 00 D4 00 00 00 05 00 00 00 D1 00 00 00 00 00 00
00 00 00 00 00 17 3E C0
    
```

Ilustración 18. Mensajes HCI sobre el estado del módulo.

```

12:05:32 TX -> LoRaWAN-HCI-Frame
  Dst:          01      [DevMgmt]
  MsgID:        03      [GetDeviceInfo Req]
  Pay: [000]
  CRC           04 24  [OK]
Raw-Frame:  [004]: 01 03 04 24
Slip-Frame: [006]: C0 01 03 04 24 C0

-----
12:05:32 RX -> LoRaWAN-HCI-Frame
  Dst:          01      [DevMgmt]
  MsgID:        04      [GetDeviceInfo Rsp]
  Pay: [010]      00 92 33 33 10 00 85 04 00 00
      Status      : [1] 00 (0x00)
      ModuleType  : [1] 92 (0x92)
      DevAddress   : [4] 33 33 10 00 (0x00103333)
      DeviceID    : [4] 85 04 00 00 (0x00000485)
  CRC           F3 60  [OK]
Raw-Frame:  [014]: 01 04 00 92 33 33 10 00 85 04 00 00 F3 60
Slip-Frame: [016]: C0 01 04 00 92 33 33 10 00 85 04 00 00 F3 60 C0

```

*Ilustración 19. Mensajes HCI sobre la información del módulo.*

```

12:03:12 TX -> LoRaWAN-HCI-Frame
  Dst:          01      [DevMgmt]
  MsgID:        01      [Ping Req]
  Pay: [000]
  CRC           16 07  [OK]
Raw-Frame:  [004]: 01 01 16 07
Slip-Frame: [006]: C0 01 01 16 07 C0

-----
12:03:12 RX -> LoRaWAN-HCI-Frame
  Dst:          01      [DevMgmt]
  MsgID:        02      [Ping Rsp]
  Pay: [001]      00
      Status      : [1] 00 (0x00)
  CRC           A0 AF  [OK]
Raw-Frame:  [005]: 01 02 00 A0 AF
Slip-Frame: [007]: C0 01 02 00 A0 AF C0

```

*Ilustración 20. Mensajes HCI ping.*

También es posible configurar el módulo radio empleando la herramienta de personalización de mensajes que incluye el programa, en caso de que no queramos hacerlo desde el WiMOD LR Studio, tal y como recomienda el fabricante. En caso de hacerlo mediante un mensaje HCI, debe hacerse como se muestra en la figura 18.



Name	SetRadioStackConfig Req
DstID	0x10
MsgID	0x19
⊟ Payload	Matriz HciPayloadItem[]
⊕ [0]	Name: def. DataRate Index, Len: 1, Value: 0
⊕ [1]	Name: def. TX Power Level, Len: 1, Value: 0
⊕ [2]	Name: Options (ADR), Len: 1, Value: 0
⊕ [3]	Name: PowerSaving Mode, Len: 1, Value: 0
⊕ [4]	Name: Num Retransmissions, Len: 1, Value: 0
⊕ [5]	Name: Band Index, Len: 1, Value: 0

Ilustración 21. Personalización del mensaje HCI para la configuración del módulo.

Esta herramienta, tal y como se ha visto, sirve para ahondar más en la comunicación HCI y su propósito no es otro que mostrar un desglose de los mensajes intercambiados para comprender su funcionamiento. La parte que resulta más interesante para el presente proyecto es la relativa a la personalización de mensajes, concretamente a aquellos que atañen a la configuración de parámetros de transmisión.

La importancia de este protocolo reside en el hecho de permitir una interacción fluida con los módulos radio, de manera que en todo momento se conoce lo que está ocurriendo en ellos y controlar sus características.

## 2. 1 metro

Estas medidas tienen como objetivo comprobar la conexión entre los módulos y verificar el funcionamiento del WiMOD LR Studio.

En este caso, además de los ficheros .log, se han realizado diferentes capturas de pantalla de los resultados tal y como los muestra el WiMOD LR Studio. No se ha realizado un procesamiento en Excel en este caso debido a que el volumen de medidas es menor y, por lo tanto, su visualización de este modo es sencilla. Además, al tratarse de una distancia tan pequeña y mantenerse fija, la evolución de la potencia con la que se reciben los mensajes no sufre cambios que deban ser estudiados.

Al final del apartado se resumirán los datos más importantes y se destacarán las diferencias más apreciables que se analizarán posteriormente en las conclusiones.

### 2.1 Configuración 1 (LoRa, BW=125 kHz, SF=12, CRR = 4/8)

En la siguiente imagen se puede ver el detalle de los mensajes intercambiados entre los dos módulos, así como los parámetros más importantes de potencia y tasa de error.

## Aplicación para Transmisión de Datos en Internet de las Cosas

No.	Port	Host Time	DnLnk Tx	DnLnk Rx	DnLnk PER	Peer RSSI	Peer SNR	UpLnk Tx	UpLnk Rx	UpLnk PER	Local RSSI	Local SNR
1	COM4	2018-06-27 10:39:39	1	1	0.00 %	-30 dBm	2 dB	1	1	0.00 %	-35 dBm	-11 dB
2	COM4	2018-06-27 10:39:43	2	2	0.00 %	-30 dBm	8 dB	2	2	0.00 %	-32 dBm	2 dB
3	COM4	2018-06-27 10:39:46	3	3	0.00 %	-30 dBm	7 dB	3	3	0.00 %	-31 dBm	4 dB
4	COM4	2018-06-27 10:39:49	4	4	0.00 %	-29 dBm	6 dB	4	4	0.00 %	-31 dBm	3 dB
5	COM4	2018-06-27 10:39:52	5	5	0.00 %	-28 dBm	7 dB	5	5	0.00 %	-34 dBm	5 dB
6	COM4	2018-06-27 10:39:55	6	6	0.00 %	-32 dBm	7 dB	6	6	0.00 %	-33 dBm	6 dB
7	COM4	2018-06-27 10:39:58	7	7	0.00 %	-32 dBm	7 dB	7	7	0.00 %	-33 dBm	6 dB
8	COM4	2018-06-27 10:40:01	8	8	0.00 %	-32 dBm	6 dB	8	8	0.00 %	-32 dBm	6 dB
9	COM4	2018-06-27 10:40:04	9	9	0.00 %	-31 dBm	5 dB	9	9	0.00 %	-30 dBm	0 dB
10	COM4	2018-06-27 10:40:07	10	10	0.00 %	-31 dBm	1 dB	10	10	0.00 %	-32 dBm	-1 dB
11	COM4	2018-06-27 10:40:11	11	11	0.00 %	-34 dBm	-12 dB	11	11	0.00 %	-41 dBm	6 dB
12	COM4	2018-06-27 10:40:14	12	12	0.00 %	-33 dBm	6 dB	12	12	0.00 %	-35 dBm	6 dB
13	COM4	2018-06-27 10:40:17	13	13	0.00 %	-33 dBm	-8 dB	13	13	0.00 %	-31 dBm	3 dB
14	COM4	2018-06-27 10:40:20	14	14	0.00 %	-29 dBm	-9 dB	14	14	0.00 %	-34 dBm	3 dB
15	COM4	2018-06-27 10:40:23	15	15	0.00 %	-27 dBm	0 dB	15	15	0.00 %	-33 dBm	-3 dB

Ilustración 22. Detalle de los mensajes intercambiados con la configuración 1 en la primera prueba.

La siguiente figura muestra un resumen de los datos más importantes que pueden extraerse. En el caso de la SNR, no calcula el valor medio, por lo que se realiza a parte, siendo en el caso del enlace descendente de 2,2 dB y en el ascendente de 1,93 dB.

	Downlink	Uplink
Transmitted Packets	15	15
Received Packets	15	15
Packet Error Rate	0.00 %	0.00 %
RSSI	-27 dBm	-33 dBm
Avg. RSSI	-30.73 dBm	-33.13 dBm
SNR	0 dB	-3 dB

Ilustración 23. Resumen de la primera prueba con la configuración 1

## 2.2 Configuración 2 (FSK, 100 kbps)

Se muestran las imágenes equivalentes, observando que en este caso el volumen de mensajes es mayor, puesto que se ha usado una modulación distinta.

## Aplicación para Transmisión de Datos en Internet de las Cosas

Radio Link Test Status			Log File C:/PFG/wimodr_ft_2018-06-27_11-13-25.log										Open Log File
No.	Port	Host Time	DnLnk Tx	DnLnk Rx	DnLnk PER	Peer RSSI	Peer SNR	UpLnk Tx	UpLnk Rx	UpLnk PER	Local RSSI	Local SNR	
1	COM4	2018-06-27 11:13:41	1	1	0.00 %	-35 dBm	0 dB	1	1	0.00 %	-22 dBm	0 dB	
2	COM4	2018-06-27 11:13:41	2	2	0.00 %	-22 dBm	0 dB	2	2	0.00 %	-21 dBm	0 dB	
3	COM4	2018-06-27 11:13:41	3	3	0.00 %	-21 dBm	0 dB	3	3	0.00 %	-21 dBm	0 dB	
4	COM4	2018-06-27 11:13:42	4	4	0.00 %	-21 dBm	0 dB	4	4	0.00 %	-21 dBm	0 dB	
5	COM4	2018-06-27 11:13:42	5	5	0.00 %	-21 dBm	0 dB	5	5	0.00 %	-21 dBm	0 dB	
6	COM4	2018-06-27 11:13:42	6	6	0.00 %	-22 dBm	0 dB	6	6	0.00 %	-21 dBm	0 dB	
7	COM4	2018-06-27 11:13:42	7	7	0.00 %	-21 dBm	0 dB	7	7	0.00 %	-22 dBm	0 dB	
8	COM4	2018-06-27 11:13:42	8	8	0.00 %	-22 dBm	0 dB	8	8	0.00 %	-22 dBm	0 dB	
9	COM4	2018-06-27 11:13:42	9	9	0.00 %	-22 dBm	0 dB	9	9	0.00 %	-22 dBm	0 dB	
10	COM4	2018-06-27 11:13:43	10	10	0.00 %	-22 dBm	0 dB	10	10	0.00 %	-22 dBm	0 dB	
11	COM4	2018-06-27 11:13:43	11	11	0.00 %	-22 dBm	0 dB	11	11	0.00 %	-22 dBm	0 dB	
12	COM4	2018-06-27 11:13:43	12	12	0.00 %	-22 dBm	0 dB	12	12	0.00 %	-22 dBm	0 dB	
13	COM4	2018-06-27 11:13:43	13	13	0.00 %	-22 dBm	0 dB	13	13	0.00 %	-22 dBm	0 dB	
14	COM4	2018-06-27 11:13:43	14	14	0.00 %	-22 dBm	0 dB	14	14	0.00 %	-22 dBm	0 dB	
15	COM4	2018-06-27 11:13:44	15	15	0.00 %	-22 dBm	0 dB	15	15	0.00 %	-22 dBm	0 dB	
16	COM4	2018-06-27 11:13:44	16	16	0.00 %	-22 dBm	0 dB	16	16	0.00 %	-22 dBm	0 dB	
17	COM4	2018-06-27 11:13:44	17	17	0.00 %	-22 dBm	0 dB	17	17	0.00 %	-22 dBm	0 dB	
18	COM4	2018-06-27 11:13:44	18	18	0.00 %	-22 dBm	0 dB	18	18	0.00 %	-22 dBm	0 dB	
19	COM4	2018-06-27 11:13:44	19	19	0.00 %	-22 dBm	0 dB	19	19	0.00 %	-22 dBm	0 dB	
20	COM4	2018-06-27 11:13:44	20	20	0.00 %	-22 dBm	0 dB	20	20	0.00 %	-22 dBm	0 dB	
21	COM4	2018-06-27 11:13:44	21	21	0.00 %	-22 dBm	0 dB	21	21	0.00 %	-22 dBm	0 dB	
22	COM4	2018-06-27 11:13:45	22	22	0.00 %	-21 dBm	0 dB	22	22	0.00 %	-22 dBm	0 dB	
23	COM4	2018-06-27 11:13:45	23	23	0.00 %	-22 dBm	0 dB	23	23	0.00 %	-22 dBm	0 dB	
24	COM4	2018-06-27 11:13:45	24	24	0.00 %	-22 dBm	0 dB	24	24	0.00 %	-22 dBm	0 dB	
25	COM4	2018-06-27 11:13:45	25	25	0.00 %	-22 dBm	0 dB	25	25	0.00 %	-22 dBm	0 dB	

Ilustración 24. Detalle de los mensajes intercambiados con la configuración 2 en la primera prueba.

Link Status ▲		
	Downlink	Uplink
Transmitted Packets	27	27
Received Packets	27	27
Packet Error Rate	0.00 %	0.00 %
RSSI	-21 dBm	-21 dBm
Avg. RSSI	-22.26 dBm	-21.78 dBm
SNR	0 dB	0 dB

Ilustración 25. Resumen de la primera prueba con la configuración 2.

En este caso, la SNR media, tanto descendente como ascendente, es de 0 dB.

### 2.3 Configuración 3 (LoRa, BW=250 kHz, SF=9, CRR = 4/8)

Con esta configuración también se envían más mensajes que con la primera debido al ancho de banda escogido, tal y como puede verse en las figuras siguientes.

## Aplicación para Transmisión de Datos en Internet de las Cosas

Radio Link Test Status												Log File C:/PFG/wimodlr_rit_2018-06-27_11-22-36.log		Close Log File
No.	Port	Host Time	DnLnk Tx	DnLnk Rx	DnLnk PER	Peer RSSI	Peer SNR	UpLnk Tx	UpLnk Rx	UpLnk PER	Local RSSI	Local SNR		
1	COM4	2018-06-27 11:22:54	1	1	0.00 %	-37 dBm	8 dB	1	1	0.00 %	-40 dBm	7 dB		
2	COM4	2018-06-27 11:22:55	2	2	0.00 %	-37 dBm	8 dB	2	2	0.00 %	-39 dBm	8 dB		
3	COM4	2018-06-27 11:22:55	3	3	0.00 %	-37 dBm	8 dB	3	3	0.00 %	-39 dBm	7 dB		
4	COM4	2018-06-27 11:22:56	4	4	0.00 %	-37 dBm	8 dB	4	4	0.00 %	-40 dBm	6 dB		
5	COM4	2018-06-27 11:22:56	5	5	0.00 %	-38 dBm	7 dB	5	5	0.00 %	-39 dBm	7 dB		
6	COM4	2018-06-27 11:22:56	6	6	0.00 %	-38 dBm	7 dB	6	6	0.00 %	-40 dBm	6 dB		
7	COM4	2018-06-27 11:22:57	7	7	0.00 %	-37 dBm	7 dB	7	7	0.00 %	-38 dBm	7 dB		
8	COM4	2018-06-27 11:22:57	8	8	0.00 %	-37 dBm	7 dB	8	8	0.00 %	-38 dBm	8 dB		
9	COM4	2018-06-27 11:22:57	9	9	0.00 %	-37 dBm	8 dB	9	9	0.00 %	-39 dBm	8 dB		
10	COM4	2018-06-27 11:22:58	10	10	0.00 %	-37 dBm	8 dB	10	10	0.00 %	-30 dBm	6 dB		
11	COM4	2018-06-27 11:22:58	11	11	0.00 %	-38 dBm	8 dB	11	11	0.00 %	-39 dBm	8 dB		
12	COM4	2018-06-27 11:22:59	12	12	0.00 %	-38 dBm	7 dB	12	12	0.00 %	-39 dBm	7 dB		
13	COM4	2018-06-27 11:22:59	13	13	0.00 %	-38 dBm	7 dB	13	13	0.00 %	-39 dBm	7 dB		
14	COM4	2018-06-27 11:22:59	14	14	0.00 %	-30 dBm	7 dB	14	14	0.00 %	-39 dBm	7 dB		
15	COM4	2018-06-27 11:23:00	15	15	0.00 %	-37 dBm	7 dB	15	15	0.00 %	-38 dBm	8 dB		
16	COM4	2018-06-27 11:23:00	16	16	0.00 %	-37 dBm	7 dB	16	16	0.00 %	-39 dBm	7 dB		
17	COM4	2018-06-27 11:23:00	17	17	0.00 %	-38 dBm	3 dB	17	17	0.00 %	-40 dBm	6 dB		
18	COM4	2018-06-27 11:23:01	18	18	0.00 %	-39 dBm	7 dB	18	18	0.00 %	-40 dBm	6 dB		
19	COM4	2018-06-27 11:23:01	19	19	0.00 %	-38 dBm	7 dB	19	19	0.00 %	-40 dBm	7 dB		
20	COM4	2018-06-27 11:23:02	20	20	0.00 %	-39 dBm	6 dB	20	20	0.00 %	-29 dBm	4 dB		
21	COM4	2018-06-27 11:23:02	21	21	0.00 %	-38 dBm	7 dB	21	21	0.00 %	-42 dBm	9 dB		
22	COM4	2018-06-27 11:23:03	22	22	0.00 %	-38 dBm	8 dB	22	22	0.00 %	-39 dBm	7 dB		

Ilustración 26. Detalle de los mensajes intercambiados con la configuración 3 en la primera prueba.

Link Status ▲		
	Downlink	Uplink
Transmitted Packets	22	22
Received Packets	22	22
Packet Error Rate	0.00 %	0.00 %
RSSI	-38 dBm	-39 dBm
Avg. RSSI	-37.27 dBm	-38.41 dBm
SNR	8 dB	7 dB

Ilustración 27. Resumen de la primera prueba con la configuración 3.

En este caso la SNR descendente media es de 7,13 dB y la ascendente de 8,31 dB, bastante superiores a los dos casos anteriores.

### 2.4 Configuración 4 (LoRa, BW=500 kHz, SF=7, CRR = 4/8)

En este caso se ha aumentado el ancho de banda, pero el número de mensajes permanece estable.

