

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

Evaluación experimental de modelos de  
radiopropagación mediante una red de sensores  
inalámbricos

Autora: Irene Aguilar Almazo

Tutores: María José Madero Ayora

Juan Antonio Becerra González

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

Sevilla, 2019





Trabajo Fin de Grado  
Ingeniería de Telecomunicación

# **Evaluación experimental de modelos de radiopropagación mediante una red de sensores inalámbricos**

Autor:

Irene Aguilar Almazo

Tutor:

María José Madero Ayora

Profesora titular

Juan Antonio Becerra González

Profesor Sustituto Interino

Dpto. de Teoría de la Señal y Comunicaciones

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Grado: Evaluación experimental de modelos de radiopropagación mediante una red de sensores inalámbricos

Autora: Irene Aguilar Almazo  
Tutores: María José Madero Ayora  
Juan Antonio Becerra González

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal



*A mi familia*

*A mis amigos*

*A mis maestros*





# Agradecimientos

---

Quisiera aprovechar estas líneas para agradecer a todas las personas que con su esfuerzo y dedicación han contribuido a la realización de este trabajo.

En primer lugar, me gustaría agradecer a María José Madero Ayora y a Juan Antonio Becerra González por el material aportado para la realización de este trabajo y por la ayuda, consejos y orientación recibidos durante la ejecución de este.

Gracias a mis profesores de secundaria por hacerme ver que con esfuerzo y trabajo podía conseguir todo lo que me propusiera.

Gracias a todos los compañeros que me han ayudado en algún momento de esta bonita y dura etapa. Agradecer a Pablo, por la ayuda recibida para la toma de todas las medidas en este proyecto y por los ánimos recibidos en los momentos más complicados.

Gracias, especialmente a Ana L., Ana B., Belén R., Cristina E. y María G., gracias por aparecer, gracias por ser mis amigas, gracias por todos los momentos que hemos compartidos y por todo el apoyo recibido.

Agradecerle a Chema, Cristina, Juani, María Z., M<sup>a</sup> José V. y Miriam porque han estado siempre presentes, pese a los pocos kilómetros que nos separaban, dándome apoyo y animándome cuando mis fuerzas flaqueaban.

Dar las gracias a mis tíos, mis hermanos y a mi abuela, por todos los ánimos recibidos y por apoyarme siempre con las decisiones tomadas.

Finalmente, gracias a mis padres por trasladarme siempre el espíritu de lucha y superación, por enseñarme a no desistir y continuar luchando por mis sueños. Gracias por darme la oportunidad y respetar mis decisiones. Gracias por creer en mí cuando ni yo lo hacía y transmitírmelo.

*Irene Aguilar Almazo*

*Sevilla, 2019*



# Resumen

---

En este trabajo se ha realizado una evaluación de los diferentes modelos de radiopropagación empleados para las redes de sensores. Como guía se ha contrastado un artículo en el que se determina que el modelo de sombra logarítmico-normal con varianza dinámica es el óptimo para este tipo de redes.

Para la realización de este trabajo ha sido necesario realizar medidas con un grupo de sensores facilitados por el grupo comercial Sigrow Agtech SL. Las medidas han sido tomadas en un entorno urbano exterior en Sevilla.

Tras realizar un procesado con estos datos y haciendo uso de Matlab se ha conseguido obtener los parámetros necesarios para definir los modelos empíricos estudiados, así como la representación de las diferentes curvas de los modelos que nos servirán para determinar el modelo óptimo.



# Abstract

---

In this work, an evaluation of several radiopropagation models used for sensor networks has been carried out. A paper which concludes that the normal logarithmic shadow model with dynamic variance is the optimum for this type of networks has been used as a reference.

In order to perform this work, it was necessary to take measures with a group of sensors provided by the commercial group Sigrow Agtech SL. The measures have been taken in an outer urban environment in Seville.

After processing this data and using Matlab, it has been possible to obtain the necessary parameters to define the empirical models studied, as well as the representation of the different curves of the models that will serve us to determine the optimal model.



# 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>
1.1 <i>Objetivos</i>	1
1.2 <i>Estructura de la memoria</i>	1
<b>2 Redes inalámbricas de sensores</b>	<b>3</b>
2.1 <i>Dispositivos de la red de sensores</i>	4
2.1.1 Nodos sensores	4
2.1.2 Pasarelas	5
2.1.3 Estación Base	5
2.2 <i>Topologías</i>	6
2.3 <i>Tecnología y estándares</i>	6
2.3.1 ZigBee	6
2.3.2 IPv6 over Low Power WPAN (6LoWPAN)	7
2.3.3 Bluetooth Low Energy (BLE)	8
2.3.4 Long Range Operation (LoRa)	8
2.3.5 SigFox	8
2.4 <i>Aplicaciones</i>	9

<b>3</b>	<b>Características generales de los modelos de radiopropagación</b>	<b>11</b>
3.1	<i>Espectro radioeléctrico</i>	11
3.1.1	Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT)	12
3.1.1.1	Bandas de frecuencias libre o sin licencia	14
3.1.2	Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF)	15
3.2	<i>Fundamentos de los enlaces radioeléctricos</i>	17
3.2.1	Influencia del terreno	18
3.2.2	Modelo de propagación en tierra plana	19
3.2.3	Modelo de Okumura-Hata	20
3.2.4	Modelo de pérdida <i>log-distance</i>	21
3.2.5	Modelo de sombra <i>log-normal</i> LNSM	21
3.3	<i>Desvanecimientos</i>	22
3.3.1	Desvanecimientos por factor K	23
3.3.2	Desvanecimiento multitrayecto	23
3.3.3	Estadísticas del desvanecimiento	24
3.4	<i>Indicador de fuerza de la señal recibida (RSSI)</i>	24
3.4.1	Métodos de localización	24
3.4.2	Relación del indicador de RSSI con la distancia	25
<b>4</b>	<b>Nodos sensores usados</b>	<b>27</b>
4.1	<i>Hardware</i>	27
4.2	<i>Características de transmisión: LoRa y LoRaWAN</i>	29
4.2.1	Modulación LoRa	30
4.2.2	Protocolo LoRaWAN	31
4.3	<i>Software</i>	31
<b>5</b>	<b>Desarrollo teórico</b>	<b>35</b>
5.1	<i>Mejora de la auto-adaptabilidad de valores Gaussianos en LNSM</i>	35
5.2	<i>Realización de la adaptabilidad de los coeficientes en el modelo de sombra logarítmico-normal</i>	37
5.3	<i>Análisis experimental en el artículo de referencia</i>	39
<b>6</b>	<b>Resultados</b>	<b>43</b>
6.1	<i>Trabajo previo</i>	43
6.2	<i>Toma de medidas</i>	44
6.3	<i>Procesado de los datos</i>	47
6.3.1	Modelos deterministas	48
6.3.2	Modelos empíricos	50
6.4	<i>Comparativa de los modelos estudiados</i>	53
<b>7</b>	<b>Conclusiones y líneas futuras</b>	<b>55</b>
	<b>Anexo</b>	<b>57</b>
	<b>Referencias</b>	<b>63</b>



# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 2-1. Comparativa entre las características de las dos capas ZigBee definidas.	7
Tabla 3-1. Bandas de frecuencias definidas y servicios mayoritarios en esas bandas según la UIT.	14
Tabla 3-2. Clasificación de los tipos de desvanecimientos.	22
Tabla 5-1. Valor de los coeficientes del modelo LNSM.	40
Tabla 6-1. Datos RSSI recibidos en los 5 primeros puntos.	45
Tabla 6-2. Datos RSSI recibidos en los últimos 5 puntos.	45
Tabla 6-3. Datos RSSI recibidos en los 5 primeros puntos tras ajuste.	46
Tabla 6-4. Datos RSSI recibidos en los últimos 5 puntos tras ajuste.	46
Tabla 6-5. Potencia recibida en los 5 primeros puntos tras ajuste en dBm.	46
Tabla 6-6. Potencia recibida en los últimos 5 puntos tras ajuste en dBm.	46



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 2-1. Componentes del nodo sensor.	5
Figura 2-2. Dispositivos de una red de sensores con topología mallada.	5
Figura 2-3. Topología en estrella y en árbol, respectivamente.	6
Figura 2-4. Modelo de capas ZigBee.	7
Figura 2-5. Capa física, de enlace y red protocolo 6LoWPAN.	8
Figura 3-1. Espectro electromagnético.	12
Figura 3-2. Regiones en las que la UIT divide el mundo para la atribución de frecuencias.	13
Figura 3-3. Ejemplo de CNAF.	17
Figura 3-4. Modelo de rayo directo y reflejado.	19
Figura 3-5. Ejemplo de señal que sufre desvanecimiento.	22
Figura 3-6. Variación temporal de la amplitud de envolvente de la señal recibida.	23
Figura 3-7. Esquema de tiempos ToA.	25
Figura 4-1. Nodo sensor utilizado.	28
Figura 4-2. Diagrama de bloques del procesador SX1272.	28
Figura 4-3. Esquemático del procesador visto desde arriba.	29
Figura 4-4. Modelo de capas de la tecnología LoRa.	30
Figura 4-5. Comparativa de la relación distancia - ancho de banda entre LoRa y otras tecnologías.	30

Figura 4-6. Interfaz de CoolTerm para configurar los diferentes parámetros de la comunicación serie.	32
Figura 4-7. Mensaje recibido por el nodo receptor.	33
Figura 5-1. Relación entre RSSI y distancia.	36
Figura 5-2. Evolución de la varianza RSSI con la distancia.	36
Figura 5-3. Relación RSSI(dB) y distancia (m) en entorno interior.	40
Figura 5-4. Relación RSSI(dB) y distancia (m) en entorno exterior.	41
Figura 6-1. Entorno sobre el que se realizan las medidas.	44
Figura 6-2. Distribución gráfica de los equipos.	45
Figura 6-3. Potencia recibida frente a distancia.	47
Figura 6-4. Pérdidas de propagación.	48
Figura 6-5. Superposición modelo espacio libre frente a valores reales.	49
Figura 6-6. Superposición modelo tierra plana frente a valores reales.	49
Figura 6-7. Superposición modelo log-distance frente a valores reales.	51
Figura 6-8. Superposición modelo log-normal shadowing frente a valores reales.	52
Figura 6-9. Superposición modelo log-normal shadowing with Dynamic variance frente a valores reales.	53
Figura 6-10. Representación de todos los modelos frente a los valores recibidos.	54
Figura 6-11. Zoom de las curvas y medidas obtenidas en los último 200m.	54





# 1 INTRODUCCIÓN

---

*There's no easy way around it, no matter how talented you are. Your talent is going to fail you if you're not skilled. If you don't study, if you don't work really hard and dedicate yourself to being better every single day.*

*No existe una manera fácil, no importa lo talentoso que seas, tu talento te va a fallar si no lo desarrollas. Si no estudias, si no trabajas duro, si no te dedicas a ser mejor cada día*

*- Will Smith -*

**E**l objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado ha sido determinar empíricamente el modelo de radiopropagación que mejor se adapte a las redes de sensores inalámbricos en entornos urbanos.

El artículo de investigación “Modelo de medida de la distancia basado en RSSI en WSN” escrito por los autores Jiuqiang Xu, Wei Liu, Fenggao Lang, Yuanyuan Xhang y Cheglong Wang [1] ha sido un pilar imprescindible ya que parte de este documento se basa en su investigación.

En este primer capítulo se va a abordar cuáles son los objetivos del Trabajo Fin de Grado, así como la estructura utilizada en la memoria.

## 1.1 Objetivos

Con la realización de este trabajo se pretende establecer el modelo de radiopropagación que mejor se adapte a la red de sensores inalámbricos sobre la red que hemos realizado las medidas, es decir, se desea determinar qué modelo predice mejor las pérdidas de propagación en una red de sensores inalámbricos en un entorno urbano.

Existen diferentes modelos que pueden ser aplicados para estas redes. A lo largo de este trabajo se ha realizado un estudio sobre todos ellos y se ha logrado encontrar el modelo que mejor se adapta a este tipo de redes haciendo uso de un grupo de sensores que nos proporcionan una serie de valores, entre ellos, el indicador de fuerza de la señal recibida (RSSI, *Received Signal Strength Indication*) que será el que nos proporcionará el dato de potencia recibida tras realizar varias operaciones sobre las medidas.

## 1.2 Estructura de la memoria

El Trabajo Fin de Grado viene presentado bajo el título “Evaluación experimental de modelos de radiopropagación mediante una red de sensores inalámbricos”. Se trata de un tema que está en continuo desarrollo actualmente, destinado para diferentes aplicaciones, desde militares a domésticas, y empleado en

diferentes tecnologías.

En primer lugar, nos encontraremos con el índice correspondiente al trabajo, así como los índices de tablas y figuras.

