

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de las Tecnologías de  
Telecomunicación

Estudio de cobertura de una red de sensores  
inalámbricos usando distintos tipos de antenas

Autor: Pablo Jesús López de Tejada Irizo

Tutores: María José Madero Ayora

Juan Antonio Becerra González

Dep. Teoría de la Señal y Comunicaciones  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018





Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de las Tecnologías de Telecomunicación

# **Estudio de cobertura de una red de sensores inalámbricos usando distintos tipos de antenas**

Autor:

Pablo Jesús López de Tejada Irizo

Tutores:

María José Madero Ayora

Profesora Titular

Juan Antonio Becerra González

Profesor Sustituto Interino

Dep. de Teoría de la Señal y Comunicaciones

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018



Trabajo de Fin de Grado: Estudio de cobertura de una red de sensores inalámbricos usando distintos tipos de antenas

Autor: Pablo de Jesús López de Tejada  
Irizo

Tutores: María José Madero Ayora  
Juan Antonio Becerra

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal



*A mi madre*

*A mi abuelo*

*“No siempre podemos agradar, pero siempre  
podemos tratar de ser agradables.”*

*- Voltaire -*





# Agradecimientos

---

Dicen que un viaje de mil millas empieza con un solo paso, por eso aquí no pueden faltar aquellas personas que estuvieron a mi lado en ese primer paso y que hoy siguen conmigo porque son ellos lo que me han apoyado desde el principio.

En mi primer lugar y más importante, a mi madre, el apoyo más importante, y a mi familia en general.

A mis compañeros de clase, especialmente a Marta, Carlos, Antonio y Álvaro por hacer estos años más amenos entre libros y cafés, apuntes y almuerzos en la cafetería.

A Irene, por la inestimable ayuda a la hora de sacar adelante este TFG.

Por último, a todos aquellos que han pasado por mi vida a lo largo de estos años y en mayor o menor medida han contribuido a llegar al final del camino.

*Pablo Jesús López de Tejada Irizo*

*Sevilla, 2018*



# Resumen

---

Este trabajo nace con el objetivo de aplicar de forma práctica los conocimientos teóricos obtenidos en las clases. A partir de las lecturas de RSSI (de sus siglas en inglés, Received Signal Strength Indicator) obtenidas con sensores, se obtendrá una fórmula general para las pérdidas de propagación en espacio libre. Además, para observar que la elección de antena es igual de importante que el resto de parámetros, este trabajo está realizado con dos antenas distintas para ver las diferencias entre una y otra en cuanto a pérdidas de propagación y potencia recibida se refiere.

Finalmente, para tener una idea del alcance práctico que puede tener una red de sensores, se incluye material visual creado con un software GIS (del inglés, sistema de información geográfico)



# Abstract

---

This work is created with the aim to apply into the reality the knowledge acquired in theoretical lessons. From RSSI information got with sensors, a general equation will be defined for the loss propagation in free space. Moreover, to emphasize the importance of choosing a good antenna, this work has been conducted with two different antennas to realize the differences between them.

Finally, in order to get an idea of the practical range a WSN can have, visual material has been included created with GSI software (geographical information system.)



# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice</b>	<b>xv</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xvii</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xix</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2 Redes Inalámbricas de Sensores</b>	<b>3</b>
2.1 <i>Ambiente Inteligente</i>	3
2.2 <i>Nodo Sensor Típico</i>	4
2.3 <i>Topología</i>	4
2.3.1 Topología en Estrella	4
2.3.2 Topología en Árbol	5
2.3.3 Topología mallada	5
2.4 <i>Características de una WSN</i>	5
2.5 <i>Pila de Protocolos de una WSN</i>	6
2.6 <i>Ejemplo de Aplicaciones</i>	7
2.7 <i>Tipos de Aplicaciones</i>	8
2.8 <i>Retos de las WSNs</i>	8
2.8.1 Características Requeridas	8
2.8.2 Mecanismos Requeridos	9
<b>3 Cobertura, Radiopropagación y Modelos Urbanos</b>	<b>11</b>
3.1 <i>Espectro Radioeléctrico</i>	11
3.1.1 CNAF	11
3.1.2 Bandas Libres de Frecuencias ISM	12
3.2 <i>Modelos Urbanos. Métodos Empíricos de Propagación</i>	13
3.2.1 RSSI	13
3.2.2 Método de la Recomendación UIT-R P.1546	13
3.2.3 Método de Hokumura-Hata	16
3.2.4 Método COST 231 para Medio Urbano	17
3.3 <i>Desvanecimientos</i>	20
3.3.1 Tipos de Desvanecimientos	20
3.3.2 Desvanecimientos multitrayecto	20

---

3.3.3	Desvanecimiento selectivo	20
3.4	<i>Método Basados en la Medida de RSSI</i>	21
3.4.1	Variabilidad de RSSI	22
3.4.2	Estado del Arte	22
<b>4</b>	<b>Materiales Empleados</b>	<b>25</b>
4.1	<i>Hardware</i>	25
4.2	<i>Características sx1272</i>	26
4.3	<i>LoRa y LoRaWan</i>	29
4.3.1	Factor de Ensanchado	31
4.3.2	Tasa de codificación	31
4.3.3	Ancho de Banda de la Señal	31
4.3.4	Estructura de un Paquete LoRa	32
4.3.5	Tiempo en el Aire	32
4.3.6	Salto de Frecuencia en LoRa	33
4.3.7	Principio de Operación	33
4.3.8	Modo de Operación de LoRa	34
4.4	<i>CoolTermWin</i>	34
4.5	<i>MapInfo</i>	36
4.6	<i>Antenas</i>	36
4.6.1	Antenas Receptoras	36
4.6.2	Antena Emisora	37
<b>5</b>	<b>Desarrollo del trabajo y resultados</b>	<b>39</b>
5.1	<i>Campaña de medida</i>	39
5.2	<i>Resultados de las medidas</i>	40
5.3	<i>Estudio de los resultados y realización del modelo</i>	41
5.3.1	Antena Dipolo	42
5.3.2	Antena Sucker o Imán	45
5.4	<i>Mapa de cobertura</i>	48
5.4.1	Antena Dipolo	49
5.4.2	Antena imán	49
<b>6</b>	<b>Conclusiones y líneas futuras de trabajo</b>	<b>51</b>
<b>7</b>	<b>Referencias</b>	<b>53</b>
<b>Anexo A: Código Matlab</b>		<b>55</b>



# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 4-1: Sensores de la empresa SiGrow	25
Tabla 4-2: Rango de operación sx1272	27
Tabla 4-3: Descripción conexionado sx1272	28
Tabla 4-4: Consumo de Potencia	29
Tabla 4-5: Parámetros principales LoRa	30
Tabla 4-6: Configuración sx1272	30
Tabla 4-7: Configuración Factor de Ensanchado	31
Tabla 4-8: Configuración Tasa de Codificación	31
Tabla 4-9: Configuración Ancho de Banda de la Señal Transmitida	32
Tabla 4-10: Modos de Operación sx1272	34
Tabla 4-11: Características Dipolo	36
Tabla 4-12: Características Sucker	37
Tabla 4-13: Características Helicoidal	38
Tabla 5-1: Potencia media medidas en cada dirección desde el punto inicial para la antena dipolo	41
Tabla 5-2: Potencia media medidas en cada dirección desde el punto inicial para la antena sucker o imán	41



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 2-1: Esquema de un nodo sensor típico	4
Figura 2-2: Sensores en estrella	4
Figura 2-3: Sensores en árbol	5
Figura 2-4: Sensores en malla	5
Figura 2-5: Pilas de protocolos de los modelos OSI y TCP/IP	6
Figura 2-6: Ejemplo de envío de datos	7
Figura 3-2: <b>100 MHz, trayecto terrestre, 50% del tiempo</b>	14
Figura 3-3: <b>100 MHz, trayecto terrestre, 10% del tiempo</b>	15
Figura 3-1: Método COST 123 para medio urbano	18
Figura 4-1: Diagrama de bloques de sx1272	26
Figura 4-2: Esquemático de sx1272	27
Figura 4-3: Escenario de transmisión LoRa	29
Figura 4-4: Estructura de un paquete LoRa	32
Figura 4-5: Menú opciones de CoolTermWin	35
Figura 4-6: Ejemplo de trama bien recibida en CoolTermWin	35
Figura 4-7: Antena Tipo Dipolo	36
Figura 4-8: Antena Tipo Sucker	37
Figura 4-9: Antena Helicoidal	37
Figura 4-10: Nodo receptor	38
Figura 4-11: Nodo sensor	38
Figura 5-1: Localización punto inicial de las medidas	39
Figura 5-2: Puntos designados para la medida de RSSI	40
Figura 5-3: Potencia recibida por la Antena Dipolo	42
Figura 5-4: Recta de ajuste y media de la potencia recibida por la antena dipolo	43
Figura 5-5: Pérdida básica de propagación para la antena dipolo	44
Figura 5-6: Recta de ajuste y media de la pérdida básica de propagación para la antena dipolo	45

Figura 5-7: Potencia recibida por la antena sucker	46
Figura 5-8: Recta de ajuste y media de la potencia recibida por la antena sucker o imán	47
Figura 5-9: Pérdida básica de propagación media de la antena sucker	47
Figura 5-10: Recta de ajuste y media de la pérdida básica de propagación de la antena sucker	48
Figura 5-11: Mapa de potencia recibida por la antena dipolo	49
Figura 5-12: Mapa de potencia recibida por la antena sucker	49

# 1 INTRODUCCIÓN

---

*Lo que sabemos es una gota de agua;  
lo que ignoramos es el océano.*

*- Sir Isaac Newton -*

La tecnología avanza, hasta hace pocos años, el Internet de las Cosas, IoT, no existía, el Big Data no estaba en el pensamiento y, sin embargo, hoy es una realidad. Todo ello es posible gracias a las redes de sensores repartidas por el entorno que se encargan de medir, recopilar, analizar y mostrar datos prácticamente en tiempo real. Aunque no está totalmente aceptado, a este despliegue de los dispositivos, se le conoce como Ambiente Inteligente, del que se hablará más adelante.

Las redes inalámbricas de sensores son la evolución lógica hacia un mundo totalmente conectado en donde los cables tienden a desaparecer y todo el mundo tiene un dispositivo inalámbrico en el bolsillo. Si hasta ahora las tecnologías inalámbricas eran WiFi, Bluetooth o Zigbee, actualmente se están desarrollando otras como son LoRa (que se desarrollará en el trabajo), o SigFox.

Hay que tener en cuenta que el objetivo de las WSN (del inglés, Redes Inalámbricas de Sensores) no es enviar mucha cantidad de información lo más rápido posible, sino la de enviar muestras periódicas de las medidas realizadas a lo largo de intervalo de tiempo lo más largo posible. Por eso, las nuevas tecnologías se desarrollan en una banda de frecuencia más bajas que las actuales, lo que conlleva un ahorro en el consumo de los dispositivos y, por tanto, una vida útil más larga, lo que está en consonancia con el objetivo de toda WSN: conseguir una alta eficiencia en consumo, sin descuidar lo realmente importante: el muestreo de los datos.

En la primera parte de este trabajo, se profundizará en las redes inalámbricas de sensores, describiendo en profundidad cómo es un nodo sensor, cómo se pueden desplegar en el entorno y las características generales que presentan los nodos, además de las frecuencias de trabajo a las que se pueden enviar la información obtenida y los métodos empíricos desarrollados para la obtención de los datos necesarios. En la segunda parte, se tratará con unos nodos específicos, se describirán las funcionalidades y las características y se tratará de hallar un modelo matemático general de pérdidas de propagación para los dos tipos de antena estudiados.



# 2 REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES

---

*“Lo que están a punto de presenciar no es magia,  
es ciencia pura.”*

*- El truco final -*

## 2.1 Ambiente Inteligente

La forma más común de procesamiento de la información hasta ahora ha sido en ordenadores grandes y de propósito general, desde antiguos ordenadores centrales hasta modernos portátiles. En muchas aplicaciones, como aplicaciones de oficina, se utilizan principalmente para procesar información centrada en un usuario humano del sistema, pero está estrechamente relacionado con el entorno físico del humano.

En otra clase de aplicaciones, el entorno físico es el centro de atención. La computación se usa para ejercer control sobre procesos físicos, por ejemplo, cuando se controlan los procesos químicos en una fábrica para la temperatura y presión. El cálculo está integrado con el control; está incrustado en un sistema físico. A diferencia de la anterior clase de sistemas, dichos sistemas integrados no se basan en la interacción humana, están centrados en la tarea de control requerida.

El progreso tecnológico está a punto de llevar esta extensión del control integrado en nuestra vida diaria un paso más allá. Hay una tendencia no solo a equipar objetos más grandes como una lavadora con computación y control, también productos más pequeños e incluso prescindibles como comestibles. Además, los espacios de vida y de trabajo en sí mismos pueden incluir tales capacidades. Finalmente, la computación nos rodeará en nuestra vida cotidiana, realizando una visión de Ambiente Inteligente donde muchos dispositivos diferentes recopilarn y procesarn información de muchas fuentes diferentes para controlar procesos físicos e interactuar con usuarios humanos.

Para realizar esta visión, se necesita un aspecto crucial además de computación y control: comunicación. Todas estas fuentes de información deben poder transferir la información al lugar donde se necesita, un actuador o un usuario, y deben colaborar para proporcionar una imagen tan precisa del mundo real como se requiere.

Para algunos escenarios de aplicaciones, tales redes de sensores y actuadores se construyen fácilmente utilizando las tecnologías de redes cableadas existentes. Sin embargo, los cables constituyen un problema de mantenimiento, evitan que las entidades sean móviles y pueden evitar que los sensores o actuadores se acerquen al fenómeno que deben controlar.

Por lo tanto, la comunicación inalámbrica entre dichos dispositivos se ha convertido en un requisito indispensable. Por lo que ha aparecido una nueva clase de redes en los últimos años: la llamada red de sensores inalámbricos. Estas redes consisten en nodos individuales que pueden interactuar con su entorno detectando o controlando parámetros físicos. Estos nodos tienen que colaborar para cumplir sus tareas ya que, generalmente, un solo nodo es incapaz de hacerlo; y usan comunicación inalámbrica para permitir esta colaboración.

## 2.2 Nodo Sensor Típico

Un nodo sensor de una WSN típica incluye: un sensor analógico para medir parámetros ambientales tales como temperatura o luminosidad, un microcontrolador para procesos locales y operaciones de red y un transceptor radio para enviar y recibir datos a través de ondas de radio. A lo anteriormente comentado habría que añadir una fuente de alimentación, tales como baterías u otras fuentes de energía como la energía solar, para alcanzar un tiempo de vida desde meses hasta unos pocos años.

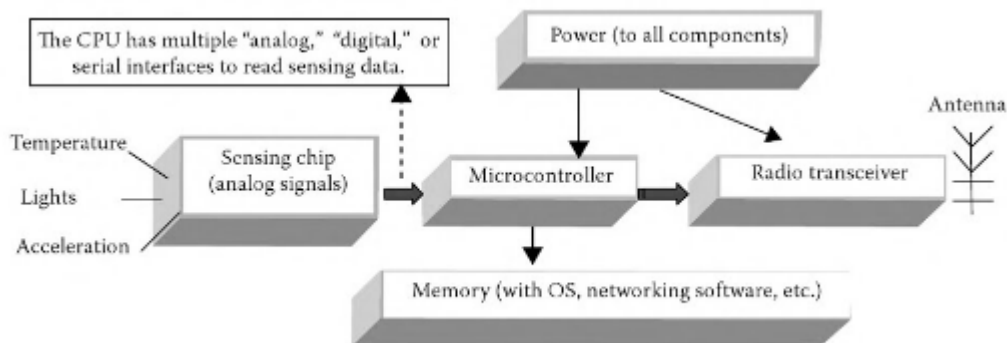


Figura 2-1: Esquema de un nodo sensor típico

## 2.3 Topología

Una red inalámbrica de sensores típica cuenta con un nodo sumidero o nodo central que es el encargado de recoger los datos enviados por el resto de nodos. Una vez recibidos estos datos, se encarga de enviarlos a la base de datos para su posterior estudio.

Además del nodo central, la red de sensores cuenta con los nodos sensores que son los encargados del procesamiento y transmisión de los datos medidos en su entorno, generalmente de forma inalámbrica. Estos mismos sensores pueden ser actuadores, esto es, pueden llevar a cabo una cierta acción en respuesta a un estímulo del entorno.

Una vez descritos los componentes, se presentan las topologías más comunes de una red de sensores, aunque estas pueden adaptarse y variar en función de las necesidades de medida que se requieran.

### 2.3.1 Topología en Estrella

Existe un nodo en la red que es el encargado de recolectar todos los datos enviados por el resto de los nodos de red. Este es el nodo central o sumidero. Todos los nodos se conectan de forma directa al sumidero, sin saltos que pasen por nodos intermedios.

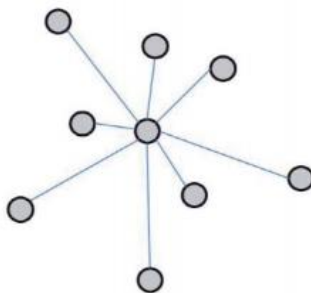


Figura 2-2: Sensores en estrella



### 2.3.2 Topología en Árbol

En este caso el nodo sumidero no está conectado a todos los nodos restantes de la red, si no que cada nodo está conectado a un nodo superior al que envía los datos y así sucesivamente hasta que se alcanza el nodo sumidero.

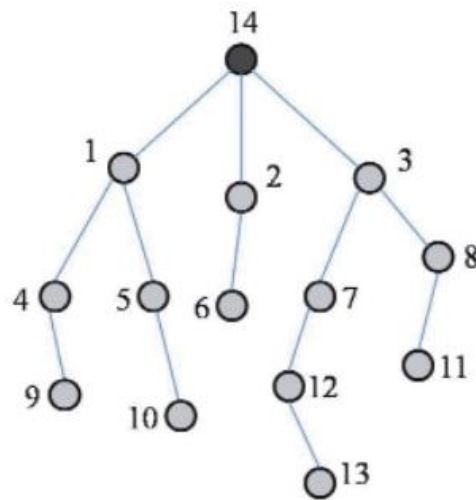


Figura 2-3: Sensores en árbol

### 2.3.3 Topología mallada

Los nodos están conectados entre sí, de forma que se ofrecen caminos alternativos antes posibles problemas.

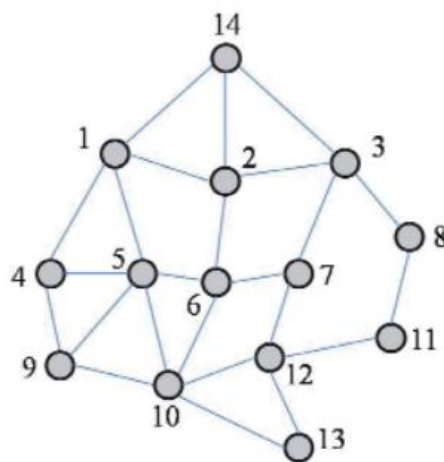


Figura 2-4: Sensores en malla

## 2.4 Características de una WSN

Para que una WSN sea práctica, los sensores que la componen deben tener las siguientes características:

- **Tamaño reducido:** El nodo sensor debe ser portable y ligero para lograr una gran escala en el despliegue de los mismos. Además, deben ocultarse con facilidad para garantizar una medida segura y limpia del ambiente.
- **Bajo coste:** En una red WSN formada por cientos o miles de nodos, el despliegue de cada nodo no puede suponer un gran gasto para asegurar la viabilidad del proyecto.
- **Bajo consumo:** Ya que se desea una WSN que opere por largo tiempo sin necesidad de cambiar la

batería de cada sensor, estos deben consumir poca energía, especialmente si se trata de una red a gran escala, con cientos o miles de sensores.

## 2.5 Pila de Protocolos de una WSN

Una vez explicadas las principales características de una WSN, se explicará de forma breve, la transferencia de datos por parte de los sensores una vez que se realizan las medidas.

Aunque el modelo OSI (Interconexión de Sistemas Abiertos por sus siglas en inglés) establece una arquitectura de siete capas para la transmisión de datos dentro de una red cualquiera, en una red WSN bastaría una arquitectura de cinco capas como la que ofrece el modelo TCP/IP. Esta diferencia se debe a que el modelo TCP/IP (Protocolo de Control de Transmisión/Protocolo de Internet) no presenta especificaciones para las capas de sesión y presentación en comparación con el modelo OSI.

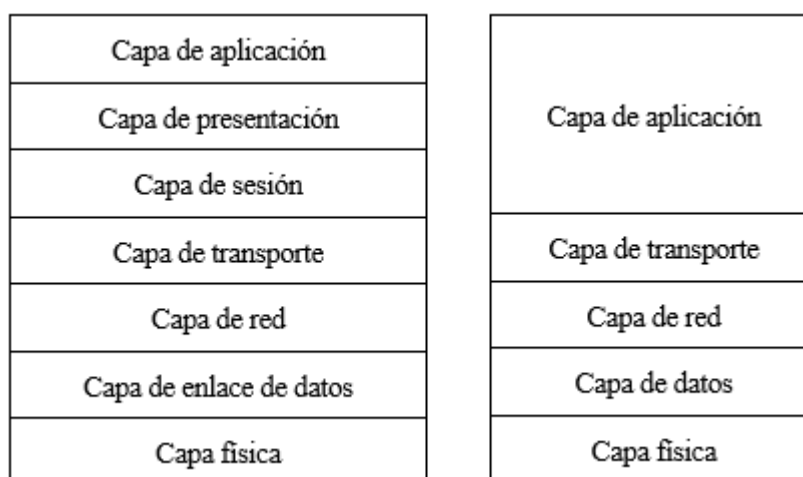


Figura 2-5: Pilas de protocolos de los modelos OSI y TCP/IP

- **Capa de aplicación:** Una vez los sensores han enviado los datos, el nodo sumidero debe manejar los datos. Un ejemplo de aplicación sería mostrar los datos por pantalla, o subirlos a la red, en ambos casos, se necesitan protocolos específicos de aplicación para poder manejar los datos. Es una capa típica de los nodos finales.
- **Capa de transporte:** El protocolo TCP asegura que los datos llegarán al destino ya que se encarga de retransmitir los datos si se pierden. Además, incorpora control de congestión de la red y control de la tasa de datos.
- **Capa de red:** El objetivo de la capa de red es el reenvío de los datos entre los sensores. Para esto, busca el camino óptimo, el cual presenta bajo consumo de energía o bajo retraso.
- **Capa de acceso a la red:** Esta capa solo se encarga de la comunicación con los nodos vecinos (1 salto en la red). Típicamente, esta capa es conocida como capa MAC (*Medium Access Control*). La capa MAC asegura que los sensores vecinos no causan conflictos de transmisión ajustando la tasa de envío. Además, se encarga de la detección de errores y de la estructura de los datos entre otras tareas.
- **Capa física:** Es la encargada de convertir los datos en señales y enviarlos de forma inalámbrica a través de la codificación y la modulación.