## Aplicación para Transmisión de Datos en Internet de las Cosas

Radio Link Test Status			Log File C:/PFG/wimodr_ft_2018-06-27_11-29-39.log										Open Log File
No.	Port	Host Time	DnLnk Tx	DnLnk Rx	DnLnk PER	Peer RSSI	Peer SNR	UpLnk Tx	UpLnk Rx	UpLnk PER	Local RSSI	Local SNR	
1	COM4	2018-06-27 11:29:50	1	1	0.00 %	-31 dBm	5 dB	1	1	0.00 %	-32 dBm	4 dB	
2	COM4	2018-06-27 11:29:50	2	2	0.00 %	-30 dBm	5 dB	2	2	0.00 %	-32 dBm	5 dB	
3	COM4	2018-06-27 11:29:51	3	3	0.00 %	-31 dBm	5 dB	3	3	0.00 %	-32 dBm	5 dB	
4	COM4	2018-06-27 11:29:51	4	4	0.00 %	-31 dBm	5 dB	4	4	0.00 %	-32 dBm	5 dB	
5	COM4	2018-06-27 11:29:51	5	5	0.00 %	-31 dBm	5 dB	5	5	0.00 %	-32 dBm	4 dB	
6	COM4	2018-06-27 11:29:51	6	6	0.00 %	-31 dBm	5 dB	6	6	0.00 %	-31 dBm	5 dB	
7	COM4	2018-06-27 11:29:51	7	7	0.00 %	-31 dBm	6 dB	7	7	0.00 %	-31 dBm	6 dB	
8	COM4	2018-06-27 11:29:52	8	8	0.00 %	-30 dBm	5 dB	8	8	0.00 %	-31 dBm	5 dB	
9	COM4	2018-06-27 11:29:52	9	9	0.00 %	-31 dBm	4 dB	9	9	0.00 %	-31 dBm	4 dB	
10	COM4	2018-06-27 11:29:52	10	10	0.00 %	-28 dBm	5 dB	10	10	0.00 %	-31 dBm	5 dB	
11	COM4	2018-06-27 11:29:52	11	11	0.00 %	-30 dBm	5 dB	11	11	0.00 %	-32 dBm	5 dB	
12	COM4	2018-06-27 11:29:53	12	12	0.00 %	-31 dBm	4 dB	12	12	0.00 %	-32 dBm	5 dB	
13	COM4	2018-06-27 11:29:53	13	13	0.00 %	-32 dBm	4 dB	13	13	0.00 %	-32 dBm	5 dB	
14	COM4	2018-06-27 11:29:53	14	14	0.00 %	-31 dBm	5 dB	14	14	0.00 %	-31 dBm	5 dB	
15	COM4	2018-06-27 11:29:53	15	15	0.00 %	-31 dBm	5 dB	15	15	0.00 %	-31 dBm	5 dB	
16	COM4	2018-06-27 11:29:53	16	16	0.00 %	-31 dBm	5 dB	16	16	0.00 %	-27 dBm	4 dB	
17	COM4	2018-06-27 11:29:53	17	17	0.00 %	-27 dBm	5 dB	17	17	0.00 %	-32 dBm	4 dB	
18	COM4	2018-06-27 11:29:53	18	18	0.00 %	-31 dBm	4 dB	18	18	0.00 %	-32 dBm	5 dB	
19	COM4	2018-06-27 11:29:54	19	19	0.00 %	-31 dBm	5 dB	19	19	0.00 %	-32 dBm	5 dB	
20	COM4	2018-06-27 11:29:54	20	20	0.00 %	-31 dBm	5 dB	20	20	0.00 %	-31 dBm	5 dB	
21	COM4	2018-06-27 11:29:54	21	21	0.00 %	-31 dBm	5 dB	21	21	0.00 %	-32 dBm	5 dB	

Ilustración 28. Detalle de los mensajes intercambiados con la configuración 4 en la primera prueba.

La SNR media con esta configuración es de 4,82 dB para el enlace descendente y de 4,57 dB para el ascendente, inferiores al caso anterior.

Link Status ▲		
	Downlink	Uplink
Transmitted Packets	21	21
Received Packets	21	21
Packet Error Rate	0.00 %	0.00 %
RSSI	-31 dBm	-32 dBm
Avg. RSSI	-30.57 dBm	-31.38 dBm
SNR	5 dB	5 dB

Ilustración 29. Resumen de la primera prueba con la configuración 4.

## 2.5 Configuración 5 (BW=125 kHz, SF=12, CRR = 4/5)

Con esta configuración se envían, de nuevo, menos mensajes porque se reduce el ancho de banda, al mismo nivel que en el primer caso.

Radio Link Test Status			Log File C:/PFG/wimodr_ft_2018-06-27_11-56-17.log										Open Log File
No.	Port	Host Time	DnLnk Tx	DnLnk Rx	DnLnk PER	Peer RSSI	Peer SNR	UpLnk Tx	UpLnk Rx	UpLnk PER	Local RSSI	Local SNR	
1	COM4	2018-06-27 11:56:42	1	1	0.00 %	-33 dBm	6 dB	1	1	0.00 %	-35 dBm	4 dB	
2	COM4	2018-06-27 11:56:44	2	2	0.00 %	-37 dBm	-2 dB	2	2	0.00 %	-35 dBm	-4 dB	
3	COM4	2018-06-27 11:56:47	3	3	0.00 %	-37 dBm	-1 dB	3	3	0.00 %	-35 dBm	2 dB	
4	COM4	2018-06-27 11:56:49	4	4	0.00 %	-37 dBm	-7 dB	4	4	0.00 %	-35 dBm	0 dB	
5	COM4	2018-06-27 11:56:52	5	5	0.00 %	-37 dBm	-5 dB	5	5	0.00 %	-35 dBm	0 dB	
6	COM4	2018-06-27 11:56:54	6	6	0.00 %	-36 dBm	-8 dB	6	6	0.00 %	-34 dBm	1 dB	
7	COM4	2018-06-27 11:56:57	7	7	0.00 %	-33 dBm	6 dB	7	7	0.00 %	-34 dBm	6 dB	
8	COM4	2018-06-27 11:56:59	8	8	0.00 %	-33 dBm	6 dB	8	8	0.00 %	-35 dBm	6 dB	
9	COM4	2018-06-27 11:57:02	9	9	0.00 %	-34 dBm	6 dB	9	9	0.00 %	-34 dBm	6 dB	
10	COM4	2018-06-27 11:57:05	10	10	0.00 %	-34 dBm	6 dB	10	10	0.00 %	-34 dBm	6 dB	

Ilustración 30. Detalle de los mensajes intercambiados con la configuración 5 en la primera prueba.

Ahora la SNR media es de 0,7 dB en el caso del enlace descendente y de 2,7 en el caso del ascendente, valores menores a los de los casos anteriores.

Link Status ▲		
	Downlink	Uplink
Transmitted Packets	10	10
Received Packets	10	10
Packet Error Rate	0.00 %	0.00 %
RSSI	-34 dBm	-34 dBm
Avg. RSSI	-35.10 dBm	-34.60 dBm
SNR	6 dB	6 dB

Ilustración 31. Resumen de la primera prueba con la configuración 5

## 2.6 Resumen

A continuación, en la tabla 8 se muestra un resumen de las medidas más importantes de esta prueba.

Tabla 8. Resumen de los parámetros más importantes de la primera prueba.

Configuración	RSSI media en Tx (dBm)	RSSI media en Rx (dBm)	SNR media en Tx (dB)	SNR media en Rx (dB)	PER media ascendente (%)	PER media descendente (%)
1	-30,73	-33,1	2,2	1,93	0	0
2	-22,26	-21,78	0	0	0	0
3	-37,27	-38,41	7,13	8,31	0	0
4	-30,57	-31,38	4,82	4,57	0	0
5	-35,1	-35,6	0,7	2,7	0	0

Como se ha mencionado anteriormente, los resultados de esta prueba no son del todo concluyentes debido a la distancia que separa los módulos, aunque de ellos se pueden tratar de inferir algunas cuestiones.

A nivel de SNR la mejor configuración parece ser la tercera, y a nivel de potencia recibida la segunda. Sobre los errores de transmisión de mensajes no se puede establecer preferencia alguna dado que en ningún caso se han perdido paquetes.

En las dos siguientes pruebas se podrá comprobar si esta primera aproximación resulta correcta o no.

## 3. 40 metros

Los resultados que se muestran a continuación proceden de los ficheros Excel a los que se han trasladado los datos de los .log para su mejor procesado. Se ha optado por realizar una gráfica que relacione la RSSI y la SNR de cada módulo con el tiempo, de manera que se pueda ver la evolución de cada parámetro a lo largo del camino realizado con el módulo par. En general, lo que se puede observar es que a medida que el módulo receptor se aleja del transmisor, los parámetros caen y la calidad de la señal desciende, como es de esperar.

El análisis en detalle de los resultados se hará posteriormente, junto con las de la prueba siguiente, una vez que se hayan mostrado todos los resultados obtenidos y se hayan contextualizado.

### 3.1 Configuración 1 (BW=125 kHz, SF=12, CRR = 4/8)

En las siguientes figuras se puede observar el nivel de potencia recibido por cada módulo. La forma de las gráficas es similar, variando principalmente el nivel de estas. Las desviaciones existentes responden al recorrido seguido para realizar la prueba, tal y como se puede apreciar en el plano que se adjunta en el capítulo correspondiente.



Ilustración 32. RSSI medida en el módulo transmisor con la configuración 1 durante la primera prueba.

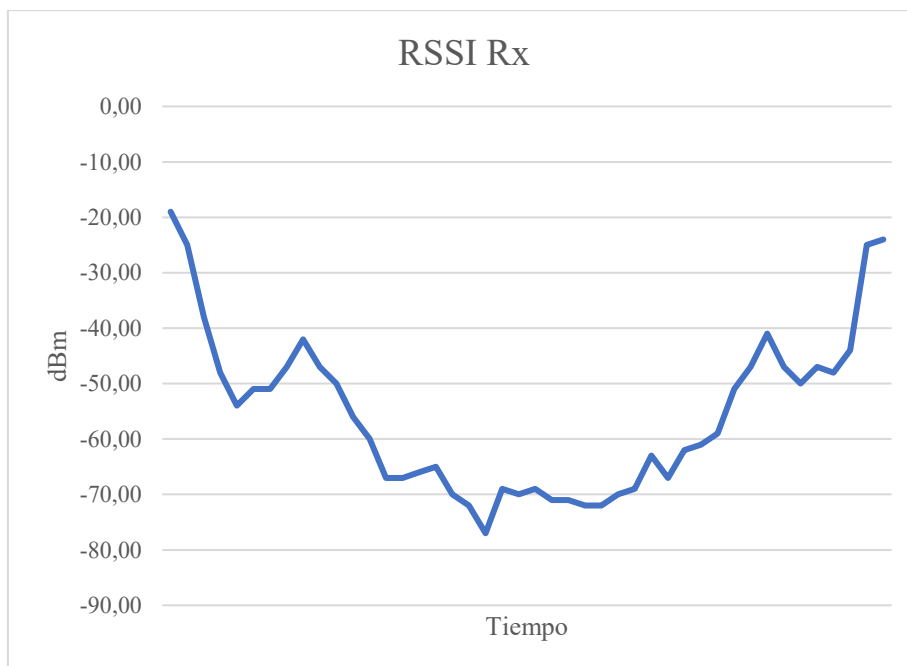


Ilustración 33. RSSI medida en el módulo receptor con la configuración 1 durante la primera prueba.

Las siguientes gráficas muestran la SNR, que como puede verse, sufre perturbaciones de menor nivel que el nivel de potencia de la señal, siendo más estable.

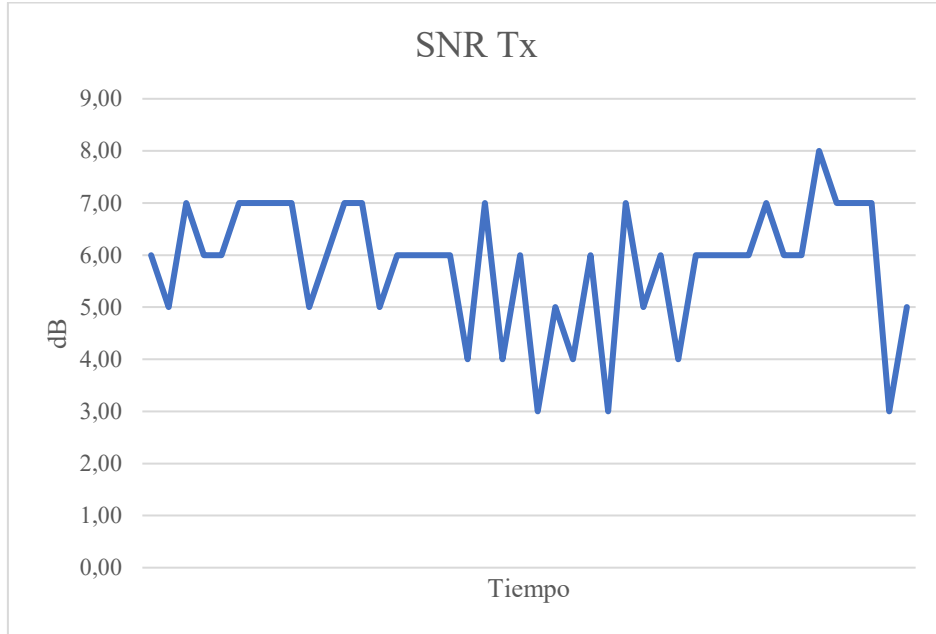


Ilustración 34. SNR medida en el módulo transmisor con la configuración 1 durante la primera prueba.

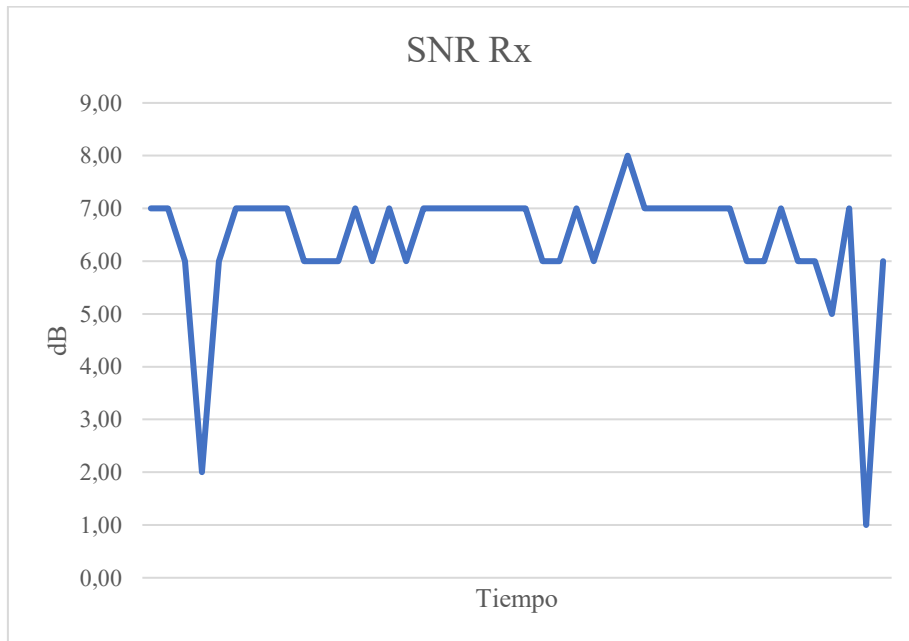


Ilustración 35. SNR medida en el módulo receptor con la configuración 1 durante la primera prueba.



### 3.2 Configuración 2 (FSK, 100 kbps)

En este caso el número de medidas es mucho mayor que con la primera configuración, debido a la velocidad de transmisión de los datos, que es mucho mayor.

La forma de las gráficas responde al mismo patrón de antes, confirmando así que las oscilaciones que se aprecian responden al camino seguido.

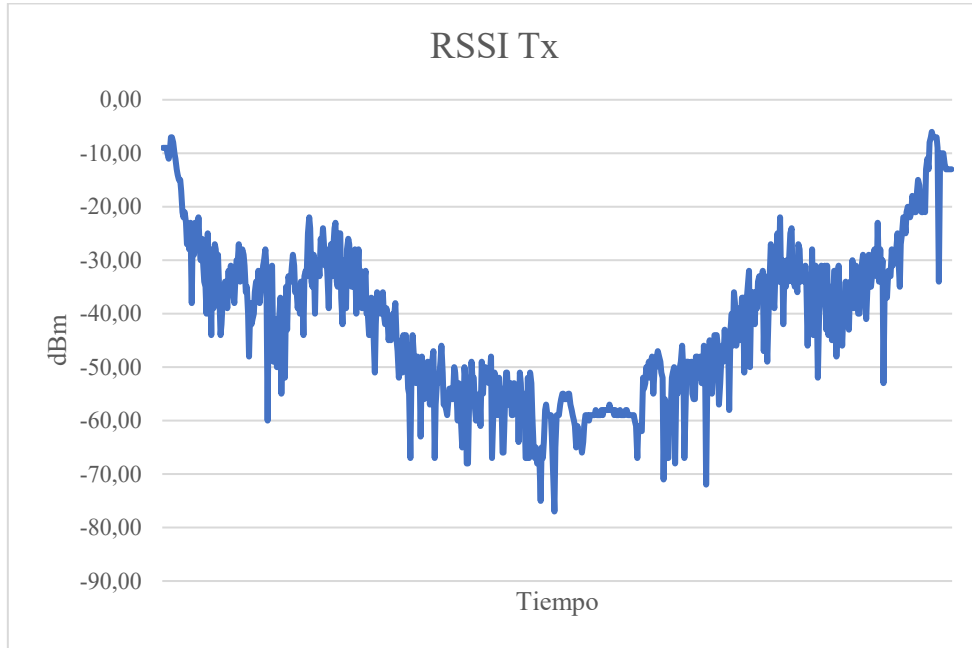


Ilustración 36. RSSI medida en el módulo transmisor con la configuración 2 durante la primera prueba.

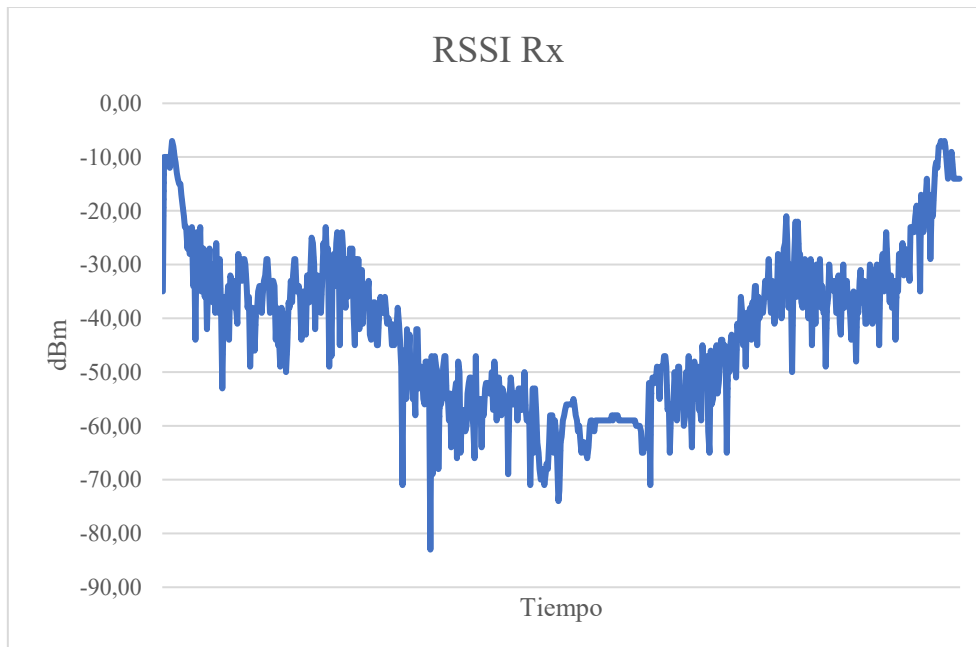


Ilustración 37. RSSI medida en el módulo receptor con la configuración 2 durante la primera prueba.