A continuación, se muestran los capítulos en los que se ha dividido el proyecto. Se ha partido desde un punto teórico donde se exponen las redes de sensores inalámbricos y sus características, se continúa con contenido teórico que tiene mayor implicación en este proyecto y finalmente se exponen los resultados obtenidos para el proyecto. Se ha estimado dividirlo en siete capítulos cuyo contenido se detalla seguidamente:

- Capítulo 1: Introducción. Se presenta el trabajo a realizar, sus objetivos y la estructura de la memoria.
- Capítulo 2: Redes inalámbricas de sensores (WSN, *Wireless Sensor Network*). Se realiza una breve descripción, indicando sus características principales, los dispositivos que las forman, las diferentes topologías, tecnologías y estándares que existen y las aplicaciones donde podemos encontrarlas.
- Capítulo 3: Características generales de los modelos de radiopropagación. Se indican los requisitos necesarios para que una WSN pueda existir, las características de los enlaces radioeléctricos, los modelos teóricos que se van a estudiar en este trabajo y la descripción de RSSI.
- Capítulo 4: Nodos sensores usados. Se comentará el hardware que forman los sensores empleados en el proyecto, sin entrar específicamente en los componentes. Se detallará la técnica de modulación LoRa y el protocolo LoRaWAN. Además, se mencionará el software utilizado y la recepción de los paquetes de datos.
- Capítulo 5: Desarrollo teórico. Se revisará el artículo “Modelo de medida de la distancia basado en RSSI en WSN” detalladamente, incluyendo su desarrollo teórico, así como las conclusiones a las que se llegaron en el experimento.
- Capítulo 6: Resultados. Se describe el lugar de trabajo sobre el que se realizan las medidas y las operaciones necesarias que deben realizarse sobre estas medidas para obtener el dato de potencia recibida. Además, se incluye el trabajo realizado en Matlab para obtener las curvas de los diferentes modelos y se comparan los resultados obtenidos de los diferentes modelos con los datos del experimento.
- Capítulo 7: Conclusiones y líneas futuras. Se concluye cuál ha sido el mejor modelo, basándonos en los resultados obtenidos en el capítulo anterior, y las posibles líneas de avance o diferentes perspectivas sobre las que se puedan obtener nuevas conclusiones para dar mayor validez al modelo.

Finalmente, se pueden encontrar las referencias en las cuáles nos hemos apoyado para la realización de este trabajo.



## 2 REDES INALÁMBRICAS DE SENSORES

---

*Intelligence is the ability to adapt to changes.  
La inteligencia es la habilidad de adaptarse a los  
cambios.*

*- Stephen Hawking -*

Las redes inalámbricas de sensores, conocidas en inglés como *Wireless Sensor Networks* (WSN), se basan en la unión de nodos sensores conectados entre sí que forman una red de comunicación inalámbrica con la posibilidad de usar diferentes topologías y emplear diferentes protocolos para su conexión. Hasta ahora, las WSN se han definido como redes de tipo WPAN (*Wireless Personal Area Network*). Sin embargo, desde hace unos años, el concepto de WSN se ha potenciado para cubrir redes de bajo consumo y área extensa (conocidas como *Low-Power Wide Area Network- LPWAN*). Las WSN se caracterizan, principalmente, por la baja complejidad en su diseño, bajo costo y reducido consumo de potencia.

El inicio de las redes de sensores se remonta al año 1980 con el grupo de trabajo Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada de Defensa (*Defense Advanced Research Projects Agency - DARPA*) formado en Estados Unidos.

Las principales características que definen las redes inalámbricas de sensores son las siguientes:

- **Topología:** Normalmente los dispositivos que forman las redes de sensores no siguen una distribución fija, ya que, en función de las necesidades de la red, estos nodos o dispositivos pueden ser móviles o fijos. Además, en una red de sensores es muy común la adición, eliminación o fallos de nodos dentro de la red. Los propios nodos han de adaptarse a los cambios en la conectividad de forma dinámica provocando cambios en la topología definida inicialmente.
- **Auto-restauración:** Si un nodo envía siempre sus datos a otro nodo destino específico, pero éste no existe o no es capaz de entablar la comunicación con él, ha de buscar otro nodo de la red que reciba el envío, favoreciendo el enrutamiento dinámico hasta conseguir establecer la comunicación con el nodo final o pasarela. En la Figura 2-2, se puede observar que cada nodo tiene diferentes vecinos a los cuales enviar los valores captados, por lo tanto, presenta distintas alternativas si se da el caso de que la comunicación con un vecino concreto falle.
- **Mantenimiento:** Las WSN presentan fácil despliegue y son redes desatendidas, es decir, sin intervención humana, pero presentan alta probabilidad de fallo. Las motas necesitan de poco mantenimiento una vez desplegadas. Sin embargo, cuando es necesaria una reconfiguración de los nodos o un cambio en su firmware, hay que tener presente las ubicaciones poco accesibles o bien el carácter dinámico de los dispositivos que componen la red. Por lo tanto, es necesario el uso de metodologías de mantenimiento alejadas del acceso físico a los propios dispositivos. Por consiguiente, es importante que la posible actualización del software de los nodos de la red se realice mediante el uso de algoritmos distribuidos sin intervención humana, o bien mediante el uso de mecanismos de

programación inalámbrica, que permitan cambiar el código de los nodos sin necesidad de acceder físicamente a ellos.

- **Limitación de recursos:** Los dispositivos que componen las redes de sensores, además de presentar ventajas como bajo coste o tamaño reducido, presentan unas limitaciones determinadas por estas características. Por lo general, a la hora de diseñar y desplegar una red de sensores inalámbrica, hay que tener en cuenta las siguientes limitaciones: potencia de cálculo, memoria, ancho de banda y energía. Normalmente los nodos sensores utilizan como fuente de energía baterías. Es por ello por lo que disponen de un modo *sleep* que permite que el sensor “esté dormido” durante la mayor parte del tiempo, originando una mayor vida a la batería.
- **Seguridad y privacidad:** En función de la finalidad que tenga la aplicación para la cual se haya diseñado la WSN estos factores tomarán mayor o menor importancia. Por ejemplo, para aplicaciones militares toma especial atención que estos datos no puedan ser obtenidos ni manipulados.
- **Redundancia de la información:** Por lo general, las redes de sensores cuentan con muchos nodos que toman valores del entorno, normalmente en distancias muy cortas, provocando que se tengan datos redundantes de una misma zona.

Como ya se ha comentado, dependiendo de la finalidad de la red se hará mayor hincapié en unas características u otras.

## 2.1 Dispositivos de la red de sensores

En una red inalámbrica de sensores nos podemos encontrar con nodos sensores, pasarelas y una estación base. El tamaño de los dispositivos estará determinado por el coste y por la funcionalidad para la cual tengan que ser diseñados. Normalmente, destacan por ser de reducido tamaño.

### 2.1.1 Nodos sensores

Los nodos sensores, llamados motas o nodos, son los dispositivos encargados de tomar los datos del exterior, procesarlos y transmitirlos. Pueden incluir uno o más sensores y en algunos casos se dotan de actuadores. Como se puede observar en la Figura 2-1, los nodos sensores están formados por diferentes componentes que se detallan a continuación:

- **Sensores:** Dispositivos encargados de medir las magnitudes físicas (intensidad eléctrica, tensión, presión, humedad, temperatura, intensidad acústica, concentración de oxígeno, etc.) y convertir la medida en una señal que será interpretada por la CPU.
- **Unidad Central de Procesamiento (CPU, *Central Processing Unit*):** Encargada del procesamiento de los datos y de ejecutar las instrucciones que han sido cargadas previamente al despliegue de la red de sensores.
- **Memoria:** Destinada al almacenamiento de datos y para el uso del programa.
- **Transceptor radio:** Empleado para enviar o recibir los datos a través del medio. Pueden existir diferentes alternativas tecnológicas en función del fabricante y de las necesidades de comunicación de la red a diseñar.
- **Fuente de energía:** Normalmente serán baterías y su función es alimentar a los diferentes componentes del nodo sensor. En algunas ocasiones puede estar acompañada de otros elementos que permitan aumentar la vida útil de los sensores utilizando recursos del entorno, como pueden ser paneles solares o dispositivos de energía eólica.
- **Actuadores:** No son obligatorios en el nodo sensor. Son dispositivos que pueden llevar a cabo una acción en respuesta a cierto estímulo.

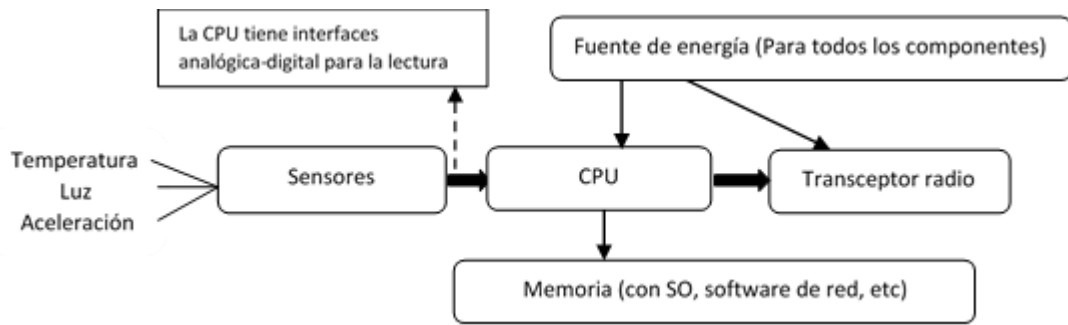


Figura 2-1. Componentes del nodo sensor [1].

## 2.1.2 Pasarelas

Una pasarela, conocida como “*gateway*”, es un dispositivo que permite interconectar redes con protocolos y arquitecturas diferentes a todos los niveles de comunicación. Su propósito es traducir la información del protocolo utilizado en la red de sensores al protocolo usado en la red de destino, normalmente TCP/IP. Las pasarelas pueden recibir los datos de los nodos sensores o de otras pasarelas que estén instaladas en la red.

## 2.1.3 Estación Base

La estación base actúa como recolector de datos y puede ser usada para su procesamiento o para prestar un determinado servicio. Por lo general, está basada en un ordenador común o en un sistema integrado.

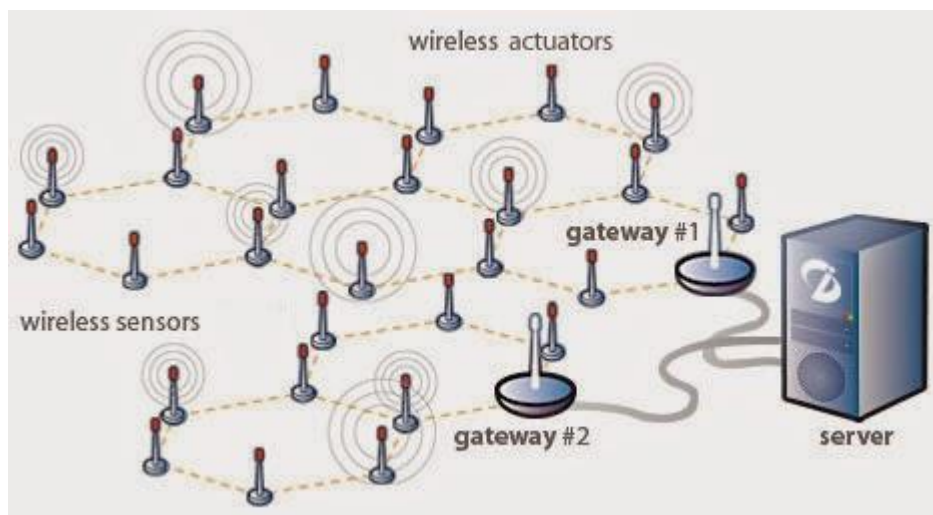


Figura 2-2. Dispositivos de una red de sensores con topología mallada.

## 2.2 Topologías

Distribución física que tomará la red de sensores inalámbrica. Las principales topologías para las WSNs son:

- **Topología en estrella:** Un elemento final (nodo central o pasarela) controla al resto de nodos. Es la más simple, ya que la comunicación entre un nodo y el elemento final es directa, por tanto, otorga a la red de mayor seguridad y fiabilidad ya que existe menor probabilidad de fallo. El mayor inconveniente que presenta es la distancia que puede abarcar la red viéndose determinada por la tecnología usada en la comunicación. En la Figura 2-3 se puede apreciar un esquema de esta topología.
- **Topología en árbol:** Se recolectan los datos hacia un sumidero que está en la raíz del árbol. La conexión en árbol es parecida a una serie de redes en estrella interconectadas salvo en que no tiene un nodo central. Su mayor ventaja es que se pueden conectar una gran cantidad de dispositivos en la red. Sin embargo, si uno de los nodos intermedios falla, los nodos que descienden de él pierden la conexión con el nodo raíz. En la Figura 2-3 se puede observar un posible esquema.
- **Topología mallada:** Un nodo dispone a su alrededor de varios nodos vecinos, es decir, existen diversos caminos entre dos nodos y para establecer la comunicación con el nodo central o pasarela un paquete podrá pasar por diferentes nodos hasta llegar al destino. Esto se consigue gracias a diferentes técnicas de enrutamiento automatizadas donde se obtiene una topología en árbol para hacer llegar cualquier paquete desde cualquier nodo hasta el elemento final. La diferencia principal con la topología en árbol es que, al existir más de un nodo vecino, si un nodo detecta fallo por un camino, se consigue crear una ruta alternativa de forma dinámica, evitando la pérdida de paquetes de información donde viajan los datos tomados en los nodos sensores. Estos nodos son más complejos ya que requieren una lógica de enrutamiento adicional, provocando mayor coste en la red. Sin embargo, se consigue una mayor extensión total de la red y aporta fiabilidad disminuyendo la probabilidad de fallo gracias a los caminos dinámicos. Por el contrario, se ve afectada la seguridad ya que los paquetes de información pasan por diferentes nodos. En la Figura 2-2 se puede ver una red mallada.



Figura 2-3. Topología en estrella y en árbol, respectivamente.

## 2.3 Tecnología y estándares

Hoy en día no existe un estándar fijo a seguir, ni en protocolos, ni en hardware, ni en representación de datos. Esto es debido, por una parte, a que las aplicaciones de las redes de sensores son tan amplias que es difícil englobarlas todas. Por otra parte, las tecnologías están en constante cambio y desarrollo. De entre las soluciones existentes, sin embargo, sí hay quienes tienen más fuerza y quienes tienen menos. A continuación, se presentan las principales soluciones para WSNs actuales que se han desarrollado para las diferentes aplicaciones.