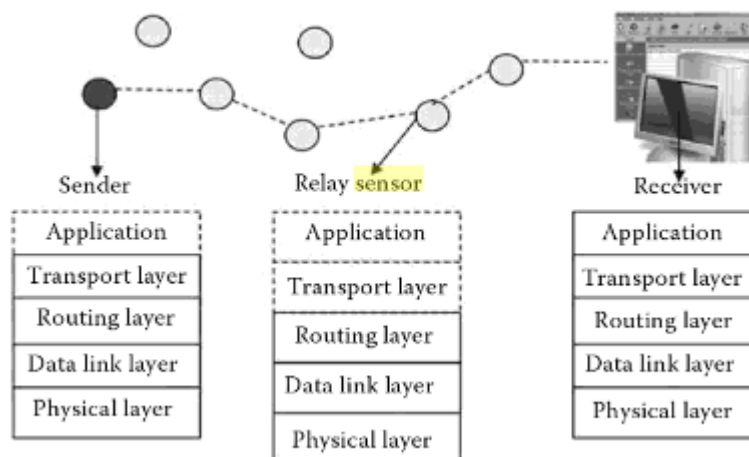


Figura 2-6: Ejemplo de envío de datos

## 2.6 Ejemplo de Aplicaciones

Aparte de la necesidad de construirlos baratos, simples de programar e integrar en una red y de ser nodos potencialmente duraderos, un punto crucial y primario para el desarrollo de aplicaciones es la capacidad de medir y actuar con los que se dota a cada sensor. Para muchos de los parámetros típicos, los sensores pueden ser integrados como nodos de una WSN. Algunas de las aplicaciones más típicas son medir temperatura, humedad, luz infrarroja, niveles acústicos, presión, sensores químicos, estrés mecánico, o incluso funcionar como radar.

Basados en los nodos que tienen la capacidad de medir, junto con la capacidad de actuación, computación y comunicación, se pueden construir multitud de aplicaciones, tales como:

- **Prevención de desastres:** Un escenario típico sería la detección de incendios forestales. Son necesarios nodos sensores equipados con termómetros que puedan determinar su propia ubicación (relativa entre sensores o absoluta en coordenadas). Estos sensores serían desplegados sobre un bosque, el campo, o una selva. Todos los sensores, colectivamente, crearían un “mapa de temperatura” de una determinada área de altas temperaturas a las que se podría acceder desde el exterior.
- **Control medioambiental y mapa de biodiversidad:** Las WSN se podrían usar para controlar el medioambiente, por ejemplo, la polución química en los vertederos. Otro ejemplo sería la vigilancia de los fondos marinos para entender los procesos de erosión que afectan a los parques eólicos marinos.
- **Edificios inteligentes:** Actualmente, los edificios malgastan grandes cantidades de energía con un control poco eficiente de humedad, y ventilación, por lo que una mejor monitorización en tiempo real de la temperatura, flujo de aire, humedad y otros parámetros de un edificio, incrementaría considerablemente el nivel de confort de las personas en su interior y reduciría el consumo de energía.
- **Gestión de instalaciones:** Un paso más allá de los edificios inteligentes estaría la gestión de instalaciones donde las WSN tienen un amplio rango de posibles aplicaciones. Ejemplos simples serían aplicaciones de entrada en edificios sin llaves, simplemente con identificadores, para determinar qué personas están autorizadas en determinadas áreas del edificio. Este ejemplo se puede extender a la detección de intrusos en determinadas áreas e incluso una WSN podría crear un mapa de posición para el seguimiento de dicha persona.
- **Vigilancia de máquinas y mantenimiento preventivo:** Una de las posibles aplicaciones sería poner sensores en lugares de difícil acceso donde puedan detectar patrones de vibración que indiquen la necesidad mantenimiento. Algunos ejemplos serían los ejes de las vías del tren.
- **Agricultura de precisión:** El riego y la fertilización de los suelos se realizaría de forma precisa gracias a la implantación de sensores con capacidad para medir la humedad y la composición del suelo. Además, se podría realizar un seguimiento de especies invasoras, con lo que se tendría una alta vigilancia de la

tierra.

- Cuidados médicos: El uso de WSN en aplicaciones de cuidados sería muy beneficioso. Ofrecen un amplio rango de posibilidades desde un post operatorio y cuidados intensivos hasta una vigilancia de larga duración. Además, el seguimiento del paciente desde los hospitales puede salvar vidas.

## 2.7 Tipos de Aplicaciones

Muchas de estas aplicaciones comparten varias características básicas. En la mayoría de ellas hay una clara diferencia entre las fuentes de datos y los sumideros. La interacción entre nodos sensores y sumideros muestra algunos patrones típicos. Los más relevantes son:

- Detección de eventos: Los nodos sensores deberían alertar al sumidero una vez se ha detectado un evento específico. Los eventos más simples son detectados por uno solo de ellos mientras que otros más complicados requieren la colaboración de otros sensores cercanos o incluso sensores remotos para decidir si un evento ha ocurrido.
- Medidas periódicas: Los sensores pueden ser programados para enviar medidas de forma periódica. Usualmente, estos informes son disparados por eventos detectados. El período de envío depende del tipo de aplicación.
- Función de aproximación y detección de bordes: El modo en el que cambia un valor físico como la temperatura de un lugar a otro, puede ser considerado como una función de la localización. Una WSN puede ser usado para aproximar esta función desconocida usando un número limitado de muestras de cada sensor. Parecido a lo anterior podría ser encontrar áreas o puntos con un mismo valor de los nodos. Un ejemplo sería encontrar puntos isotermos en una aplicación de detección de fuegos para detectar el límite del incendio actual.
- Seguimiento: La fuente de un evento puede ser móvil. La WSN puede ser usada para enviar actualizaciones de la posición del evento, con lo que además se podría estimar tanto la velocidad como la dirección de la fuente.

## 2.8 Retos de las WSNs

Manejar una gama tan amplia de aplicaciones será muy complicado con un solo tipo de WSN. No obstante, se pueden apreciar ciertos rasgos comunes, especialmente respecto a las características y mecanismos requeridos de tales sistemas. Darse cuenta de estas características con nuevos mecanismos en el principal desafío de la visión de las WSNs.

### 2.8.1 Características Requeridas

Las siguientes características son compartidas por la mayoría de las aplicaciones discutidas en el punto anterior:

- Tipo de servicio: El servicio convencional de una red de comunicación es mover bits de un lugar a otro. Para una red de sensores, este no es el propósito real. De una WSN se espera que dé información sobre una tarea determinada. Además, conceptos como el alcance geográfico o los intervalos de tiempo serán importantes.
- Calidad de Servicio: Estrechamente relacionado con el tipo de servicio de una red está la calidad de este servicio. Los requisitos de calidad tradicionales provienen generalmente de aplicaciones multimedia, como el retraso limitado o ancho de banda mínimo, sin embargo, estas son irrelevantes cuando las aplicaciones son tolerantes a retrasos – latencia – o el ancho de banda necesario para la transmisión de

datos es muy pequeño. En algunos casos, la entrega ocasional de un paquete es más que suficiente; en otros casos, puede ser crítico cuando los actuadores son controlados en tiempo real por la red de sensores. Por lo tanto, el concepto de calidad de servicio adaptada o la detección confiable de eventos es importante.

- Tolerancia a fallos: Debido a que los nodos pueden quedarse sin energía, pueden dañarse, o la comunicación entre dos nodos se puede interrumpir permanentemente, es importante que la WSN en su conjunto sea capaz de tolerar fallos. Para tolerar estos fallos es necesaria una implementación redundante, utilizando más nodos de los necesarios si todos funcionaran correctamente.
- Tiempo de vida: En muchos escenarios, los nodos tendrán que depender de un suministro limitado de energía (baterías). Reemplazar estas fuentes de energía en el campo generalmente no es factible, y al mismo tiempo, una WSN debe operar al menos durante un tiempo de misión dado o el mayor tiempo posible. Por lo tanto, la vida de una WSN se convierte en una figura muy importante. Evidentemente, es necesaria una forma de funcionamiento eficiente de la energía de la WSN. Como una alternativa a las fuentes de energía limitadas, se podrían añadir complementos como células fotovoltaicas. Aunque estas fuentes no son lo suficientemente potentes como para garantizar un funcionamiento continuo, pueden proporcionar una recarga de baterías. Con tales condiciones, la vida útil de la red debería ser idealmente infinita.

La vida útil de una red también tiene ventajas y desventajas directas en contra de la calidad del servicio: invertir más energía puede aumentar la calidad, pero disminuir la vida útil. Se requieren conceptos adicionales para armonizar estas concesiones.

- Escalabilidad: Como una WSN podría incluir una gran cantidad de nodos, las arquitecturas y los protocolos deben ser capaces de escalar a estas cantidades.
- Densidad: La cantidad de nodos por unidad de área en una WSN puede variar considerablemente. Las diferentes aplicaciones tendrán densidades de nodo muy diferentes. Incluso dentro de una aplicación dada, la densidad puede variar a lo largo del tiempo y el espacio porque los nodos fallan o se mueven; la densidad tampoco tiene que ser homogénea en toda la red y la red debería adaptarse a tales variaciones.
- Programabilidad: No solo será necesario que los nodos procesen información, sino que también tendrán que reaccionar de manera flexible sobre los cambios en sus tareas. Estos nodos deben ser programables, y su programación debe ser cambiante durante la operación cuando las tareas nuevas se vuelven importantes. Una forma fija de procesamiento de la información sería insuficiente.
- Mantenimiento: Como tanto el entorno de una WSN como la propia WSN cambian (baterías agotadas, nodos defectuosos, nuevas tareas), el sistema tiene que adaptarse. Tiene que controlar su propia salud y estado para cambiar los parámetros operativos o elegir diferentes compensaciones (por ejemplo, para proporcionar una calidad inferior cuando escasean los recursos energéticos). En este sentido, la red debe mantenerse a sí misma; también podría interactuar con mecanismos externos de mantenimiento para garantizar su funcionamiento.

### 2.8.2 Mecanismos Requeridos

Para cumplir estos requisitos, se deben encontrar mecanismos innovadores para una red de comunicación, así como nuevas arquitecturas y conceptos de protocolo. Un desafío particular aquí es la necesidad de encontrar mecanismos que sean lo suficientemente específicos para la idiosincrasia de una aplicación dada para soportar los requisitos específicos de calidad de servicio, duración y mantenimiento. Por otro lado, estos mecanismos también tienen que generalizarse a una gama más amplia de aplicaciones para que no sean necesarios un desarrollo y una implementación completos para cada aplicación. Esto probablemente convertiría a las WSNs en un concepto tecnológico económicamente inviable. Algunos de los mecanismos que formarán partes típicas de WSN son:

- Comunicaciones inalámbricas multisalto: Si bien la comunicación inalámbrica será una técnica básica, una comunicación directa entre un emisor y un receptor presenta limitaciones. En particular, la comunicación a largas distancias solo es posible utilizando una potencia de transmisión

prohibitivamente alta. El uso de nodos intermedios puede reducir la potencia total requerida. Por lo tanto, para muchas formas de WSN, la llamada comunicación multisalto será necesaria.

- **Funcionamiento con ahorro de energía:** Para soportar una vida útil prolongada, la operación de ahorro de energía es una técnica clave. Las opciones a considerar incluyen el transporte de datos energéticamente eficiente entre dos nodos (medido en J/bit) o, más importante aún, la determinación de eficiencia energética de una información solicitada. Además, el consumo de energía no homogéneo es un problema.
- **Autoconfiguración:** Una WSN tendrá que configurar la mayoría de sus parámetros operativos de forma autónoma, independientemente de la configuración externa. La gran cantidad de nodos y la implementación simplificada requerirán esa capacidad en la mayoría de las aplicaciones. Como ejemplo, los nodos deberían poder determinar sus posiciones geográficas usando otros nodos de la red, lo que se denomina auto-ubicación. Además, la red debería ser capaz de tolerar los nodos defectuosos (debido a una batería agotada) o integrar nuevos nodos (debido a la implementación incremental después del fallo).
- **Colaboración y procesamiento en red:** En algunas aplicaciones, un solo sensor no puede decidir si un evento ha sucedido, sino que varios sensores tienen que colaborar para detectar un evento y solo los datos conjuntos de muchos sensores proporcionan suficiente información. La información se procesa en la propia red de diversas formas para lograr esta colaboración, en lugar de que todos los nodos transmitan todos los datos a una red externa y la procesen fuera de la red. Un ejemplo sería determinar la temperatura más alta o la temperatura promedio dentro de un área y enviar ese valor a un sumidero. Para resolver estas tareas de manera eficiente, las lecturas de los sensores individuales se pueden agregar a medida que se propagan a través de la red, reduciendo la cantidad de datos que se transmiten y, por lo tanto, mejorando la eficiencia energética. Cómo realizar dicha agregación es una pregunta abierta.
- **Centrada en datos:** Las redes de comunicación tradicionales generalmente se centran en la transferencia de datos entre dos dispositivos específicos, cada uno equipado con (al menos) una dirección de red; el funcionamiento de tales redes está, por lo tanto, centrado en la dirección. En una WSN, donde normalmente los nodos se implementan de forma redundante para protegerse contra fallos de los nodos, la identidad del nodo particular que suministra datos se vuelve irrelevante. Lo que importa son las respuestas y los valores en sí mismos, no qué nodo los ha provisto. Un ejemplo de tal interacción centrada en datos sería solicitar la temperatura promedio en un área de ubicación determinada, en lugar de requerir lecturas de temperatura de nodos individuales.
- **Localidad:** Se trata más bien de una guía de diseño que de un mecanismo en particular. El principio de localidad se debe adoptar para garantizar la escalabilidad. Ya que los nodos cuentan con recursos limitados como la memoria, deben intentar limitar el estado que acumulan durante el procesamiento del protocolo a solo la información sobre sus vecinos directos. Se espera que esto permita que la red escale a un gran número de nodos sin tener que depender de un procesamiento potente en cada nodo. Sin embargo, cómo combinar el principio de localidad con diseños de protocolo eficientes sigue siendo un tema de investigación abierto.

# 3 COBERTURA, RADIOPROPAGACIÓN Y MODELOS URBANOS

---

*Las matemáticas son el lenguaje con el que Dios ha escrito el universo.*

*- Galileo Galilei -*

LA propagación de ondas a través de medios reales se puede estudiar a partir de las ecuaciones de Maxwell, analizando las soluciones compatibles con las condiciones de contorno que imponga el medio. Sin embargo, este estudio puede ser dificultoso y complejo, por lo que para la predicción de pérdidas de propagación se utilizan modelos simplificados basados en óptica geométrica. Cuando, además, estos modelos dejan de ser válidos, se acude a expresiones empíricas o curvas de propagación normalizadas obtenidas a partir de mediciones.

Las características de propagación de una onda dependen de la situación del trayecto de propagación respecto a los obstáculos (suelos, colinas, edificios), de propiedades físicas del medio (intensidad de precipitaciones, absorción por gases y vapores) y de la frecuencia y polarización de las ondas.

## 3.1 Espectro Radioeléctrico

“El espectro radioeléctrico es un bien de dominio público cuya titularidad y administración corresponden al Estado. Para su uso es necesario, en general, disponer del correspondiente título habilitante, otorgado por la Secretaría de Estado para la Sociedad de la Información y la Agenda Digital.” [9]

El espectro radioeléctrico está compuesto por un conjunto de frecuencias que se agrupan en bandas de frecuencias y que pueden ser utilizadas por los titulares de la licencia para la prestación de servicios de comunicaciones inalámbricas, radiodifusión sonora y televisión - Servicios de radiodifusión (AM, FM, TV), internet, telefonía fija y móvil - o por entidades y servicios públicos para operar sistemas relacionados con seguridad, defensa, emergencias, transporte e investigación científica, así como aplicaciones industriales y domésticas - Sistemas de Radionavegación Marítimas y Aeronáuticas, Sistemas de Seguridad (Aeropuertos, Alarmas, Radiolocalización de vehículos, Monitorización, etc.), diversos Sistemas y Servicios Radioeléctricos tanto de uso civil como militar (Fuerzas de Seguridad, Fuerzas Armadas, Policía, Bomberos, Defensa Civil, Salud Pública, Radioaficionados, Radiotaxis, Radiomensajes, etc.) -.

### 3.1.1 CNAF

En España, todos los usos anteriormente descritos están recogidos en el CNAF (Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias), elaborado por la Secretaría de Estado para el Avance Digital. En el CNAF, se recogen todos los usos para las ondas radioeléctricas desde 8,3 kHz hasta 3000 GHz; casi todas las frecuencias tienen un uso específico asignado por la Secretaría, sin embargo, existen, al menos, 4 bandas de frecuencias de uso libre, para las que no es necesaria licencia o autorización. Estas bandas de frecuencias se encuentran alrededor de 868 MHz, 2,4 GHz, 5 GHz y 60 GHz.

### 3.1.2 Bandas Libres de Frecuencias ISM

*Industrial, Scientific and Medical* (ISM) son bandas reservadas internacionalmente para uso no comercial de radiofrecuencia. Actualmente estas bandas de frecuencia han sido popularizadas para su uso en comunicaciones WLAN (Red de Área Local Inalámbrica) o WPAN (Red de Área Personal Inalámbrica).

El uso de estas bandas de frecuencia está abierto a todo el mundo sin necesidad de licencia, respetando las regulaciones que limitan los niveles de potencia transmitida. Este hecho fuerza a que este tipo de comunicaciones tengan cierta tolerancia frente a errores y que utilicen mecanismos de protección contra interferencias, como técnicas de ensanchado de espectro.

En las notas de utilización del CNAF, elaborado igualmente por la SETSI, se recogen los usos y restricciones de cada banda ISM, que se resumen a continuación.

- Banda de 868 MHz: Aplicaciones de baja potencia con la consideración de uso común en el rango de frecuencias 868 a 870 MHz. Aplicaciones de voz, alarmas, alarmas de teleasistencia, con una p.r.a (potencia radiada aparente) - potencia que se tiene que introducir en una antena dipolo para conseguir la potencia equivalente a una antena considerada - radiada específica para cada caso, recogida en las notas de utilización.

Actualmente, en esta banda de frecuencia se está desarrollando LoRaWAN para aplicaciones de IoT. De esta tecnología se hablará más profundamente en el capítulo 5.

Además, existe otra tecnología en desarrollo desde 2009, denominada *SigFox*, creada por la empresa francesa de mismo nombre que proporciona el servicio de red de cobertura amplia de bajo consumo *Low Power Wide Area Network* (LPWAN). Es inalámbrica y fue creada para que funcione e interactúe con dispositivos de bajo consumo energético

- Banda de 2,4 GHz: La banda de frecuencias 2400-2483,5 MHz podrá ser utilizada también para los siguientes usos de radiocomunicaciones bajo la consideración de uso común:
  - a) Sistemas de transmisión de datos de banda ancha y de acceso inalámbrico a redes de comunicaciones electrónicas incluyendo redes de área local.
  - b) Dispositivos genéricos de baja potencia en recintos cerrados y exteriores de corto alcance, incluyendo aplicaciones de vídeo.

Algunas de las aplicaciones más conocidas a esta banda de frecuencias son *Wi-Fi*, *ZigBee* y *Bluetooth*. Todas ellas se incluyen en las denominadas redes de área local (para *Wi-Fi*) y redes de área personal (para *ZigBee* y *Bluetooth*). Asimismo, todas ellas cuentan con un estándar creado por el IEEE (Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica).

- Banda de 5 GHz: Uso común de sistemas de acceso inalámbrico con distintas capacidades de movilidad del terminal (FWA/NWA/MWA) (Acceso Inalámbrico Fijo/Acceso Inalámbrico Nómada/Acceso Inalámbrico Móvil) y diferentes configuraciones de arquitectura de red, incluyendo aquellos con tecnologías de banda ancha (BFWA, Acceso Inalámbrico Fijo de Banda Ancha), funcionando dentro de la banda de aplicaciones ICM de 5,8 GHz.

El uso más común para esta banda de frecuencias es para las redes de área local (*Wi-Fi*).

- Banda de 60 GHz: Sistemas de transmisión de datos de banda ancha en torno a 60 GHz, de corto alcance funcionando en el rango de frecuencias 57 a 66 GHz para transmisión de datos a muy alta velocidad, conocidas como MGWS (de sus iniciales en inglés, *Multiple Gigabit Wireless Systems*), como son las redes WLAN y WPAN en aplicaciones de interior, coexistiendo con otras aplicaciones en parte o en la totalidad de la banda de frecuencias.

Actualmente se están desarrollando aplicaciones de área local a esta frecuencia, recogidas por la norma IEEE 802.11ad.



## 3.2 Modelos Urbanos. Métodos Empíricos de Propagación

### 3.2.1 RSSI

Se define RSSI como indicador de fuerza de la señal recibida (por las siglas del inglés *Received Signal Strength Indicator*). Es una escala de referencia (en relación a 1 mW) para medir el nivel de potencia de las señales recibidas por un dispositivo en las redes inalámbricas (típicamente WIFI o telefonía móvil). Se trata, pues, de un indicador de intensidad recibida, no de calidad de señal, ya que esta se determina contrastando la intensidad de la señal respecto de la relación señal/ruido (Eb/No).