## Aplicación para Transmisión de Datos en Internet de las Cosas

A continuación, se muestran los niveles de SNR en ambos módulos, siendo 0 en ambos casos, algo que será analizado en profundidad más adelante.

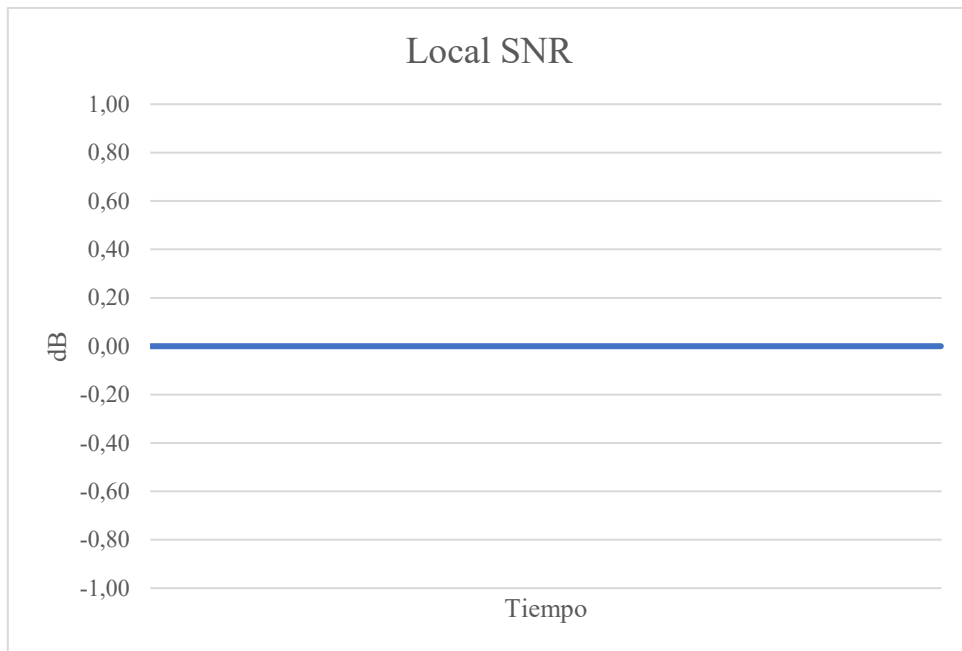


Ilustración 38. SNR medida en el módulo transmisor con la configuración 2 durante la primera prueba.

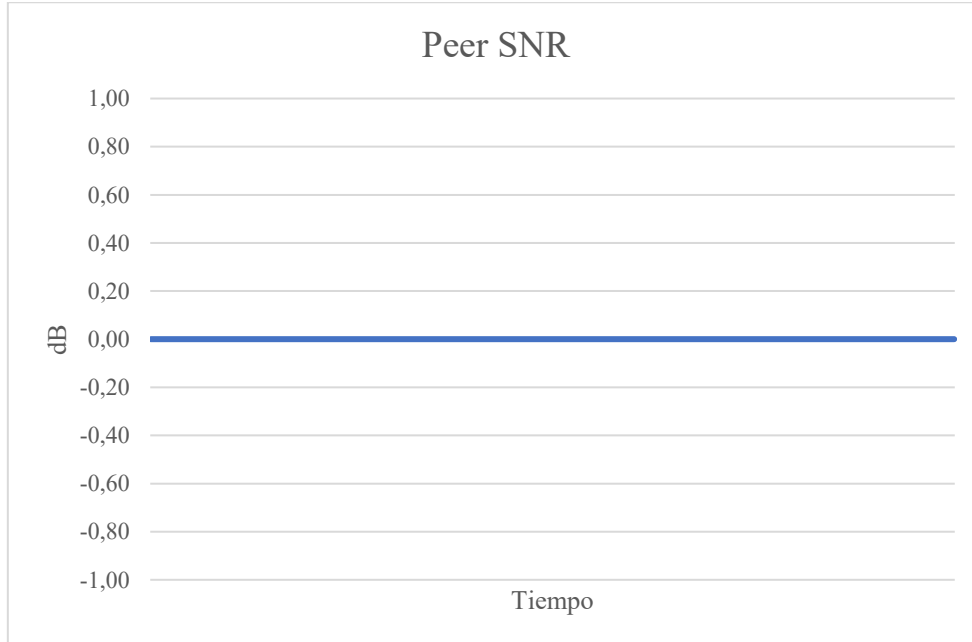


Ilustración 39. SNR medida en el módulo receptor con la configuración 2 durante la primera prueba.

### 3.3 Configuración 3 (LoRa, BW=250 kHz, SF=9, CRR = 4/8)

Como en los casos anteriores, se muestra en primer lugar el nivel de potencia recibida en cada módulo y se observan los mismos efectos, lo que lleva a pensar que se puede tratar de una tendencia.

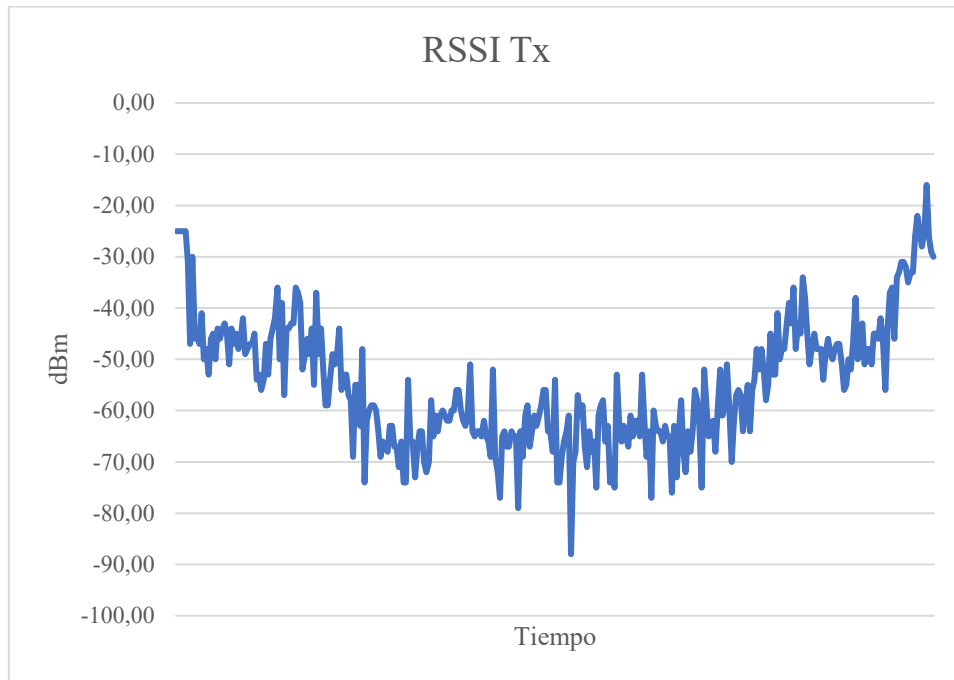


Ilustración 40. RSSI medida en el módulo transmisor con la configuración 3 durante la primera prueba.

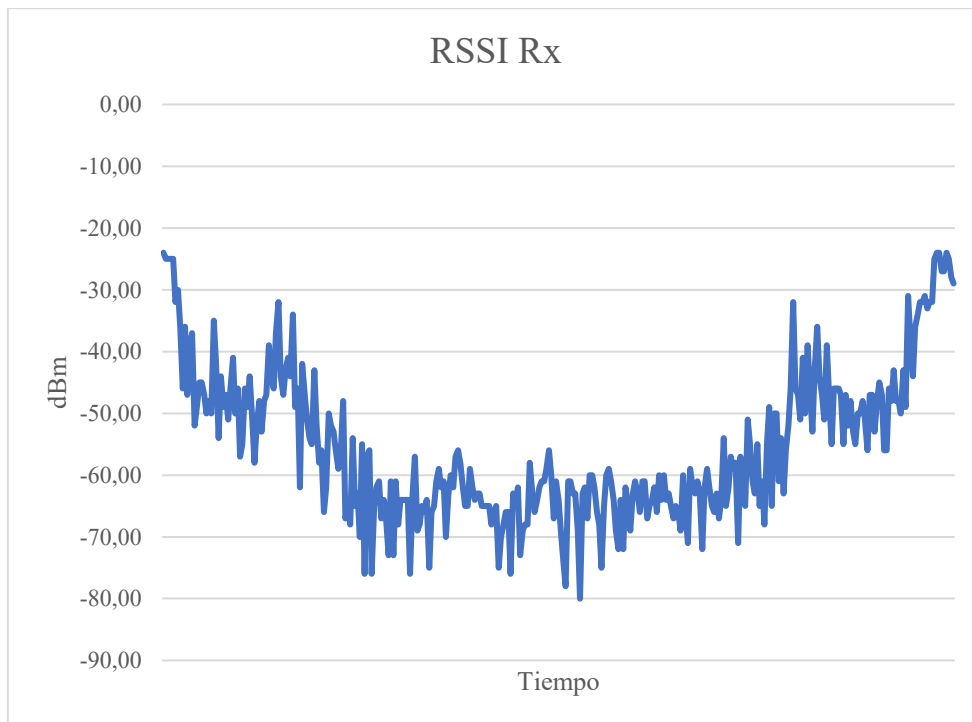


Ilustración 41. RSSI medida en el módulo receptor con la configuración 3 durante la primera prueba.

Ahora pueden verse los niveles de SNR, que en este caso ya no son tan estables como en los anteriores, por lo que no se podría hablar de tendencia para este parámetro.

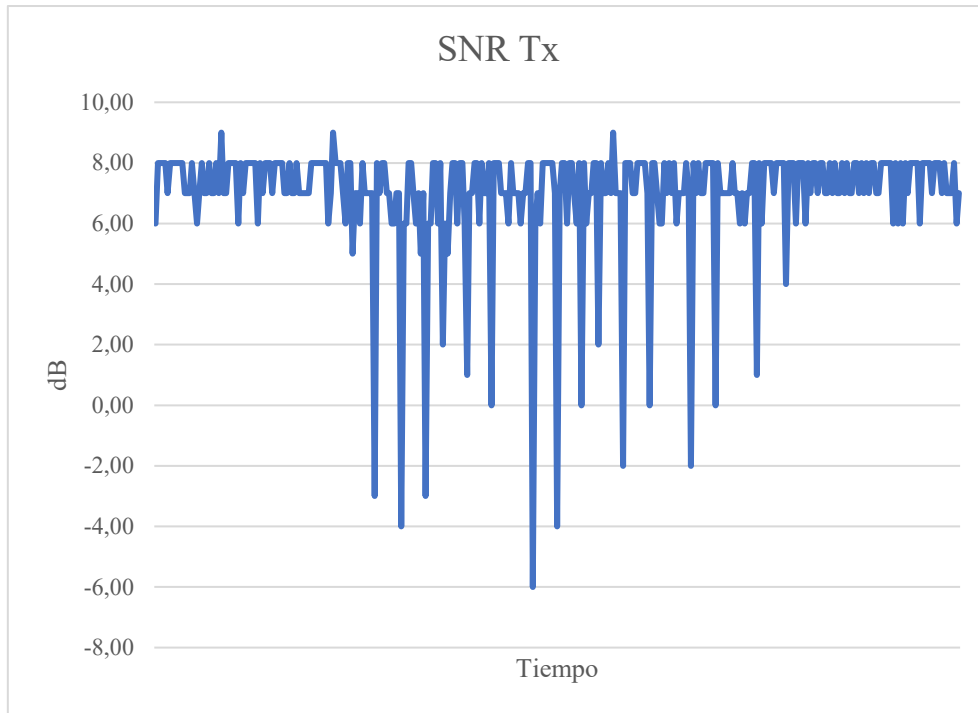


Ilustración 42. SNR medida en el módulo transmisor con la configuración 3 durante la primera prueba.

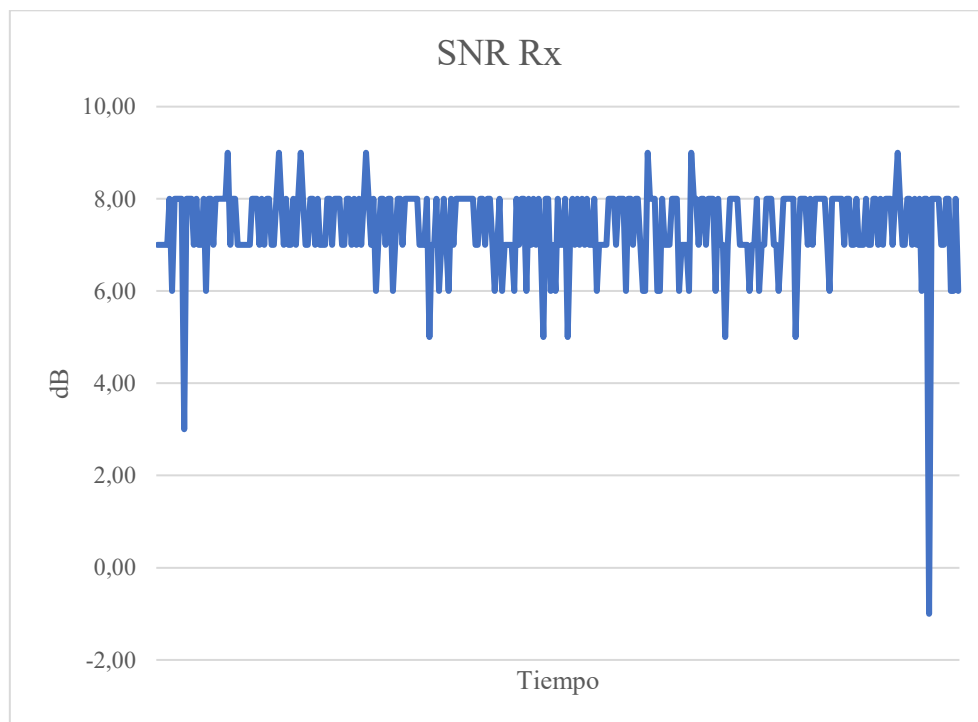


Ilustración 43. SNR medida en el módulo receptor con la configuración 3 durante la primera prueba.

### 3.4 Configuración 4 (LoRa, BW=500 kHz, SF=7, CRR = 4/8)

En primer lugar, se ofrecen las gráficas con los niveles de potencia recibidos.

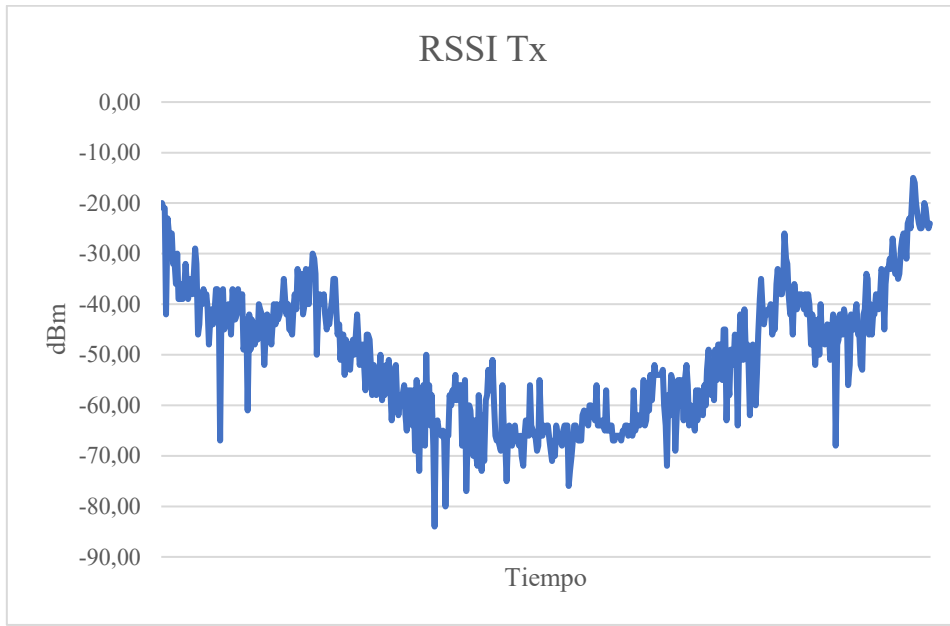


Ilustración 44. RSSI medida en el módulo transmisor con la configuración 4 durante la primera prueba.

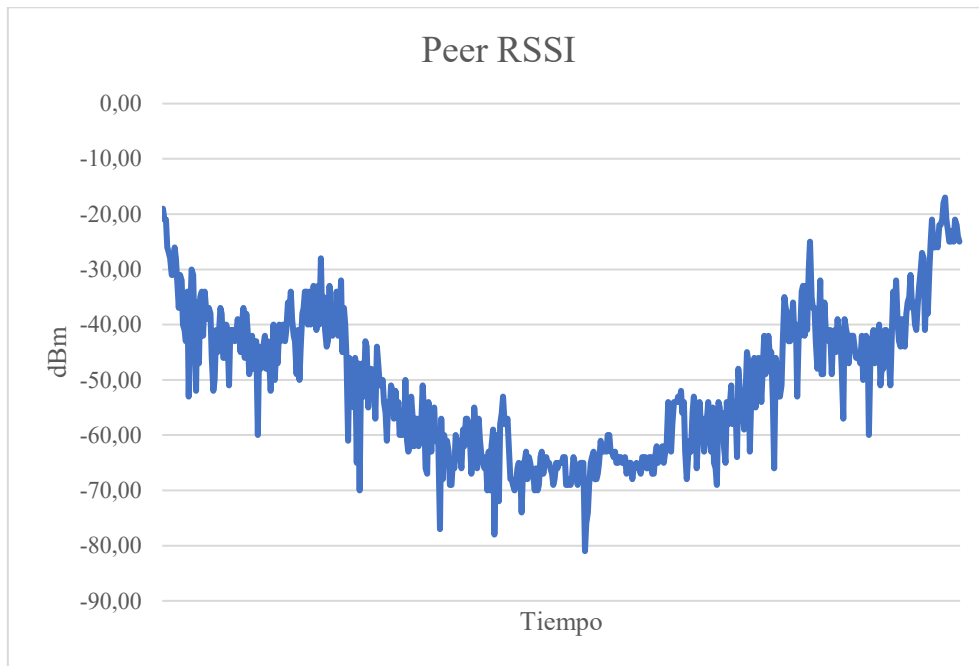


Ilustración 45. RSSI medida en el módulo receptor con la configuración 4 durante la primera prueba.