### 2.3.1 ZigBee

Tecnología de red inalámbrica dirigida a aplicaciones de monitorización remota y control. Fue creado en 1990 por un consorcio de empresas llamado *ZigBee Alliance*. En 2003 fue normalizado por el IEEE en el estándar

802.15.4 y en él se definen las especificaciones técnicas de la capa física y de enlace. El resto de las capas superiores como son la de red, soporte y aplicación están definidas por *ZigBee Alliance* y, además, se ocupa de la certificación y evaluación para la interoperabilidad. Entre sus características:

- Bajo consumo de baterías, que pueden llegar a durar entre varios meses y 2 años.
- Topologías de red apropiadas para aplicaciones de monitorización y control.
- Bajas tasas de datos, baja complejidad, bajo coste y facilidad de uso.
- Muy alta fiabilidad y seguridad.

Diseñado para operar en bandas de frecuencia sin licencias. En la banda superior, a 2450 MHz (a nivel mundial) para la cual está definida la capa física *ZigBee PHY 2450 MHz*. En la banda inferior, a 915 MHz (banda ISM en la mayor parte de América y la Cuenca del Pacífico) y a 868 MHz (banda ISM para Europa) con la capa física *ZigBee PHY 868/915 MHz*. Ambas no pueden ser usadas en un mismo dispositivo y tienen diferentes tipos de modulación y tasas binarias. En la Tabla 2-1 se muestra una breve comparativa.

PHY	Rango de Frecuencias (MHz)	Tasa de chip (kcps)	Modulación	Tasa de bit (kbps)	Tasa de símbolos (ksps)
<b>868/915</b>	868-868.6	300	BPSK	20	20
	902-928	600	BPSK	40	40
<b>2450</b>	2400-2483.5	2000	OQPSK	250	62.5

Tabla 2-1. Comparativa entre las características de las dos capas ZigBee definidas.

Adecuado para aplicaciones con sistemas empotrados de electrónica de consumo, automatización del hogar e industrial, sistemas de seguridad, periféricos de ordenador, aplicaciones de sensores médicos e industriales, juguetes y juegos.



Figura 2-4. Modelo de capas ZigBee.

### 2.3.2 IPv6 over Low Power WPAN (6LoWPAN)

*IPv6-based Low Power Wireless Personal Area Networks* permite la comunicación de paquetes IPv6 con la capa de enlace definida en el estándar IEEE 802.15.4. Se basa en la idea de que dispositivos de baja potencia

con capacidades limitadas de procesamiento puedan ser capaces de comunicarse directamente con otros dispositivos IP, permitiendo la interoperabilidad entre Internet y las WSN.

El estándar proporciona una capa de adaptación, nuevo formato de paquete y gestión de direccionamiento. Como el tamaño de paquete IPv6 es mucho más grande que el tamaño de la trama IEEE 802.15.4 es necesaria una capa de adaptación. La capa de adaptación lleva a cabo la funcionalidad de compresión de cabeceras. Con esta, se crean paquetes de menor tamaño que encajan en una trama IEEE 802.15.4. Por otro lado, el mecanismo de gestión de direcciones se encarga de la formación de direcciones de dispositivo para la comunicación. 6LoWPAN está diseñado para aplicaciones en las que los dispositivos requieren conexión a Internet [26].

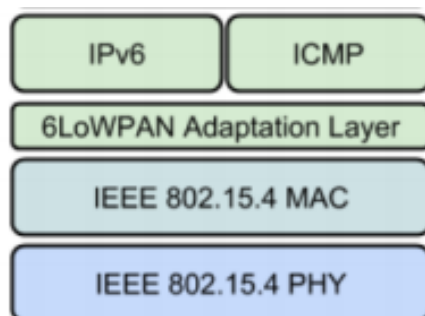


Figura 2-5. Capa física, de enlace y red protocolo 6LoWPAN [23].

### 2.3.3 Bluetooth Low Energy (BLE)

Bluetooth Low Energy (BLE) es la nueva especificación de Bluetooth incluida en la versión 4.0 de la tecnología desarrollada por *Bluetooth Special Interest Group* (SIG). Se ha diseñado como una tecnología complementaria al Bluetooth clásico para garantizar un consumo de energía bajo, y menor tiempo de establecimiento de conexión. BLE funciona en la banda 2.4 GHz con una tasa de datos de 1 Mbps y su protocolo está diseñado para evitar colisiones. La distancia de enlace entre dispositivos es de 5-10 m.

BLE está diseñado para la transmisión de pequeñas cantidades de datos (tiempos de transmisión muy pequeños) y por lo tanto de ultra-bajo consumo de energía. No está pensado para mantener una conexión entre dispositivos por un largo tiempo transmitiendo grandes cantidades de datos a alta velocidad. Esto permite que los dispositivos estén activos solo cuando se les pide la transmisión de datos. Además, es fácil de implementar e instalar y está soportado por los *smartphones*.

### 2.3.4 Long Range Operation (LoRa)

LoRa es una tecnología inalámbrica pensada para cubrir la necesidad creada en los últimos tiempos para las redes de bajo consumo y área extensa (conocida como *Low-Power Wide Area Network- LPWAN*).

LoRa es una tecnología exclusiva y patentada de propiedad de *Semtech Corporation*, que funciona en la banda ISM. La asignación de frecuencias y los requisitos reglamentarios para ISM varían por región. Dos de las más populares son las frecuencias de 868 MHz utilizada en Europa y 915 MHz utilizada en América del Norte.

El protocolo LoRa satisface una importante necesidad en el Internet de las Cosas (*Internet of the Things, IoT*) para aplicaciones de largo alcance y baja potencia, lo que implica una limitación en la velocidad de datos máxima a 50 kbps.

En capítulos posteriores se hará mayor estudio de esta tecnología ya que ha sido la empleada en el proyecto.

### 2.3.5 SigFox

Propone la creación de una red independiente a la que, para conectarse, es necesario incorporar un chip que sea compatible con la misma. Es otra alternativa a las redes de bajo consumo y área extensa *LPWAN*. En la red SigFox se transmiten mensajes de 12 bytes, pudiendo enviar 140 mensajes al día. El protocolo de metadatos ya incluye una marca de tiempo y la identificación de cada dispositivo de forma única. Puede parecer poco, pero para muchos usos es más que suficiente. Esto tiene interesantes ventajas para la comunicación de los objetos

conectados:

- Eficiencia energética, alargando la duración de la batería en algunos dispositivos hasta 15 años, más allá en muchos casos de su vida útil.
- Uso de frecuencias libres (ISM) resistentes frente a interferencias.
- Conectividad Ultra Narrow Band (UNB) bidireccional.
- Gestión sencilla y basada en la nube. Se controlan todos los dispositivos conectados a la red desde un único lugar.
- Cobertura internacional.

Para el control de dispositivos, proporciona una interfaz de aplicaciones web, así como una web API basada en estándares, para una fácil y eficiente gestión de dispositivos e integración de datos, facilitando su uso con los sistemas que ya utilizan sus clientes [25].

## 2.4 Aplicaciones

Debido a sus atractivas características, las redes de sensores inalámbricas pueden estar presentes en diferentes ámbitos, ya sea en aplicaciones industriales o bien dentro de la vida cotidiana de las personas. A continuación, se detallan diferentes campos donde las WSN están presentes:

- **Aplicaciones militares:** Fueron el punto de partida para las WSNs. Se pensó como un apoyo para tener conocimiento en tiempo real en el campo de batalla para el control, comunicaciones y toma de decisiones. Por ejemplo, puede ser útil el despliegue de una red de sensores sobre un territorio para detectar de forma precisa determinadas acciones del enemigo.
- **Agricultura:** Es uno de los campos donde las WSNs están teniendo mayor auge. Mediante la medición de diferentes parámetros se puede controlar el agua o fertilizante que las plantas necesitan. Con un control exhaustivo se puede predecir enfermedades o determinar el mejor momento para realizar la cosecha. Además, para aquellos cultivos que precisen delicadeza se puede controlar la intrusión de animales y actuar contra ellos para su expulsión en la zona afectada.
- **Medio ambiente:** El despliegue de múltiples nodos con sensores facilita la captación de parámetros medioambientales, como puede ser la polución o las medidas asociadas a los fenómenos meteorológicos. Una vez tomados los valores, se puede determinar si es necesario tomar medidas en cuanto a la emisión de gases contaminantes o bien realizar un estudio de los fenómenos atmosféricos en zonas determinadas. Además, se puede monitorizar determinadas zonas para la detección de incendios forestales, detención de inundaciones, explotación de animales en su hábitat natural, entre otras.
- **Domótica:** Es uno de los campos donde las redes de sensores inalámbricas empiezan a estar más presentes, debido a que pueden facilitar la realización de tareas triviales a partir de la captación de ciertos parámetros de información. Acciones como encender la calefacción, bajar las persianas o encender las luces pueden ser realizadas por ciertos actuadores cuando los sensores desplegados en la casa capturen ciertos valores de temperatura, humedad o cantidad de luz, por ejemplo.
- **Monitorización de instalaciones:** Las redes de sensores inalámbricas pueden ser aplicadas para la lectura y monitorización de parámetros determinantes tanto en edificios como en industrias, como pueden ser el gasto energético, consumo de agua o presencia de gases peligrosos para la realización de las actividades laborales. Este tipo de monitorización permitirá facilitar la gestión eficiente de recursos, buscando además un ahorro en el consumo.
- **Automoción:** La cantidad de posibilidades que ofrecen los sensores en el ámbito automovilístico son innumerables. Ofrecen funciones de monitorización, control en sistemas modernos de gestión del motor, sistemas de seguridad y confort.
- **Medicina:** Enfocado en la monitorización de los pacientes. Se puede medir de forma remota los parámetros biométricos de las personas, ayudando al diagnóstico preciso o disparando alarmas en situación de emergencias.





# 3 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS MODELOS DE RADIOPROPAGACIÓN

---

*Scientist study the world as it is, engineers create the world that never has been.*

*Los científicos estudian el mundo tal como es, los ingenieros crean el mundo que nunca ha sido.*

*- Theodore von Karman -*

En el capítulo anterior se han comentado las diferentes topologías, aplicaciones, tecnologías y estándares con las que nos podemos encontrar desplegada una WSN. Sin embargo, para poder establecer cualquier tipo de comunicación de estas redes es necesario seguir una serie de criterios, tanto a nivel legal, ya que el espectro es compartido por todos, como a nivel técnico, para que los dispositivos implicados puedan funcionar. En el desarrollo de este capítulo se va a establecer cuáles son esos requisitos.

## 3.1 Espectro radioeléctrico

El espectro radioeléctrico es una parte del espectro electromagnético, concretamente está fijado entre los 8,3 kHz y los 3000 GHz, es decir comprende las ondas electromagnéticas (naturales o artificiales) que están entre nosotros. En particular, el espectro radioeléctrico discierne solamente a las ondas electromagnéticas que se utilizan para las comunicaciones (radio, teléfono, televisión, internet, etc.), también denominadas de radiofrecuencia.

Debido a que es un recurso natural de carácter limitado, se considera un bien de dominio público que es gestionado por los correspondientes Estados. Es por ello por lo que deben existir organismos que se encarguen de la gestión del espectro. Para su control se pueden diferenciar dos niveles, un organismo a nivel internacional como es la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) y un organismo a nivel nacional, en España la Secretaría de Estado para el Avance Digital, anteriormente la Secretaría de Estado de Telecomunicaciones y para la Sociedad de la Información (SETSI). En la Figura 3-1 se puede observar cómo el espectro radioeléctrico es una pequeña parte del espectro electromagnético.

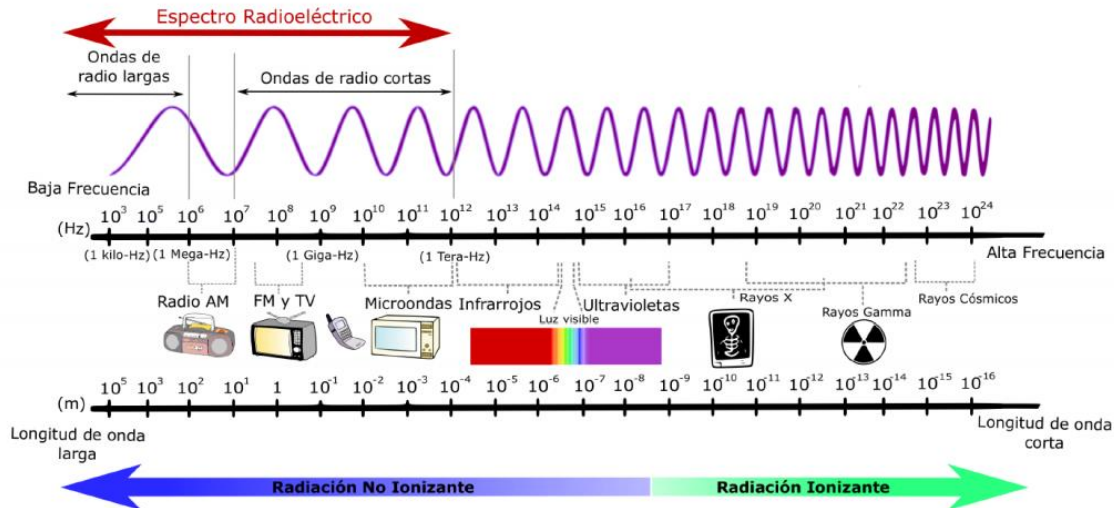


Figura 3-1. Espectro electromagnético [42].