RSSI describe la relación entre la potencia transmitida y recibida de señales inalámbricas y la distancia entre nodos como sigue:

$$P_r = P_t \cdot \left( \frac{1}{d} \right)^n \quad (3-1)$$

donde:

$P_r$  es la potencia recibida de la señal inalámbrica

$P_t$  es la potencia transmitida de la señal inalámbrica

$d$  es la distancia entre nodo emisor y receptor

$n$  es el factor de transmisión que depende de las condiciones de propagación

Tomando logaritmo en base 10 a los dos lados de la ecuación, se obtiene:

$$10 \log P_r = 10 \log P_t - 10n \log d \quad (3-2)$$

despejando la potencia recibida, la ecuación anterior se puede escribir como:

$$P_r \text{ (dBm)} = A - 10n \log d \quad (3-3)$$

De esta ecuación se puede concluir que los parámetros A y n determinan la relación entre la fuerza de la señal recibida y la distancia de la transmisión.

### 3.2.2 Método de la Recomendación UIT-R P.1546

El método propuesto por la UIT-R (Unión Internacional de Telecomunicaciones – Sección de Radiocomunicaciones) en la recomendación P.1546 es empírico. Se presentan una serie de curvas de propagación normalizadas para predecir valores de intensidad de campo eléctrico en enlaces terrenales, para aplicaciones tanto móviles como fijas, en un rango de frecuencia desde 30 MHz hasta 3000 MHz y para distancias de 1 a 1000 km.

Dicha Recomendación proporciona familias de curvas estándar que dan valores de intensidad de campo eléctrico (dBμV/m) en función de la distancia, entre  $d = 1$  km y  $d = 1000$  km, para frecuencias de 100, 600 y 2000 MHz, para entornos tales como propagación en tierra, mares cálidos y fríos, y para alturas de referencia de las antenas transmisoras de 10 a 1200 m.

Para trayectos en los que todos o parte de los parámetros difieran de los que aparecen en las curvas es necesario realizar una serie de ajustes y correcciones. En cualquier caso, hay que tener en cuenta que los valores de la intensidad de campo que se obtengan al aplicar el método no rebasarán el máximo  $E_{\text{máx}}$  (dBu) dado por:

$$\begin{aligned} E_{\text{máx}} &= E_{fs} && \text{para trayectos terrestres} \\ E_{\text{máx}} &= E_{fs} + E_{se} && \text{para trayectos marítimos} \end{aligned}$$

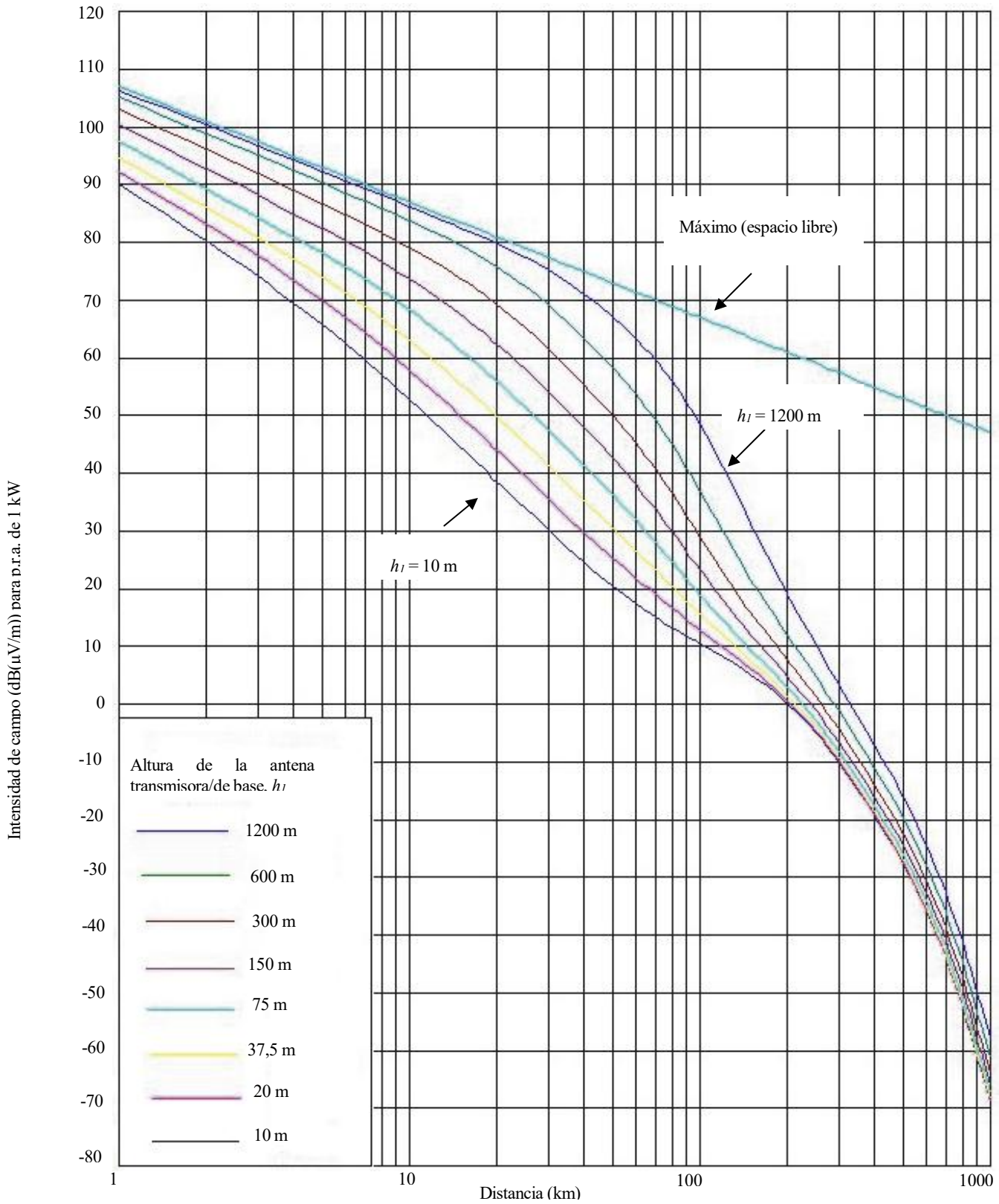


Figura 3-1: 100 MHz, trayecto terrestre, 50% del tiempo

50% de las ubicaciones

$h_2$ : altura representativa de los obstáculos

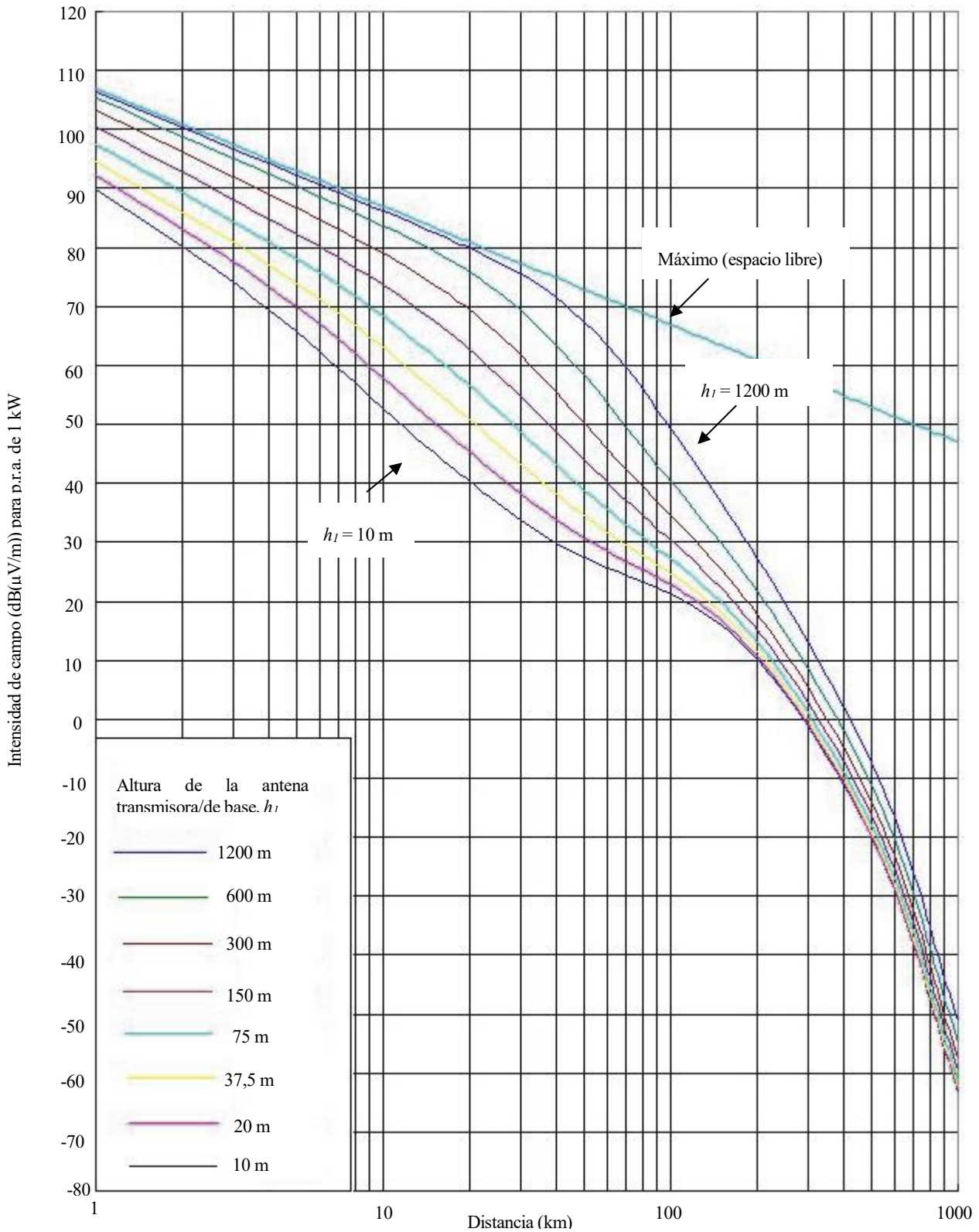


Figura 3-2: 100 MHz, trayecto terrestre, 10% del tiempo

50% de las ubicaciones

$h_2$ : altura representativa de los obstáculos

donde  $E_{fs}$  es el valor de la intensidad de campo en condiciones de espacio libre para una p.r.a de 1 kW:

$$E_{fs} = 107 - 20 \log d \quad (3-4)$$

y  $E_{se}$  es una intensificación debida a la propagación sobre mar cuyo valor es:

$$E_{se} = 2,38 \cdot [1 - \exp(-d / 8,94)] \cdot \log(20/T) \quad (3-5)$$

siendo  $d$  la distancia (km) y  $T$  el porcentaje de tiempo.

Como el objeto de este trabajo no es el estudio en profundidad de dichas correcciones, solo se nombrarán, aunque pueden consultarse con más detalle en [1].

- 1) Corrección por potencia de emisión
- 2) Cálculo de la altura  $h_t$
- 3) Interpolación-extrapolación en función de la frecuencia
- 4) Corrección por altura de la antena de recepción
- 5) Corrección para trayectos cortos en medio urbano/suburbano
- 6) Corrección por despejamiento del terreno cerca del receptor
- 7) Corrección por porcentaje de ubicaciones
- 8) Corrección por porcentaje de tiempo

### 3.2.3 Método de Hokumura-Hata

Para aplicaciones de radiocomunicaciones móviles, Okumura obtuvo unas curvas estándar de propagación similares a las de la Rec. P.1546, sobre la base de una amplia campaña de medidas efectuadas en Japón. Las curvas normalizadas de Okumura proporcionan valores de la intensidad de campo para medio urbano, diferentes alturas efectivas de antenas, bandas de 150, 450 y 900 MHz y una p.r.a de 1 kW. La altura de la antena receptora se propone en 1,5 m., valor típico en aplicaciones móviles. Además de las curvas, el método de Okumura proporciona correcciones para tener en cuenta los efectos de ondulación del terreno, pendiente del terreno, presencia de obstáculos significativos, heterogeneidad del terreno (trayectos mixtos tierra/mar), altura de antena receptora, potencia radiada aparente y orientación de las calles y densidad de edificación, en el caso de zonas urbanas. Este método proporciona resultados bastante acordes con las mediciones, por lo que se suele utilizar con bastante asiduidad.

Aparte de proporcionar las curvas, Hata desarrolló expresiones numéricas para las curvas normalizadas de propagación de Okumura, incluyendo las correcciones más usuales utilizadas en las radiocomunicaciones móviles. Mediante el análisis, Hata obtuvo una serie de expresiones que proporcionan la pérdida básica de propagación,  $L_b$ , para medios urbanos, suburbanos y rurales sobre terreno poco ondulado. La fórmula fundamental de Hata, que da  $L_b$  para un medio urbano y que sirve de referencia para las demás es la que sigue:

$$L_b = 69,55 + 26,16 \log f - 13,82 \log h_t - a(h_r) + (44,9 - 6,55 \log h_t) (\log d) \quad (3-6)$$

Una variante de esta fórmula proporciona el valor de la intensidad de campo  $E$  (dBu) para una p.r.a de 1 kW:

$$E_b = 69,82 - 6,16 \log f + 13,82 \log h_t + a(h_r) - (44,9 - 6,55 \log h_t) (\log d) \quad (3-7)$$

en ambos casos:

$f$ : Frecuencia, en MHz, con valores de  $f$  comprendidos entre  $150 \leq f \leq 1500$  MHz .

$h_t$ : Altura efectiva de la antena de transmisión (m), con valores de  $h_t$  comprendidos entre  $30 \leq h_t \leq 200$  m.

$h_r$ : Altura sobre el suelo de la antena de recepción (m), con valores de  $h_r$  comprendidos entre  $1 \leq h_r \leq 10$  m.

$d$ : Distancia (km)

La fórmula de Hata está diseñada especialmente para su aplicación en radiocomunicaciones móviles. Proporciona valores medios de la pérdida básica de propagación o de la intensidad de campo en cualquier punto, sin embargo, no tiene en cuenta el entorno del receptor. Como se ha podido apreciar anteriormente, la fórmula está limitada para frecuencias de hasta 1500 MHz. Con los nuevos sistemas de comunicaciones que funcionan en frecuencias superiores a esta, 1800 y 2000 MHz, se ha desarrollado otra variante de la fórmula de Hata, denominada Hata-COST231, que proporciona una estimación de  $L_b$  para estas frecuencias:

$$L_b = 46,3 + 33,9 \log f - 13,82 \log h_t - a(h_t) + (44,9 - 6,55 \log h_t) (\log d) + c_m \quad (3-8)$$

siendo  $c_m$  una constante de ajuste cuyos valores son:

$c_m = 0$  dB, para ciudades de tipo medio y áreas con una densidad de arbolado moderado.

$c_m = 3$  dB, para grandes centros metropolitanos.

El término  $a(h_t)$  es una corrección que depende de la altura de la antena del móvil. Para una altura típica de antena de 1,5 m,  $a(h_t) = 0$ . Para otras alturas,  $a(h_t)$  depende del tipo de ciudad.

Ciudad media-pequeña:

$$a(h_t) = (1,1 \log f - 0,7) \cdot h_t - (1,56 \log f - 0,8) \text{ dB} \quad (3-9)$$

Ciudad grande:

$$a(h_t) = 8,29 (\log 1,54 h_m)^2 - 1,1 \quad f \leq 200 \text{ MHz} \quad (3-10)$$

$$a(h_t) = 3,2 (\log 11,75 h_m)^2 - 4,97 \quad f \geq 200 \text{ MHz} \quad (3-11)$$

Si el receptor se encuentra en una zona suburbana, caracterizada por edificaciones de baja altura y calles relativamente anchas, la atenuación se considera de la siguiente manera:

$$L_{bs} = L_b - 2 \cdot [\log(f / 28)]^2 - 5,4 \quad (3-12)$$

Por último, si el receptor se encuentra en una zona rural, abierta, sin obstrucciones en su entorno inmediato, se tiene:

$$L_{br} = L_b - 4,78 (\log f)^2 + 18,33 \log f - 40,94 \text{ dB} \quad (3-13)$$

Cabe destacar por último que la fórmula de Hata no tiene en cuenta la influencia de la ondulación del terreno ni los efectos derivados del grado de urbanización.

### 3.2.4 Método COST 231 para Medio Urbano

Si se desea una predicción más precisa de la pérdida básica de propagación en el medio urbano, se han propuesto varios métodos que incorporan el efecto de las estructuras urbanas (edificios, calles), en cuyo entorno está situado el móvil. Se trata de métodos aplicables a radiocomunicaciones localizadas exclusivamente en el medio urbano y en particular a las comunicaciones móviles celulares, cuando se desea delimitar con precisión la cobertura de una estación base. De entre todos los métodos existentes, el método COST 231 es el más actual. Está preparado para enlaces en 900 y 1800 MHz y se basa en los métodos de Ikegami-Ioshida y Walfish-Bertoni, con la adaptación de algunas de sus variables a las características de las ciudades europeas.

Este método se aplica cuando el rayo directo entre emisor y receptor está obstruido por los edificios.

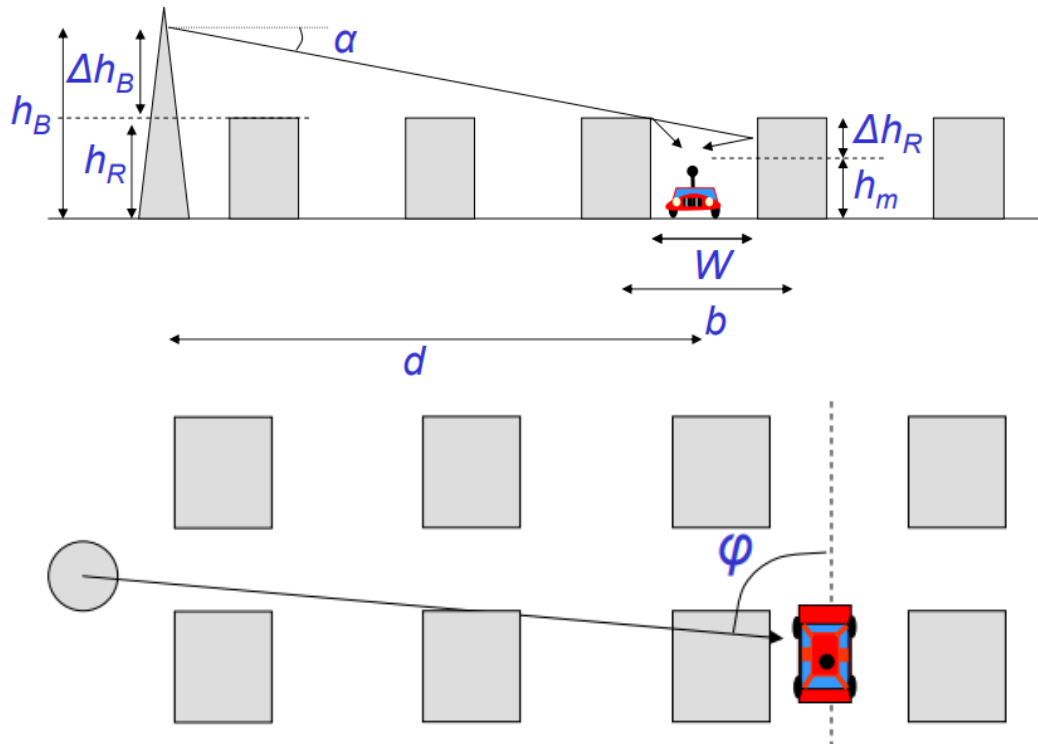


Figura 3-3: Método COST 123 para medio urbano

En la Figura 3-3: Método COST 231 para Medio Urbano

$h_B$ : Altura sobre el suelo de la antena de estación base (fija) (m).

$h_m$ : Altura sobre el suelo de la antena del móvil (m).

$h_R$ : Altura media de los edificios (m) ( $h_R > h_m$ ).

$w$ : Anchura de la calle donde se encuentra el móvil (m).

$b$ : Distancia entre centros de edificios (m).

$d$ : Distancia base-móvil (km).

$\alpha$ : Ángulo de inclinación del rayo ( $^\circ$ ).

$\varphi$ : Ángulo del rayo con el eje de la calle ( $^\circ$ ).

$\Delta h_B = h_B - h_R$ : Altura de la antena de la estación base sobre la altura media de los edificios circundantes (m).

$\Delta h_R = h_R - h_m$ : Altura media de los edificios sobre la altura de antena del móvil (m).

De acuerdo con el método, la pérdida básica de propagación es

$$L_b = L_{bf} + L_{rts} + L_{msd} \quad (3-14)$$

donde:

$L_{bf}$  es la pérdida en condiciones de espacio libre:

$$L_{bf} = 32,45 + 20 \log f (MHz) + 20 \log d (km) \quad (3-15)$$

$L_{rts}$  es la pérdida debida a la difracción tejado-calle entre el tejado de los edificios y el móvil, que se calcula mediante la ecuación:

$$L_{rts} = -8,2 - 10 \log w + 10 \log f + 20 \log \Delta h_R + L_{ori} \quad (3-16)$$

Si  $L_{rts} \leq 0$ , se toma  $L_{rts} = 0$ .