Y a continuación, los niveles de SNR de casa módulo, que mantienen la misma forma que en el caso anterior.

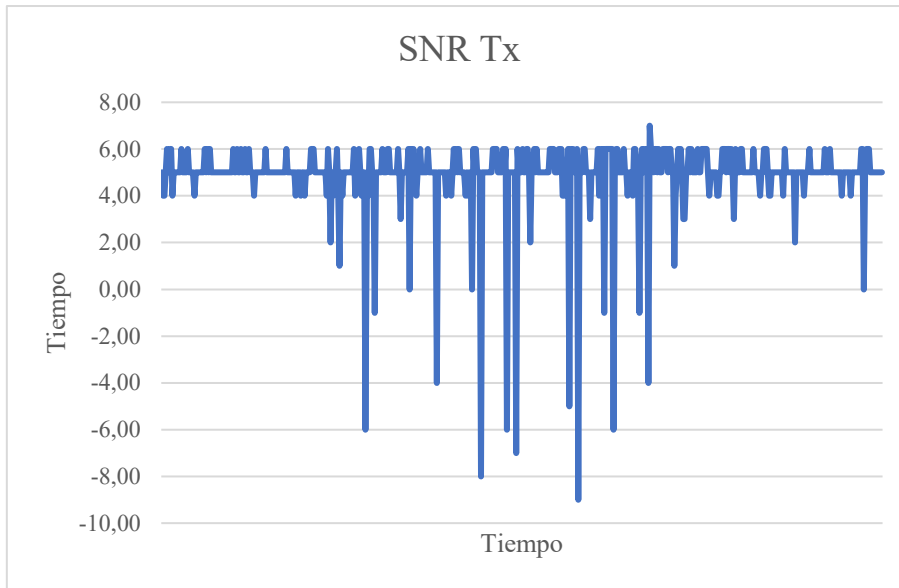


Ilustración 46. SNR medida en el módulo transmisor con la configuración 4 durante la primera prueba.

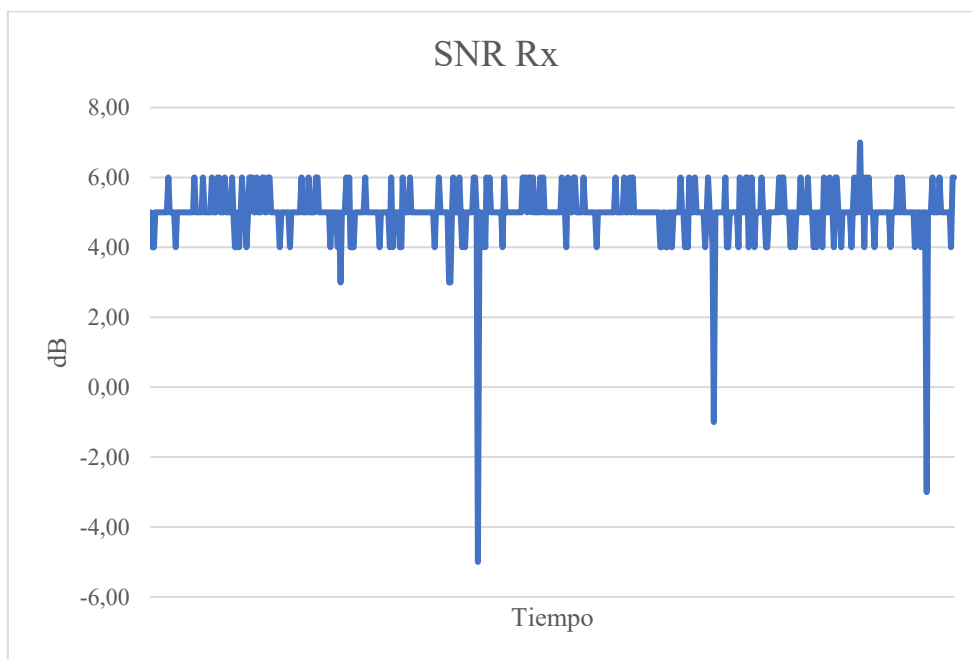


Ilustración 47. SNR medida en el módulo receptor con la configuración 4 durante la primera prueba.

### 3.5 Configuración 5 (BW=125 kHz, SF=12, CRR = 4/5)

En este caso el número de medidas desciende debido a la velocidad de transmisión de los datos, que vuelve a ser menor, comparable a la de la primera configuración.

Se muestran a continuación los niveles de potencia recibida en cada módulo.



Ilustración 48. RSSI medida en el módulo transmisor con la configuración 5 durante la primera prueba.



Ilustración 49. RSSI medida en el módulo receptor con la configuración 5 durante la primera prueba.

Y ahora, los niveles de SNR, que vuelven a parecerse a los de la primera configuración, por tener algunas características similares.

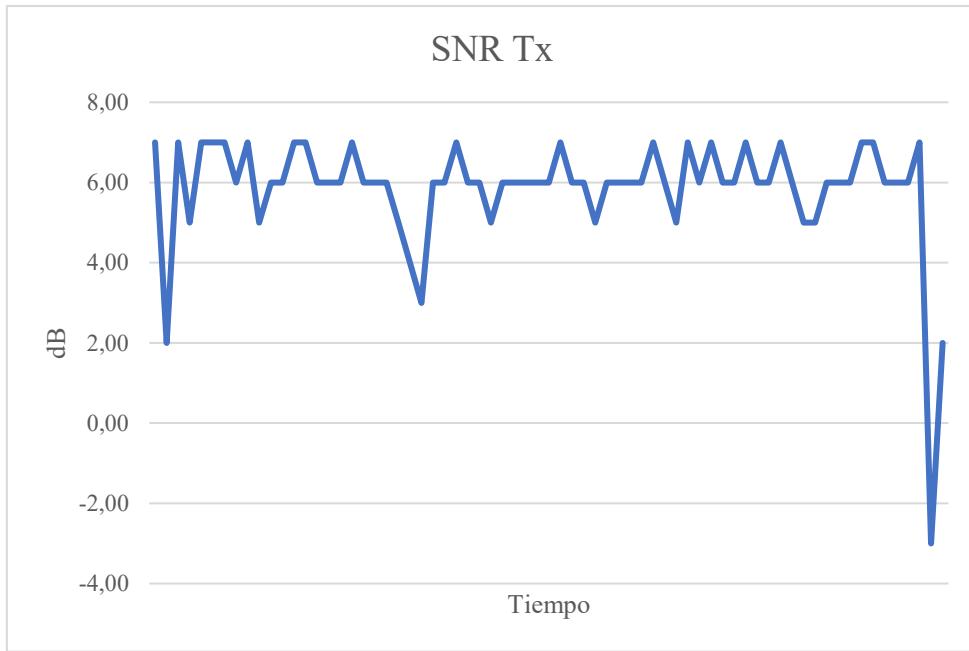


Ilustración 50. SNR medida en el módulo transmisor con la configuración 5 durante la primera prueba.

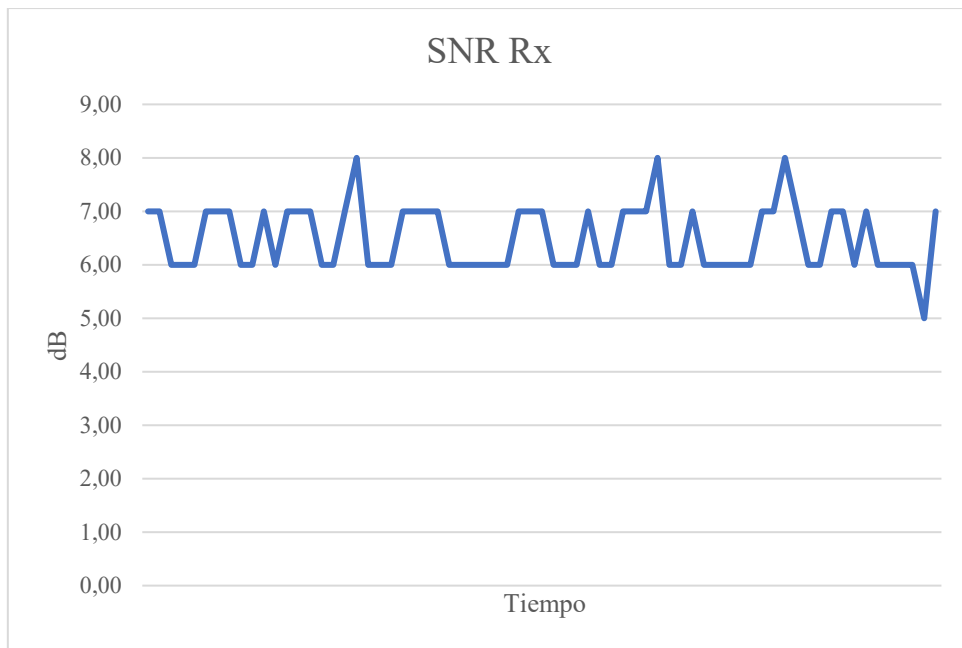


Ilustración 51. SNR medida en el módulo receptor con la configuración 5 durante la primera prueba

### 3.6 Resumen

En este apartado se pretende resumir el contenido de las gráficas anteriormente expuestas con el objetivo de que, con un simple vistazo a la tabla 9, se pueda tomar una decisión de qué



configuración es más adecuada para el propósito buscado en función de los parámetros que resulten interesantes.

*Tabla 9. Valores medios de los parámetros más relevantes medidos durante la primera prueba.*

Configuración	RSSI media en Tx (dBm)	RSSI media en Rx (dBm)	SNR media en Tx (dB)	SNR media en Rx (dB)	PER media ascendente (%)	PER media descendente (%)
1	-55,66	-55,48	5,82	6,39	0	0
2	-41,26	-42,26	0	0	2,28	0,66
3	-54,74	-55,28	6,98	7,39	1,88	1,86
4	-50,33	-50,53	4,87	4,99	1,09	0,69
5	-59,42	-59,84	5,82	6,49	0	0

A nivel de SNR, la mejor configuración es la segunda, al igual que en la prueba anterior. Si se busca un nivel de potencia recibida mejor, se debería optar por la segunda configuración, mientras que, si se pretende que la transmisión de datos sea fiable, la primera y quinta configuración deberían ser las elegidas.

Ahora se comprobará si estos criterios se mantienen al aumentar la distancia de separación entre los módulos.

## 4. 200 metros

Del mismo modo que en los dos casos anteriores, primero se muestran las curvas con los resultados de relación señal a ruido y nivel de potencia recibida para después compararlos entre sí.

### 4.1 Configuración 1 (BW=125 kHz, SF=12, CRR = 4/8)

La forma de las gráficas de potencia recibida es similar en ambos módulos, cambiando el nivel. En ambos casos se pueden observar las oscilaciones debidas al recorrido seguido, que se puede ver en los planos que se adjuntan posteriormente.

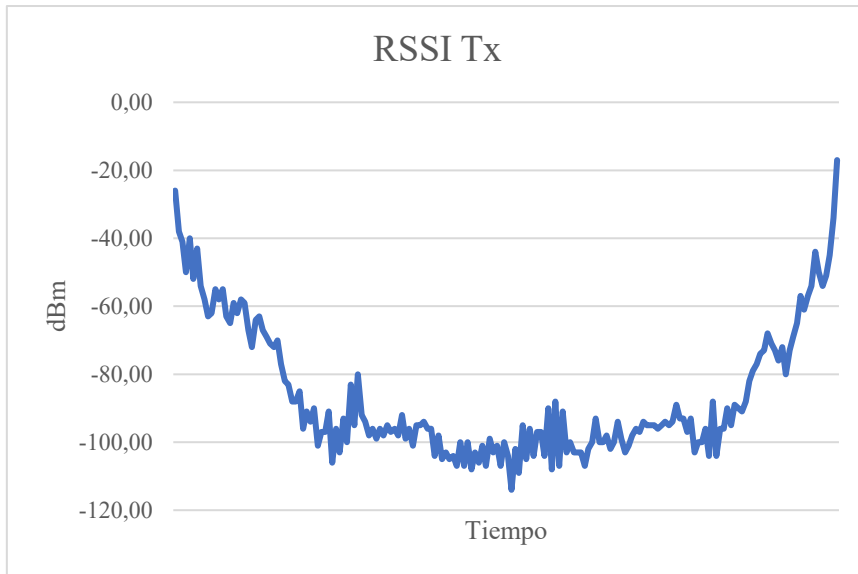


Ilustración 52. RSSI medida en el módulo transmisor con la configuración 1 durante la segunda prueba.

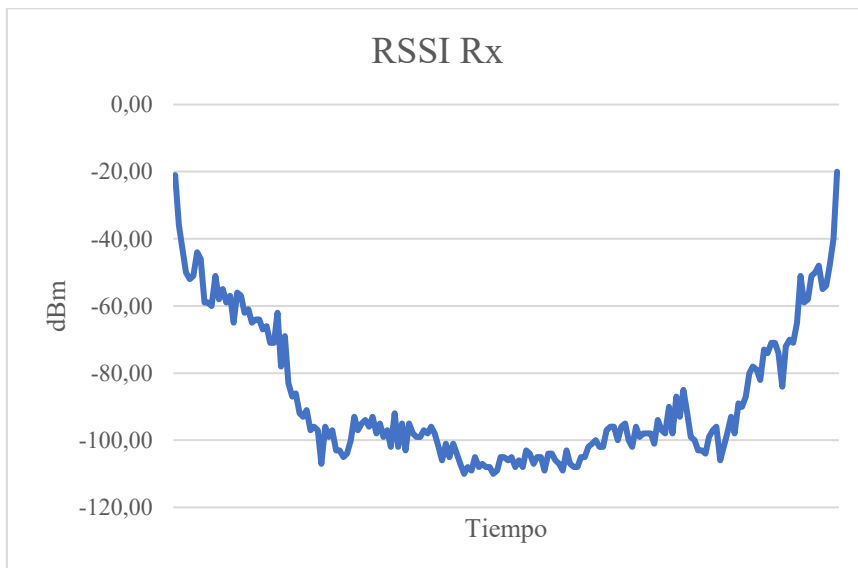


Ilustración 53. RSSI medida en el módulo receptor con la configuración 1 durante la segunda prueba.

A continuación, pueden verse las gráficas con los datos de relación señal a ruido, que al igual que en la prueba anterior, sufren una menor variación que la potencia.

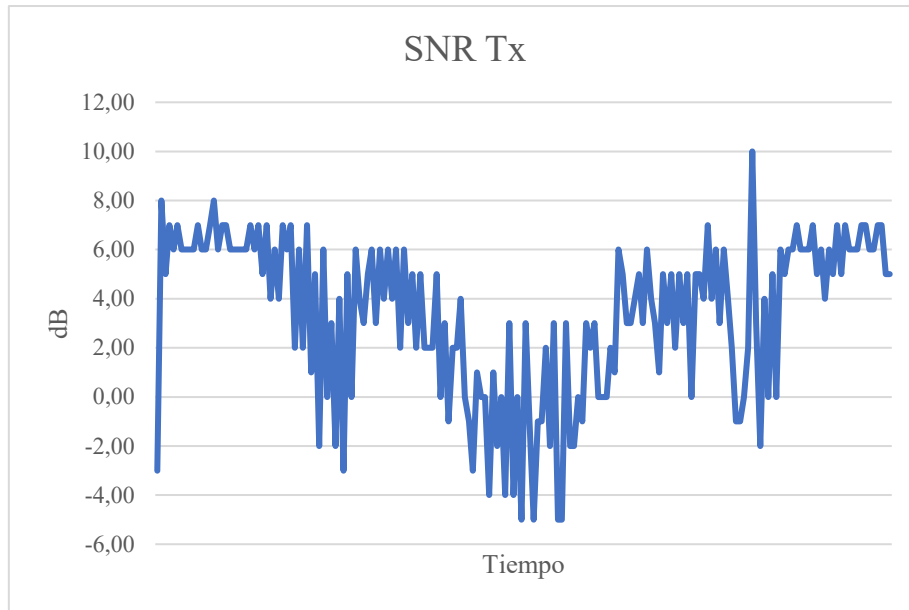


Ilustración 54. SNR medida en el módulo transmisor con la configuración 1 durante la segunda prueba.

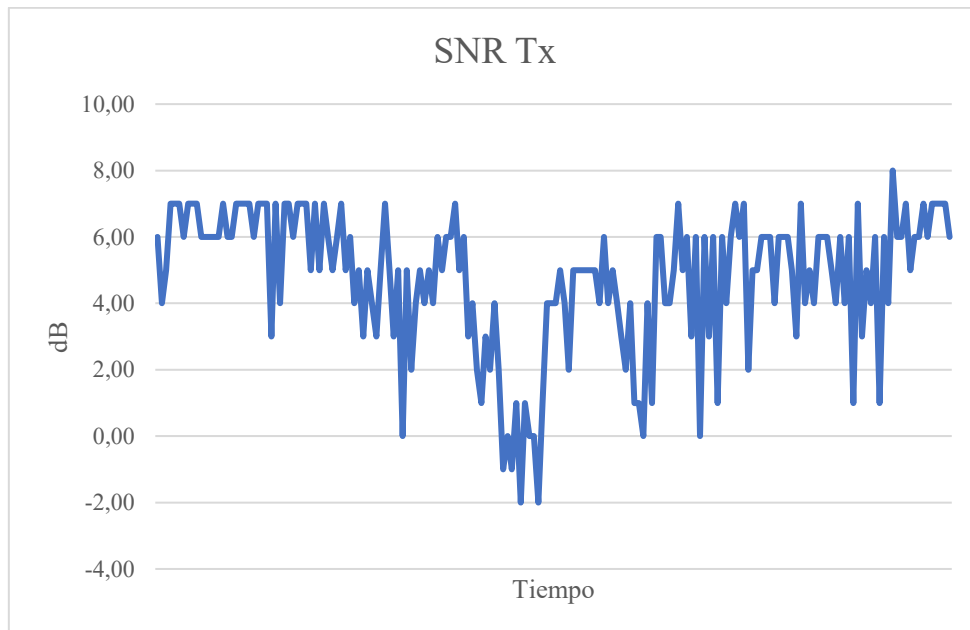


Ilustración 55. SNR medida en el módulo receptor con la configuración 1 durante la segunda prueba.