### 3.1.1 Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT)

La Unión Internacional de Telecomunicaciones UIT conocida también como ITU (del inglés *International Telecommunication Union*) es el organismo especializado de las Naciones Unidas para las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC).

Se encarga de atribuir el espectro radioeléctrico y las órbitas de satélites a escala mundial, elaborando normas técnicas que garantizan la interconexión continua de las redes y las tecnologías. La UIT está comprometida para conectar a toda la población mundial, independientemente de cuales sean los medios de los que disponga. Dentro de la UIT existen tres ámbitos de actividad principales:

- **Sector de Radiocomunicación (UIT-R):** Encargado de la gestión internacional del espectro de frecuencias radioeléctricas y las órbitas de los satélites.
- **Sector de Normalización (UIT-T):** Reúnen a expertos de todo el mundo para elaborar normas internacionales conocidas como Recomendaciones ITU, que actúan como elementos definitorios de la infraestructura mundial de las Tecnologías de la Información y la Comunicación. Las normas resultan indispensables para la interoperabilidad de las TIC.
- **Sector de Desarrollo (UIT-D):** Fomenta la cooperación internacional y la solidaridad en la prestación de asistencia técnica y en la creación, desarrollo y perfeccionamiento de redes y equipos de telecomunicaciones y TIC en los países en desarrollo.

El espectro radioeléctrico se divide en Bandas de Frecuencias, las cuales se atribuyen a los diferentes servicios radioeléctricos. Estas atribuciones las efectúa la UIT en las Conferencias de Radiocomunicaciones y quedan recogidas en el Cuadro de Atribución de Bandas de Frecuencias del Reglamento de Radiocomunicaciones.

Las conferencias establecen también los llamados Planes de Adjudicaciones, en los que se habilitan frecuencias para su utilización por los servicios de radiocomunicación terrenales o espaciales de uno o más países o zonas geográficas.

El espectro radioeléctrico se divide en nueve bandas de frecuencias que se designan por número enteros siguiendo la designación numérica siguiente: la banda « N » se extiende desde  $0,3 \times 10^N$  a  $3 \times 10^N$ ; o por nombres abreviados del inglés.

Además, la UIT elabora el Cuadro de Atribución de Frecuencias a los servicios de Radiocomunicación. Se define como el instrumento del Reglamento de Radiocomunicaciones en el que se inspira la regulación de la utilización de las frecuencias. Para tal atribución se divide el mundo en tres Regiones.

- Región 1: comprende Europa, África, Siberia y algunos países de Oriente Medio.
- Región 2: abarca toda América.

- Región 3: Australia, Sur-Sureste Asiático y parte de Pacífico Sur.

Dentro de estas regiones existen Zonas de Adjudicaciones especiales. En la Figura 3-2 se pueden apreciar gráficamente estas regiones.

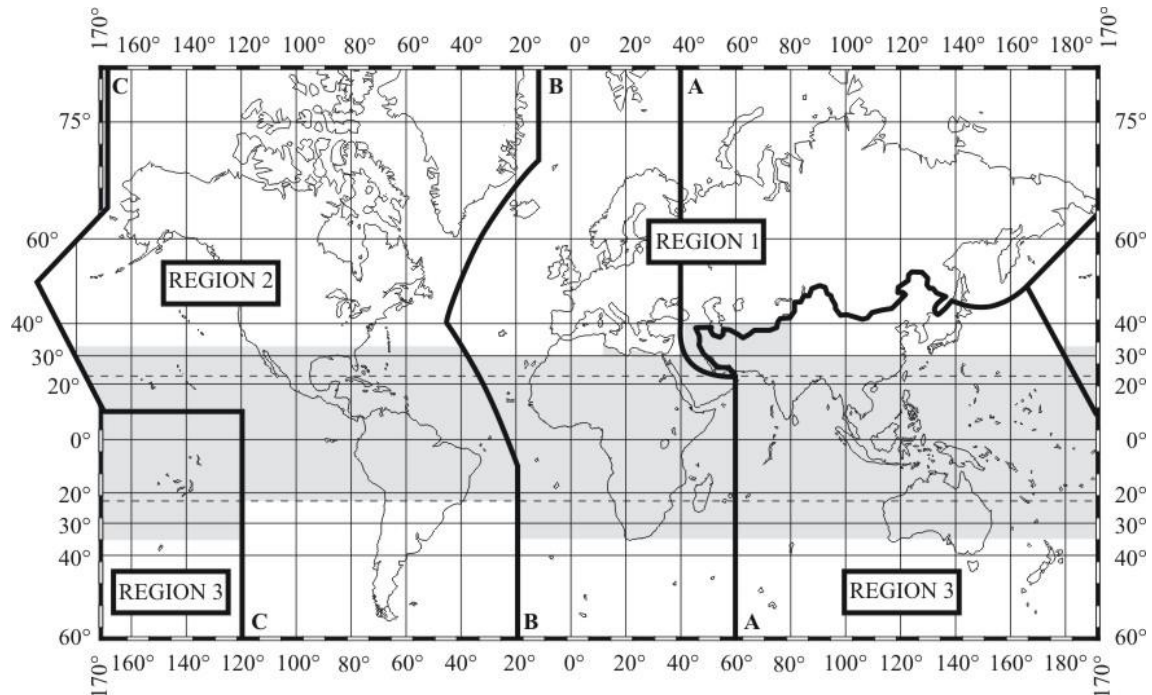


Figura 3-2. Regiones en las que la UIT divide el mundo para la atribución de frecuencias.

En la Tabla 3-1 se pueden apreciar los servicios más típicos utilizados definidos para la Región 1 aplicados a los diferentes rangos de frecuencias. Además, los rangos de frecuencias (excluido el límite inferior pero incluido el superior) se muestran con el nombre que recibe la banda en inglés y con el número de la banda según define la UIT.

Además de esta división en frecuencias, la UIT también realiza una división en función del carácter de la banda, es decir, podemos encontrar bandas particulares, bandas licenciadas y bandas libres. Estos grupos de frecuencias también se ven afectados por la región en la que se encuentren. Estas se pueden definir como:

- **Bandas particulares:** bandas de uso privativo normalmente compradas al organismo nacional regulador de las telecomunicaciones y solamente su dueño puede usarlas.
- **Bandas licenciadas:** Se usan típicamente para enlaces punto a punto de gran capacidad. Para poder usarlas es necesario un permiso dado por la agencia reguladora del espectro en cada país y la licencia se da por enlace. Su precio depende de la longitud del enlace, situación y ancho de banda.
- **Bandas libres:** En las frecuencias definidas como libres, cualquier persona puede transmitir sin necesidad de tener un permiso. Sin embargo, para poder transmitir deben cumplir ciertas reglas que están contempladas en la regulación de estas bandas.

Número de la banda (N)	Nombre de la banda (en inglés)	Rango de frecuencias	Servicios más usados en la banda
4	VLF – <i>Very Low Frequency</i>	3 a 30 kHz	Radionavegación. Servicio móvil marítimo.
5	LF – <i>Low Frequency</i>	30 a 300 kHz	Frecuencias patrón.
6	MF – <i>Medium Frequency</i>	300 a 3000 kHz	Radiodifusión.
7	HF – <i>High Frequency</i>	3 a 30 MHz	Servicio fijo. Servicios móviles. Radiodifusión.
8	VHF – <i>Very High Frequency</i>	30 a 300 MHz	Servicios móviles. Radiodifusión sonora y TV. Radionavegación. Servicio fijo.
9	UHF – <i>Ultra High Frequency</i>	300 a 3000 MHz	Servicio fijo (radioenlaces). Servicios móviles. Radiodifusión. Servicio fijo.
10	SHF – <i>Super High Frequency</i>	3 a 30 GHz	Servicio fijo (radioenlaces terrenales). Telecomunicación y radiodifusión por satélite. Radionavegación.
11	EHF – <i>Extremely High Frequency</i>	30 a 300 GHz	Radioastronomía. Servicio fijo entre satélites. Radiolocalización. Investigación espacial. Radiodifusión por satélite.
12		300 a 3000 GHz	No está atribuida.

Tabla 3-1. Bandas de frecuencias definidas y servicios mayoritarios en esas bandas según la UIT [6].

### 3.1.1.1 Bandas de frecuencia libres o sin licencia

Como se ha indicado anteriormente, las bandas sin licencia son bandas de frecuencias en las cuales puede transmitir cualquier persona, por lo que estamos expuestos a que en un momento dado podamos encontrarnos con situaciones en las que los enlaces no puedan ofrecer el rendimiento deseado por culpa de la presencia de

equipamiento de terceros. Esta es la principal desventaja que nos podemos encontrar cuando se usan estas frecuencias. No obstante, se han desarrollado mecanismos para el control de interferencias, como técnicas de espectro ensanchado.

Sin embargo, gracias a su reducido coste, fácil despliegue y la gran variedad de frecuencias que se ofrecen se hace muy interesante su uso y es por ello por lo que podemos encontrar millones de aplicaciones implementadas en estas bandas. Además, gracias a su regulación, es posible que puedan convivir unas con otras.

A estas bandas también se les llama bandas ICM (Industrial, Científica y Médica) o ISM (*Industrial, Scientific and Medical*). Son bandas de frecuencias reservadas internacionalmente para uso no comercial de radiofrecuencia electromagnética en aplicaciones industriales, científicas y médicas.

Actualmente la ITU tiene definidas como bandas ISM [43]:

- 6.765 – 6.795 kHz (frecuencia central 6.780 kHz),
- 13.553 – 13.567 kHz (frecuencia central 13 560 kHz),
- 26.957 – 27.283 kHz (frecuencia central 27 120 kHz),
- 40,66 - 40,70 MHz (frecuencia central 40,68 MHz),
- 433,05 - 434,79 MHz (frecuencia central 433,92 MHz) en la Región 1, excepto en algunos países.
- 868 MHz en la Región 1
- 902 -928 MHz en la Región 2 (frecuencia centra 915 MHz)
- 2.400 - 2.500 MHz (frecuencia central 2 450 MHz)
- 5.725 – 5.875 MHz (frecuencia central 5 800 MHz)
- 24 - 24,25 GHz (frecuencia central 24,125 GHz)
- 61 - 61,5 GHz (frecuencia central 61,25 GHz)
- 122 - 123 GHz (frecuencia central 122,5 GHz), y
- 244 - 246 GHz (frecuencia central 245 GHz)

La totalidad de las tecnologías WLAN y WPAN comerciales se utilizan en estas bandas. De todas ellas, podemos destacar

- 2.400 MHz: empleada por WiFi, Bluetooth o ZigBee.
- 5.000 MHz: empleada por WiFi.
- 915 MHz para la región 2 y 868 MHz para la región 1: empleada por ZigBee, Lora o Sigfox, muy empleada para aplicaciones del tipo LPWAN.
- 434 MHz: empleada para controles remotos.
- Por debajo de 13.560 kHz: aplicaciones inalámbricas de corto alcance para identificación por radiofrecuencia (*RFID, Radio Frequency IDentification*).

No obstante, como ya se ha mencionado, aunque sean bandas sin licencias, se exige un control por parte de organismos internacionales y Nacionales para vigilar la potencia emitida y las técnicas de acceso.

### 3.1.2 Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF)

En España, el Gobierno es el encargado de legislar el espectro radioeléctrico. La Secretaria de Estado de Telecomunicaciones y para la Sociedad de la Información (SETSI), que actualmente acaba de ser renombrada como la Secretaria de Estado para el Avance Digital, perteneciente al Ministerio de Economía y Empresa, es la encargada de elaborar el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF). Este documento contiene la atribución o uso a que se reserva cada una de las bandas de frecuencias en las que se divide el espectro radioeléctrico disponible para radiocomunicaciones.

El CNAF fue publicado por primera vez en 1990 y es un documento que requiere constantes actualizaciones derivadas generalmente de las actividades de los organismos internacionales con competencias regulatorias a los que España pertenece. Los organismos principales aprueban reglamentos, decisiones, recomendaciones y otras disposiciones encaminadas, generalmente, hacia una armonización del uso del espectro radioeléctrico.

La versión actual del CNAF fue publicada en el Boletín Oficial del Estado el 27 de octubre de 2017. Posteriormente, se ha publicado la Orden ETU/416/2018, de 20 de abril, por la que se modifica la Orden

ETU/1033/2017, de 25 de octubre, por la que se aprueba el cuadro nacional de atribución de frecuencias.

En el CNAF se definen los servicios que se ofrecen en el rango de frecuencias de 8,3 kHz a 3.000 GHz, aunque el rango que va desde 275 – 3.000 GHz no está atribuido aún. El documento toma como punto de división inicial el rango de frecuencias y los servicios ofrecidos según el Reglamento de Radiocomunicación (RR) de la UIT. De tal modo, para un determinado rango de frecuencias, se obtienen dos secciones, con una tabla en cada una de ellas.

En la primera sección aparece una tabla donde se recoge la atribución de frecuencias según el artículo 5 del RR de la UIT. En la segunda, aparece otra tabla dividida en tres columnas. En ella se obtiene, la atribución nacional de cada banda de frecuencias, que salvo casos puntuales coincide con el RR. Una segunda columna donde se indica el uso del espectro que aplica a cada banda de frecuencias, con las siguientes modalidades:

- C: Uso común
- E: Uso especial
- P: Uso privativo
- R: Uso reservado al Estado
- M: Uso mixto que comprende los usos P y R

Finalmente, aparece una última columna de observaciones donde figuran las notas del RR y las Notas de utilización Nacional (UN) que aplican a cada banda de frecuencias, y, en su caso, información o comentarios adicionales en relación a la correspondiente banda de frecuencias. En la Figura 3-3 se recoge como ejemplo del CNAF el rango 460 – 890 MHz, en el cual se encuentra la frecuencia que ha sido empleada para el desarrollo de este trabajo.