El valor de  $L_{ori}$  tiene en cuenta el ángulo  $\varphi$  entre el rayo y el eje de la calle, como sigue:

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0,354\varphi & 0 < \varphi < 35^\circ \\ 2,5 + 0,075(\varphi - 35^\circ) & 35 \leq \varphi \leq 55^\circ \\ 4 - 0,114(\varphi - 55^\circ) & 55 \leq \varphi \leq 90^\circ \end{cases} \quad (3-17)$$

$L_{msd}$  es una estimación de la difracción multiobstáculo que experimenta el rayo entre la antena transmisora y el edificio próximo al receptor, debido a los edificios interpuestos entre ambos. Su valor es:

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \cdot \log d + k_f \cdot \log f - 9 \log b \quad (3-18)$$

Los parámetros de la expresión se definen de la siguiente manera:

$$L_{bsh} = \begin{cases} 0 & \Delta h_B < 0 \\ -18 \log(1 + \Delta h_B) & e.o.c \end{cases} \quad (3-19)$$

$$k_a = \begin{cases} 54 & \Delta h_B \geq 0 \\ 54 - 0,8\Delta h_B & \Delta h_B < 0 \text{ y } d \geq 0,5 \\ 54 - 0,8\Delta h_B (d / 0,5) & \Delta h_B < 0 \text{ y } d < 0,5 \end{cases} \quad (3-20)$$

$$k_d = \begin{cases} 18 & \Delta h_B \geq 0 \\ 18 - \frac{(15\Delta h_B)}{h_R} & \Delta h_B < 0 \end{cases} \quad (3-21)$$

$$k_f = \begin{cases} -4 + 0,7 \left( \frac{f}{925} - 1 \right) & \text{para ciudades de tamaño medio y} \\ & \text{zonas suburbanas con densidad de} \\ & \text{vegetacion moderada} \\ -4 + 1,5 \left( \frac{f}{925} - 1 \right) & \text{para grandes centros metropolitanos} \end{cases} \quad (3-22)$$

Si  $L_{msd} < 0$ , se toma  $L_{msd} = 0$ .

Si se desconocen los datos del medio urbano, pueden utilizarse los siguientes valores por defecto:

- $b$ : 20 a 50 m.
- $w$ :  $b/2$ .
- $h_R$ :  $3 \cdot (\text{núm. pisos}) + \text{ático}$  (m).
- $\text{ático}$ : 3 m (inclinado), 0 m (plano).
- $\varphi$ :  $90^\circ$ .

Todos estos parámetros son aplicables dentro de la siguiente gama de valores:

$$800 \leq f \leq 2000 \text{ MHz}$$

$$4 \leq h_B \leq 50 \text{ m}$$

$$1 \leq h_m \leq 3 \text{ m}$$

$$0,02 \leq d \leq 5 \text{ km}$$

### 3.3 Desvanecimientos

Se conoce como desvanecimiento a toda disminución de la potencia de señal recibida con la relación a su valor nominal. La diferencia entre el nivel nominal y el nivel recibido en condiciones de desvanecimientos se llama profundidad de desvanecimiento y se expresa en dB. Al intervalo de tiempo de tiempo en que la potencia recibida es inferior a un valor umbral se lo conoce como duración del desvanecimiento.

#### 3.3.1 Tipos de Desvanecimientos

Se denomina desvanecimiento plano cuando la caída de nivel afecta por igual a todas las componentes del espectro de una portadora modulada. Sin embargo, los desvanecimientos selectivos producen distorsión en el espectro de la señal modulada, al afectar de modo diferente a unas frecuencias y a otras, lo cual provoca, a su vez, una degradación de la señal modulada.

Los desvanecimientos de factor  $k$  son los producidos por variaciones en el índice de refracción troposférica que, al aumentar la curvatura aparente de la Tierra, reducen el margen libre de obstáculos, incluso pudiendo llegar a convertir un trayecto con visibilidad directa en otro obstruido.

Los desvanecimientos multitrayecto se originan por la aparición de varios caminos de propagación entre el transmisor y el receptor, de forma que se produce una interferencia entre el rayo directo y los rayos que alcanzan la antena receptora con diversos ángulos, tras recorrer otros trayectos de propagación (reflexión en el suelo o en capas atmosféricas). La señal resultante es la suma de una componente típicamente constante (señal directa) y otras componentes de amplitud variable en función de las amplitudes y fases instantáneas de las componentes.

En condiciones normales de propagación, suele estar presente otro tipo de desvanecimiento de pequeña intensidad, originado por irregularidades en la troposfera, denominado centelleo y que se modela mediante una distribución gaussiana.

#### 3.3.2 Desvanecimientos multitrayecto

El desvanecimiento multitrayecto, debido a su intensidad y al hecho de ser selectivo en frecuencia, en muchas ocasiones produce una importante atenuación y distorsión en la señal recibida, por lo que ejerce una marcada influencia sobre la calidad de los sistemas de radiocomunicaciones.

Como ya se ha comentado, este tipo de desvanecimientos es consecuencia de la interferencia entre componentes de la señal que se propagan por caminos diferentes. La existencia de dos o más trayectos además del principal se debe a reflexiones en el suelo o en capas atmosféricas como consecuencia, en el último caso, de discontinuidades en el índice de refracción de la troposfera.

La reflexión especular o difusa en el suelo suele ser previsible y puede contrarrestarse con un cierto grado de fiabilidad. Sin embargo, los multitrayectos atmosféricos dependen de la distancia, gradiente  $N$  (En propagación de microondas es de mayor interés el gradiente de  $N$  ( $dN/dh$ ) que su valor absoluto, ya que la curvatura del rayo depende de este gradiente.), espesor, altura y grado de estratificación de la atmósfera.

#### 3.3.3 Desvanecimiento selectivo

Este tipo de desvanecimiento se caracteriza porque la función de transferencia del medio de propagación varía con la frecuencia, lo que produce una distorsión de amplitud y fase en las señales transmitidas que inciden notablemente en la calidad de recepción.

Para el estudio del desvanecimiento selectivo resulta necesario conocer:

1. El porcentaje de tiempo en que un desvanecimiento multitrayecto tendrá carácter selectivo.
2. Un modelo de la función de transferencia  $H(\omega)$  del canal radioeléctrico en estas condiciones, que se denomina función de transferencia multitrayecto (FTM), al menos para la gama de frecuencias tales que

$$|f - f_c| \leq B/2$$

donde  $f_c$  es una frecuencia de referencia (frecuencia central de medida o frecuencia de portadora) y  $B$  la anchura de banda de medición o de transmisión.



3. Las estadísticas de los parámetros que intervienen en el modelo de  $H(\omega)$ .

### 3.4 Método Basados en la Medida de RSSI

Actualmente el modelo de propagación de RSSI en redes WSN, incluye cuatro modelos: el modelo de espacio libre, el modelo de propagación de dos rayos, el modelo de sombra logarítmico-normal (abreviado log-normal) y el modelo de pérdidas *log-distance*.

El modelo de espacio libre se aplica en las siguientes ocasiones:

- 1) La distancia de transmisión es mucho mayor que el tamaño de la antena y la longitud de onda de la portadora.
- 2) No hay obstáculos entre el emisor y el receptor.

Tomando  $P_t$  como la potencia de la señal transmitida, la potencia de la señal recibida de los nodos localizadas a una distancia  $d$  se puede determinar de la siguiente manera:

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (3-23)$$

Si tomamos logaritmos en ambos lados de la ecuación, y con la definición de RSSI, se obtiene:

$$PL(dB) = 10 \log \frac{P_t}{P_r} = -10 \log \left[ \frac{\lambda^2 G_t G_r}{(4\pi)^2 d^2 L} \right] \quad (3-24)$$

donde  $G_t$  y  $G_r$  son las ganancias de las antenas transmisora y receptora respectivamente y  $L$  es el factor de pérdidas del sistema. Normalmente, se toma  $G_t = G_r = 1$  y  $L = 1$

El modelo de 2 rayos se aplica en las siguientes ocasiones:

- 1) La distancia de la transmisión es de unos pocos kilómetros.
- 2) La altura de las antenas transmisora y receptora es de 50 metros o más.

Se trata de un modelo muy preciso cuando se usa en ambientes urbanos microcelulares. La potencia de la señal recibida se determina con las siguientes fórmulas:

$$P_r(dB) = P_t G_t G_r \frac{h_t^2 h_r^2}{d^4} \quad (3-25)$$

$$PL(dB) = 40 \log d - (10 \log G_t + 10 \log G_r + 20 \log h_t + 20 \log h_r) \quad (3-26)$$

donde  $h_t$  es la altura de la antena transmisora y  $h_r$  es la altura de la antena receptora.

El modelo de sombra *log-normal* es el más general de los modelos de propagación. Es válido tanto para ambientes en interiores como en exteriores. El modelo proporciona una serie de parámetros que pueden ser configurados de acuerdo a los diferentes entornos. El cálculo es como sigue:

$$PL(d)(dB) = \overline{PL}(d) + X_\sigma = \overline{PL}(d_0) + 10\eta \log \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma \quad (3-27)$$

donde el parámetro  $d_0$  es la referencia de tierra cercana, que depende de los valores experimentales;  $\eta$  es el índice de pérdidas del trayecto, que depende del trayecto específico de propagación y su valor se hace más grande a medida que aumentan los obstáculos;  $X_\sigma$  es una variable aleatoria Gaussiana de media cero. Los parámetros  $d_0$ ,  $\eta$  y  $\sigma$  describen el modelo de pérdidas del trayecto que tiene una distancia específica de transmisión y recepción. Este modelo puede ser usado para el diseño y análisis de sistemas inalámbricos generales.

El modelo de pérdidas *log-distance* surge como resultado teórico de medidas en el campo, se observó que la potencia media de la señal recibida tiene un comportamiento logarítmico decreciente con la distancia T-R. La

fórmula general del modelo se expresa como:

$$PL(avg) = PL(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (3-28)$$

donde  $PL(avg)$  se muestra en decibelios,  $n$  es la tasa de pérdidas del trayecto y  $PL(d_0)$  es la pérdida del trayecto con una distancia de referencia  $d_0$ ; normalmente se toma con valores de 1 m, 100 m ó 1 km, de acuerdo con el rango de aplicación del modelo. La tasa de pérdidas  $n$  depende de las condiciones del ambiente y se encuentra en el rango de [2 6]. Para el modelo de espacio libre y de dos rayos  $n$  se toma con valores 2 y 4 respectivamente. Este valor se incrementa con la frecuencia y disminuye con la altura de las antenas.

Resumiendo, los cuatro modelos anteriormente descritos, el modelo de sombra *log-normal* es el más apropiado para aplicaciones en redes WSN debido a su naturaleza universal y su habilidad de ser configurado de acuerdo a las condiciones del medio.

### 3.4.1 Variabilidad de RSSI

El RSSI en una radiocomunicación se ve afectado por varios factores que se pueden dividir en dos categorías: los relativos a las propiedades del medio de propagación y los relativos a los dispositivos. Los relativos a las propiedades del medio incluyen:

- Tipo del medio
- Ruido de fondo
- Temperatura
- Reflejos de objetos metálicos
- Otros campos electromagnéticos
- Refracción por los medios con diferente velocidad de propagación
- Circuitos de recepción inaplicables.

Los factores relativos a los dispositivos incluyen el tipo de antena (direccional u omnidireccional), la potencia de transmisión, las ganancias de las antenas emisora y receptora y la sensibilidad del receptor.

Para mitigar los efectos de estas interferencias, se pueden establecer algunas condiciones básicas en la configuración de los dispositivos tales como:

- Mismo tipo de antena para el emisor y el receptor.
- Pretesteo en los dispositivos para alcanzar un valor similar de RSSI en ausencia de personas.
- La dirección de los pares de antenas emisoras y receptoras son paralelas y opuestas.

Sin embargo, el principal factor de variabilidad de la señal RSSI es el desvanecimiento multirayecto y las sombras en el canal de radiofrecuencia. En entornos de interiores, la señal electromagnética se refleja cuando encuentra paredes, adornos y otros objetos. Como velocidad de propagación es tan alta, es casi imposible para el receptor distinguir la señal original de la señal reflejada. Por esta razón, la presencia de personas interfiere en la radiopropagación y, por tanto, en la medida del RSSI.

### 3.4.2 Estado del Arte

Como se ha visto anteriormente, la señal RSSI, se usa para conocer la potencia de la señal recibida. Si se consigue predecir y, por tanto, reducir los errores sistemáticos del entorno, esta potencia se puede usar como parámetro para desarrollar aplicaciones. Algunas de ellas se presentan a continuación:

1. Estimación de la posición y seguimiento.

El estudio de las redes WSNs para aplicaciones de seguimiento y estimación de la posición ha deparado algunos resultados interesantes tales como:

- La estimación de la posición con un algoritmo de máxima verosimilitud en 3D basado en la medida de RSSI; Hasta entonces, no se había investigado un algoritmo de posicionamiento en 3D. [14]
- Algoritmo de localización adaptativa basado en RSSI en WSN; La mayoría de algoritmos dependen principalmente de un solo modelo y se usan solo para unas condiciones dadas. Con este nuevo modelo adaptativo, se fusionan los modelos tradicionales de posicionamientos basados en RSSI y los nuevos modelos experimentales. [15]
- Seguimiento de múltiples objetos usando WSN; En este estudio se asume que los objetos a seguir no llevan ningún tipo de dispositivo activo. Este seguimiento se realiza con un grupo de sensores lumínicos con fuentes de luz generales. [16]

## 2. Detección de aparcamientos

Haciendo uso de la señal RSSI recibida, se sabrá si una plaza de aparcamiento está ocupada o libre. El campo RSSI está contenido en la trama MAC del estándar ZigBee, sobre el que se implementa la red WSN. [17]

## 3. Navegación

El uso conjunto de redes de sensores y sistema de posicionamiento global (por ejemplo, GPS) aumenta la precisión del posicionamiento y provee de conectividad en lugares donde es complicado hacer una instalación adecuada y no demasiada cara de los sistemas de navegación tradicionales. [18]



# 4 MATERIALES EMPLEADOS

*The fundamental problem of communication is that of reproducing at one point either exactly or approximately a message selected at another point.*

Claude Shannon, 1948

## 4.1 Hardware

Para la realización de este proyecto se usará el kit Chefi-Air, empleado por la empresa SiGrow para el control de plantaciones y cosechas a través de las medidas de Radiación Activa Fotosintética (PAR), temperatura, humedad, nivel de CO<sub>2</sub>, salinidad del suelo y la temperatura del sustrato.

SiGrow ofrece varios modelos de kit dependiendo de las necesidades del usuario. Estos kits ofrecen un número de sensores, que varían en función del área a cubrir, y un nodo central que es el que se encarga de recolectar los datos obtenidos.

Así, los kits que se ofrecen se resumen a continuación:

Tabla 4-1: Sensores de la empresa SiGrow

	LIGHT PAR umol/m2/s	AIR TEMPER. °C	AIR HUMIDITY %	AIR CO2 ppm	SUBSTRATE VOLUMETRIC WATER CONTENT %/%	SUBSTRATE EC ms/m	SUBSTRATE TEMPER. °C
AIR	✓	✓	✓				
AIR PRO	✓	✓	✓	✓			
SOIL	✓	✓	✓		✓	✓	✓

Estos módulos pertenecen a la familia de dispositivos integrados sx1272, de la empresa Semtech, trabajan en las bandas de frecuencia ISM a 915 MHz en Estados Unidos, Canadá, Australia, Singapur e Israel y a 868 MHz en su versión europea y del resto del mundo y ofrecen una velocidad de transmisión de datos de hasta 300 kbps.

Para la transmisión de datos, el sx1272 incorpora técnicas más novedosas como un módulo de espectro expandido denominado LoRa que coexiste con otras técnicas más conocidas como los sistemas basados en modulaciones de frecuencia FSK (Modulación por Desplazamiento en Frecuencia) y otras como OOK (Modulación On-Off) y GMSK (Modulación por Desplazamiento Mínimo Gaussiano), que además ofrecen

compatibilidad con estándares tales como MBUS (Meter-Bus, estándar para la lectura remota de medidores de consumo) o IEEE 802.15.4g.

El uso del integrado sx1272 está ligado a aplicaciones tales como:

- Lectura automática del medidor
- Automatización del hogar y edificios
- Sistemas de seguridad y alarmas inalámbricas
- Monitorización y control industrial
- Sistemas de irrigación de largo alcance

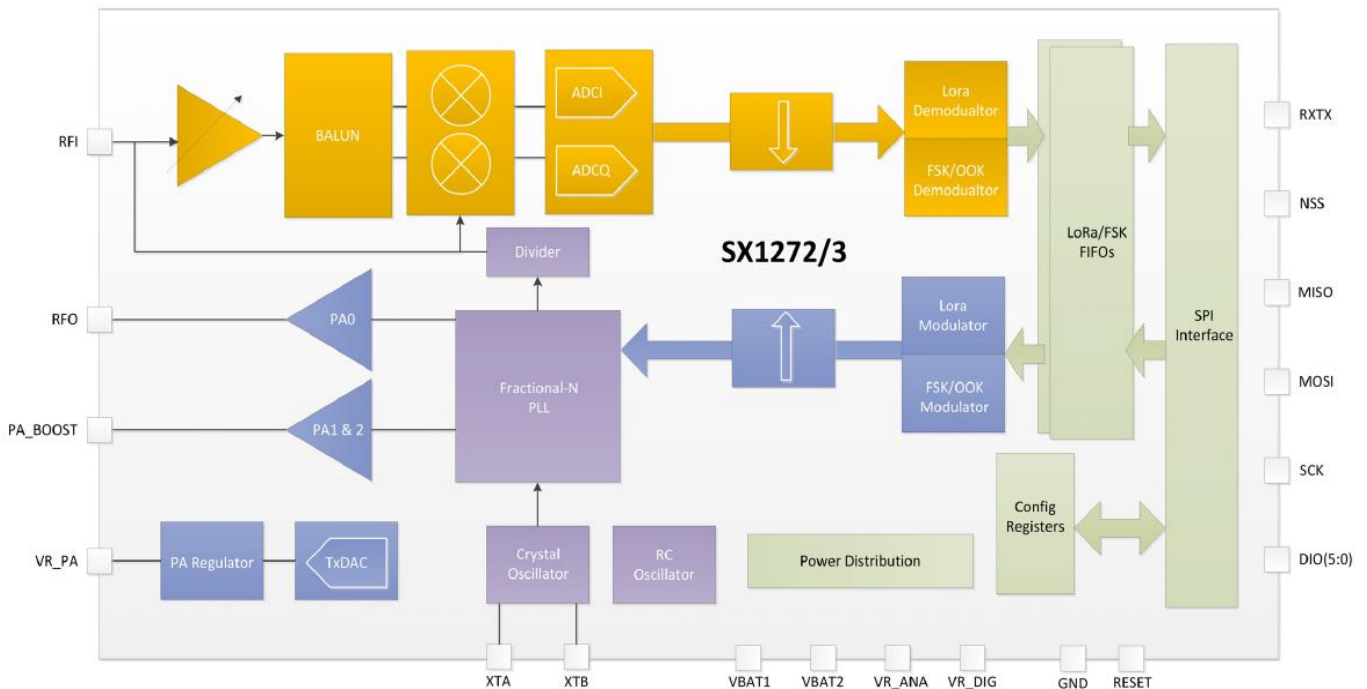


Figura 4-1: Diagrama de bloques de sx1272

Tal y como se ha dicho anteriormente, SX1272/73 incorpora un módulo de espectro ensanchado LoRa el cual es capaz de alcanzar un mayor rango que sistemas basados en modulaciones FSK o OOK. Este esquema de modulación proporciona una sensibilidad de 8 dB mejor que su equivalente FSK con la misma tasa pudiéndose alcanzar con un oscilador del cristal de bajo coste. Esto permite un alcance y una robustez mucho mayor sin la necesidad de un amplificador externo. LoRa también proporciona ventajas en selectividad y en el rendimiento de bloqueo y seguridad en la comunicación. Además, se caracteriza por su flexibilidad de cara al usuario ya que se puede decidir el ancho de banda de la modulación de espectro expandido (BW), el factor de ensanchado (SF) y la tasa de corrección de errores (CR). Otro de los beneficios de LoRa es que cada uno de los factores de ensanchado es ortogonal entre sí, lo que permite la transmisión de múltiples señales en el mismo canal sin interferencias. Esto además permite la coexistencia con sistemas FSK. Además, también existen modulaciones GFSK, FSK, OOK y GMSK para permitir la compatibilidad con sistemas existentes.

SX1272 ofrece tres anchos de banda distintos con factores de ensanchado en el rango de 6 a 12 mientras que SX1273 ofrece los mismos anchos de bandas con factores de ensanchado de 6 a 9.