## 4.2 Configuración 2 (FSK, 100 kbps)

Siguiendo el mismo procedimiento, se muestran los datos de potencia recibida. En este caso, debido a la tasa de datos, hay un mayor número de medidas que con la configuración anterior, algo que se podía ver en las anteriores pruebas.

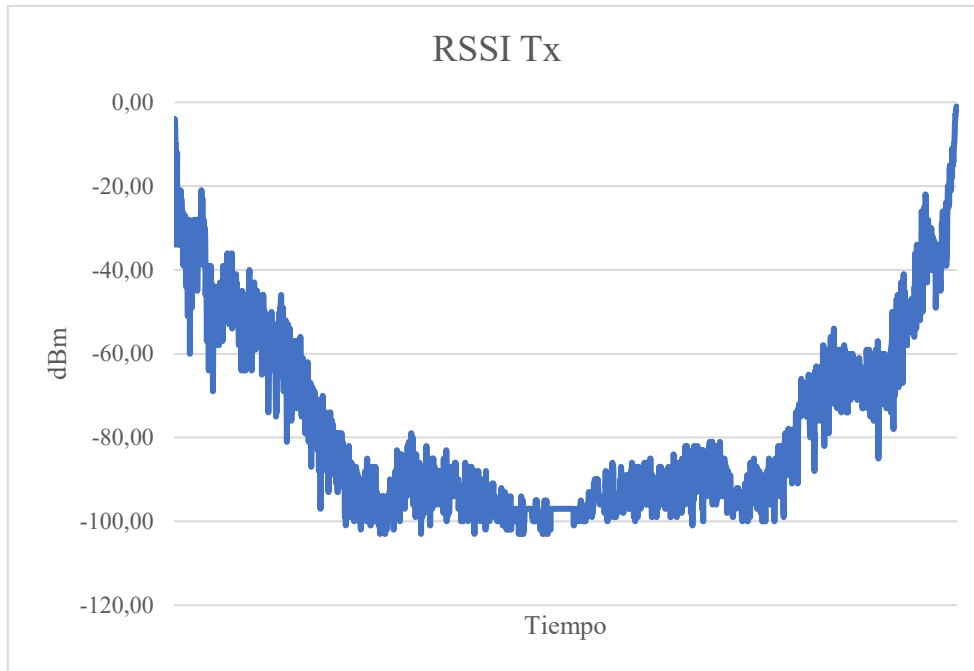


Ilustración 56. RSSI medida en el módulo transmisor con la configuración 2 durante la segunda prueba.

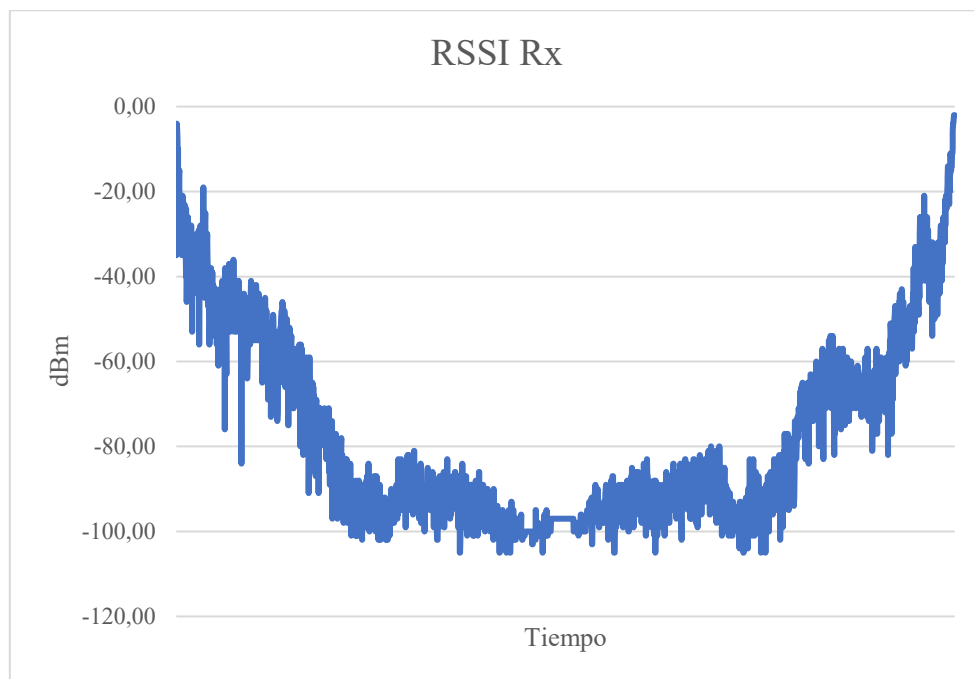


Ilustración 57. RSSI medida en el módulo receptor con la configuración 2 durante la segunda prueba.

La SNR, al igual que en las dos pruebas anteriores, se mantiene constante e igual a cero tanto en el transmisor como en el receptor.

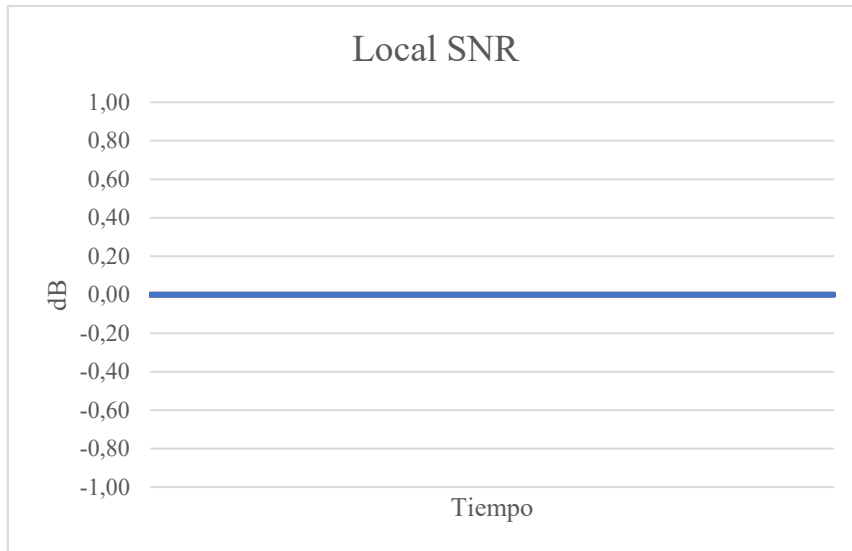


Ilustración 58. SNR medida en el módulo transmisor con la configuración 2 durante la segunda prueba.

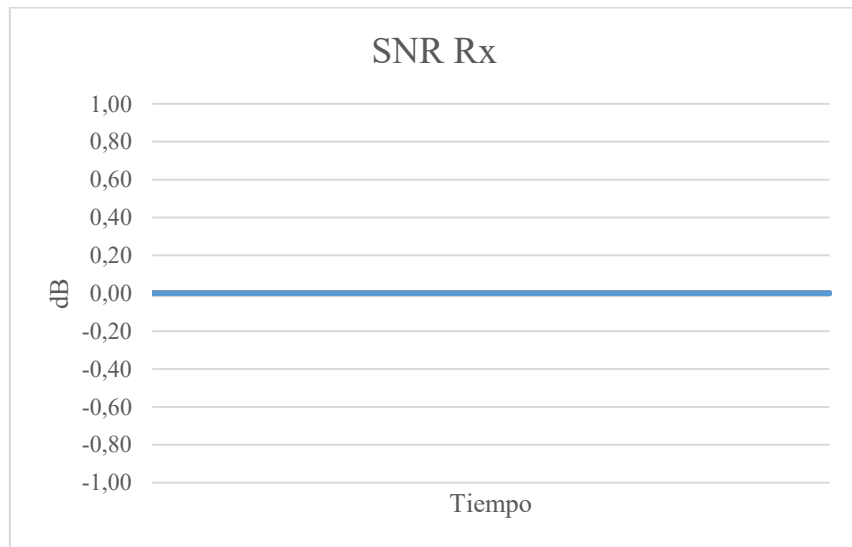


Ilustración 59. SNR medida en el módulo receptor con la configuración 2 durante la segunda prueba.

### 4.3 Configuración 3 (LoRa, BW=250 kHz, SF=9, CRR = 4/8)

Se presentan ahora los datos de potencia recibida, que comparten la misma forma que los de las configuraciones anteriores, lo que concuerda con las otras pruebas y con lo que cabía esperar del banco de pruebas.

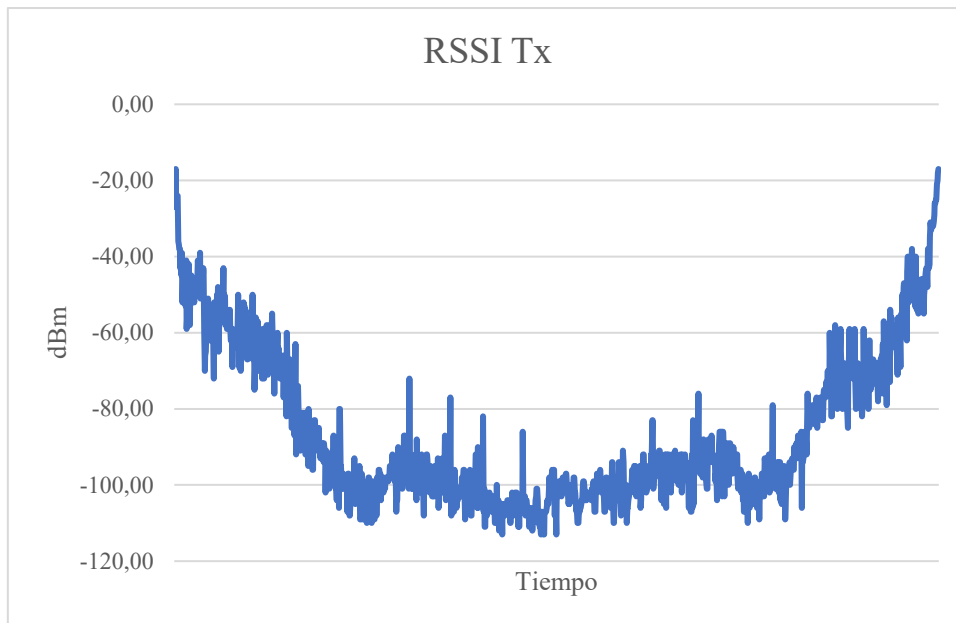


Ilustración 60. RSSI medida en el módulo transmisor con la configuración 3 durante la segunda prueba.

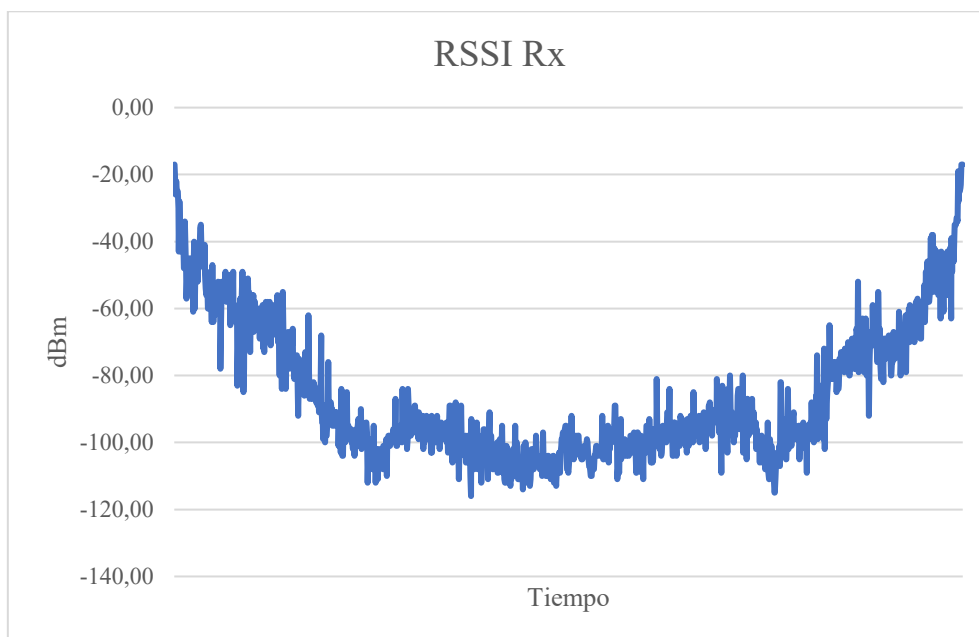


Ilustración 61. RSSI medida en el módulo receptor con la configuración 3 durante la segunda prueba.

Y ahora se muestran los datos de SNR, que responden al mismo patrón del resto de medidas y configuraciones.

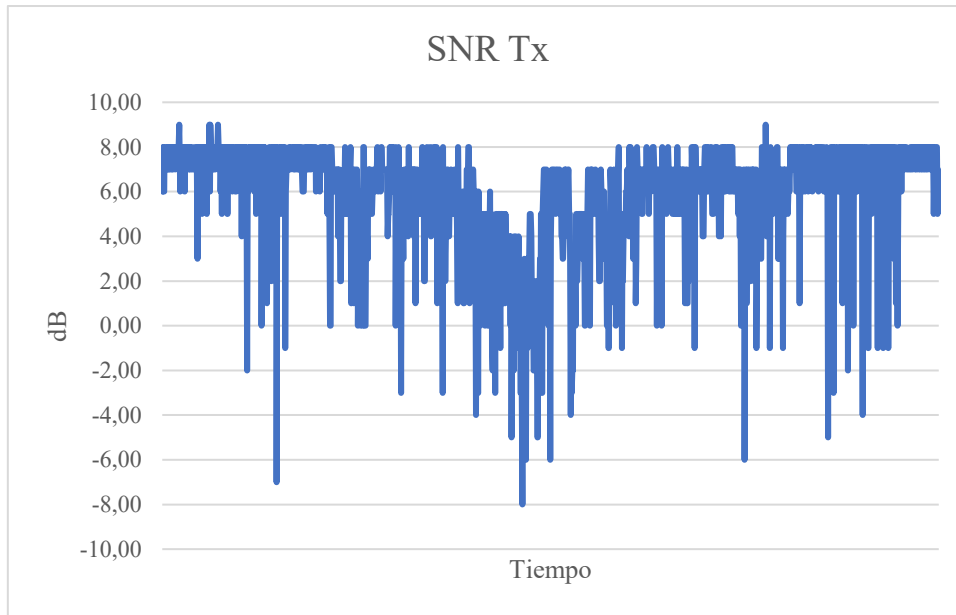


Ilustración 62. SNR medida en el módulo transmisor con la configuración 3 durante la segunda prueba.

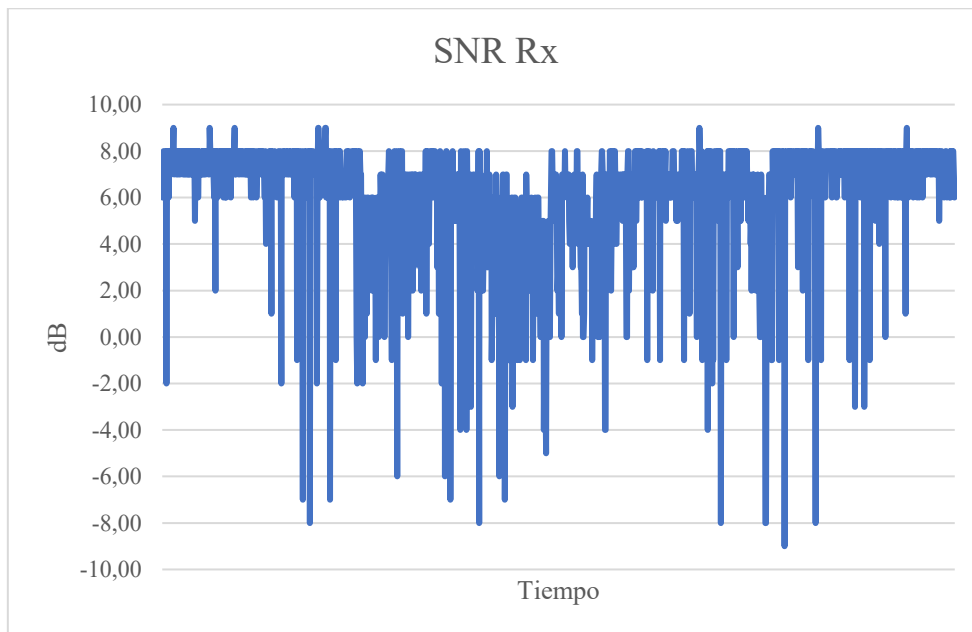


Ilustración 63. SNR medida en el módulo receptor con la configuración 3 durante la segunda prueba.

#### 4.4 Configuración 4 (LoRa, BW=500 kHz, SF=7, CRR = 4/8)

Se comienza mostrando las gráficas con los datos de potencia.

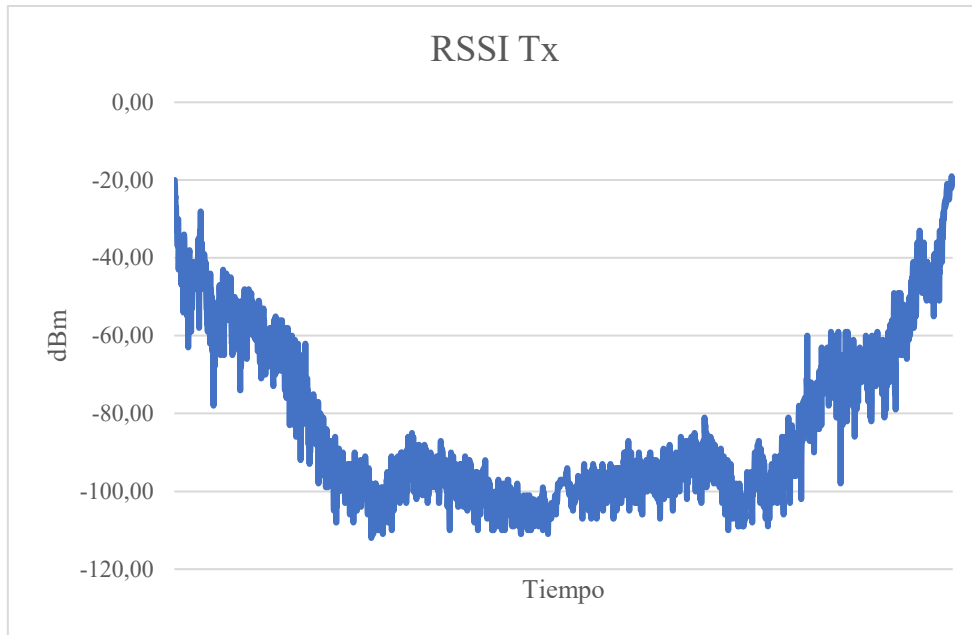


Ilustración 64. RSSI medida en el módulo transmisor con la configuración 4 durante la segunda prueba.