Concretamente, si nos fijamos en el sub-rango 862 – 890 MHz muestra que los usos son M y C según indiquen las notas de utilización. La frecuencia empleada en este proyecto ha sido 868 MHz, así que la UN a la cual debemos adaptarnos es UN-39. En ella se especifica: “*Aplicaciones de baja potencia con la consideración de uso común en el rango de frecuencias 868 a 870 MHz. Esta banda se destina para aplicaciones de baja potencia y de datos en general de conformidad con la Decisión de Ejecución (UE) 2017/1483 de la Comisión por la que se modifica la Decisión 2006/771/CE, sobre la armonización del espectro radioeléctrico para su uso por dispositivos de corto alcance.*”

Como se trata de una banda común, cualquiera puede transmitir en dicho rango de frecuencia. Aun así, se deben cumplir ciertas pautas, tanto técnicas de acceso como la potencia máxima a la que se puede emitir que también se especifica en la UN-39, concretamente:

“- *Dispositivos de baja potencia no específicos para aplicaciones genéricas:*

▪ *868,000 - 868,600 MHz con 25 mW (p.r.a.) de potencia radiada aparente máxima. Estos dispositivos deberán utilizar técnicas de acceso y mitigación de interferencias con rendimiento al menos equivalente a las técnicas descritas en las normas armonizadas según la Directiva 2014/53/UE, o alternativamente no sobrepasar el 1% de ciclo de trabajo. Se excluyen las aplicaciones analógicas de video.*”

Es decir, en el desarrollo del proyecto debemos referirnos a esas especificaciones.

Por tanto, podemos concluir que se puede hacer uso de forma gratuita en cualquier banda de frecuencia que nos indique CNAF y atendiendo a los criterios que especifiquen. Un incumplimiento de estas normas puede provocar grandes sanciones.

ATRIBUCIÓN A LOS SERVICIOS según el RR de la UIT			ATRIBUCIÓN NACIONAL	USOS	OBSERVACIONES
<b>460 - 890 MHz</b>			<b>460 - 890 MHz</b>		
Región 1	Región 2	Región 3			
<b>460 - 470</b> FIJO MÓVIL 5.286AA Meteorología por satélite (espacio-Tierra) 5.287 5.288 5.289 5.290	<b>470 - 512</b> RADIODIFUSIÓN Fijo Móvil 5.292 5.293 5.295	<b>470 - 585</b> FIJO MÓVIL 5.296A RADIODIFUSIÓN 5.291 5.298	<b>460 - 470</b> FIJO MÓVIL Meteorología por satélite (espacio-Tierra)	M M R	5.286AA 5.287 5.289 5.311A UN-31, UN-97 UN-154, UN-156
<b>470 - 694</b> RADIODIFUSIÓN 5.149 5.291A 5.294 5.296 5.300 5.304 5.306 5.311A 5.312	<b>512 - 608</b> RADIODIFUSIÓN 5.295 5.297	<b>585 - 610</b> FIJO MÓVIL 5.296A RADIODIFUSIÓN 5.149 5.305 5.306 5.307	<b>470 - 694</b> RADIODIFUSIÓN Móvil terrestre	P P	5.149 5.296 5.306 5.311A Atribución adicional a título secundario al servicio móvil terrestre para aplicaciones auxiliares de la radiodifusión (470-694 MHz) UN-36 TDT
<b>694 - 790</b> MOVIL salvo móvil aeronáutico 5.312A 5.317A RADIODIFUSIÓN 5.300 5.311A 5.312	<b>608 - 614</b> RADIOASTRONOMÍA Móvil por satélite, salvo móvil aeronáutico por satélite (Tierra-espacio)	<b>610 - 890</b> FIJO MÓVIL 5.296A 5.313A 5.317A RADIODIFUSIÓN	<b>694 - 790</b> RADIODIFUSIÓN MÓVIL, salvo móvil aeronáutico	P P	5.311A 5.312A 5.317A UN-36 TDT UN-153
	<b>614 - 698</b> RADIODIFUSIÓN Fijo Móvil 5.293 5.308 5.308A 5.309 5.311A				
	<b>698 - 806</b> MOVIL 5.317A RADIODIFUSIÓN Fijo 5.293 5.309 5.311A	5.149 5.305 5.306 5.307 5.211A 5.320			

ATRIBUCIÓN A LOS SERVICIOS según el RR de la UIT			ATRIBUCIÓN NACIONAL	USOS	OBSERVACIONES
<b>460 - 890 MHz</b>			<b>460 - 890 MHz</b>		
Región 1	Región 2	Región 3			
<b>790 - 862</b> FIJO MÓVIL salvo móvil aeronáutico 5.316B 5.317A RADIODIFUSIÓN 5.312 5.319	<b>806 - 890</b> FIJO MÓVIL 5.317A RADIODIFUSIÓN 5.317 5.318		<b>790 - 862</b> FIJO MÓVIL, salvo móvil aeronáutico	P P	5.316B 5.317A Sistemas terrenales capaces de prestar servicios de comunicaciones electrónicas (790-823/832-862 MHz) UN-151: Dispositivos PMSE (823-832 MHz) UN-153, UN-154
<b>862 - 890</b> FIJO MÓVIL, salvo móvil aeronáutico 5.317A RADIODIFUSIÓN 5.322 5.319 5.323		5.149 5.305 5.306 5.307 5.311A 5.320	<b>862 - 890</b> FIJO MÓVIL, salvo móvil aeronáutico	* *	5.317A 5.322 Sistemas terrenales capaces de prestar servicios de comunicaciones electrónicas (880-890 MHz) UN-39, UN-40, UN-41, UN-111 UN-115 UN-118: MICRÓFONOS SIN HILOS UN-135 RFID, UN-154 * Usos M y C (según notas UN)

Figura 3-3. Ejemplo de CNAF [39].

### 3.2 Fundamentos de los enlaces radioeléctricos

Las características de propagación de una onda dependen de la situación del trayecto de propagación respecto a los obstáculos, de las características eléctricas del terreno, de propiedades físicas del medio y de la frecuencia y polarización de las ondas.

Para que un enlace radioeléctrico pueda ser llevado a cabo es necesario la comunicación entre el emisor y receptor de la señal. La caracterización de un enlace se realiza en términos de balance potencia. Se define pérdida básica de propagación ( $l_b$ ) de un enlace radioeléctrico al cociente entre la potencia transmitida y la potencia recibida:

$$l_b = \frac{p_t}{p_r} \quad (3-1)$$

definida en dB como:

$$L_b(dB) = P_t(dB) - P_r(dB) \quad (3-2)$$

En un sistema de radiocomunicaciones siempre interviene de alguna forma el medio de propagación. Sin embargo, se estudia el caso ideal de propagación en espacio libre como marco de referencia y para la determinación de la pérdida de propagación mínima que cabe esperar en un enlace a la cual se denomina pérdida básica de propagación en espacio libre ( $L_{bf}$ ).

Para ajustar cualquier enlace a la realidad se van añadiendo a esas pérdidas diversas correcciones o atenuaciones adicionales en función de las características específicas del medio de propagación, como son: presencia de obstáculos, desvanecimientos, influencia de la lluvia, gases atmosféricos... De tal modo, definimos

$$L_b = L_{bf} + L_{exc} \quad (3-3)$$

en dB.

La pérdida básica de propagación en espacio libre no depende de la potencia recibida ni transmitida, su valor depende únicamente de la distancia que abarque el enlace y de la longitud de onda empleada.

$$l_{bf} = \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \quad (3-4)$$

tomando  $\lambda = \frac{v}{f}$ , donde  $v = c = 3 * 10^8 \frac{m}{s}$  nos queda:

$$L_{bf}(dB) = 32,45 + 20 \log_{10} f(MHz) + 20 \log_{10} d(km) \quad (3-5)$$

Sin embargo, en la práctica existen condiciones del entorno que afectan a la pérdida de potencia media recibida. Es por ello por lo que muchos métodos de predicción de propagación se limitan a la evaluación de estas pérdidas en exceso.

La propagación de las ondas a través de los medios reales puede estudiarse a partir de las ecuaciones de Maxwell, analizando las soluciones compatibles con las condiciones de contorno que imponga el medio. Sin embargo, tal estudio riguroso es a veces impracticable y en todo caso muy complejo, por lo que para la predicción de pérdidas de propagación se utilizan modelos simplificados basados en la óptica geométrica. Si estos modelos dejan de ser válidos, se acude a expresiones empíricas o curvas de propagación normalizadas obtenidas a partir de mediciones.

### 3.2.1 Influencia del terreno

Si el transmisor y receptor están situados sobre la superficie terrestre y existe visibilidad directa entre ambos, se modela la propagación mediante un rayo directo y otro reflejado en el suelo. Además, en función del terreno, la frecuencia y la polarización de la onda, puede haber también una componente de onda de superficie.

En estas condiciones, la expresión general del campo recibido viene dada mediante la llamada ecuación general de la propagación:

$$e = e_0[1 + R \cdot \exp(-j\Delta) + (1 - R) \cdot A \cdot \exp(-j\Delta)] \quad (3-6)$$



donde:

- $e$ : Intensidad de campo en recepción en las condiciones reales.
- $e_0$ : Intensidad de campo en condiciones de espacio libre debido al rayo directo.
- $e_0 \cdot R \cdot \exp(-j\Delta)$ : Intensidad de campo recibido debido al rayo reflejado.
- $e_0 \cdot (1 - R) \cdot A \cdot \exp(-j\Delta)$ : Intensidad de campo recibido debido a la onda de superficie.
- $\Delta$ : Ángulo de desfase entre la componente directa y la reflejada.
- $R$ : Coeficiente de reflexión en el suelo.
- $A$ : Atenuación por la onda de superficie

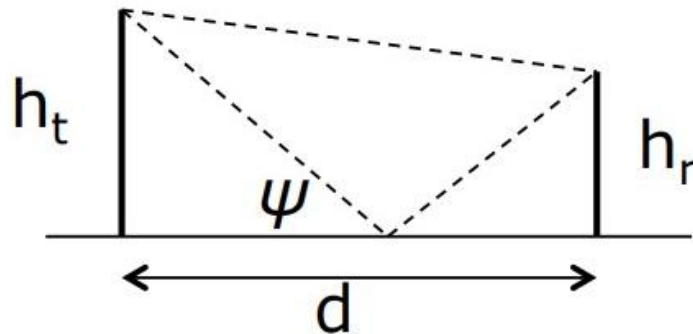


Figura 3-4. Modelo de rayo directo y reflejado.

De este modo, la atenuación en exceso será:

$$L_{ex}(dB) = 20 \log_{10} |E_0/E| = 20 \log_{10} \frac{1}{|1 + R \cdot \exp(-j\Delta) + (1 - R) \cdot A \cdot \exp(-j\Delta)|} \quad (3-7)$$

$$L_{ex}(dB) = -20 \log_{10} |1 + R \cdot \exp(-j\Delta) + (1 - R) \cdot A \cdot \exp(-j\Delta)| \quad (3-8)$$

$$\text{donde } \Delta = \frac{2\pi\Delta l}{\lambda} \text{ y } R = |R|e^{-j\beta}$$

Con  $\Delta l$  diferencia de recorridos entre el rayo reflejado y el rayo directo y  $\lambda$  la longitud de onda.

Para distancias grandes y alturas de las antenas reducidas, el ángulo de incidencia del rayo reflejado con el suelo es muy pequeño, provocando  $\beta \approx \pi$  y  $R = -1$ . La propagación por onda de superficie resulta útil cuando la frecuencia es inferior a 10 MHz.

### 3.2.2 Modelo de propagación en tierra plana

El modelo de Tierra plana o modelo de propagación de dos rayos es aplicable a distancias cortas para las que puede despreciarse la curvatura terrestre y se supone terreno liso. Además, la componente de onda de superficie puede despreciarse excepto para frecuencias inferiores a 150 MHz, alturas de antenas reducidas y polarización vertical. En el caso de frecuencias inferiores a 10 MHz la componente de onda de superficie es dominante. En nuestro caso se puede despreciar la componente de onda de superficie. Se obtiene:

$$\begin{aligned} L_b(dB) &= L_{bf}(dB) + L_{ex}(dB) \\ &= 32.5 + 20 \log_{10} f(MHz) \\ &\quad + 20 \log_{10} d(km) - 10 \log_{10}(1 + |R|^2 + 2|R| \cos(\Delta + \beta)) \end{aligned} \quad (3-9)$$

Mediante consideraciones geométricas se obtiene:

- Ángulo de incidencia:  $\Psi = \text{atan} \frac{h_t + h_r}{d}$
- Diferencias de trayectos:  $\Delta l = \frac{2h_t h_r}{d}$
- Diferencia de fase:  $\Delta = \frac{4\pi h_t h_r}{\lambda d}$

Además, si ocurre que  $d \gg h_t, h_r$  entonces  $\Psi \rightarrow 0$ ,  $|R| \rightarrow 1$  y  $\beta \rightarrow \pi$ . Bajo estas condiciones se define el “Modelo de Tierra Plana”. Mediante cálculos básicos, se define la pérdida básica de propagación como:

$$L_b \approx \frac{\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2}{\left(\frac{4\pi h_t h_r}{\lambda d}\right)^2} = \frac{d^4}{(h_t h_r)^2} \quad (3-10)$$

$$L_b(\text{dB}) = 120 + 40 \log_{10} d(\text{km}) - 20 \log_{10} h_t(\text{m})h_r(\text{m}) \quad (3-11)$$

### 3.2.3 Modelo de Okumura-Hata

El método de Okumura-Hata fue desarrollado para aplicaciones de radiocomunicaciones móviles. Okumura obtuvo una serie de curvas normalizadas como resultado de una campaña de medidas efectuadas en Japón. Estas curvas proporcionan valores de la intensidad de campo para medio urbano, con diferentes alturas efectivas de antenas y para diferentes bandas de frecuencias, comprendidas entre 150 y 1.500 MHz. Además, para estas curvas toma como altura de la antena de recepción 1,5 m y una PRA (*potencia radiada aparente*) de 1 kW.