## 4.2 Características sx1272

- Módulo LoRa
- Máxima pérdida básica de propagación admisible 157 dBm

- Potencia de salida de RF constante a +20 dBm (100 mW) frente a tensión de alimentación
- Incluye un primer amplificador de alta eficiencia con +14 dBm a la salida
- Tasa de bit programable de hasta 300 kbps
- Alta sensibilidad: menor de -137 dBm
- IIP3 = -12.5 dBm
- Inmunidad a bloqueo de 89 dB
- Baja corriente de receptor de 10 mA, registro de retención 100 nA
- Sintetizador completamente integrado con resolución de 61 Hz
- Modulaciones FSK, GFSK, MSK, GMSK, OOK y LoRa
- Sincronización de bit para la recuperación del reloj
- Detección de preámbulo
- Rango dinámico RSSI de 127 dB
- Sensor automático de RF y detección de actividad en el canal ultra rápida
- Procesado de paquetes de hasta 256 bytes con CRC (código de redundancia cíclico)
- Sensor de temperatura e indicador de batería incorporados

Tabla 4-2: Rango de operación sx1272

Símbolo	Descripción	Min	Max	Unit
VDDop	Voltaje de alimentación	1.8	3.7	V
Top	Rango de temperaturas	-40	+85	°C
Clop	Carga en los puertos digitales	-	+25	pF
ML	Nivel de entrada RF	-	+10	dBm

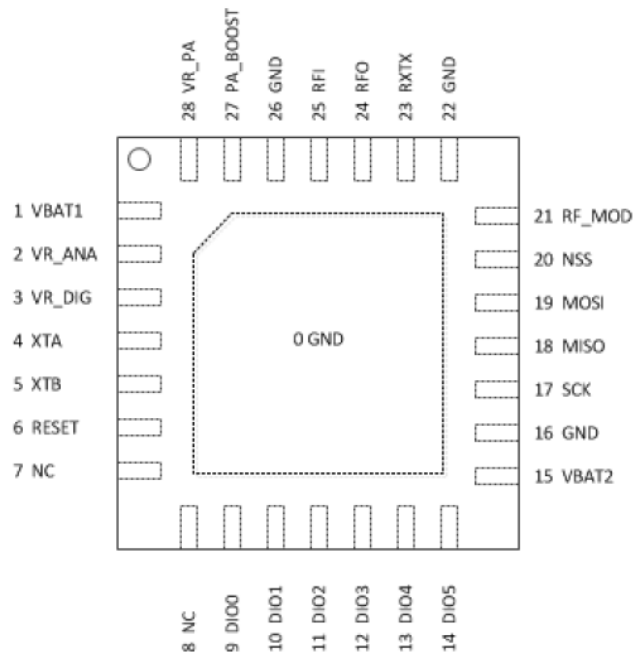


Figura 4-2: Esquemático de sx1272

Tabla 4-3: Descripción conexas de sx1272

Número	Nombre	Tipo	Descripción
0	GROUND	-	Tierra
1	VBAT1	-	Voltaje de alimentación
2	VR_ANA	-	Regulador de voltaje para circuitería analógica
3	VR_DIG	-	Regulador de voltaje para bloques digitales
4	XTA	I/O	Conexión al cristal o entrada TCXO
5	XTB	I/O	Conexión del cristal
6	RESET	I/O	Reset
7	NC	-	Conexión a Tierra
8	NC	-	Conexión a Tierra
9	DIO0	I/O	Entrada/Salida digital, configurada por software
10	DIO1/DCLK	I/O	Entrada/Salida digital, configurada por software
11	DIO2/DATA	I/O	Entrada/Salida digital, configurada por software
12	DIO3	I/O	Entrada/Salida digital, configurada por software
13	DIO4	I/O	Entrada/Salida digital, configurada por software
14	DIO5	I/O	Entrada/Salida digital, configurada por software
15	VBAT2	-	Voltaje de alimentación
16	GND	-	Tierra
17	SCK	I	SPI Entrada de Reloj
18	MISO	O	SPI Salida de Datos
19	MOSI	I	SPI Entrada de Datos
20	NSS	I	SPI Entrada CS
21	RF_MOD	O	NC
22	GND	O	Tierra
23	RXTX	O	Control Rx/Tx: Tx alto
24	RFO	O	Salida RF
25	RFI	I	Entrada RF
26	GND	O	Tierra
27	PA_BOOST	O	Salida Alta potencia
28	VR_PA	O	Alimentación regulada para PA



Tabla 4-4: Consumo de Potencia

Descripción	Condiciones	Typ.	Unit
Corriente en Modo Sleep		0.1	uA
Corriente en Modo Libre	Oscilador RC habilitado	1.5	uA
Corriente en Modo StanBy	Oscilador de Cristal habilitado	1.4	mA
Corriente en Modo Sintetizador		4.5	mA
Corriente en Modo Receptor	LNA OFF	10.5	mA
	LNA ON	11.2	
Corriente en Modo Transmisor con Adaptación de Impedancia	+20 dBm en pin PA_BOOST	125	mA
	+17 dBm en pin PA_BOOST	90	
	+13 dBm en pin RFO	28	
	+7 dBm en pin RFO	18	

### 4.3 LoRa y LoRaWan

Como se ha explicado anteriormente, los sensores integran varias técnicas de modulación. Sin embargo, esta empresa apuesta por la tecnología LoRa para la transmisión de sus datos.

LoRaWAN es un protocolo de red de área amplia (LPWA) de baja potencia diseñado para conectar de forma inalámbrica dispositivos con batería a Internet en redes regionales, nacionales o mundiales, y se dirige a requisitos clave de Internet de las Cosas como comunicación bidireccional, servicios de seguridad, movilidad y localización de extremo a extremo.

LoRa utiliza una modulación *chirp-spread-spectrum* (CSS) con opciones para diferentes factores de propagación (SF) y ancho de banda para optimizar la modulación y cumplir con los requisitos de rango y datos. LoRa usa bandas ISM de 433 MHz, 868 MHz o 915 MHz dependiendo de la región, con la banda dividida en canales. La combinación de SF y ancho de banda compensa la velocidad de transmisión.

LoRaWAN incorpora una pila de protocolos con la conexión inalámbrica LoRa como capa física. Los sensores LoRaWAN se comunican por aire con una pasarela que incorpora un concentrador receptor capaz de decodificar 10 transmisiones simultáneas. Estas pasarelas se comunican con el servidor de red.

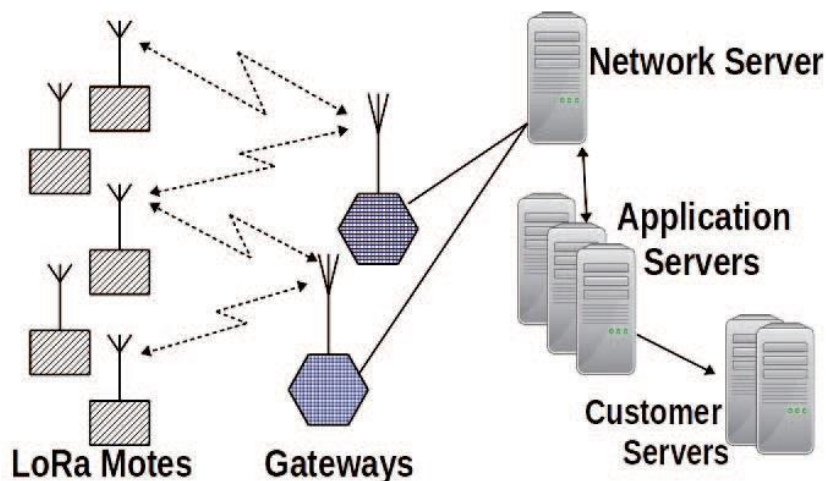


Figura 4-3: Escenario de transmisión LoRa

Tabla 4-5: Parámetros principales LoRa

Integrado	Rango de Frecuencias	Parámetros LoRa			
		Factor de Ensanchado	Ancho de Banda	Tasa de bit Efectiva	Sensibilidad
SX1272	860 – 1020 MHz	6 – 12	125 – 500 kHz	0.24 – 37.5 kbps	-117 a -137 dBm
SX1273	860 – 1020 MHz	6 – 9	125 – 500 kHz	1.7 – 37.5 kbps	-117 a -130 dBm

La modulación LoRa viene con las siguientes características por defecto en el SX1272/73, sin embargo, estas pueden ser modificadas dependiendo del uso que se le vaya a dar:

- Voltaje: 3.3 V.
- Temperatura: 25° C.
- $f_{\text{xosc}}$ : 32 MHz.
- Banda:  $f_{\text{RF}}=915$  MHz.
- Ancho de banda (BW): 125 kHz.
- Factor de ensanchado (SF): 12.
- Código de corrección de errores (EC): 4/6.
- Tasa de error de paquetes (PER): 1%.
- Código de redundancia cíclico de la carga útil.
- Potencia de transmisión: 13 dBm.
- Longitud de la carga útil: 10 bytes.
- Longitud del preámbulo: 12 símbolos.

SX 1272/73 es un transceptor semi-duplex de baja frecuencia. La señal recibida se amplifica con un LNA. Después del amplificador de bajo ruido, se convierte a una señal diferencial para mejorar la linealidad de segundo orden y el rechazo de armónicos. Seguidamente, la señal es convertida a sus componentes de fase y cuadratura a frecuencia intermedia por medio de la etapa del mezclador. Un par de convertidores analógico-digital sigma delta convierten los datos a digitales tras lo cual se realiza el procesamiento de señal y la demodulación en el dominio digital. La máquina de estados digital también controla la frecuencia automática de corrección (AFC), el indicador de fuerza de señal recibida (RSSI) y la ganancia de control automático (AGC).

Tabla 4-6: Configuración sx1272

Ancho de Banda (kHz)	Factor de Ensanchado	Rb nominal (bps)	Sensibilidad (dBm)
125	6	9380	-122
125	12	293	-137
250	6	18750	-119
250	12	586	-134
500	6	37500	-116
500	12	1172	-131

#### 4.3.1 Factor de Ensanchado

La modulación de espectro ensanchado LoRa se realiza representando cada bit de carga útil por múltiples chips de información. La tasa a la que se envía la información ensanchada es tomada como la tasa de símbolo ( $R_s$ ), la relación entre la tasa nominal de símbolo y la tasa de chip es el factor de ensanchado y representa el número de símbolos enviados por cada bit de información. El rango de valores accesible con la modulación LoRa se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4-7: Configuración Factor de Ensanchado

Factor de Ensanchado (RegModemConfig2)	Factor de Ensanchado (Chips/símbolo)	SNR demodulador LoRa
6	64	-5 dB
7	128	-7.5 dB
8	256	-10 dB
9	512	-12.5 dB
10	1024	-15 dB
11	2048	-17.5 dB
12	4096	-20 dB

#### 4.3.2 Tasa de codificación

Para mejorar la robustez del enlace LoRa se emplea codificación de error cíclica para realizar una detección y corrección de errores hacia delante. Dicha codificación de errores conlleva una sobrecarga en la transmisión como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 4-8: Configuración Tasa de Codificación

Tasa de codificación	Tasa de codificación Cíclica	Ratio de Sobrecarga
1	4/5	1.25
2	4/6	1.5
3	4/7	1.75
4	4/8	2

La corrección de errores hacia delante es particularmente eficiente en la mejora de la fiabilidad del canal en presencia de interferencias. Es por eso que la codificación de errores se puede cambiar en respuesta a las condiciones del canal.

#### 4.3.3 Ancho de Banda de la Señal

Un incremento en el ancho de banda de la señal permite el uso de una tasa de datos efectiva más alta, así se reduce el tiempo de transmisión a expensas de una reducción de la sensibilidad. Contrariamente a la modulación FSK, que se describe en términos de banda lateral única, el ancho de banda de la modulación LoRa se refiere a doble banda lateral (o el total del ancho de banda).

Tabla 4-9: Configuración Ancho de Banda de la Señal Transmitida

Ancho de Banda (kHz)	Factor de Ensanchado	Tasa de Codificación	Rb Nominal (bps)	Sensibilidad (dBm)
125	12	4/5	293	-136
250	12	4/5	586	-133
500	12	4/5	1172	-130

La tasa de símbolo de LoRa se define como:

$$R_s = \frac{BW}{2^{SF}} \quad (4-1)$$

donde BW es el ancho de banda programado y SF es el factor de ensanchado. La señal transmitida es una señal envolvente constante. De forma equivalente, un chip se envía por segundo y por hercio de ancho de banda.

#### 4.3.4 Estructura de un Paquete LoRa

La modulación LoRa emplea dos tipos de formato, explícito e implícito. El paquete explícito incluye una cabecera corta que contiene información sobre el número de bytes, la tasa de codificación y si se usa CRC en el paquete. El formato es el siguiente:

- Preámbulo.
- Cabecera opcional.
- Carga útil.

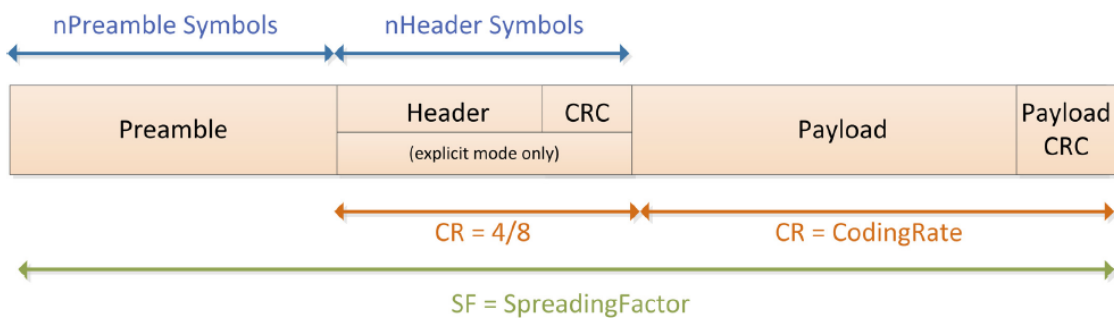


Figura 4-4: Estructura de un paquete LoRa

#### 4.3.5 Tiempo en el Aire

Para una combinación dada de factor de ensanchado, tasa de codificación y ancho de banda de la señal, el tiempo total en el aire de una transmisión LoRa se puede calcular como sigue. A partir de la definición de tasa de símbolo es conveniente definir el periodo de símbolo:

$$T_s = \frac{1}{R_s} \quad (4-2)$$

La duración del paquete LoRa se define como la suma de la duración del preámbulo y del paquete transmitido.

La longitud del preámbulo se calcula de la siguiente manera:

$$T_{preámbulo} = (n_{preámbulo} + 4.25)T_{sym} \quad (4-3)$$

donde  $n_{preámbulo}$  es la longitud programable del preámbulo, tomada de los registros *RegPreambleMsb* y *RegPreambleLsb*. La duración de la carga útil depende de si la cabecera está habilitada. La siguiente fórmula muestra el número de símbolos útiles:

$$n_{payload} = 8 + \max \left( \text{ceil} \left[ \frac{8PL - 4SF + 28 + 16CRC - 20IH}{4(SF - 2DE)} \right] (CR + 4), 0 \right) \quad (4-4)$$

donde PL es el número de bytes de carga útil, SF es el factor de ensanchado, IH=1 cuando el modo de cabecera implícito está habilitado e IH=0 cuando se usa la cabecera explícita. DE a 1 indica el uso de optimización de la baja tasa de datos, 0 cuando está deshabilitado. CRC indica la presencia de CRC en carga útil si CRC=1 ó 0 cuando no. CR es la tasa de codificación programada de 1 a 4.

La función techo (*ceil*) indica que la expresión entre corchete se debe redondear hasta el valor entero próximo por arriba. La función *max* compara el resultado de la función techo evaluada y devuelve 0 o el resultado, el más alto de los dos.

$$T_{payload} = n_{payload} \cdot T_s \quad (4-5)$$

La suma de la duración del preámbulo y de la carga útil da el tiempo total del paquete en el aire.

$$T_{packet} = T_{preámbulo} + T_{payload} \quad (4-6)$$

#### 4.3.6 Salto de Frecuencia en LoRa

El espectro expandido por salto de frecuencia (FHSS) se usa habitualmente cuando la duración de un único paquete puede exceder los requerimientos regulatorios relativos al máximo tiempo permisible de ocupación del canal. Esto es más notable en el caso americano operando en la banda de 902 a 928 MHz, que hacen una provisión para la operación en salto de frecuencia. Para facilitar el modo de espectro expandido por salto en frecuencia en los sistemas LoRa, se puede habilitar mediante la configuración de *FreqHoppingPeriod* a un valor distinto de 0 en el registro *RegHopPeriod*.

#### 4.3.7 Principio de Operación

El principio detrás del esquema FHSS es que una parte de cada paquete LoRa se transmite en un canal “saltante” de una tabla de frecuencia manejada por el microcontrolador. Después de un predeterminado periodo de salto, el transmisor y el receptor cambian al siguiente canal en una lista predefinida de saltos de frecuencia para continuar la transmisión y la recepción de la siguiente parte del paquete. El tiempo que la transmisión ocupará el canal se determina en *FreqHoppingPeriod* que es un entero múltiplo de los periodos de símbolo:

$$HoppingPeriod [s] = Ts \times FreqHoppingPeriod \quad (4-7)$$

El salto de frecuencia en el proceso de transmisión y recepción comienza en el canal 0. El preámbulo y la cabecera se transmiten en el canal 0. El contador de canal *FhssPresentChannel* se incrementa en el inicio de cada transmisión. La nueva frecuencia debe programarse dentro del periodo de salto para asegurar que se coge en la nueva cuenta para el siguiente salto.

La recepción FHSS siempre comienza en el canal 0. El receptor espera la detección de un preámbulo válido antes de empezar el proceso de salto de frecuencia descrito arriba. Si eventualmente existe una CRC corrompida, el receptor solicitará automáticamente el canal 0 y se empezará de nuevo el proceso de detección de un preámbulo válido.

### 4.3.8 Modo de Operación de LoRa

Los modos de operación de LoRa se describen en la siguiente tabla:

Tabla 4-10: Modos de Operación sx1272

Modo de Operación	Descripción
SLEEP	Modo de bajo consumo. En este modo solo SPI (Interfaz Periférica Serie) y los registros de configuración son accesibles.  Este es el único modo que permite en cambio entre FSK/OOK y LoRa.
STANDBY	Los bloques del oscilador de cristal y de LoRa están activos. La cabecera de RF y PLLs están deshabilitados.
FSTX	Modo de síntesis de frecuencia para transmisión. El PLL elegido para la transmisión está bloqueado y activo a la frecuencia de transmisión. La cabecera de RF está apagada.
FSRX	Modo de síntesis de frecuencia para recepción. El PLL elegido para transmisión está bloqueado y activo a la frecuencia de transmisión. La cabecera de RF está apagada.
TX	Cuando se activa, el SX1272/73 alimenta todos los bloques restantes necesarios para la transmisión, amplifica el PA, transmite el paquete y vuelve al modo de STANDBY.
RXCONTINUOUS	Cuando se activa, el SX1272/73 alimenta todos los bloques restantes necesarios para la recepción, procesando todos los datos recibidos hasta que se realiza una nueva solicitud de un nuevo usuario para cambiar el modo de operación.
RXSINGLE	Cuando se activa, el SX1272/73 alimenta todos los bloques necesarios para la recepción, permanece en este estado hasta que se recibe un paquete válido y luego vuelve al modo de STANDBY.
CAD	En el modo CAD, el dispositivo comprobará un canal dado para detectar la señal de preámbulo de LoRa.

## 4.4 CoolTermWin

Para la toma de valores de RSSI se hizo uso de CoolTermWin. Se trata de un software de comunicación conectado a un puerto serie. Algunas de las características que presenta son:

- Capacidad de múltiples conexiones simultáneas si hay varios puertos serie disponibles.
- Visualización de los datos recibidos en texto plano o formato hexadecimal.
- Envío de datos mediante pulsaciones de teclas, así como un cuadro de diálogo "Enviar cadena" que admite la entrada de datos en texto sin formato o formato hexadecimal.
- Envío de datos a través de copiar y pegar texto en la ventana del terminal.
- Envío de archivos de texto.
- Capacidad de captura de datos recibidos en archivos de texto.
- Eco local de los datos transmitidos y recibidos (loop back to sender)
- Indicadores de estado de la línea visual.
- Carácter configurable y retrasos de línea.
- Capacidad de guardar y recuperar opciones de conexión.

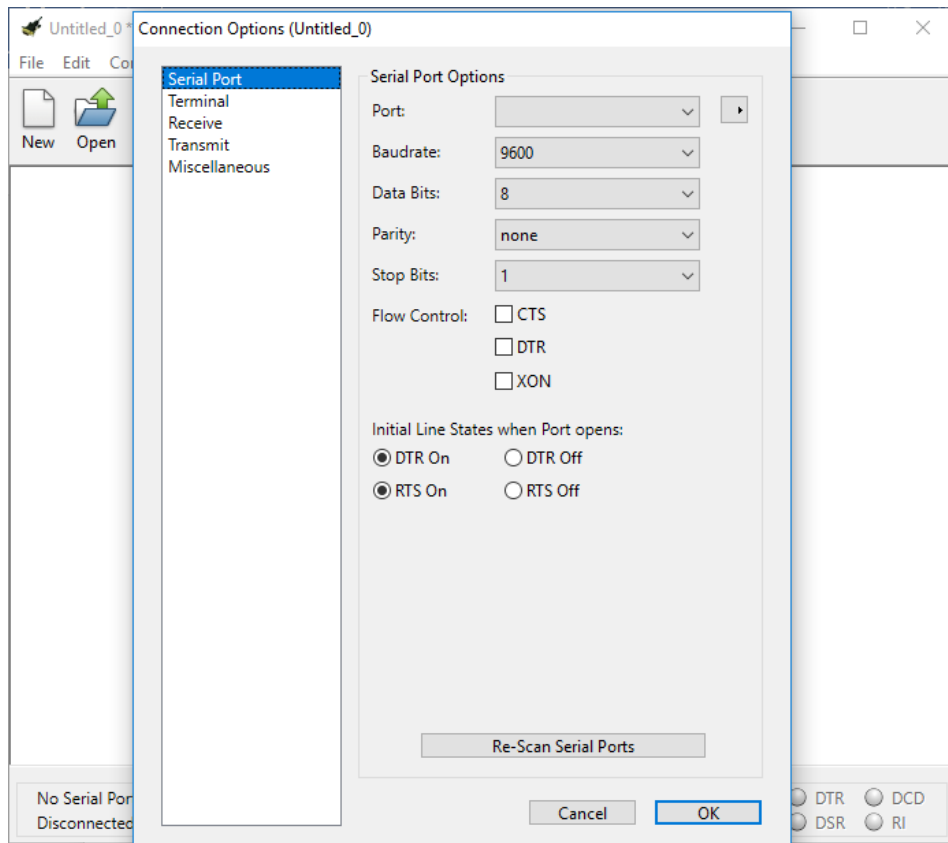


Figura 4-5: Menú opciones de CoolTermWin

Entre las opciones que presenta el software se puede observar en la Figura 4-6 cómo se pueden configurar el puerto de recepción de datos, los baudios (tasa de símbolos/segundo), el número de bits de datos, si la trama tendrá bit de paridad o no, o el número de bits de parada entre otras configuraciones.