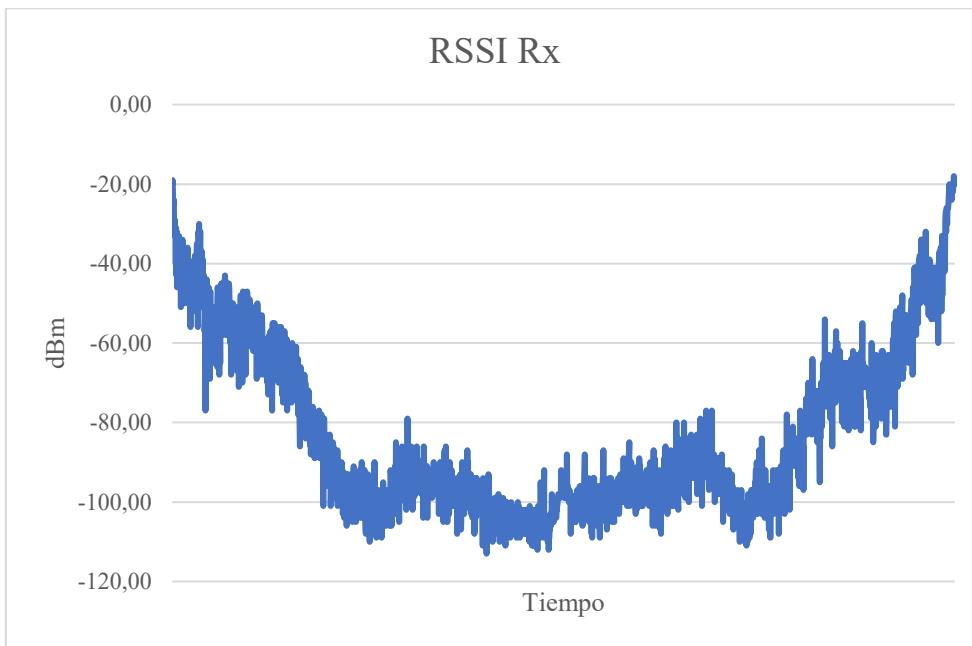


Ilustración 65. RSSI medida en el módulo receptor con la configuración 4 durante la segunda prueba.

Y a continuación, la SNR en transmisión y recepción.



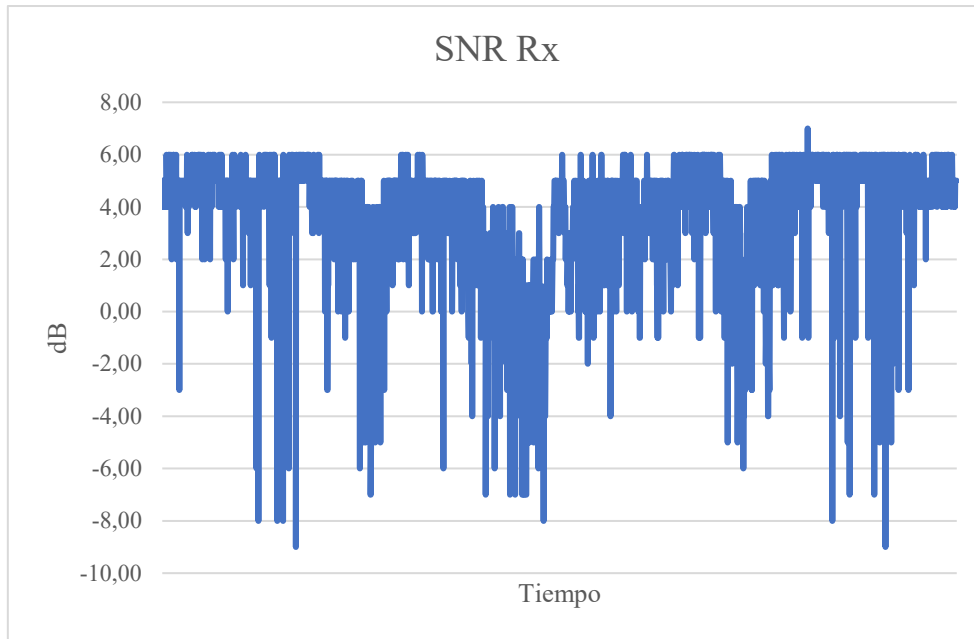


Ilustración 66. SNR medida en el módulo transmisor con la configuración 4 durante la segunda prueba.

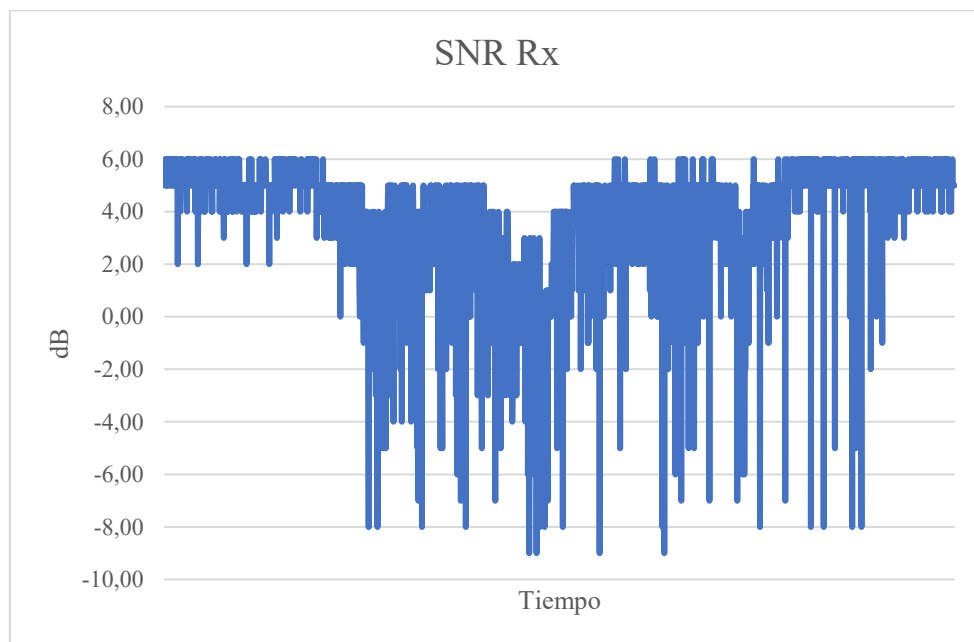


Ilustración 67. SNR medida en el módulo receptor con la configuración 4 durante la segunda prueba.

#### 4.5 Configuración 5 (BW=125 kHz, SF=12, CRR = 4/5)

A continuación, se pueden ver las gráficas que representan la potencia recibida en transmisión y recepción.

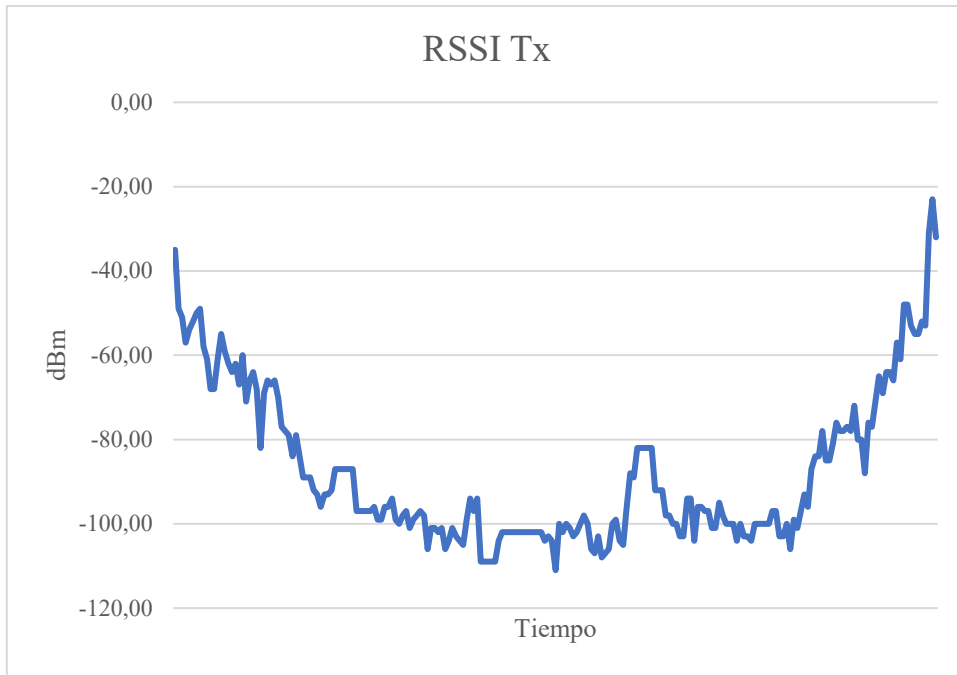


Ilustración 68. RSSI medida en el módulo transmisor con la configuración 5 durante la segunda prueba.

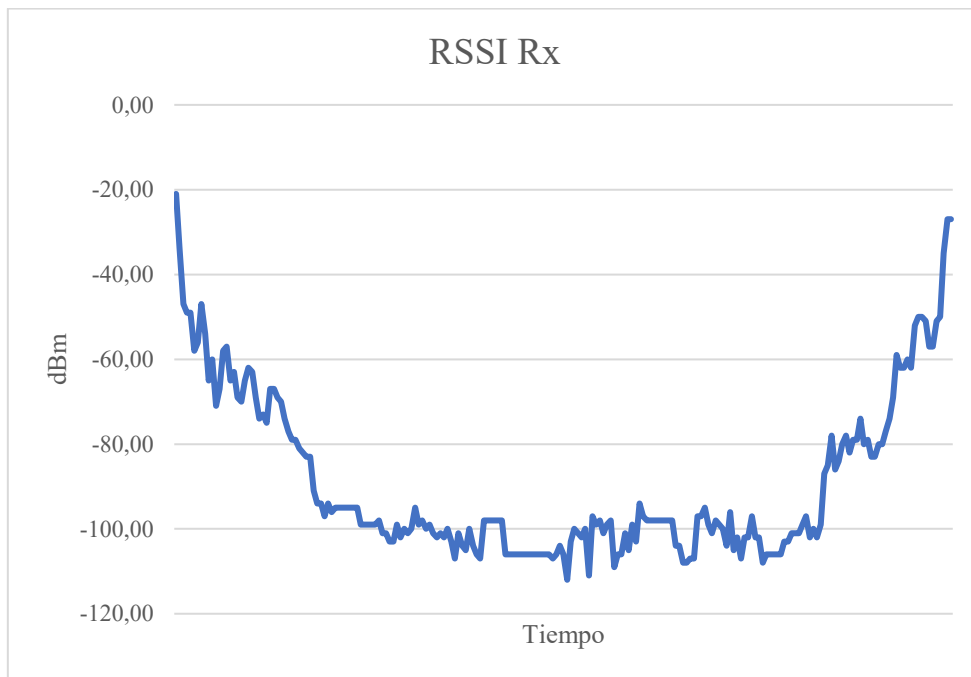


Ilustración 69. RSSI medida en el módulo receptor con la configuración 5 durante la segunda prueba.

Y, en segundo lugar, las gráficas con valores de SNR.

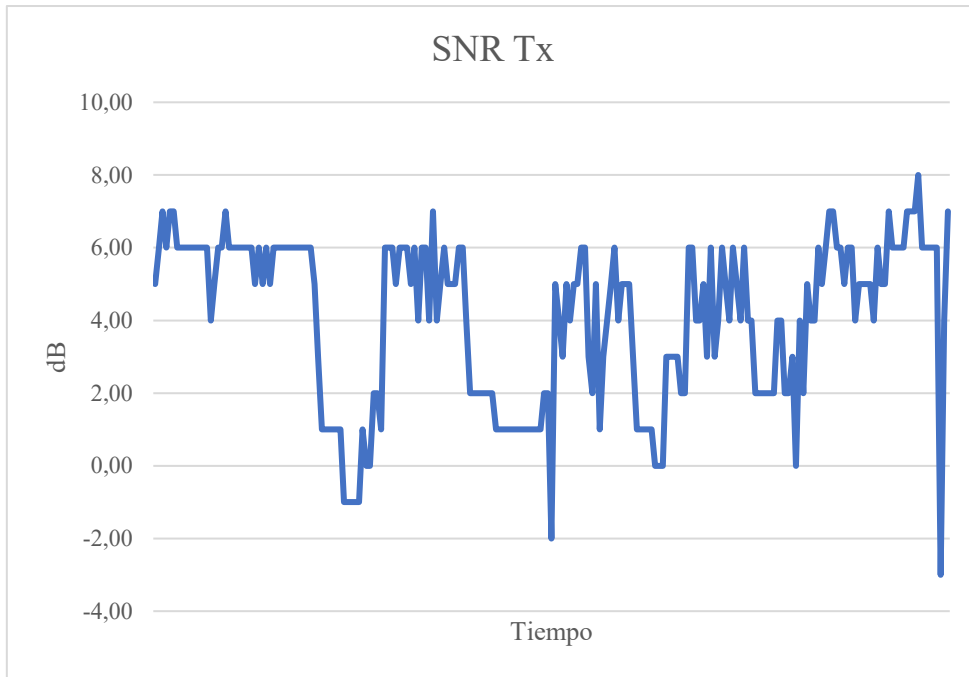


Ilustración 70. SNR medida en el módulo transmisor con la configuración 5 durante la segunda prueba.

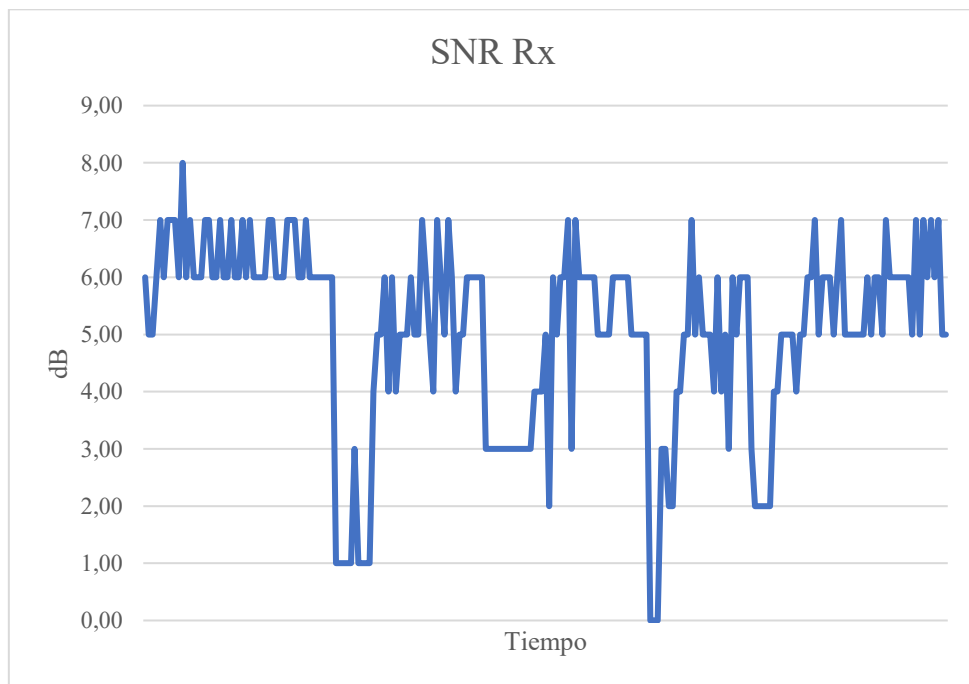


Ilustración 71. SNR medida en el módulo receptor con la configuración 5 durante la segunda prueba.

## 4.6 Resumen

Al igual que en la prueba anterior, en la tabla 10 se muestra un resumen de los valores más importantes de los parámetros medidos, con el mismo objetivo.

Tabla 10. Valores medios de los parámetros más relevantes medidos durante la segunda prueba.

Configuración	RSSI media en Tx (dBm)	RSSI media en Rx (dBm)	SNR media en Tx (dB)	SNR media en Rx (dB)	PER media ascendente (%)	PER media descendente (%)
1	-86,26	-87,64	3,44	4,75	2,52	0,2
2	-77,23	-77,3	0	0	14,8	14,96
3	-86,13	-85,95	5,77	6,02	10,65	4,88
4	-83,07	-82,7	3,65	3,68	6,54	4,73
5	-87,57	-88,99	4,05	5,06	17,02	3,37

En este caso, los resultados son similares a los de la primera prueba en términos cualitativos, aunque en términos cuantitativos, se aprecie un descenso en la potencia recibida y la relación señal a ruido y un aumento de la tasa de error de paquete. Estos descensos y aumentos son debidos al incremento de la distancia entre los dos módulos y resultan esperables.

En términos de potencia recibida, la segunda configuración sigue siendo la mejor, al igual que la tercera continúa manteniendo los valores más altos de SNR. En cambio, en cuanto a transmisión de mensajes sin errores, la quinta configuración ya no es tan buena como en la prueba anterior, mientras que la primera sigue siendo la mejor opción si lo que se busca es fiabilidad.

## 5. Análisis de resultados

A la vista de los resultados obtenidos, es necesario establecer una clasificación de las distintas configuraciones empleadas según el propósito de la comunicación que se desee llevar a cabo.

Para realizar esta clasificación, se han establecido tres tipos de comunicaciones, basadas en las tres principales características estudiadas: potencia recibida, calidad de la señal y errores en los mensajes.

- Comunicaciones con baja tasa de error: Este tipo de transmisiones de datos son adecuadas cuando no se realiza una gran cantidad de intercambio de mensajes, pero se desea que no falle ninguno. Esto puede darse en casos de control y gestión de sistemas o parámetros, como, por ejemplo, los niveles de depósitos, temperaturas, radiación...

Para este tipo de comunicaciones, las configuraciones más adecuadas serían la primera y, después, la quinta, en la que la velocidad de transmisión es muy baja, pero la fiabilidad es bastante alta.