Para poder informatizar el método, mediante análisis de regresión múltiple sobre las curvas de propagación de Okumura, Hata obtuvo unas expresiones numéricas para la pérdida básica de propagación,  $L_b$ , para medios urbanos, suburbanos y rurales sobre terreno poco ondulado.

$$L_b = 69,55 + 26,16 \log_{10} f (\text{MHz}) - 13,86 \log_{10}(h_t(\text{m})) - a(h_r) + (44,9 - 6,55 \log_{10} h_t(\text{m}))(\log_{10} d(\text{km})^b) \quad (3-12)$$

donde:

$f$ : Frecuencia, en MHz, en la gama  $150 \leq f \leq 1500 \text{ MHz}$

$h_t$ : Altura efectiva de la antena de transmisión (m), en la gama  $30 \leq h_t \leq 200 \text{ m}$

$h_r$ : Altura sobre el suelo de la antena de recepción (m), en la gama  $1 \leq h_r \leq 10 \text{ m}$

$d$ : Distancia (km)

$b = 1 + (0,14 + 0,000187f + 0,00107h_t)[\log_{10}(0,05d)]^{0,8}$  si  $d > 20 \text{ km}$

$b = 1$ , si  $d \leq 20 \text{ km}$

Si la altura de la antena de recepción es  $h_r \neq 1,5 \text{ m}$ , se hace una corrección sobre  $a(h_r)$ , distinguiendo entre:

Ciudad media-pequeña:  $a(h_r) = (1,1 \log_{10} f - 0,7)h_r - (1,56 \log_{10} f - 0,8)$

Ciudad media-pequeña:  $a(h_r) = (1,1 \log_{10} f - 0,7)h_r - (1,56 \log_{10} f - 0,8)$

Ciudad grande:  $a(h_r) = 8,29(\log_{10} 1,54h_r)^2 - 1,1$  si  $f \leq 200 \text{ MHz}$

$a(h_r) = 3,2(\log_{10} 11,75h_r)^2 - 4,97$  si  $f \geq 400 \text{ MHz}$

Para entornos suburbanos o rurales se introducen correcciones sobre la pérdida básica de propagación:

$$\text{Zona suburbana:} \quad L_{bs} = L_b - 2 \left[ \log_{10} \left( \frac{f}{28} \right) \right]^2 - 5,4 \quad (3-13)$$

$$\text{Zona rural:} \quad L_{br} = L_b - 4,78(\log_{10} f)^2 + 18,33 \log_{10} f - 40,94 \quad (3-14)$$

El método de Hata-Cost231 es una extensión de este método donde se ha obtenido una nueva expresión para las pérdidas básicas de propagación para el rango 1.500 – 2.000 MHz, teniendo en cuenta que la distancia no puede superar los 20 km.

$$L_b = 46,3 + 33,9 \log_{10} f - 13,82 \log h_t - a(h_r) + (44,9 - 6,55 \log_{10} h_t) \log_{10} d + c_m \quad (3-15)$$

### 3.2.4 Modelo de pérdida *log-distance*

Tras realizar combinaciones entre resultados teóricos y mediciones de campo, se ha determinado que la potencia media de la señal recibida muestra una disminución logarítmica con la distancia entre transmisor y receptor obteniéndose la pérdida básica de propagación que determina el modelo cómo:

$$\overline{PL(d)(dB)} = L_b(d)(dB) = \overline{PL(d_0)} + 10\eta \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) \quad (3-16)$$

donde:

$\overline{PL(d_0)}$ : pérdidas básicas a la distancia  $d_0$  del transmisor.

$d_0$ : distancia de referencia.

$\eta$ : índice de pérdidas básicas que varía en función del medio de propagación, creciente cuantos más obstáculos haya en el enlace.

A partir de este punto, denotaremos la pérdida básica de propagación  $L_b(d)(dB)$  como  $\overline{PL(d)(dB)}$ .

### 3.2.5 Modelo de sombra *log-normal* LNSM

El modelo LNSM (del inglés, *log-normal shadowing model*) es un modelo de propagación más general que puede ser usado en entornos exteriores e interiores ajustando los parámetros del modelo. Estos parámetros se obtienen a partir del medio que se quiera estudiar.

$$PL(d)(dB) = \overline{PL(d)} + X_\sigma = \overline{PL(d_0)} + 10\eta \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma \quad (3-17)$$

donde:

$d_0$ : distancia de referencia.

$\eta$ : índice de pérdidas básicas que varía en función del medio de propagación, creciente cuantos más obstáculos haya en el enlace.

$X_\sigma$ : variable aleatoria Gaussiana de media cero, útil para describir la interferencia producida en las señales RSSI.

Este modelo puede ser usado para el diseño y análisis general de sistemas inalámbricos. De todos los modelos mencionados en este apartado, el modelo de sombra log-normal es el que más se ajusta a las redes inalámbricas de sensores debido a su naturaleza universal y a la posibilidad de ser configurado con el entorno. En este proyecto

se hace uso de este modelo, por lo que posteriormente se aportará más información sobre el modelo y se detallarán los pasos seguidos para obtener los parámetros configurables.

### 3.3 Desvanecimientos

La propagación de las señales radioeléctricas a través de diversos medios está sujeta a la variabilidad de las características físicas de estos medios. Se denomina desvanecimiento a toda disminución de la potencia recibida de señal con relación a su valor nominal. Se define potencia recibida nominal al valor mediano de la potencia recibida.

Se llama profundidad del desvanecimiento a la diferencia entre el nivel nominal y el nivel recibido en condiciones de desvanecimiento, se expresa en dB. Finalmente, al intervalo de tiempo que media entre la disminución y la recuperación del nivel nominal, se le llama duración del desvanecimiento.

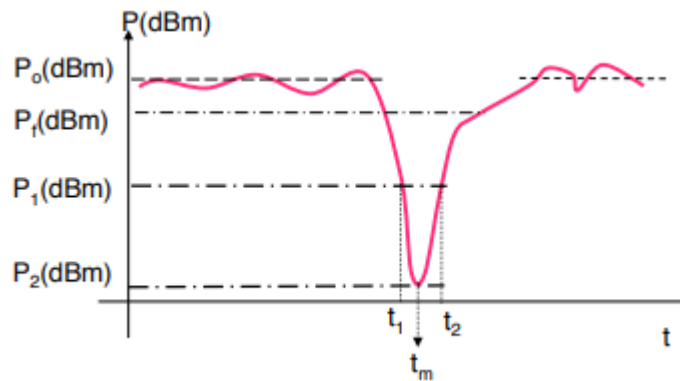


Figura 3-5. Ejemplo de señal que sufre desvanecimiento.

En la Figura 3-5 se puede apreciar un ejemplo de una señal que sufre dos desvanecimientos, en  $t = t_1$ ,  $F_1 = P_0 - P_1$ , y en  $t = t_m$ ,  $F_2 = P_0 - P_2$ . En este caso, la duración del desvanecimiento  $F_1$  es  $\tau_1 = t_2 - t_1$ .

La expresión del desvanecimiento puede hacerse en términos de la tensión de envolvente de la señal, llamando  $r$  a la tensión, se tiene:

$$F_1 = P_0 - P_1 = 20 \log_{10} \frac{r_0}{r_1} \quad (3-18)$$

Existen diferentes criterios para clasificar los desvanecimientos. En la Tabla 3-2, se muestra clasificación de los tipos de desvanecimientos en función de las características por las que pueda verse afectado un radioenlace.

<i>Característica</i>	<i>Tipo de desvanecimiento</i>	
<b>Profundidad</b>	Profundo ( ~ 3 dB)	Muy profundo ( > 20 dB)
<b>Duración</b>	Lento	Rápido
<b>Característica espectral</b>	Plano	Selectivo
<b>Mecanismo de producción</b>	Factor k	Multitrayecto
<b>Distribución probabilística</b>	Gaussiano	Rayleigh/Rice
<b>Dependencia temporal</b>	Continuado	Puntual

Tabla 3-2. Clasificación de los tipos de desvanecimientos [6].

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

### 3.3.1 Desvanecimientos por factor K

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

Son desvanecimientos lentos de larga duración, con hasta 6 dB de profundidad, que variarán con la frecuencia, pero a gran escala, es decir, de una banda a otra, pero no dentro la misma banda. Son, por tanto, desvanecimientos planos. Este desvanecimiento también puede producirse por mecanismos de superrefracción y formación de conductos que desenfocan el haz radioeléctrico.

Para modelarlo se recurre a una variable gaussiana o a expresiones empíricas. Los desvanecimientos de factor k pueden evitarse controlando las alturas de las antenas.

### 3.3.2 Desvanecimiento multirrayecto

Los desvanecimientos multirrayecto 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 debido a la reflexión en el suelo o en capas atmosféricas. La señal resultante es la suma de una componente prácticamente constante (señal directa) y otras componentes de amplitudes variables y fases aleatorias, dando una resultante que puede tener una amplitud variable en función de las amplitudes y fases instantáneas de las componentes. Este tipo de desvanecimiento suele ser muy profundo y selectivo en frecuencia.

El desvanecimiento multirrayecto en ocasiones produce una importante atenuación y distorsión en la señal recibida, por lo que afecta directamente a la calidad del sistema de radiocomunicación, de ahí la importancia de su estudio.

Cuando existe una componente dominante, entonces la señal resultante tiende a distribuirse según una estadística de Rice, como puede ser un radioenlace. Si no existe una componente dominante, es decir, las componentes tienen amplitudes instantáneas similares, la señal resultante tiende a distribuirse según una estadística de Rayleigh, como puede ocurrir en un sistema de comunicaciones móviles.

En la Figura 3-6 se pueden apreciar dos situaciones de desvanecimientos. En un primer tramo, se puede apreciar un centelleo. En el segundo tramo se observa un desvanecimiento intenso debido a propagación multirrayecto.

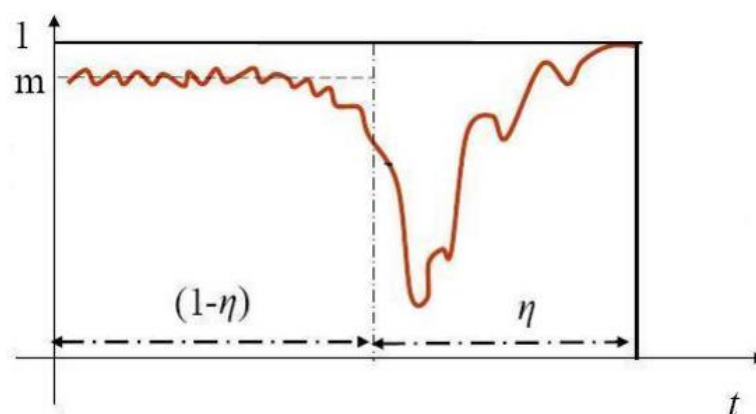


Figura 3-6. Variación temporal de la amplitud de envoltura de la señal recibida.

Donde:

$\eta$ : factor de actividad de multirrayecto, porcentaje de tiempo durante el cual el desvanecimiento es de tipo multirrayecto

$1 - \eta$ : porcentaje de tiempo de propagación en condiciones normales.

El parámetro  $\eta$  es una variable aleatoria cuya estadística depende del periodo de observación y de condiciones meteorológicas.

### 3.3.3 Estadísticas del desvanecimiento

Para cumplir con los niveles de calidad establecidos en las recomendaciones para los sistemas de radiocomunicación se deben predecir ciertos criterios, entre ellos:

- Evaluar la probabilidad de que se rebase una determinada profundidad de desvanecimiento  $F$ (dB).
- En ocasiones se debe predecir la duración media de los desvanecimientos.
- Se predice la frecuencia de los desvanecimientos, es decir, el número de desvanecimientos de profundidad superior a  $F$  por unidad de tiempo.

Para modelar estos criterios se utilizan distribuciones estadísticas de Rayleigh, Rice u otras obtenidas experimentalmente que se traducen en expresiones empíricas. En función del valor que tome  $F$ , pueden aplicarse diferentes distribuciones estadísticas:

- Si  $F$  es pequeña, normalmente centello  $F \approx 2 - 5$  dB, puede aplicarse una gaussiana. En este caso, la probabilidad de rebasar  $F$  se expresa

$$P_G(F) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{F}{\sigma_G}\right)$$

donde  $\operatorname{erfc}(x)$  es la función de error complementaria y  $\sigma_G$  la desviación típica de la distribución.

- Si  $F$  es grande,  $F > 15$  dB,  $P_G(F) \approx 0$ , se aplican estadísticas derivadas de la función de Rayleigh.

Para valores intermedios se usan métodos de interpolación.