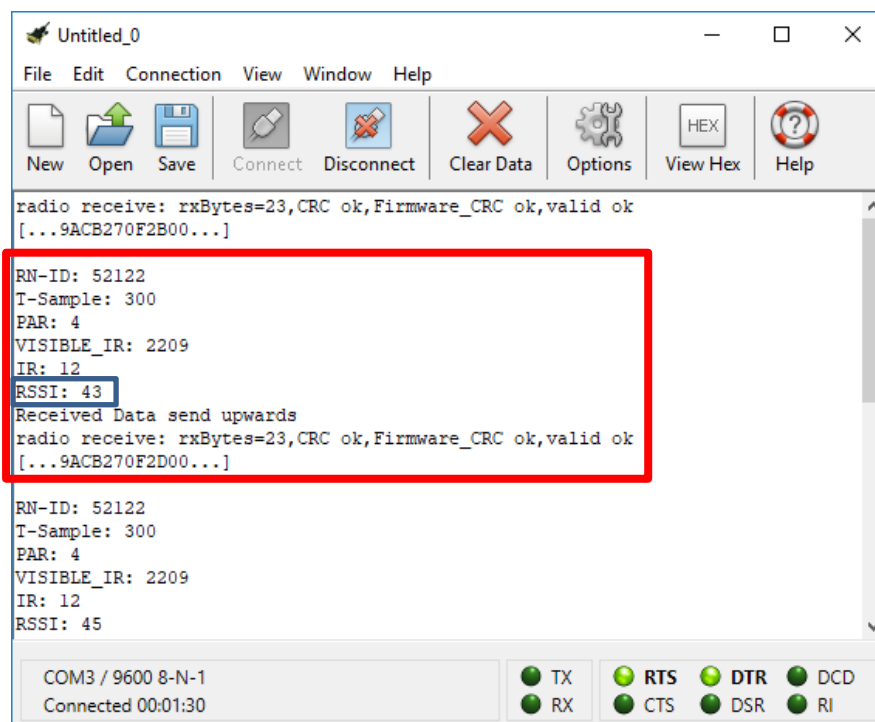


Figura 4-6: Ejemplo de trama bien recibida en CoolTermWin

En la figura superior, en el interior del cuadro rojo, se puede observar los datos de una trama enviada por uno de los sensores. Entre ellos, el que interesa en este estudio es el valor de RSSI, dentro del rectángulo azul. Cabe destacar también, entre los datos recibidos, el número de bytes que se recibe por trama (23B), el código de redundancia cíclico (CRC). Además, en la parte inferior izquierda de la imagen, se puede ver el puerto serie por donde se reciben los datos (COM3), la velocidad a la que se transmiten y reciben los datos (9600 baudios), los bits de datos, la paridad y los bits de parada (8-N-1, respectivamente) como se ha configurado anteriormente y se muestra en la Figura 4-6.

## 4.5 MapInfo

MapInfo Professional es un producto de software de sistema de información geográfica producido por la empresa Pitney Bowes Software y que se utiliza para el mapeo y el análisis de ubicación. MapInfo Professional permite a los usuarios visualizar, analizar, editar, interpretar, comprender y generar datos para revelar relaciones, patrones y tendencias. MapInfo Professional permite a los usuarios explorar datos espaciales dentro de un conjunto de datos, simbolizar características y crear mapas.

Fue lanzado por primera vez en 1986 como sistema de análisis y visualización de mapas y fue el primer producto SIG de escritorio en el mercado.

## 4.6 Antenas

Para el desarrollo de la parte práctica de este trabajo, se han empleado dos antenas emisoras y una única antena receptora.

### 4.6.1 Antenas Receptoras

#### 4.6.1.1 Antena Tipo Dipolo

Se trata de una antena lineal, que trabaja en la banda de 868 MHz.



Figura 4-7: Antena Tipo Dipolo

Tabla 4-11: Características Dipolo

Tipo	Dipolo
Ganancia	5 dBi±0.7 dBi
ROE	≤ 1.8
Impedancia	50 Ω
Longitud	19.5 cm

Con los datos proporcionados se pueden sacar algunos parámetros más tales como el tipo de antena del que se trata, de la siguiente manera:



$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{868 \times 10^6} = 0.3456m \rightarrow \frac{\lambda}{2} = 0.1728m \quad (4-8)$$

$$ROE = \frac{1+\rho}{1-\rho} \rightarrow \rho = \frac{ROE-1}{ROE+1} = \frac{1.8-1}{1.8+1} = \frac{2}{7} \quad (4-9)$$

#### 4.6.1.2 Antena Tipo Sucker

Se trata de una antena de 25.5 cm de longitud aproximadamente, que trabaja en la frecuencia libre americana (banda de 915 MHz).



Figura 4-8: Antena Tipo Sucker

Tabla 4-12: Características Sucker

Tipo	-
Ganancia	5 dBi±0.5 dBi
ROE	≤ 2
Impedancia	50 Ω
Longitud	25.5 cm

$$ROE = \frac{1+\rho}{1-\rho} \rightarrow \rho = \frac{ROE-1}{ROE+1} = \frac{2-1}{2+1} = \frac{1}{3} \quad (4-10)$$

#### 4.6.2 Antena Emisora

Como se aprecia en la Figura 4 – 9, se trata de una antena helicoidal, de 10 vueltas, que trabaja en la banda libre de 868 MHz.



Figura 4-9: Antena Helicoidal

Tabla 4-13: Características Helicoidal

Tipo	Helicoidal
Ganancia	2.15 dBi±0.5 dBi
ROE	≤ 1.9
Impedancia	50 Ω
Longitud	1.25 cm

$$ROE = \frac{1+\rho}{1-\rho} \rightarrow \rho = \frac{ROE-1}{ROE+1} = \frac{1.9-1}{1.9+1} = 0.3103 \quad (4-11)$$



Figura 4-10: Nodo receptor

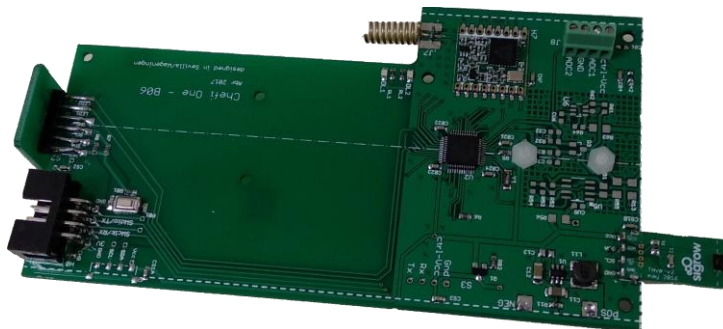


Figura 4-11: Nodo sensor

# 5 DESARROLLO DEL TRABAJO Y RESULTADOS

## 5.1 Campaña de medida

Para la realización de medidas se buscó una localización cercana a la Escuela Técnica Superior de Ingeniería que tuviera, al menos, 4 direcciones disponibles en las que alejarse del punto inicial con la extensión suficiente para poder hacer la cantidad de medidas necesarias para tener una buena aproximación de la cobertura proporcionada por cada nodo.

El punto elegido para colocar el receptor fue el cruce de la Avenida de los Descubrimientos con la calle Marie Curie y Matemáticos Rey Pastor y Castro.

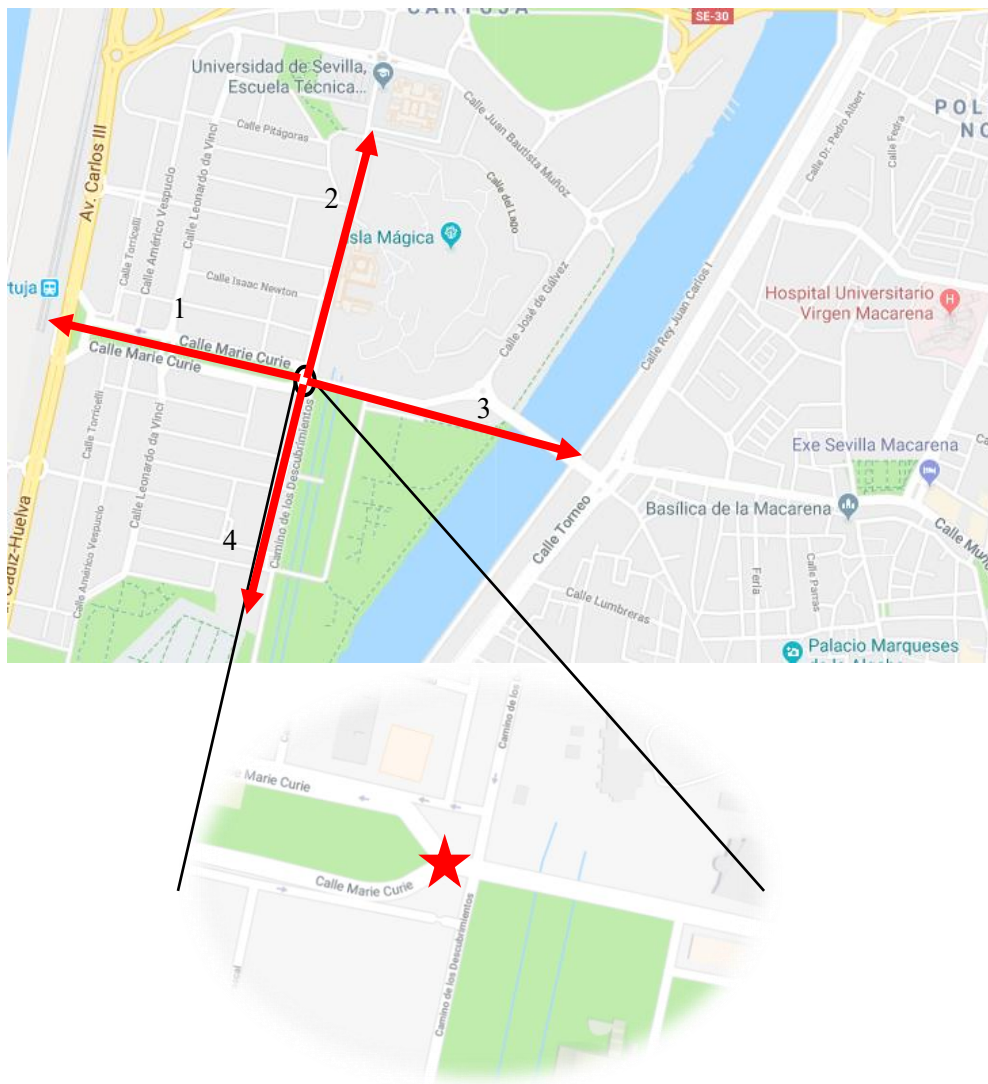


Figura 5-1: Localización punto inicial de las medidas

A gran escala, se muestra a continuación una muestra de cómo se eligieron los puntos para las medidas de RSSI.



Figura 5-2: Puntos designados para la medida de RSSI

Partiendo desde la “Posición inicial”, marcada en rojo, se fueron tomando medidas cada 100 metros aproximadamente, en las direcciones marcadas en rojo en la Figura 5-1, con 3 motas distintas para tener unas medidas más precisas de las mismas.

En una primera campaña de medida, se llegó hasta 500 metros, pero viendo los resultados, se amplió a un radio de 1000 metros, una vez tomadas las medidas hasta el primer kilómetro, se acordó aumentar el radio de acción hasta que las medidas de RSSI no variasen o las tramas no llegaran correctamente a la mota receptora, lo que marcaría el límite de la red de sensores.

## 5.2 Resultados de las medidas

La fórmula para hallar la potencia recibida a partir del indicador RSSI se define de la siguiente forma, según se indica en el datasheet de SiGrow:

$$P_r (dBm) = RSSI - 125 + 64 \quad (5-1)$$

Para valores de RSSI negativos, la mota está configurada en complemento a 2; esto es, para tener el valor real

del indicador, ha habido que restar 256 al valor leído por la mota receptora.

Los resultados de las medidas recogidas en CoolTermWin se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 5-1: Potencia media medidas en cada dirección desde el punto inicial para la antena dipolo

ANTENA DIPOLO				
DISTANCIA(m)	Dirección 1 (dBm)	Dirección 2 (dBm)	Dirección 3 (dBm)	Dirección 4 (dBm)
100	-8,67	-64,00	-47,00	-48,33
200	-56,67	-53,00	-51,33	-43,33
300	-61,00	-71,67	-58,00	-58,33
400	-62,33	-72,67	-65,67	-67,00
500	-68,33	-78,33	-69,00	-65,67
600	-82,00	-43,00	-86,67	-66,67
700	--	-72,33	-77,00	-73,67
800	--	-81,00	-79,00	-79,33
900	--	-87,67	-79,67	-82,33
1000	--	-87,00	-86,00	-87,33
1100	--	-85,33	-87,00	-89,00
1200	--	-87,67	-86,67	-84,67
1300	--	-87,00	-87,00	-86,67
1400	--	-87,33	-87,67	-88,67
1500	--	-88,00	-87,33	-88,00

Tabla 5-2: Potencia media medidas en cada dirección desde el punto inicial para la antena sucker o imán

ANTENA SUCKER				
DISTANCIA (m)	Dirección 1 (dBm)	Dirección 2 (dBm)	Dirección 3 (dBm)	Dirección 4 (dBm)
100	-59,33	-67,67	-59,67	-26,67
200	-64,00	-68,00	-63,67	-64,33
300	-69,33	-72,00	-79,33	-69,67
400	-72,00	-86,67	-76,67	-83,33
500	-80,33	-85,00	-76,33	-86,33
600	-78,33	-86,33	-83,67	-82,00
700	--	-88,00	-86,00	-87,67
800	--	-89,33	-85,67	-88,33
900	--	--	-88,00	-70,00
1000	--	--	-88,67	-70,00

### 5.3 Estudio de los resultados y realización del modelo

Una vez se han ordenado y resumido los datos, se procede a usar el software matemático para el estudio y la implementación de un modelo de radiopropagación.

La herramienta elegida es MATLAB: una herramienta diseñada en la década de los 70 por la empresa MathWorks dotando de un entorno interactivo al cálculo matemático. Gracias a ella se puede implementar un algoritmo que manipule matrices realizando cálculos que a mano resultarían complejos y obteniendo la representación gráfica de los resultados obtenidos.

Tomando el metro como unidad de medida, se define un vector de distancias, con  $d_0 = 100$  (distancia de

referencia), tal que:

$$\text{dist}=100:100:1500;$$

### 5.3.1 Antena Dipolo

Para empezar, se definen los cuatro vectores con los datos de potencias obtenidos en cada dirección:

$$A1 = [-8.666666667 \ -56.66666667 \ -61 \ -62.33333333 \ -68.33333333 \ -82];$$

$$A2 = [-64 \ -53 \ -71.66666667 \ -72.66666667 \ -78.33333333 \ -43 \ -72.33333333 \ -81 \\ -87.66666667 \ -87 \ -85.33333333 \ -87.66666667 \ -87 \ -87.33333333 \ -88];$$

$$A3 = [-47 \ -51.33333333 \ -58 \ -65.66666667 \ -69 \ -86.66666667 \ -77 \ -79 \ -79.66666667 \\ -86 \ -87 \ -86.66666667 \ -87 \ -87.66666667 \ -87.33333333];$$

$$A4 = [-48.33333333 \ -43.33333333 \ -58.33333333 \ -67 \ -65.66666667 \ -66.66666667 \ -73.66666667 \\ -79.33333333 \ -82.33333333 \ -87.33333333 \ -89 \ -84.66666667 \ -86.66666667 \ -88.66666667 \ -88];$$

Una vez que se han creado los 4 vectores con sus correspondientes valores, se procede a encontrar la media aritmética en cada punto que representa una medida a la misma distancia entre transmisor y receptor para así poder encontrar un modelo de propagación lo más general posible. De tal forma que el vector “media” queda definido de la siguiente manera:

$$\text{media} = [-42.0000 \ -51.0833 \ -62.2500 \ -66.9167 \ -70.3333 \ -69.5833 \ -74.3333 \ -79.7778 \\ -83.2222 \ -86.7778 \ -87.1111 \ -86.3333 \ -86.8889 \ -87.8889 \ -87.7778]$$

A partir de la media se puede crear un gráfico para visualizar de una mejor forma cómo varía la potencia recibida con la distancia, así pues:

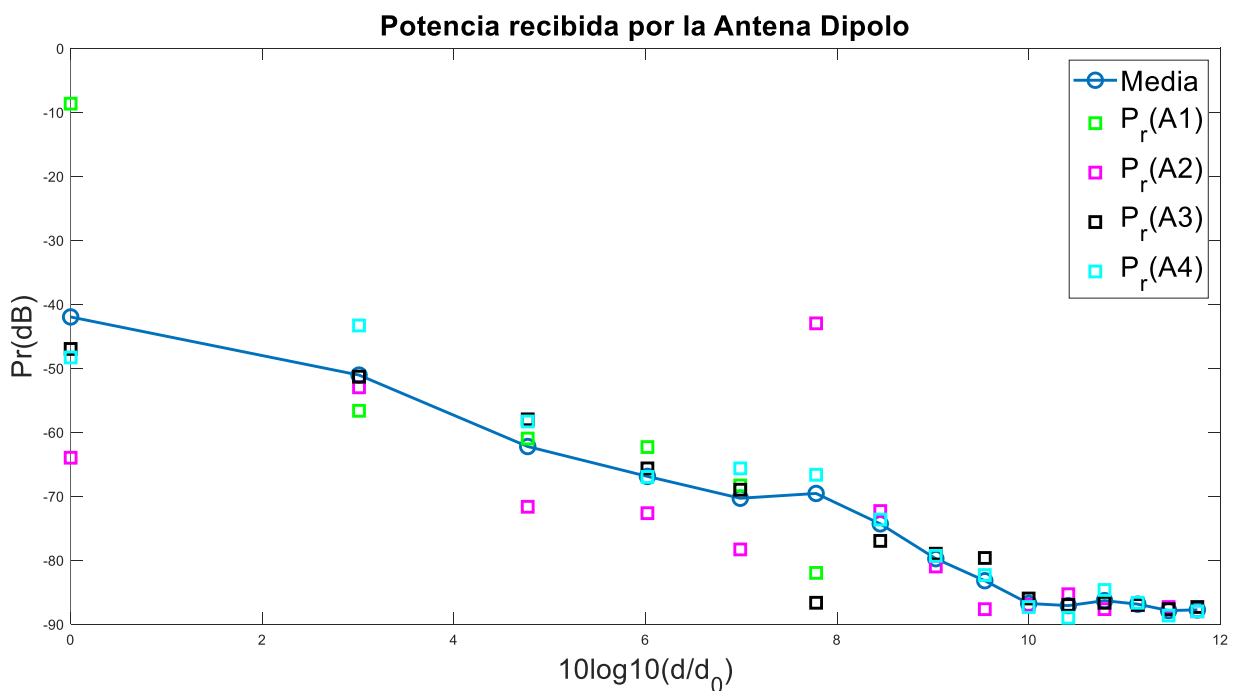


Figura 5-3: Potencia recibida por la Antena Dipolo

Como cabía esperar, la potencia recibida por la antena en la posición inicial decrementa con la distancia, hasta un punto en la que prácticamente se hace constante porque se llega a la sensibilidad de la mota receptora. En la práctica este límite se encuentra aproximadamente en -90 dBm.

Una vez que se tiene en la gráfica la media de la potencia recibida en cada punto, para hacer el modelo lo más general posible, se procede a buscar una recta de mejor ajuste por la regla de los mínimos cuadrados, así, al encontrarla, se podrá modelar la potencia recibida con una ecuación.

```
coef_medidas=polyfit(dist_dB,media,1);
yy=polyval(coef_medidas,dist_dB);
```

Con estos dos comandos en MATLAB se obtienen los coeficientes de la ecuación de primer grado que generan la recta de mejor ajuste para modelar la potencia recibida por la antena.

$$P_r(dBm) = -40.8829 - 4.2012 \cdot 10 \log\left(\frac{d}{100}\right) \quad (5-2)$$

De esta forma, si se compara con la media aritmética obtenida anteriormente y se muestra en una gráfica, se puede observar que se trata de una aproximación muy buena para el modelado de la potencia recibida.

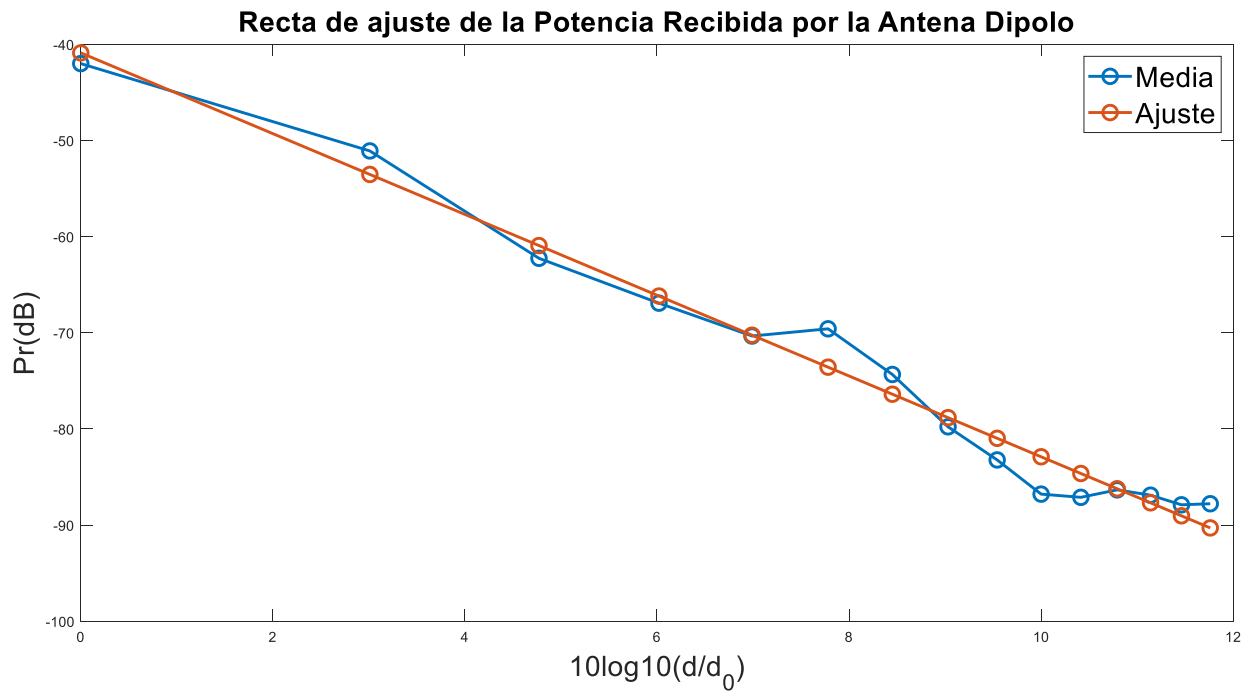


Figura 5-4: Recta de ajuste y media de la potencia recibida por la antena dipolo

El estudio del modelado de la pérdida básica de propagación  $L_b(d)$  parte de la media que se calculó anteriormente. Para tener un vector de pérdidas se parte de la fórmula general de la potencia recibida:

$$P_r(dBm) = PIRE(dBm) - L_b(dB) + G_r(dBi) \quad (5-3)$$

y se despeja de la ecuación las pérdidas por propagación, donde  $media = P_r(dBm)$ ,  $G_r(dBi)$  es la ganancia de la antena receptora y para modelar las pérdidas básicas se ha hecho uso de uno de los métodos descritos en el capítulo 3, apartado 4 de este trabajo. En concreto se ha usado el modelo de pérdidas *log-distance*, ya que éste surgió a partir de medidas realizadas sobre el campo, al igual que el proyecto que se describe en esta memoria.