- Comunicaciones con calidad de señal alta: Estas comunicaciones necesitan que la señal recibida sea distinguible con facilidad por encima del ruido, ya sea por requisitos del receptor o por necesidades electrónicas de sistema.

En este caso, lo más adecuado, sería optar por la tercera configuración, que resulta ser la más robusta frente al ruido.

- Comunicaciones con nivel de potencia recibida determinado: En este caso, el requisito necesario es el nivel de potencia recibida, ya sea por cuestiones legislativas o de hardware.

Para estas comunicaciones la configuración más adecuada sería la segunda, que ofrece los mejores niveles.

Una vez realizada esta clasificación, se debe tratar de escoger la mejor configuración en todos los términos, la solución de compromiso que sirva para varios tipos de aplicaciones.

La cuarta configuración queda descartada porque no ofrece los mejores valores en ninguno de los parámetros medidos. La quinta también podría descartarse porque sus valores de potencia y calidad son similares a los de la primera, pero tiene peor tasa de error. La segunda configuración también puede ser descartada por tener los peores valores de SNR.

De este modo, la primera y la tercera configuración parecen ser las mejores opciones, complementándose la una a la otra en términos de calidad y fiabilidad.

Tras establecer una jerarquía de configuraciones, es necesario conocer los motivos que llevan a que cada configuración se comporte de una manera determinada.

El primer factor que se debe tener en cuenta es la propia naturaleza de la modulación. Todas las configuraciones que emplean la modulación LoRa dan lugar a resultados que se encuentran en un rango de valores bastante similar, mientras que la configuración que emplea como modulación FSK, tiene unas características visiblemente distintas.

El siguiente factor que resulta determinante en los resultados obtenidos es el ancho de banda. El ancho de banda es determinante en cuanto a la velocidad de transmisión de datos (a mayor ancho de banda, mayor capacidad de canal y mayor número de mensaje enviados en el mismo espacio de tiempo). También el ancho de banda afecta a la PER puesto que, a mayor ancho de banda, mayor riesgo de interferencia con otras comunicaciones, dado que la transmisión se lleva a cabo en una zona del espectro sin licencia.

En esta línea, el factor de ensanchamiento es también importante en su relación con la transmisión de datos, pues permite que se envíen más o menos mensajes en el mismo intervalo temporal.

Por último, el factor de corrección frente a errores resulta ser la pieza fundamental a la hora de obtener una mejor PER, aunque no la única, pues el factor de ensanchamiento es útil también. Y, además, al aumentar la cantidad de bits que se envían, repercute en la velocidad de transmisión.

Los tres parámetros resultan ser fundamentales para determinar el resultado de las configuraciones y es esencial encontrar un equilibrio entre ellos que se adapte a las necesidades de la actividad que se quiera llevar a cabo.

Teniendo en cuenta esto y las características fundamentales de IoT ya mencionadas anteriormente, la mejor opción para transmitir datos sería la primera configuración, puesto que es la más fiable y evitaría la necesidad de mensajes de confirmación, ahorrando así energía. Además, al tener un ancho de banda pequeño, también se ahorrarían costes.



## Planos

En esta sección se muestran los planos de las zonas en las que se han realizado todas las medidas. En primer lugar, de forma general.



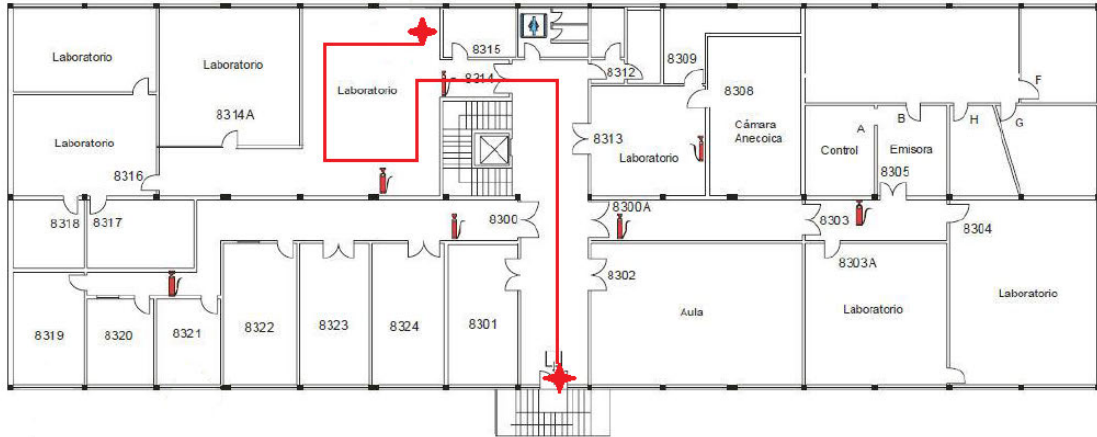
*Ilustración 72. Lugar escogido para la prueba a 40 m.*



*Ilustración 73. Lugar escogido para la prueba a 200 m.*

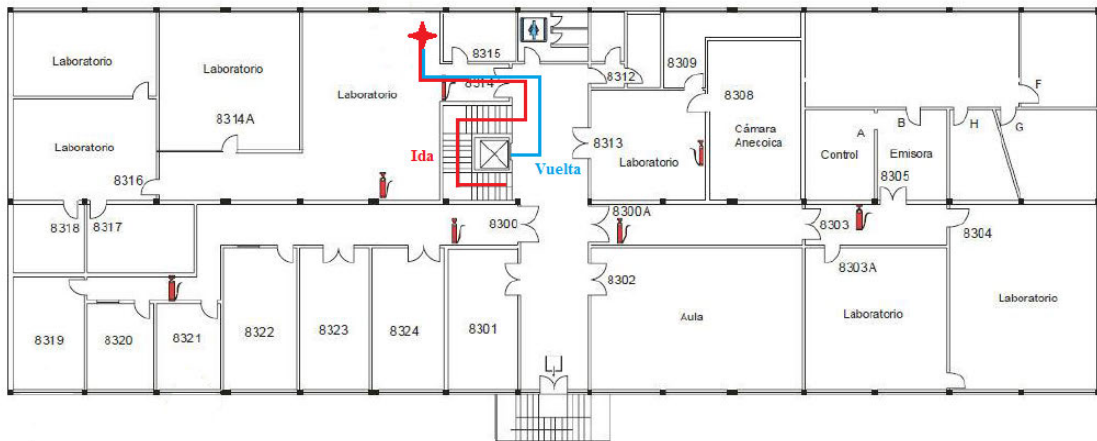
A continuación, se muestra el plano con el recorrido seguido en las medidas realizadas en interior, con una distancia de 40 m entre los dos módulos radio.

## Aplicación para Transmisión de Datos en Internet de las Cosas



*Ilustración 74. Plano de situación de las medidas a 40 m.*

Ahora se muestran los dos planos con el recorrido seguido en las medidas a 200 m, diferenciando el camino de vuelta en la zona en la que hay cambios.



*Ilustración 75. Primer plano de situación de las medidas a 200 m.*



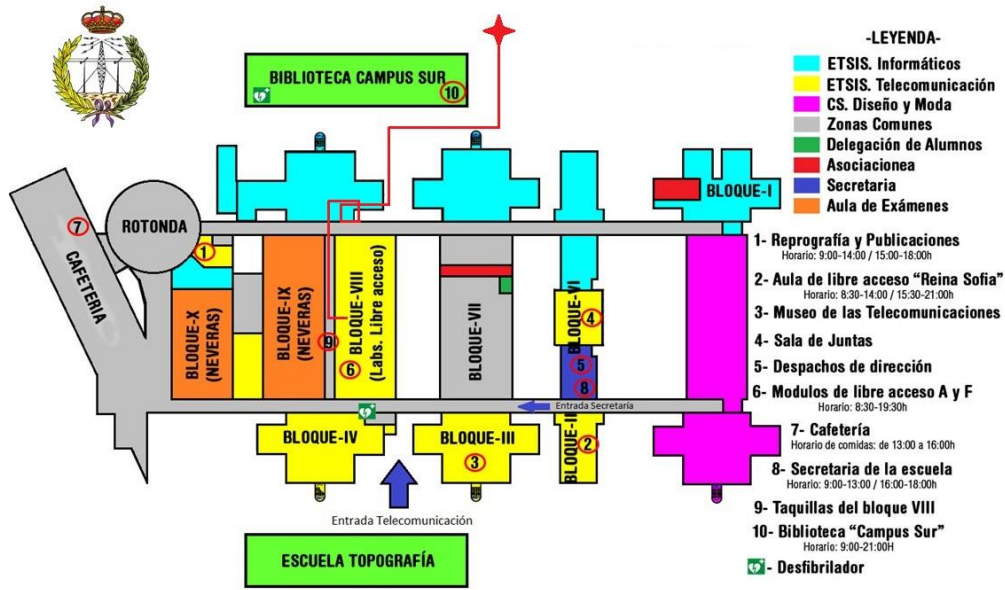


Ilustración 76. Segundo plano de situación de las medidas a 200 m.



## **Presupuesto**

- Starter-Kit SK-iM880A – 250 €
- Horas de trabajo – 2000 € (Remuneración típica de una beca o puesto en prácticas durante cuatro meses)
- Costes de electricidad, conexión a Internet y uso de ordenadores – 0 € (A cargo del departamento de la Universidad)
- Software empleado – 0 € (Incluido en el precio del hardware)

Por lo que el coste total del proyecto asciende a 2250 €.



## **Conclusiones**

Existen multitud de opciones para desarrollar proyectos relacionados con IoT, por lo que es esencial realizar un estudio previo de las características que se necesitan y así escoger la tecnología que mejor se adapte a las necesidades del proyecto.

Resulta complicado discriminar tecnologías y configuraciones de sistemas, puesto que Internet de las cosas abarca multitud de áreas y en cada una de ellas las necesidades son distintas, por lo que este proyecto se ha centrado en las aplicaciones en las que un usuario quiera desarrollar su propio proyecto sin ceñirse a normas estrictas.

La transmisión de datos es una de esas características que deben analizarse, ya que es la parte fundamental de cualquier aplicación IoT.

Como resultado del trabajo realizado, se puede concluir que los aspectos que deben prevalecer a la hora de elegir un determinado tipo de transmisión son la fiabilidad, la velocidad de transmisión y la potencia transmitida y recibida.

En el mundo de Internet de las cosas, lo deseable es que los mensajes se envíen sin necesidad de confirmación para ahorrar batería, por lo que deben ser fiables. La velocidad de transmisión no debe ser necesariamente alta para así poder emplear anchos de banda menores que redunden en un menor consumo de energía para la transmisión de datos. Al no querer utilizar grandes niveles de potencia a la hora de transmitir datos, los niveles de esta en recepción no serán altos tampoco.

Todo ello hace, que tal y como se ha visto en los resultados de las pruebas realizadas, las mejores opciones para transmitir datos con tecnologías IoT tengan anchos de banda pequeños, velocidades de transmisión bajas y una gran protección frente a errores, que evite la necesidad de esperar verificación por parte del sistema.

Otros factores que deben tenerse en cuenta a la hora de elegir una tecnología en detrimento de otra son la versatilidad y la posibilidad de configurar las herramientas que proporcione, sin necesidad de ceñirse a un esquema estricto.

Tras comparar varias tecnologías, se puede concluir que para desarrollar proyectos desde cero e ir avanzando en todas sus fases resulta muy interesante emplear LoRa y todas sus herramientas asociadas, pues permiten al usuario construir multitud de sistemas diferentes y, además, su coste es mucho menor que el de otras tecnologías, puesto que deja gran parte del trabajo al usuario, al contrario que otras compañías, que hacen todo el trabajo y cuyos procesos resultan opacos para el cliente.

Cabe destacar que esta conclusión es tan sólo una recomendación y que queda en manos de la persona que vaya a desarrollar su proyecto la elección del mejor sistema para el mismo, dado que Internet de las cosas sigue en constante desarrollo y crecimiento y parece no tener límites por el momento.



## **Bibliografía**

GSMA Mobile IoT Industry Alignment Group (2016). 3GPP Low Power Wide Area Technologies.

Franklin Heath Ltd (2017). LPWA Technology Security Comparison.

González García, A. J. (2017). IoT: Dispositivos, tecnologías de transporte y aplicaciones. Universitat Oberta de Catalunya

IMST GmbH (2015). WiMOD LR Starter Kit: Quick Start Guide.

IMST GmbH (2015). WiMOD iM880A datasheet,

IMST GmbH (2014). WiMOD LR Studio User Guide.

IMST GmbH (2015). WiMOD-LoRaWAN\_DevTool User Guide.

IMST GmbH (2015). WiMOD LoRaWAN EndNode Modem HCI Specification.

Link Labs (2018). Cost-Effective Solution for End-to-End Manufacturing Visibility.

Link Labs (2018). Low Power Wide Area Networks Explained.

Link Labs (2018). Symphony Link vs. LoRaWAN.

Link Labs (2017). The Ultimate Guide to IoT Terminology.





## Anexos

### 1. Comunicación HCI

En esta sección se pretende profundizar en el flujo de mensajes de la comunicación HCI y en el formato de estos, ya que se trata del protocolo empleado en la comunicación del ordenador con los módulos radio que se utilizan en el proyecto.

#### 1.1 Flujo de mensajes

El protocolo HCI define tres tipos de mensajes:

- Mensajes de comando: Siempre se envían desde el controlador del host hacia el módulo radio para iniciar una función.
- Mensajes de respuesta: Se envían desde el módulo radio al controlador para responder a un mensaje HCI de solicitud previo.
- Mensajes de evento: Se pueden enviar desde el módulo radio al controlador en cualquier momento para indicar un suceso o para transmitir datos que hayan sido recibidos a través del enlace radio desde el módulo par.

#### 1.2 Formato de los mensajes HCI

La figura siguiente muestra el formato de los mensajes HCI usados con propósitos comunicativos.

ID destino	ID mensaje	Carga
8 bit	8 bit	8 * n bit

*Ilustración 77. Formato de mensaje HCI simple*

- ID de destino: Este campo identifica a un punto de acceso de servicio lógico dentro de un dispositivo. El punto de acceso puede considerarse como un componente de firmware que implementa múltiples servicios que pueden ser llamados por su correspondiente mensaje HCI. Este enfoque modular permite que se puedan soportar hasta 256 componentes independientes por dispositivo.
- ID de mensaje: Este campo identifica a un tipo específico de mensajes y se utiliza para activar la función correspondiente o para indicar una respuesta o evento al controlador.
- Carga: Este campo tiene una longitud variable y transporta parámetros dependientes del mensaje. Su tamaño máximo es de 300 Bytes.

A este mensaje básico se le añade una secuencia de verificación de 16 bits para proporcionar transmisión de datos fiable. Este campo contiene una CRC que permite contrastar el paquete

recibido para detectar bits erróneos y deja el formato de mensaje tal y como se muestra en la siguiente figura.

Mensaje HCI	Secuencia de verificación
$(n + 2) * 8$ bit	16 bit

Ilustración 78. Formato de mensaje HCI con CRC.

La interfaz estándar de comunicación HCI es la interfaz UART. Concretamente, el protocolo HCI empleado por LoRaWAN es el SLIP a la hora de transmitir mensajes a través de la interfaz UART.

Los mensajes HCI deben ser incrustados en un paquete SLIP de una determinada manera, tal y como puede verse a continuación.

Cabecera SLIP		Escape SLIP	Bytes con CRC	Escape SLIP		Cabecera SLIP
8 bit	$k * 8$ bit; $k \geq (n + 4)$					8 bit

Ilustración 79. Formato de mensaje para interfaz UART.

## 2. Procesado de datos

En este apartado se quieren mostrar los detalles el procesado de datos de las medidas tomadas realizado en Excel.

Los ficheros .log que recogen los datos de las pruebas realizadas no son muy manejables, tal y como se muestra en las siguientes figuras.