## 3.4 Indicador de fuerza de la señal recibida (RSSI)

El indicador de fuerza de la señal recibida conocido como RSSI (del inglés, *Received Signal Strength Indicator*) define una escala de referencia para medir el nivel de potencia de las señales recibidas. Se trata de una extensión de la intensidad de señal recibida conocida como RSS (del inglés, *Received Signal Strength*) para dispositivos integrados.

RSSI surge ante la necesidad de establecer la distancia a la que se encuentra un componente de la WSN. La relación entre los valores RSSI y la distancia es la base y la clave de las tecnologías de determinación de distancia y posicionamiento en las redes de sensores inalámbricos.

### 3.4.1 Métodos de localización

La necesidad de conocer la ubicación de los nodos sensores ha provocado que se hayan definido diferentes algoritmos de localización en los que es necesario conocer la distancia a la cual se encuentra el dispositivo.

A continuación, se definen los métodos de localización basados en alcance más destacados [5]:

- Método basado en tiempo de llegada (ToA, *Time of Arrival*). Se calcula el tiempo que tarda en llegar la señal transmitida entre dos nodos vecinos, por lo que requiere de una buena sincronización del tiempo. Conocida la velocidad de propagación  $v$  y obtenidos los tiempos se puede calcular la distancia como:

$$d = \frac{((T_3 - T_0) - (T_2 - T_1)) \times v}{2} \quad (3-19)$$

En la Figura 3-7 se aclara el significado de los parámetros que aparecen en la ecuación.

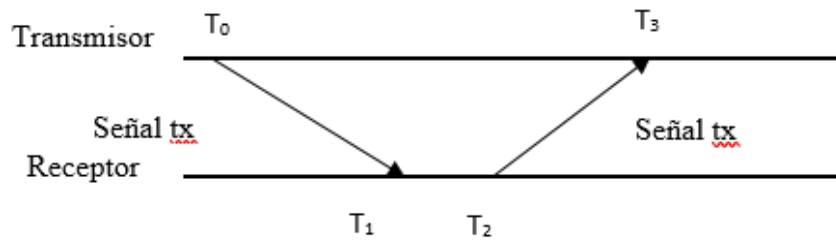


Figura 3-7. Esquema de tiempos ToA [5].

- Método basado en la diferencia de tiempo de llegada (TDoA, *Time Difference of Arrival*). Se trata de un método similar a ToA, pero en este caso es necesario el envío de dos señales que viajan a diferentes velocidades, como pueden ser de ultrasonido (US) y radiofrecuencia (RF). De este modo, la sincronización entre transmisor y receptor no es importante, pero sí es necesario dotar a cada nodo de dos tipos de emisores y receptores. De este modo, se calcula la distancia como:

$$d = (T_{US} - T_{RF}) \times \left( \frac{v_{RF} \times v_{US}}{v_{RF} - v_{US}} \right) \quad (3-20)$$

- Método basado en la intensidad de la señal recibida (RSS, *Received Signal Strength*). Como ya se ha comentado, cuando una señal es transmitida de un punto transmisor a un punto receptor sufre una atenuación debida a la distancia que comprende el trayecto. La ventaja de este método reside en que necesita menos gastos de comunicación, menor complejidad de implementación y menor costo. Sin embargo, se deben considerar otros posibles factores de atenuación que afectan directamente al enlace como pueden ser desvanecimientos o la influencia del terreno.

### 3.4.2 Relación del indicador de RSSI con la distancia

El principio del alcance RSSI describe la relación entre la potencia transmitida y la potencia recibida de señales inalámbricas y la distancia entre ambos nodos. Esta relación es descrita en (3-21)

$$P_r = k \cdot P_t \cdot \left( \frac{1}{d} \right)^n \quad (3-21)$$

donde:

- $P_r$ : Potencia recibida de la señal inalámbrica
- $P_t$ : Potencia transmitida de la señal inalámbrica
- $d$ : distancia entre los nodos transmisor y receptor
- $n$ : coeficiente de transmisión cuyo valor depende del medio
- $k$ : constante determinada por la frecuencia, ganancias de las antenas transmisora y receptora, factor de pérdidas...

Si se aplica 10 veces el logaritmo a ambos lados de la ecuación (3-21), se obtiene:

$$10 \log_{10} P_r = 10 \log_{10} k + 10 \log_{10} P_t - 10n \log_{10} d \quad (3-22)$$

Sobre la ecuación (3-22) se aplica concepto de *dBm*:

$$P_R(\text{dBm}) = A - 10n \log_{10} d \quad (3-23)$$

Donde el parámetro A de la ecuación (3-23) determina la relación entre RSS y la distancia de la señal transmitida. Actualmente, los modelos de propagación sobre los que se hace uso de señales RSSI para redes de sensores

inalámbricas son los modelos de espacio libre, modelo de Tierra plana y modelo de sombra log-normal, definidos en detalle en apartado 3.2. En función del modelo elegido, la  $P_r$  podrá tomar diferentes expresiones.



# 4 NODOS SENSORES USADOS

---

*Don't ever let someone tell you that you can't do something, not even me. If you got a dream, you gotta protect it. When people can't do something themselves, they're gonna tell you that you can't do it. If you want something go get it.*

*No permitas que nadie diga que eres incapaz de hacer algo, ni siquiera yo. Si tienes un sueño, debes conservarlo. Cuando la gente no logra conseguir sus sueños, suele decirles a los demás que tampoco cumplirán los suyos. Si quieres algo, sal a buscarlo.*

*- Will Smith, En busca de la felicidad -*

Para el desarrollo del proyecto se han utilizado cuatro sensores, tres de ellos actuando como transmisores y un nodo central como receptor actuando de pasarela para trasladar los datos recibidos por radiofrecuencia a la estación base que, en este caso, ha sido un portátil. El nodo receptor y el portátil han sido conectados a través de un puerto USB, que se ha habilitado en el nodo receptor. Los sensores han estado trabajando usando modulación LoRa, en la banda ISM de 868 MHz.

## 4.1 Hardware

Las motas han sido proporcionadas por el grupo comercial Sigrow Agtech SL. Estos sensores están destinados para el desarrollo de sistemas de monitorización modulares e inalámbricos para la producción agrícola.

Respecto a la placa, se trata de un circuito a medida con el microcontrolador STM32. Además, lleva integrado un transceptor de largo alcance de baja potencia denominado SX1272 desarrollado por Semtech para trabajar con tecnología LoRa. Semtech es un proveedor líder de semiconductores analógicos y de señal mixta de alto rendimiento y algoritmos avanzados que ha patentado la modulación empleada con LoRa. En la Figura 4-1 se puede observar la placa utilizada. Entre otros elementos que posee, destacan:

- Sensores para medida de temperatura, humedad y radiación activa de la fotosíntesis.
- Dos ledes para indicar si la transmisión ha sido correcta, azul, o incorrecta, rojo.
- Una antena helicoidal de diez vueltas en los nodos transmisores con una ganancia de  $2.15 + 0.5 \text{ dBi}$  y una antena  $\lambda/2$  tipo dipolo en el nodo receptor con una ganancia de  $5 \pm 0.7 \text{ dBi}$ .
- Un botón manual para enviar los datos de forma asíncrona.
- Los nodos transmisores presentan como fuente de alimentación dos pilas AA, mientras que el nodo que actúa como receptor se conecta directamente al PC y de ahí obtiene la energía.
- Además, posee un módulo compuesto por transmisor, receptor y tierra para cuando sea necesario conectar el nodo con otros dispositivos por cable.

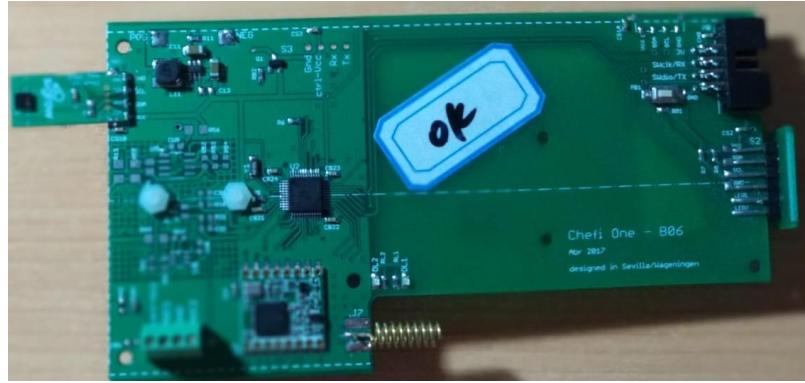


Figura 4-1. Nodo sensor utilizado.

El transceptor ofrece la posibilidad de trabajar en el rango comprendido entre 860-1020 MHz con diferentes anchos de bandas y diferentes factores de ensanchado comprendidos entre 6 y 12. Además, ofrece la posibilidad de ser configurado con diferentes modulaciones como FSK, GFSK, MSK, GMSK, LoRa y OOK. Seleccionando modulación LoRa, el procesador presenta las siguientes características:

- Rango de frecuencias: 860 – 1020 MHz
- Factor de ensanchado: 6 – 12
- Ancho de banda: 125 – 500 kHz
- Tasa de bits efectiva: 0,24 – 37,5 kbps
- Sensibilidad: –117 hasta – 137 dBm

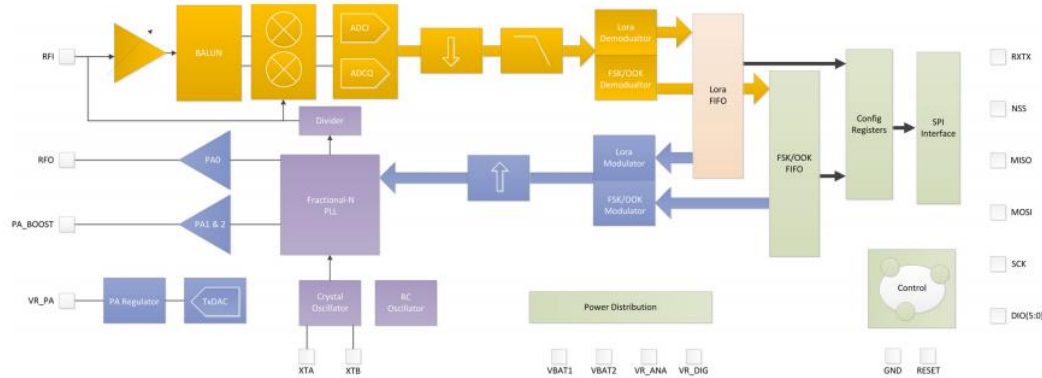


Figura 4-2. Diagrama de bloques del procesador SX1272 [28].

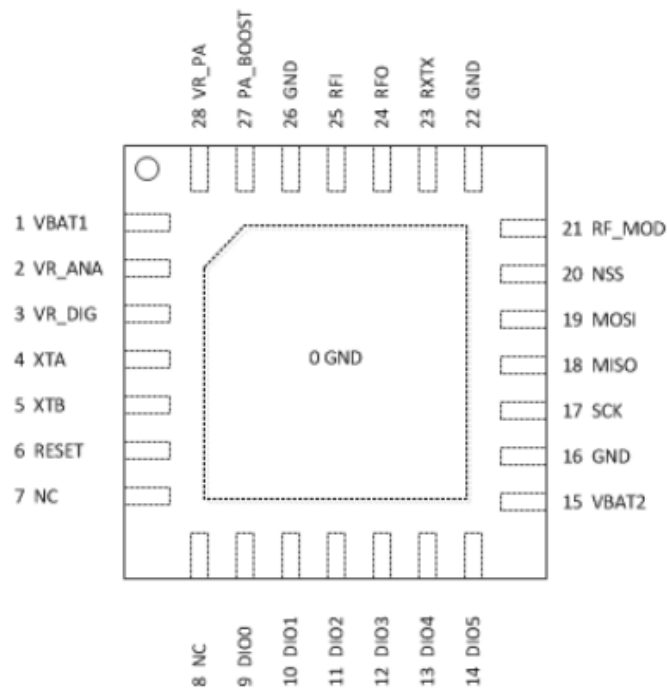


Figura 4-3. Esquemático del procesador visto desde arriba [28].

Este transceptor es utilizado en aplicaciones de diversos campos relacionados con IoT, como pueden ser:

- Lecturas automáticas en medidores.
- Automatización de viviendas y edificios.
- Alarma inalámbrica y sistemas de seguridad.
- Monitorización y control industrial.
- Sistemas de riego de largo alcance.

Entre todas las posibilidades que ofrece, permite obtener el dato RSSI de la transmisión. Este será el parámetro recibido que someteremos a estudio.

La lógica de funcionamiento de la mota es muy sencilla:

- Cada cierto tiempo, configurado previamente, o a través del botón manual los sensores envían los datos al microcontrolador.
- Una vez que el microcontrolador ha recibido los datos, se comunica con el transceptor para realizar el envío de los paquetes.
- Cuando los paquetes han sido enviados, se recibe una señal de asentimiento por parte del *gateway*, si todo ha ido bien el sensor pasa a modo “*sleep*”.

En caso de que haya algún problema, el sensor lo comunica a través de uno de los ledes.

## 4.2 Características de transmisión: LoRa y LoRaWAN

En el punto 2.3.4 se ha hecho una breve descripción de la tecnología LoRa. A lo largo de este capítulo, se revisará y se complementará con datos más técnicos.

En primer lugar, se debe aclarar que cuando se habla de LoRa nos estamos refiriendo a la técnica de modulación empleada, mientras que LoRaWAN es un protocolo para redes de área extensa de baja potencia, LPWAN, que implementa la tecnología LoRa.