La fórmula general que modela las pérdidas viene dada por:

$$L_b(dB) = PL(avg) = PL(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (5-4)$$

Para saber cómo varía la pérdida básica de propagación con la distancia, se realiza una gráfica en MATLAB, con los siguientes valores de la pérdida básica de propagación:

$$L_{med}(dB) = 20 - media + G_r(dBi) \quad (5-5)$$

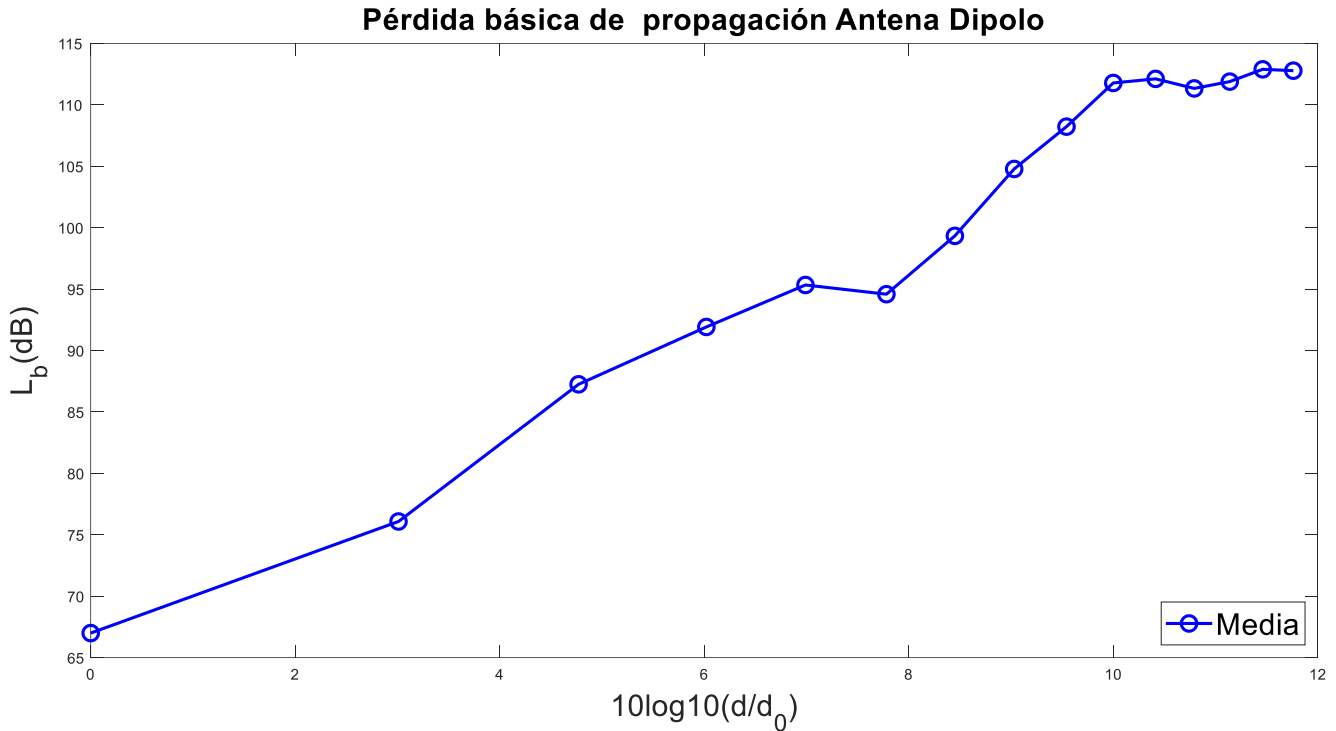


Figura 5-5: Pérdida básica de propagación para la antena dipolo

$$L_{med} = [67.0000 \ 76.0833 \ 87.2500 \ 91.9167 \ 95.3333 \ 94.5833 \ 99.3333 \\ 104.7778 \ 108.2222 \ 111.7778 \ 112.1111 \ 111.3333 \ 111.8889 \ 112.8889 \\ 112.7778]$$

De la misma manera que para la potencia, se pretende encontrar una ecuación de primer orden que modele la pérdida básica de propagación, por lo tanto, haciendo uso de las funciones anteriores en MATLAB,

```
coef=polyfit(dist_dB,lmed,1);
y=polyval(coef,dist_dB);
```



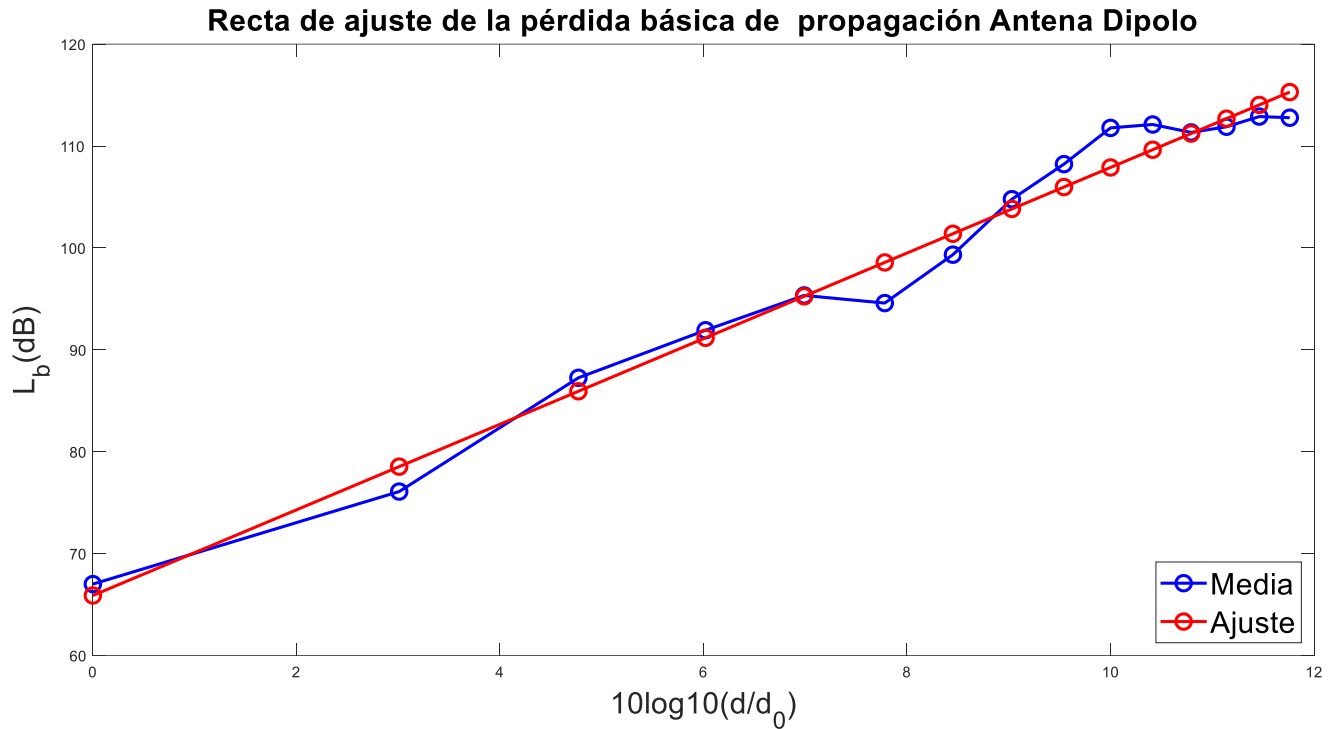


Figura 5-6: Recta de ajuste y media de la pérdida básica de propagación para la antena dipolo

Finalmente, la ecuación de la recta que modela las pérdidas viene dada por los coeficientes que da la función “polyfit”, en este caso:

$$L_b (dB) = 65.8829 + 10 \cdot 4.2012 \log\left(\frac{d}{100}\right) \quad (5-6)$$

Donde  $PL(d_0)$  es 65.8829 a una distancia de 100 metros y  $n = 4.2012$ .

Un valor  $n$  aproximadamente igual a 4 indica que la pérdida crece más rápido que en espacio libre ( $n = 2$ ) al estar en un entorno real. En este caso, la localización elegida era un entorno bastante abierto y sin muchos edificios por lo que más pesa al calcular las pérdidas es la reflexión sobre Tierra plana.

### 5.3.2 Antena Sucker o Imán

Siguiendo el mismo procedimiento que para la antena tipo dipolo, se definen los vectores con la potencia obtenida en cada dirección:

$$A1 = [-59.33333333 \ -64 \ -69.33333333 \ -72 \ -80.33333333 \ -78.33333333]$$

$$A2 = [-67.66666667 \ -68 \ -72 \ -86.66666667 \ -85 \ -86.33333333 \ -88 \ -89.33333333]$$

$$A3 = [-59.66666667 \ -63.66666667 \ -79.33333333 \ -76.66666667 \\ -76.33333333 \ -83.66666667 \ -86 \ -85.66666667 \ -88 \ -88.66666667]$$

$$A4 = [-26.66666667 \ -64.33333333 \ -69.66666667 \ -83.33333333 \\ -86.33333333 \ -82 \ -87.66666667 \ -88.33333333 \ -70 \ -70];$$

El hecho de que en algunas direcciones haya más medidas que en otras reside en que se llega a un punto en el que las tramas recibidas no son buenas y, por lo tanto, no se puede extraer la información que se necesita. Después de un determinado número de intentos, se dio por imposible recibir la trama correcta y se fijó en ese punto el límite de las medidas.

Siguiendo la línea desarrollada en el apartado anterior para la antena tipo dipolo, se calculó el vector de potencia

media recibida y se representó en una gráfica:

$media = [-53.3333 \ -65.0000 \ -72.5833 \ -79.6667 \ -82.0000$   
 $-82.5833 \ -87.2222 \ -87.7778 \ -79.0000 \ -79.3333]$

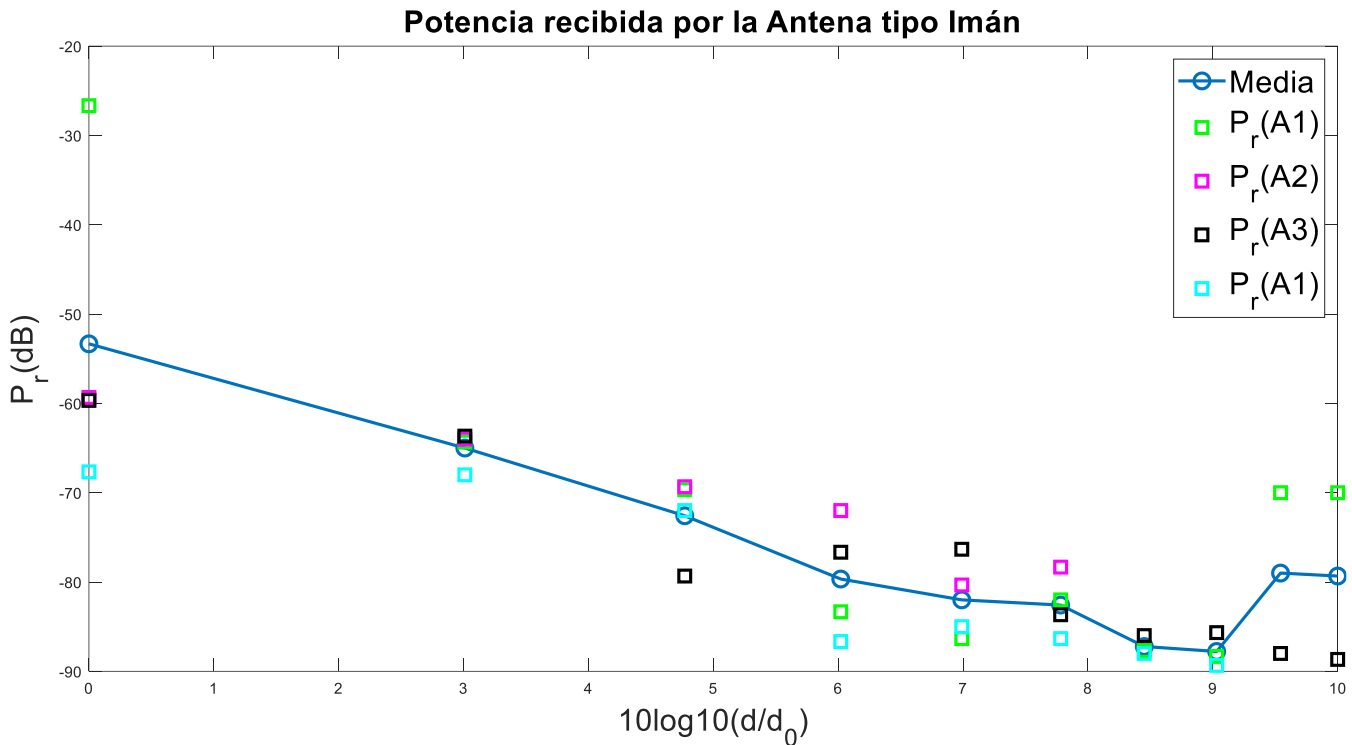


Figura 5-7: Potencia recibida por la antena sucker

Como se puede observar en la figura superior los dos últimos valores de potencia recibida obtenidos presentan valores anómalos. Al encontrarse el sensor en el límite del área donde los datos se reciben correctamente, estas medidas pueden no corresponderse con los valores reales que se deberían obtener, por lo tanto, podrían falsear de manera ostensible los cálculos derivados de estas medidas, por lo tanto, se decide prescindir de ellos a la hora seguir adelante en el proyecto.

Una vez se ha calculado la media, igual que anteriormente, se busca una ecuación que modele el comportamiento de la potencia recibida con la distancia, haciendo uso de las funciones que ofrece MATLAB:

```
coef_medidas=polyfit(dist_dB,media,1);
yy=polyval(coef_medidas,dist_dB);
```

la ecuación quedaría de la siguiente manera:

$$P_r (dBm) = -53.8368 - 3.8969 \cdot 10 \log\left(\frac{d}{100}\right) \quad (5-7)$$

Y la comparación con la media aritmética de la potencia recibida por la antena tipo imán en una gráfica queda como sigue:

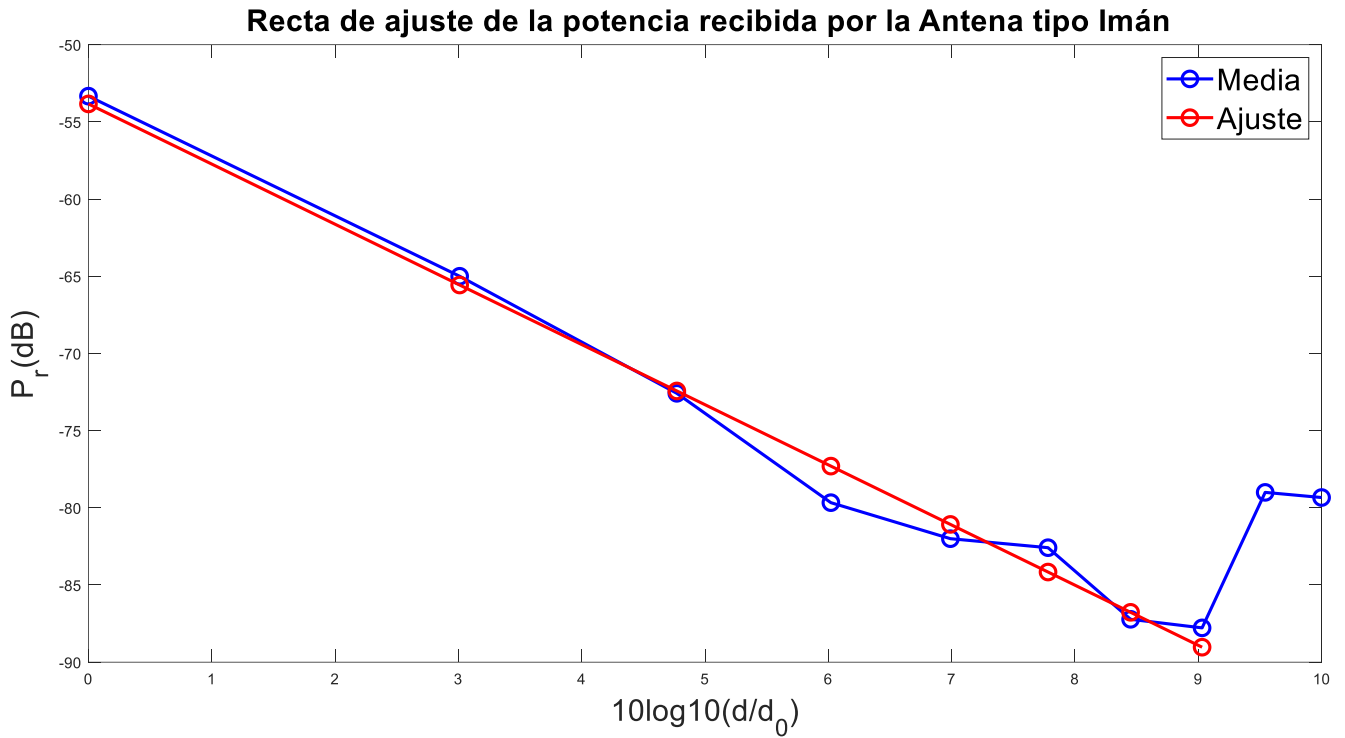


Figura 5-8: Recta de ajuste y media de la potencia recibida por la antena sucker o imán

El procedimiento sigue con el cálculo de la pérdida básica de propagación, para ello, se ha restado la PIRE a la media de la potencia recibida, de tal forma que la pérdida resultante es:

$$L_{med} = [78.3333 \ 90.0000 \ 97.5833 \ 104.6667 \ 107.0000 \\ 107.5833 \ 112.2222 \ 112.7778 \ 104.0000 \ 104.3333]$$

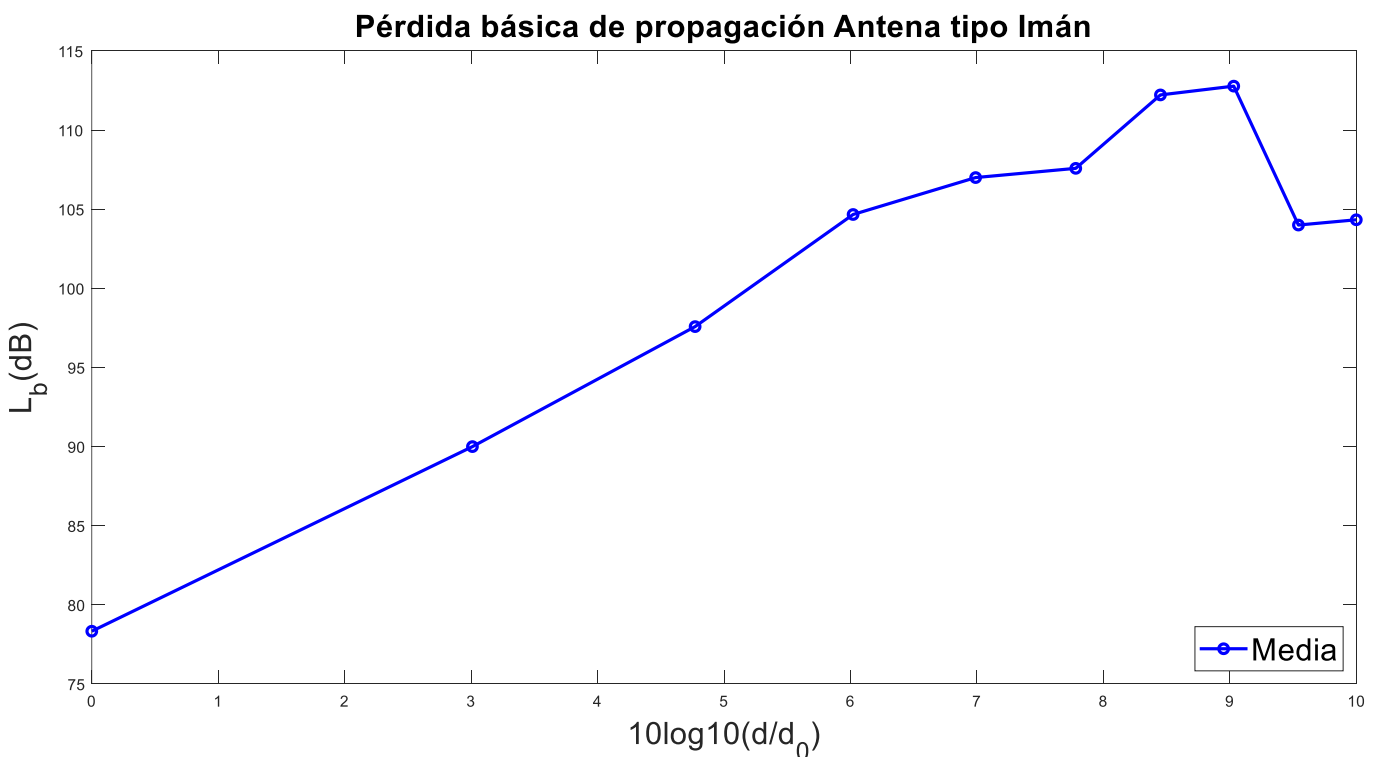


Figura 5-9: Pérdida básica de propagación media de la antena sucker

A partir de la media calculada anteriormente, se quiere buscar una ecuación que modele las pérdidas para la antena tipo imán, de igual forma que para la antena dipolo, se hace uso de las funciones que ofrece MATLAB para hallar los coeficientes de la ecuación de primer grado.