No.	Port	Host Time	DnLnk Tx	DnLnk Rx	DnLnk PER	Peer RSSI	Peer SNR	UpLnk Tx
1	COM4	28-6-18 9:58	1	1	0.00 % -19 dBm 7 dB	1	0.00 % -17 dBm 6 dB	
2	COM4	29-6-18 9:58	2	2	0.00 % -25 dBm 7 dB	2	0.00 % -33 dBm 5 dB	
3	COM4	30-6-18 9:58	3	3	0.00 % -38 dBm 6 dB	3	0.00 % -34 dBm 7 dB	
4	COM4	1-7-18 9:58	4	4	0.00 % -48 dBm 2 dB	4	0.00 % -49 dBm 6 dB	
5	COM4	2-7-18 9:58	5	5	0.00 % -54 dBm 6 dB	5	0.00 % -53 dBm 6 dB	
6	COM4	3-7-18 9:58	6	6	0.00 % -51 dBm 7 dB	6	0.00 % -54 dBm 7 dB	
7	COM4	4-7-18 9:58	7	7	0.00 % -51 dBm 7 dB	7	0.00 % -51 dBm 7 dB	
8	COM4	5-7-18 9:58	8	8	0.00 % -47 dBm 7 dB	8	0.00 % -44 dBm 7 dB	
9	COM4	6-7-18 9:58	9	9	0.00 % -42 dBm 7 dB	9	0.00 % -50 dBm 7 dB	
10	COM4	7-7-18 9:58	10	10	0.00 % -47 dBm 6 dB	10	0.00 % -53 dBm 5 dB	
11	COM4	8-7-18 9:58	11	11	0.00 % -50 dBm 6 dB	11	0.00 % -53 dBm 6 dB	
12	COM4	9-7-18 9:58	12	12	0.00 % -56 dBm 6 dB	12	0.00 % -62 dBm 7 dB	
13	COM4	10-7-18 9:58	13	13	0.00 % -60 dBm 7 dB	13	0.00 % -67 dBm 7 dB	
14	COM4	11-7-18 9:58	14	14	0.00 % -67 dBm 6 dB	14	0.00 % -67 dBm 5 dB	
15	COM4	12-7-18 9:58	15	15	0.00 % -67 dBm 7 dB	15	0.00 % -62 dBm 6 dB	
16	COM4	13-7-18 9:58	16	16	0.00 % -66 dBm 6 dB	16	0.00 % -70 dBm 6 dB	
17	COM4	14-7-18 9:58	17	17	0.00 % -65 dBm 7 dB	17	0.00 % -64 dBm 6 dB	
18	COM4	15-7-18 9:58	18	18	0.00 % -70 dBm 7 dB	18	0.00 % -71 dBm 6 dB	
19	COM4	16-7-18 9:58	19	19	0.00 % -72 dBm 7 dB	19	0.00 % -72 dBm 4 dB	
20	COM4	17-7-18 9:58	20	20	0.00 % -77 dBm 7 dB	20	0.00 % -72 dBm 7 dB	
21	COM4	18-7-18 9:58	21	21	0.00 % -69 dBm 7 dB	21	0.00 % -69 dBm 4 dB	

Ilustración 80. Vista de uno de los ficheros .log

## Aplicación para Transmisión de Datos en Internet de las Cosas

```

2018-06-28;09:58:36.872;COM4:LR Base Node:RLT:Command:start radio link test session
2018-06-28;09:58:36.874;COM4:LR Base Node:RLT:DstGroupAddress:0x10
2018-06-28;09:58:36.874;COM4:LR Base Node:RLT:DstDeviceAddress:0x3333
2018-06-28;09:58:36.875;COM4:LR Base Node:RLT:PacketSize:15
2018-06-28;09:58:36.875;COM4:LR Base Node:RLT:NumPackets:100
2018-06-28;09:58:36.876;COM4:LR Base Node:RLT:InfiniteTest:1
2018-06-28;09:58:36.876;COM4:LR Base Node:WiMODLRHCI:Tx Event:C0 02 01 10 33 33 0F 64 00 01 87 D9 C0
2018-06-28;09:58:36.896;COM4:LR Base Node:WiMODLRHCI:Rx Event:C0 02 02 00 C4 40 C0
2018-06-28;09:58:36.900;COM4:LR Base Node:RLT:Result: OK
2018-06-28;09:58:39.952;COM4:LR Base Node:WiMODLRHCI:Rx Event:C0 02 06 00 01 00 01 00 01 00 01 00 EF FF ED FF 06 07 2F 11 C0
-----
2018-06-28;09:58:39.970;COM4:LR Base Node:EvType:Radio Link Test Status
2018-06-28;09:58:39.972;COM4:LR Base Node:HostTime:2018-06-28 09:58:39
2018-06-28;09:58:39.975;COM4:LR Base Node:Port:COM4
2018-06-28;09:58:39.977;COM4:LR Base Node:Status:0
2018-06-28;09:58:39.979;COM4:LR Base Node:LocalTx:1
2018-06-28;09:58:39.981;COM4:LR Base Node:LocalRx:1
2018-06-28;09:58:39.982;COM4:LR Base Node:PeerTx:1
2018-06-28;09:58:39.984;COM4:LR Base Node:PeerRx:1
2018-06-28;09:58:39.985;COM4:LR Base Node:LocalRSSI:-17
2018-06-28;09:58:39.987;COM4:LR Base Node:PeerRSSI:-19
2018-06-28;09:58:39.989;COM4:LR Base Node:LocalSNR:6
2018-06-28;09:58:39.990;COM4:LR Base Node:PeerSNR:7
2018-06-28;09:58:39.992;COM4:LR Base Node:RadioMode:Standard
2018-06-28;09:58:39.993;COM4:LR Base Node:RxGroupAddress:0x10
2018-06-28;09:58:39.995;COM4:LR Base Node:TxGroupAddress:0x10
2018-06-28;09:58:39.997;COM4:LR Base Node:RxDeviceAddress:0x5555
2018-06-28;09:58:39.998;COM4:LR Base Node:TxDeviceAddress:0x3333
2018-06-28;09:58:40.000;COM4:LR Base Node:Modulation:LoRa
2018-06-28;09:58:40.002;COM4:LR Base Node:Frequency:869524963 Hz
2018-06-28;09:58:40.003;COM4:LR Base Node:Bandwidth:125 kHz
2018-06-28;09:58:40.005;COM4:LR Base Node:Spreading:SF12
2018-06-28;09:58:40.007;COM4:LR Base Node:ErrorCoding:4/8
2018-06-28;09:58:40.009;COM4:LR Base Node:PowerLevel:20 dBm

```

Ilustración 81. Vista de uno de los ficheros .log

Debido a esto, resulta necesario procesar los datos de otra manera para que su visualización y posterior análisis resulte más sencillo y eficaz.

En las siguientes imágenes puede verse el aspecto de los mismos datos en Excel.

	A	B	C
1	Fecha	Hora	Evento
2	2018-06-28	9:56:40	log file opened: C:/PFG/WiMOD_LR_Studio_28062018_095618.log
3			
4	2018-06-28	9:58:11	COM4:LR Base Node:DataLink:Command:send confirmed radio message
5	2018-06-28	9:58:11	COM4:LR Base Node:DataLink:DstGroupAddress:0x10
6	2018-06-28	9:58:11	COM4:LR Base Node:DataLink:DstDeviceAddress:0x3333
7	2018-06-28	9:58:11	COM4:LR Base Node:DataLink:Payload:0x01 0x02 0x03 0x04
8	2018-06-28	9:58:11	COM4:LR Base Node:WiMODLRHCI:Tx Event:C0 03 09 10 33 33 01 02 03 04 D5 B9 C0
9	2018-06-28	9:58:11	COM4:LR Base Node:WiMODLRHCI:Rx Event:C0 03 0A 00 D8 D4 C0
10	2018-06-28	9:58:11	COM4:LR Base Node:DataLink:Result: OK
11	2018-06-28	9:58:13	COM4:LR Base Node:WiMODLRHCI:Rx Event:C0 03 10 01 10 55 55 10 33 33 E8 FF 04 8C 6E 89 4B A8 89 C0
12			
13	2018-06-28	9:58:37	COM4:LR Base Node:RLT:Command:start radio link test session
14	2018-06-28	9:58:37	COM4:LR Base Node:RLT:DstGroupAddress:0x10
15	2018-06-28	9:58:37	COM4:LR Base Node:RLT:DstDeviceAddress:0x3333
16	2018-06-28	9:58:37	COM4:LR Base Node:RLT:PacketSize:15
17	2018-06-28	9:58:37	COM4:LR Base Node:RLT:NumPackets:100
18	2018-06-28	9:58:37	COM4:LR Base Node:RLT:InfiniteTest:1
19	2018-06-28	9:58:37	COM4:LR Base Node:WiMODLRHCI:Tx Event:C0 02 01 10 33 33 0F 64 00 01 87 D9 C0
20	2018-06-28	9:58:37	COM4:LR Base Node:WiMODLRHCI:Rx Event:C0 02 02 00 C4 40 C0
21	2018-06-28	9:58:37	COM4:LR Base Node:RLT:Result: OK
22	2018-06-28	9:58:40	COM4:LR Base Node:WiMODLRHCI:Rx Event:C0 02 06 00 01 00 01 00 01 00 01 00 EF FF ED FF 06 07 2F 11 C0

Ilustración 82. Vista de los datos recogidos en Excel.

## Aplicación para Transmisión de Datos en Internet de las Cosas

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	No.	Port	Host Time	DnLnk Tx	DnLnk Rx	DnLnk PER	Peer RSSI	Peer SNR	UpLnk Tx	UpLnk Rx	UpLnk PER	Local RSSI	Local SNR
2	1	COM4	28/06/2018 9:58	1	1	1	0 -19 dBm	7 dB	1	1	1	0 -17 dBm	6 dB
3	2	COM4	29/06/2018 9:58	2	2	2	0 -25 dBm	7 dB	2	2	2	0 -33 dBm	5 dB
4	3	COM4	30/06/2018 9:58	3	3	3	0 -38 dBm	6 dB	3	3	3	0 -34 dBm	7 dB
5	4	COM4	01/07/2018 9:58	4	4	4	0 -48 dBm	2 dB	4	4	4	0 -49 dBm	6 dB
6	5	COM4	02/07/2018 9:58	5	5	5	0 -54 dBm	6 dB	5	5	5	0 -53 dBm	6 dB
7	6	COM4	03/07/2018 9:58	6	6	6	0 -51 dBm	7 dB	6	6	6	0 -54 dBm	7 dB
8	7	COM4	04/07/2018 9:58	7	7	7	0 -51 dBm	7 dB	7	7	7	0 -51 dBm	7 dB
9	8	COM4	05/07/2018 9:58	8	8	8	0 -47 dBm	7 dB	8	8	8	0 -44 dBm	7 dB
10	9	COM4	06/07/2018 9:58	9	9	9	0 -42 dBm	7 dB	9	9	9	0 -50 dBm	7 dB
11	10	COM4	07/07/2018 9:58	10	10	10	0 -47 dBm	6 dB	10	10	10	0 -53 dBm	5 dB
12	11	COM4	08/07/2018 9:58	11	11	11	0 -50 dBm	6 dB	11	11	11	0 -53 dBm	6 dB
13	12	COM4	09/07/2018 9:58	12	12	12	0 -56 dBm	6 dB	12	12	12	0 -62 dBm	7 dB
14	13	COM4	10/07/2018 9:58	13	13	13	0 -60 dBm	7 dB	13	13	13	0 -67 dBm	7 dB
15	14	COM4	11/07/2018 9:58	14	14	14	0 -67 dBm	6 dB	14	14	14	0 -67 dBm	5 dB
16	15	COM4	12/07/2018 9:58	15	15	15	0 -67 dBm	7 dB	15	15	15	0 -62 dBm	6 dB
17	16	COM4	13/07/2018 9:58	16	16	16	0 -66 dBm	6 dB	16	16	16	0 -70 dBm	6 dB
18	17	COM4	14/07/2018 9:58	17	17	17	0 -65 dBm	7 dB	17	17	17	0 -64 dBm	6 dB
19	18	COM4	15/07/2018 9:58	18	18	18	0 -70 dBm	7 dB	18	18	18	0 -71 dBm	6 dB
20	19	COM4	16/07/2018 9:58	19	19	19	0 -72 dBm	7 dB	19	19	19	0 -72 dBm	4 dB
21	20	COM4	17/07/2018 9:58	20	20	20	0 -77 dBm	7 dB	20	20	20	0 -72 dBm	7 dB
22	21	COM4	18/07/2018 9:58	21	21	21	0 -69 dBm	7 dB	21	21	21	0 -69 dBm	4 dB

*Ilustración 83. Vista de los datos recogidos en Excel.*

Una vez que los datos se tienen de esta forma, resulta mucho más sencillo poder analizarlos, hacer las gráficas que se han mostrado en el documento y calcular los valores medios de los parámetros deseados, tal y como puede verse en la siguiente imagen.

O	P	Q	R	S	T	U
			P RSSI	P SNR	L RSSI	L SNR
DL PER media	0		-19,00	7,00	-17,00	6,00
UL PER media	0		-25,00	7,00	-33,00	5,00
			-38,00	6,00	-34,00	7,00
Peer RSSI media	-55,48		-48,00	2,00	-49,00	6,00
Peer SNR media	6,39		-54,00	6,00	-53,00	6,00
			-51,00	7,00	-54,00	7,00
Local RSSI media	-55,66		-51,00	7,00	-51,00	7,00
Local SNR media	5,82		-47,00	7,00	-44,00	7,00
			-42,00	7,00	-50,00	7,00

*Ilustración 84. Cálculo de valores medios en Excel.*

## **Índice de ilustraciones y tablas**

Ilustración 1. Pila de protocolos Sigfox comparada con modelo OSI.....	17
Ilustración 2. Arquitectura Sigfox.....	18
Ilustración 3. LoRa en el modelo OSI.....	19
Ilustración 4. Arquitectura LoRa.....	20
Ilustración 5. Módulo iM880A.....	26
Ilustración 6. Esquema de comunicación entre los módulos radio. ....	30
Ilustración 7. Aspecto de la herramienta Radio Link Test y los resultados que muestra por pantalla. ....	30
Ilustración 8. Aspecto de la herramienta Data Link Test y de los resultados que muestra por pantalla. ....	31
Ilustración 9. Intercambio de mensajes HCI entre el host y el módulo radio.....	32
Ilustración 10. Ventana de configuración 1.....	35
Ilustración 11. Ventana de configuración 2.....	35
Ilustración 12. Módulo conectado al ordenador.....	36
Ilustración 13. Módulo no conectado y alimentado por baterías.....	36
Ilustración 14. Vista de un fichero .log con mensajes HCI. ....	37
Ilustración 15. Vista de un fichero .log con mensajes HCI. ....	38
Ilustración 16. Vista de un fichero Excel con mensajes HCI. ....	38
Ilustración 17. Vista de un fichero Excel con mensajes HCI. ....	39
Ilustración 18. Mensajes HCI sobre el estado del módulo. ....	39
Ilustración 19. Mensajes HCI sobre la información del módulo.....	40
Ilustración 20. Mensajes HCI ping.....	40
Ilustración 21. Personalización del mensaje HCI para la configuración del módulo.....	41
Ilustración 22. Detalle de los mensajes intercambiados con la configuración 1 en la primera prueba.....	42
Ilustración 23. Resumen de la primera prueba con la configuración 1 .....	42
Ilustración 24. Detalle de los mensajes intercambiados con la configuración 2 en la primera prueba.....	43
Ilustración 25. Resumen de la primera prueba con la configuración 2. ....	43
Ilustración 26. Detalle de los mensajes intercambiados con la configuración 3 en la primera prueba.....	44
Ilustración 27. Resumen de la primera prueba con la configuración 3. ....	44
Ilustración 28. Detalle de los mensajes intercambiados con la configuración 4 en la primera prueba.....	45
Ilustración 29. Resumen de la primera prueba con la configuración 4. ....	45
Ilustración 30. Detalle de los mensajes intercambiados con la configuración 5 en la primera prueba.....	45
Ilustración 31. Resumen de la primera prueba con la configuración 5 .....	46
Ilustración 32. RSSI medida en el módulo transmisor con la configuración 1 durante la primera prueba.....	47
Ilustración 33. RSSI medida en el módulo receptor con la configuración 1 durante la primera prueba.....	47
Ilustración 34. SNR medida en el módulo transmisor con la configuración 1 durante la primera prueba.....	48
Ilustración 35. SNR medida en el módulo receptor con la configuración 1 durante la primera prueba.....	48

Ilustración 36. RSSI medida en el módulo transmisor con la configuración 2 durante la primera prueba.....	49
Ilustración 37. RSSI medida en el módulo receptor con la configuración 2 durante la primera prueba.....	49
Ilustración 38. SNR medida en el módulo transmisor con la configuración 2 durante la primera prueba.....	50
Ilustración 39. SNR medida en el módulo receptor con la configuración 2 durante la primera prueba.....	50
Ilustración 40. RSSI medida en el módulo transmisor con la configuración 3 durante la primera prueba.....	51
Ilustración 41. RSSI medida en el módulo receptor con la configuración 3 durante la primera prueba.....	51
Ilustración 42. SNR medida en el módulo transmisor con la configuración 3 durante la primera prueba.....	52
Ilustración 43. SNR medida en el módulo receptor con la configuración 3 durante la primera prueba.....	52
Ilustración 44. RSSI medida en el módulo transmisor con la configuración 4 durante la primera prueba.....	53
Ilustración 45. RSSI medida en el módulo receptor con la configuración 4 durante la primera prueba.....	53
Ilustración 46. SNR medida en el módulo transmisor con la configuración 4 durante la primera prueba.....	54
Ilustración 47. SNR medida en el módulo receptor con la configuración 4 durante la primera prueba.....	54
Ilustración 48. RSSI medida en el módulo transmisor con la configuración 5 durante la primera prueba.....	55
Ilustración 49. RSSI medida en el módulo receptor con la configuración 5 durante la primera prueba.....	55
Ilustración 50. SNR medida en el módulo transmisor con la configuración 5 durante la primera prueba.....	56
Ilustración 51. SNR medida en el módulo receptor con la configuración 5 durante la primera prueba.....	56
Ilustración 52. RSSI medida en el módulo transmisor con la configuración 1 durante la segunda prueba.....	58
Ilustración 53. RSSI medida en el módulo receptor con la configuración 1 durante la segunda prueba.....	58
Ilustración 54. SNR medida en el módulo transmisor con la configuración 1 durante la segunda prueba.....	59
Ilustración 55. SNR medida en el módulo receptor con la configuración 1 durante la segunda prueba.....	59
Ilustración 56. RSSI medida en el módulo transmisor con la configuración 2 durante la segunda prueba.....	60
Ilustración 57. RSSI medida en el módulo receptor con la configuración 2 durante la segunda prueba.....	60
Ilustración 58. SNR medida en el módulo transmisor con la configuración 2 durante la segunda prueba.....	61
Ilustración 59. SNR medida en el módulo receptor con la configuración 2 durante la segunda prueba.....	61
Ilustración 60. RSSI medida en el módulo transmisor con la configuración 3 durante la segunda prueba.....	62

Ilustración 61. RSSI medida en el módulo receptor con la configuración 3 durante la segunda prueba.....	62
Ilustración 62. SNR medida en el módulo transmisor con la configuración 3 durante la segunda prueba.....	63
Ilustración 63. SNR medida en el módulo receptor con la configuración 3 durante la segunda prueba.....	63
Ilustración 64. RSSI medida en el módulo transmisor con la configuración 4 durante la segunda prueba.....	64
Ilustración 65. RSSI medida en el módulo receptor con la configuración 4 durante la segunda prueba.....	64
Ilustración 66. SNR medida en el módulo transmisor con la configuración 4 durante la segunda prueba.....	65
Ilustración 67. SNR medida en el módulo receptor con la configuración 4 durante la segunda prueba.....	65
Ilustración 68. RSSI medida en el módulo transmisor con la configuración 5 durante la segunda prueba.....	66
Ilustración 69. RSSI medida en el módulo receptor con la configuración 5 durante la segunda prueba.....	66
Ilustración 70. SNR medida en el módulo transmisor con la configuración 5 durante la segunda prueba.....	67
Ilustración 71. SNR medida en el módulo receptor con la configuración 5 durante la segunda prueba.....	67
Ilustración 72. Lugar escogido para la prueba a 40 m.....	71
Ilustración 73. Lugar escogido para la prueba a 200 m.....	71
Ilustración 74. Plano de situación de las medidas a 40 m. ....	72
Ilustración 75. Primer plano de situación de las medidas a 200 m.....	72
Ilustración 76. Segundo plano de situación de las medidas a 200 m. ....	73
Ilustración 77. Formato de mensaje HCI simple.....	81
Ilustración 78. Formato de mensaje HCI con CRC.....	82
Ilustración 79. Formato de mensaje para interfaz UART.....	82
Ilustración 80. Vista de uno de los ficheros .log.....	82
Ilustración 81. Vista de uno de los ficheros .log.....	83
Ilustración 82. Vista de los datos recogidos en Excel. ....	83
Ilustración 83. Vista de los datos recogidos en Excel. ....	84
Ilustración 84. Cálculo de valores medios en Excel.....	84