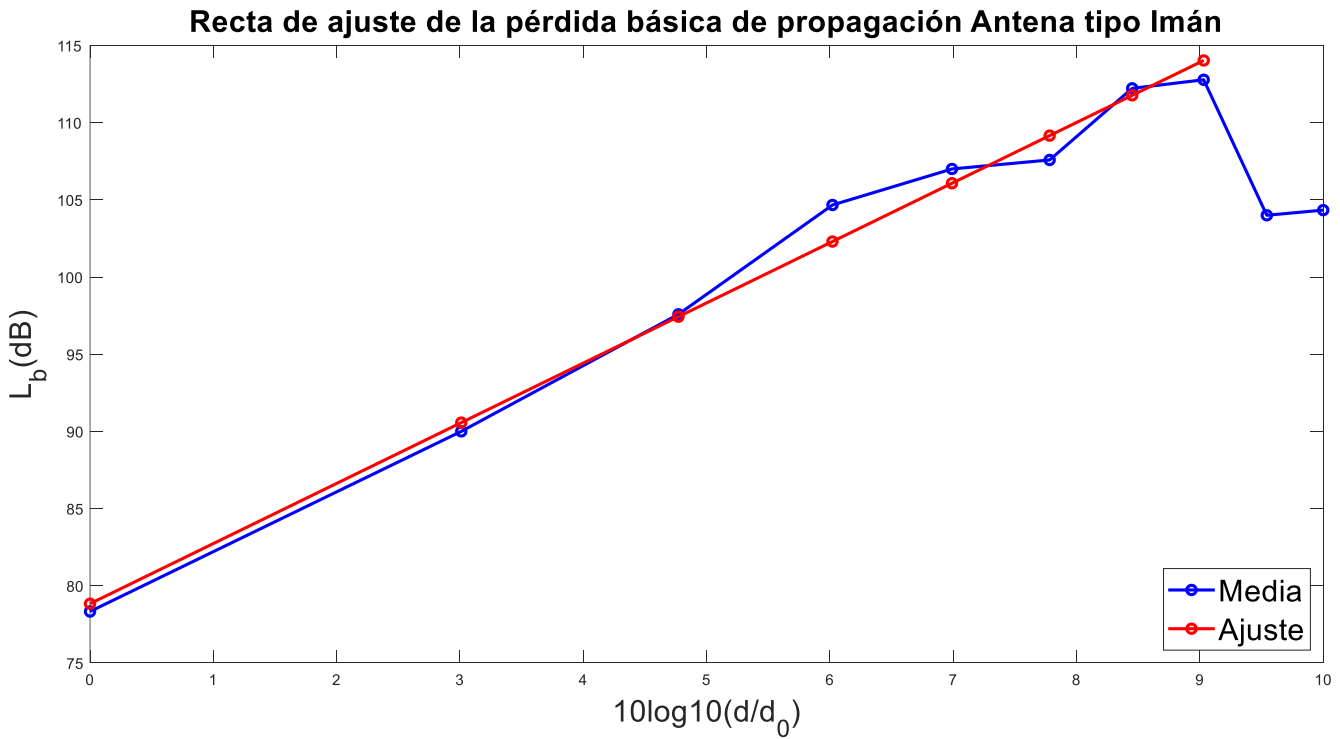


Figura 5-10: Recta de ajuste y media de la pérdida básica de propagación de la antena sucker

De tal forma que la ecuación queda de la siguiente forma:

$$L_b (dB) = 78.8368 + 3.8969 \cdot 10 \log \left( \frac{d}{100} \right) \quad (5-8)$$

Donde  $PL(d_0)$  es 78.8368 dB a una distancia de 100 metros y la  $n$  obtenida es igual a 3.8969. Este valor se encuentra bastante cercano a por lo que se puede concluir que el modelo dominante en la pérdida de propagación es el modelo de Tierra plana.

## 5.4 Mapa de cobertura

Como último paso del estudio de los sensores se presenta un mapa de cobertura, realizado con el software MapInfo, de la variación de la potencia recibida por el nodo receptor en cada dirección de medida, esto es, los valores presentados en los vectores A1, A2, A3 y A4. Así, se podrá ver de forma visual el alcance práctico de una red de sensores y se podrá tener una mejor idea de la distancia que podría haber en una red de sensores entre dos nodos próximos.

Como se puede observar en las dos figuras siguientes, la cobertura que proporciona la antena dipolo es mayor que la dada por la antena imán. Esto se debe a que la antena dipolo y la antena receptora trabajan a la misma frecuencia mientras que la antena tipo imán trabaja a 915 MHz. Además, ésta última es la banda asignada a GSM en Europa, por lo tanto, siempre puede haber colisiones en los datos enviados y por ello, la cobertura es menor.

### 5.4.1 Antena Dipolo

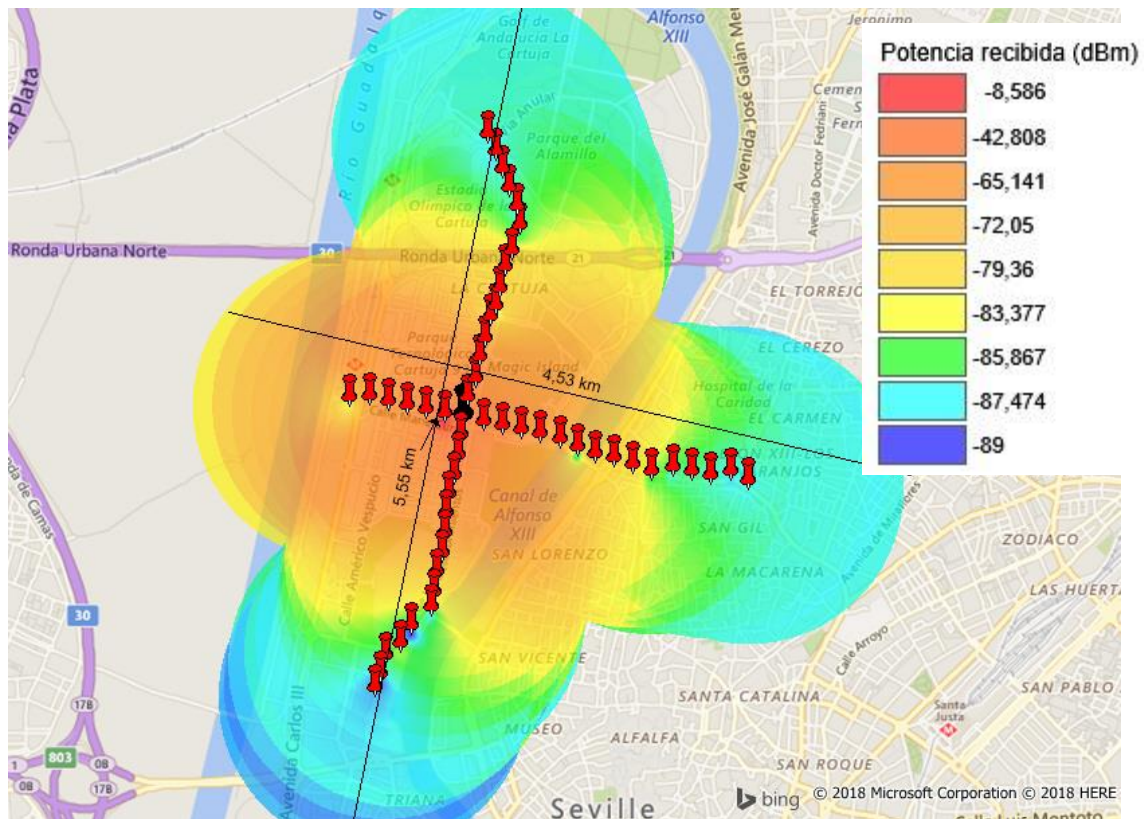


Figura 5-11: Mapa de potencia recibida por la antena dipolo

### 5.4.2 Antena imán

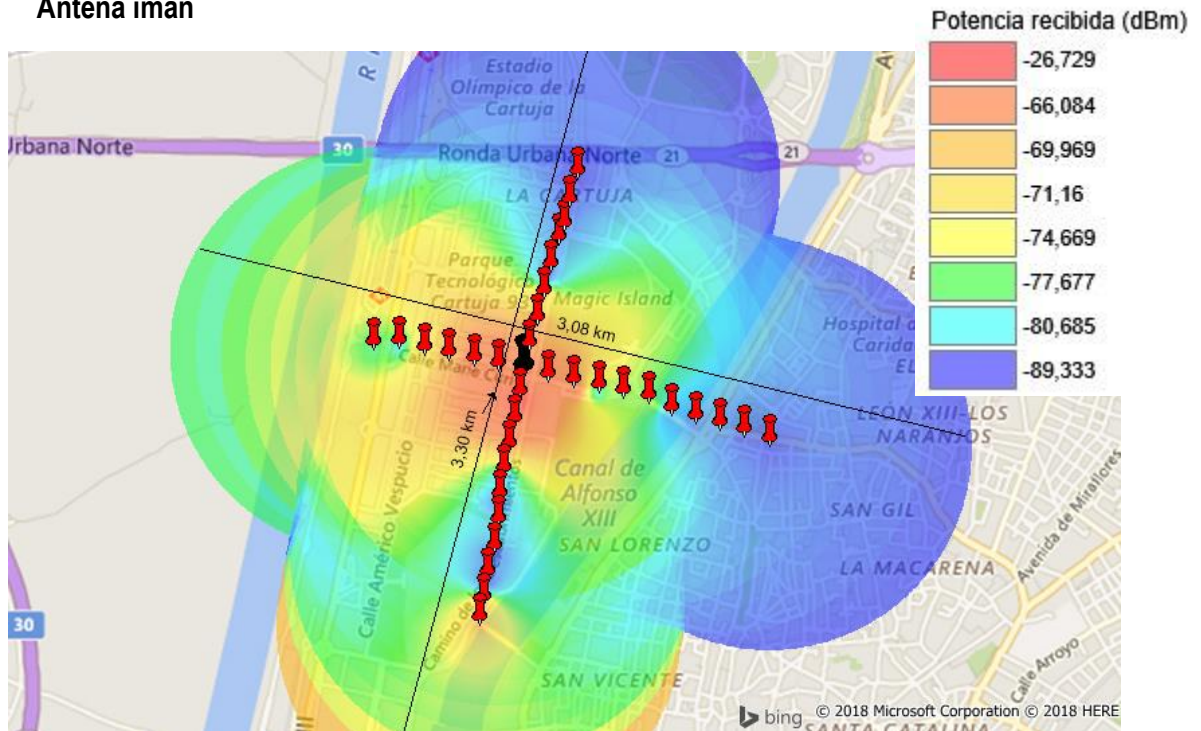


Figura 5-12: Mapa de potencia recibida por la antena sucker



# 6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO

---

Con este proyecto se ha conseguido un contacto más cercano al tema de las Redes de Sensores Inalámbricos (WSN) partiendo de un estudio genérico sobre su funcionamiento hasta profundizar en los elementos que la componen, la lógica de cómo funcionan estos dispositivos entre ellos, así como las distintas características que son necesarias para que la red WSN sea eficaz y se consolide.

Se ha ahondado además en una tecnología emergente como LoRa y LoRaWAN y las características de éstas para que se convierta en una tecnología dominante en los próximos años. Finalmente, se ha hecho uso de las fórmulas vistas en clase para proponer un modelo matemático de pérdidas de propagación para un enlace entre nodos.

1. La vida útil de un sensor depende del consumo de este, por lo tanto, debe implementar una tecnología muy eficiente para alargar la vida del nodo.
2. A mayor tasa de envío de datos, menor vida útil, por eso un nodo no está diseñado para enviar mucha información en un periodo corto de tiempo, si no, poca información a lo largo de un período extenso de tiempo.
3. La vida útil de los sensores, y la cantidad de los mismos, está directamente relacionado con el coste de despliegue de la misma, por eso, los sensores deben tener un precio asequible para poder desplegar una red de cientos o miles de dispositivos a un precio adecuado.
4. Los resultados de las simulaciones se pueden considerar buenas aproximaciones de cómo se comportarían los nodos dentro de una red de sensores desplegada y en funcionamiento.
5. La topología que se ha usado sería una topología en estrella, donde el nodo central recibe toda la información que le envían los demás sensores de la red.
6. El alcance de una red en estrella es menor que el de una red mallada o en árbol, por ejemplo, ya que la información enviada por los nodos, salta de mota en mota hasta llegar al nodo sumidero. Sin embargo, el reenvío de los datos hace que el consumo de los nodos sea mayor en este tipo de redes.
7. Si en una red en estrella, se quiere aumentar el área de despliegue, la única forma de hacerlo sería aumentar la potencia de transmisión, por lo que se entraría en contradicción con el punto de la vida útil de un sensor

## 6.1 Líneas futuras de avance

Una vez que se ha encontrado un modelo de pérdidas para una red en estrella, se podrían configurar los nodos usados para que establecer una red mallada o en árbol donde la información saltara de nodo en nodos hasta llegar al nodo sumidero. Con una red mallada o en árbol, el área de despliegue de una red de sensores sería más amplia que la de una red con topología en estrella. Además, se podría estudiar la robustez de la misma desde un punto de vista práctica.

Se podría implementar además algoritmos de Machine Learning para que la mota aprendiera y actuase de forma autónoma ante cambios en la topología de la red.

Por último, se podría intentar implementar algoritmos de IoT o Big Data para que la WSN sea capaz de analizar datos en tiempo real.





# 7 REFERENCIAS

---

- [1] J.M. Hernando Rábanos, J.M. Riera Salís, L. Tomás Mendo, «Transmisión por radio», Centro de Estudios Ramón Areces, 7ª edición, 2013
- [2] F. Hu, X. Cao, «Wireless sensor networks : principles and practice», Auerbach Publications, 1ª edición, 2009
- [3] K. Holger, A Willig, «Protocols and architectures for wireless sensor networks», Hoboken, NJ : Wiley, 1ª edición, 2007
- [4] M.J. Madero, «Apuntes Sistemas emergente de comunicaciones», U. Sevilla, curso 2015-2016
- [5] K. Sinan, T. Bulent, «Path-Loss Modeling for Wireless Sensor Networks», IEEE Antennas & Propagation Magazine, 2/2017
- [6] A.J. Wixted, P. Kinnaird, H. Larijani, A. Tait, A. Ahmadiania, N. Strachan, «Evaluation of LoRa and LoRaWAN for Wireless Sensor Networks», IEEE, 2016
- [7] J. Xu, W. Liu, F. Lang, Y. Zhang, C. Wang, «Distance Measurement Model Based on RSSI », Scientific Research, 2010
- [8] «Datasheet sx1272/73»
- [9] «Ministerio de Ciencia, Innovacion y Universidades», [En línea ]. <http://www.ciencia.gob.es/>
- [10] «Semtech», [En línea]. <https://www.semtech.com/lora>
- [11] «LoRa Alliance», [En línea]. <https://lora-alliance.org/>
- [12] «Sigfox», [En línea]. <https://www.sigfox.com/en>
- [13] «SiGrow», [En línea]. <https://www.sigrow.com/>
- [14] «IEEE Xplore», [En línea]. <https://ieeexplore--ieee--org.us.debiblio.com/document/8054226>
- [15] «IEEE Xplore», [En línea]. <https://ieeexplore--ieee--org.us.debiblio.com/document/6664559>
- [16] «IEEE Xplore», [En línea]. <https://ieeexplore--ieee--org.us.debiblio.com/document/5962801>
- [17] «IEEE Xplore», [En línea]. <https://ieeexplore--ieee--org.us.debiblio.com/document/6142454>
- [18] «IEEE Xplore», [En línea]. <https://ieeexplore--ieee--org.us.debiblio.com/document/5197251>



# ANEXO A: CÓDIGO MATLAB

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%      fichero: medidas_dipolo.m
%      autor: Pablo López de Tejada Irizo
%      descripción: código generado para el tratamiento
%                  de medidas y presentación de
%                  resultados con la antena dipolo
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear,clc

% Medidas medias tomadas por la antena receptora en las 4 direcciones
% anteriormente descritas

A1 =[-8.666666667 -56.66666667 -61 -62.33333333 -68.33333333 -82];
A2 =[-64 -53 -71.66666667 -72.66666667 -78.33333333 -43 -72.33333333 ...
    -81 -87.66666667 -87 -85.33333333 -87.66666667 -87 -87.33333333 -88];
A3 =[-47 -51.33333333 -58 -65.66666667 -69 -86.66666667 -77 -79 ...
    -79.66666667 -86 -87 -86.66666667 -87 -87.66666667 -87.33333333];
A4 =[-48.33333333 -43.33333333 -58.33333333 -67 -65.66666667 ...
    -66.66666667 -73.66666667 -79.33333333 -82.33333333 -87.33333333 ...
    -89 -84.66666667 -86.66666667 -88.66666667 -88];

dist=100:100:1500; %Vector de distancias
Gr=5;
media=zeros(1,15);

%Vector medio de todas las medidas realizadas en cada punto
for i=1:1:6
    media(i)=(A4(i)+A1(i)+A2(i)+A3(i))/4;
end
for i=7:1:15
    media(i)=(A4(i)+A2(i)+A3(i))/3;
end

dist_dB=10*log10(dist./100); % Vector de distancia en decibelios
lmed=20-media; % Calculo de perdidas por propagacion
coef=polyfit(dist_dB,lmed,1); % Coeficientes de la recta de mejor ajuste
% para pérdidas por propagacion
y=polyval(coef,dist_dB); % Recta evaluada en el vector distancia

figure(1) % Representacion grafica de las rectas las perdidas por
propagacion

plot(dist_dB,lmed,'-ob',dist_dB,y,'-or','linewidth',2,'markersize',10)
xlabel('10log10(d/d0)','FontSize',20)
ylabel('L_{b}(dB)','FontSize',20)
title('Recta de ajuste de la pérdida básica de propagación Antena Dipolo' ...
, 'FontSize',20)
legend({'Media','Ajuste'},'Location','Southeast','FontSize',20)
```

```

distancia

figure(2) % Representacion grafica de las rectas las perdidas por propagacion

plot(dist_dB,media,'-o',dist_dB,yy,'-o','linewidth',2,'markersize',10)
title('Recta de ajuste de la Potencia Recibida por la Antena
Dipolo','fontSize',20)
legend({'Media','Ajuste'},'FontSize',20)
xlabel('10log10(d/d_{0})','FontSize',20)
ylabel('Pr(dB)','fontSize',20)

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% fichero: medidas_sucker.m
% autor: Pablo López de Tejada Irizo
% descripción: código generado para el tratamiento
% de medidas y presentación de
% resultados con la antena tipo iman
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clear,clc

% Medidas medias tomadas por la antena receptora en las 4 direcciones
% anteriormente descritas
A1 = [-59.33333333 -64 -69.33333333 -72 -80.33333333 -78.33333333];
A2 = [-67.66666667 -68 -72 -86.66666667 -85 -86.33333333 -88 -89.33333333];
A3 = [-59.66666667 -63.66666667 -79.33333333 -76.66666667 -76.33333333 ...
-83.66666667 -86 -85.66666667 -88 -88.66666667];
A4 = [-26.66666667 -64.33333333 -69.66666667 -83.33333333 -86.33333333 ...
-82 -87.66666667 -88.33333333 -70 -70];

dist=100:100:1000; %Vector de distancias
media=zeros(1,10);
Gr=5;
%Vector medio de todas las medidas realizadas en cada punto
for i=1:1:6
    media(i)=(A4(i)+A1(i)+A2(i)+A3(i))/4;
end
for i=7:1:8
    media(i)=(A4(i)+A2(i)+A3(i))/3;
end
for i=9:1:10
    media(i)=(A4(i)+A3(i))/2;
end

dist_dB=10*log10(dist./100); % Vector de distancia en decibelios
lmed=20-media; % Calculo de perdidas por propagacion
coef=polyfit(dist_dB,lmed,1); % Coeficientes de la recta de mejor ajuste
% para pérdidas por propagación
y=polyval(coef,dist_dB(1:8)); % Recta evaluada en el vector distancia

figure(1) % Representacion grafica de las rectas las perdidas por
propagacion
plot(dist_dB,lmed,'-o',dist_dB(1:8),y,'-o','linewidth',2)
xlabel('10log10(d/d_{0})','fontSize',20)

```

```
ylabel('L_{b} (dB)', 'fontsize', 20)
title('Recta de ajuste de la Pérdida básica de propagación Antena tipo
Imán'...
      , 'fontsize', 20)
legend({'Media', 'Ajuste'}, 'fontsize', 20, 'location', 'southeast')

coef_medidas=polyfit(dist_dB,media,1); % Coeficientes de la recta de mejor
ajuste
                                     % para potencia recibida
yy=polyval(coef_medidas,dist_dB);    % Recta evaluada en el vector distancia

figure(2) % Representacion grafica de las rectas las perdidas por
propagacion
plot(dist_dB,media,'-o',dist_dB,yy,'-or','linewidth',2,'markersize',10)
title('Recta de ajuste de la Potencia recibida por la Antena tipo Imán', ...
      'fontsize', 20)
legend({'Media', 'Ajuste'}, 'fontsize', 20)
xlabel('10log10(d/d_{0})', 'fontsize', 20)
ylabel('P_{r} (dB)', 'fontsize', 20)
```