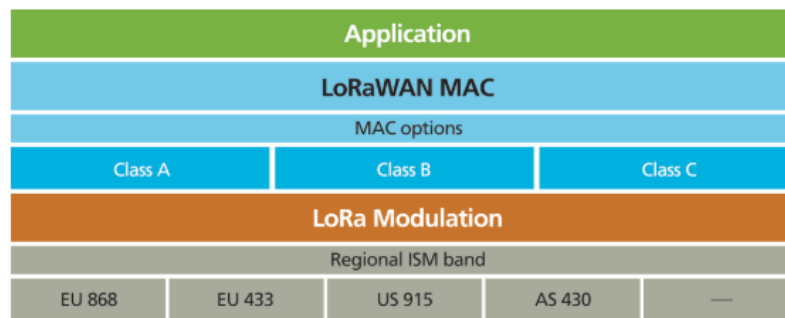


Figura 4-4. Modelo de capas de la tecnología LoRa [26].

La tecnología LoRa ofrece una solución eficiente, flexible y económica para problemas del mundo real en casos de uso rural e interior donde las redes celulares, Wi-Fi o Bluetooth son ineficaces.

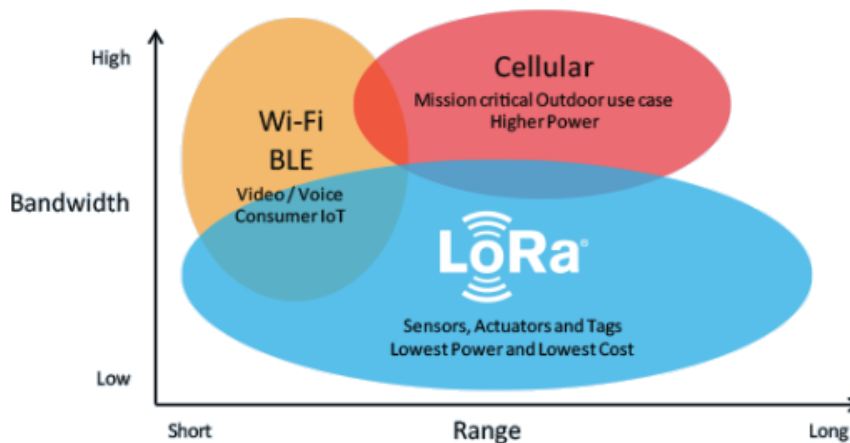


Figura 4-5. Comparativa de la relación distancia - ancho de banda entre LoRa y otras tecnologías [26].

#### 4.2.1 Modulación LoRa

LoRa emplea una técnica de modulación de espectro ensanchado *chirp*, conocida como CSS (del inglés, *Chirp Spread Spectrum*), con diferentes factores de ensanchado (SF, *Spreading Factors*) y anchos de bandas (Bw, *Bandwidth*) para optimizar la modulación, de forma que se pueda cumplir con la cobertura y los requisitos de tasa de datos. En función de los requisitos necesarios, modificando SF y Bw se consigue obtener mayor cobertura a menor velocidad o viceversa [2].

La modulación CSS es una técnica de espectro ensanchado que utiliza impulsos *chirp* modulados en frecuencia de banda ancha para codificar información. Un *chirp* es una señal sinusoidal en la cual la frecuencia aumenta o disminuye con el tiempo.

Como ya se ha comentado, LoRa está diseñado para trabajar en las bandas ISM y presenta diferentes parámetros de configuración en función de la región en la que se emplee. En concreto, en Europa se tiene:

- Rango de frecuencias: 867 – 869 MHz
- Número de Canales: 10
- Ancho de banda: 125 kHz
- Potencia de transmisión: 14 dBm
- Factor de ensanchado: 7 – 12
- Tasa de bits: 0,25 – 50 kbps

Las principales ventajas que presenta LoRa como tecnología son las siguientes:

- Alta tolerancia a las interferencias
- Alta sensibilidad para recibir datos
- Bajo Consumo (hasta 10 años con una batería)
- Largo alcance teórico, de 10 a 20 km

#### 4.2.2 Protocolo LoRaWAN

LoRaWAN es un protocolo de red de capa de enlace que utiliza la tecnología LoRa para comunicar y administrar dispositivos. Entre sus características destacan:

- Topología en estrella, es decir, los dispositivos finales se conectan directamente con el elemento central.
- Bidireccional, por lo que permite la entrega fiable de mensajes mediante confirmaciones.
- Encriptación de los paquetes extremo a extremo para seguridad y privacidad de datos.
- Registro en el aire de nodos finales y capacidad de multidifusión.
- Gracias al estándar elaborado por LoRa Alliance, se garantiza la interoperabilidad con el resto de redes.

*LoRa Alliance* es una organización sin ánimo de lucro comprometida a permitir el despliegue a gran escala a las redes LPWAN a través del desarrollo y la promoción del estándar abierto LoRaWAN. Entre sus funciones se encuentra la elaboración de las especificaciones del protocolo, así como la certificación de los productos.

En las especificaciones de LoRaWAN se definen tres clases de dispositivos de nodo final. Todos ellos permiten la comunicación bidireccional. Sin embargo, presentan diferencias en el enlace descendente, es decir, cuando un nodo final recibe un mensaje del *gateway*.

- Dispositivos finales bidireccionales (Clase A): Son los dispositivos que presentan menor consumo de energía. Sin embargo, el enlace descendente solo está habilitado un tiempo corto justo después de que el nodo final haya transmitido. Si se quiere volver a hacer uso del enlace descendente se debe esperar a que, desde el nodo final, se vuelva a usar el enlace ascendente. Por tanto, solo existen dos ventanas de recepción. Estos dispositivos suelen usarse de forma síncrona, es decir, se programa para que envíen datos cada cierto tiempo, o mediante eventos, es decir, si el parámetro que se está controlando supera cierto umbral.
- Dispositivos finales bidireccionales con ranuras de recepción programadas (Clase B): Permiten más ranuras de recepción. Además de las ventanas de recepción aleatorias de clase A, los dispositivos de clase B abren ventanas de recepción adicionales a horas programadas. Para que el dispositivo final abra su ventana de recepción a la hora programada, recibe una trama de sincronización en el tiempo desde el *gateway*.
- Dispositivos finales bidireccionales con ranura de recepción máxima (Clase C): Estos dispositivos tienen ventanas receptoras casi continuamente abiertas, solo se cierran cuando transmiten. Los dispositivos finales de clase C usarán más energía para operar que la clase A o la clase B, pero ofrecen la latencia más baja para la comunicación entre el servidor y el dispositivo final.

### 4.3 Software

Los datos recibidos en el nodo receptor son enviados al PC a través del puerto serie USB habilitado. Para mostrar la información recibida por el puerto serie se ha utilizado el software CoolTerm 1.4.7.

CoolTerm es una sencilla aplicación de terminal para puerto serie que es capaz de intercambiar datos con el hardware conectado a través del serial. Presenta las siguientes características:

- Capacidad de múltiples conexiones concurrentes si hay múltiples puertos seriales disponibles.
- Visualización de datos recibidos en texto plano o formato hexadecimal.

- Envío de datos mediante pulsaciones de teclas, así como un diálogo "Enviar cadena" que admite la entrada de datos en formato de texto plano o hexadecimal.
- Envío de datos mediante copiar y pegar texto en la ventana del terminal.
- Envío de archivos de texto.
- Capacidad de capturar datos recibidos en archivos de texto.
- Eco local de los datos transmitidos.
- Eco local de los datos recibidos (*loop back to sender*).
- Hardware (CTS, DTR) y control de flujo de software (XON).
- Indicadores de estado de línea visual.
- Capacidad de alternar manualmente estados de línea de ciertas señales de comunicación cuando el control de flujo de hardware está desactivado.
- Carácter configurable y retardos de línea.
- Capacidad de guardar y recuperar opciones de conexión.

Este programa está disponible para varios sistemas operativos, en nuestro caso se ha utilizado sobre Windows 10.

Una vez que ha sido descargado e instalado correctamente se debe configurar con los parámetros correctos. En nuestro caso, se presenta una interfaz, como aparece en la Figura 4-6, donde se debe seleccionar el puerto serie, la velocidad debe ser configurada a 9.600 baudios y la tasa de bits a 8. El resto de los parámetros se deben dejar como vienen por defecto.

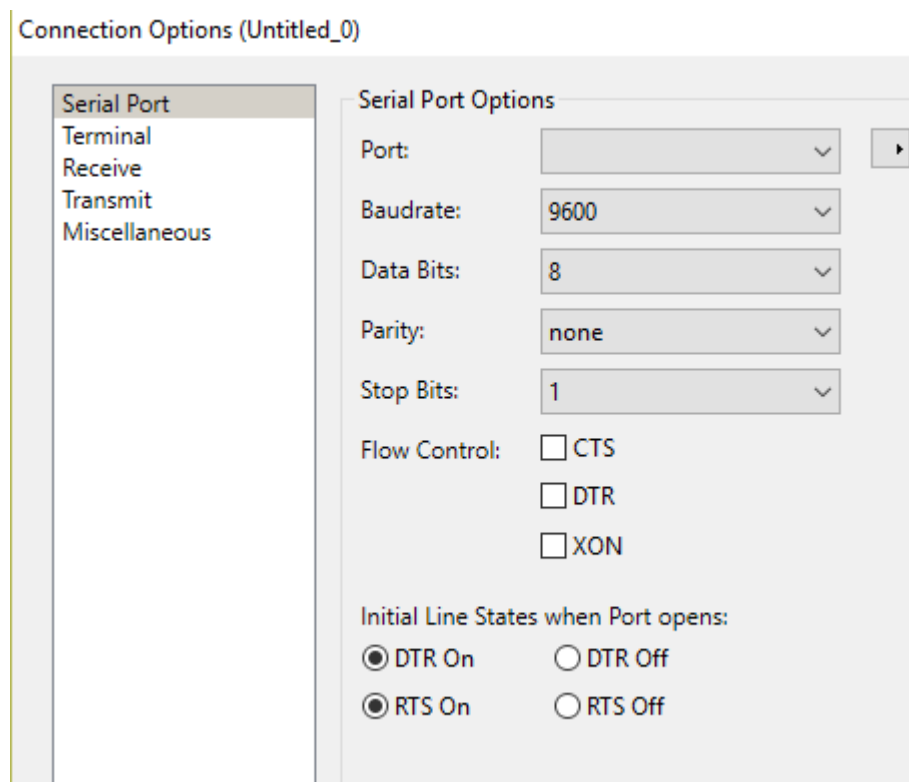


Figura 4-6. Interfaz de CoolTerm para configurar los diferentes parámetros de la comunicación serie.

Tras la configuración, se muestra una segunda ventana donde irán apareciendo los mensajes que la pasarela vaya recibiendo de los nodos finales. En la Figura 4-7 se muestra un mensaje recibido de un nodo final, en concreto por el nodo etiquetado como 52.122.

```
RN-ID: 52122  
T-Sample: 300  
PAR: 266  
VISIBLE_IR: 1250  
IR: 5415  
RSSI: 14  
Received Data send upwards  
radio receive: rxBytes=23,CRC ok,Firmware_CRC ok,valid ok [...87E4D40C0900...]
```

Figura 4-7. Mensaje recibido por el nodo receptor.

Debemos mencionar que el valor recibido para RSSI está en complemento a dos y se deben realizar operaciones sobre él para conseguir el valor de la potencia recibida correcta.





# 5 DESARROLLO TEÓRICO

---

*There is a driving force more powerful than steam,  
electricity and atomic energy: the will.*

*Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la  
electricidad y la energía atómica: la voluntad.*

- Albert Einstein -

El desarrollo de este Trabajo Fin de Grado se basa en el artículo titulado “Modelo de medida de la distancia basado en RSSI en WSN” desarrollado por los autores Jiuqiang Xu, Wei Liu, Fenggao Lang, Yuanyuan Xhang y Cheglong Wang. Este artículo fue publicado en 2010 en la revista *Wireless Sensor Network*. A lo largo de este apartado se detallarán y comentarán los resultados obtenidos en dicho artículo.

En el apartado 3.2.5 de este documento ya se hace referencia al modelo de sombra logarítmico-normal. Para determinar el modelo se deben ajustar los valores de  $PL(d_0)$ ,  $\eta$  y  $X_\sigma$  adecuados para el entorno en el que se esté trabajando. Sin embargo, el principal problema que presenta este modelo es que no es posible autoadaptarse si el medio cambia.

La finalidad del artículo consiste en establecer una función que relacione la dispersión  $\sigma$  y la distancia de propagación de la señal  $d$  considerando una variable aleatoria Gaussiana de media cero. Se debe hacer uso del método de mínimos cuadrados LS (del inglés, *Least Squares*) para determinar los coeficientes que permitan mejorar la auto-adaptabilidad del modelo. El resultado de aplicar estos cálculos se denomina modelo de sombra logarítmico normal con varianza dinámica conocida en inglés como *Log-Normal Shadowing Model with dynamic variance (LNSM-DV)*.

## 5.1 Mejora de la auto-adaptabilidad de valores Gaussianos en LNSM

En el artículo se detalla un experimento realizado con más de un centenar de grupos de datos intensidad de señal-distancia (RSSI,d) por nodos MICAz en distintos puntos de distancia desde 0 a 6,1 metros. De estos grupos de datos, se seleccionan 20 grupos para determinar las curvas de RSSI y distancia.

En la Figura 5-1 se puede diferenciar el comportamiento de las curvas en tres tramos:

- De 0 a 3 metros todas las curvas tienen un comportamiento parecido y no se aprecia gran diferencia entre ellas.
- De 3 a 5 metros las curvas presentan una mayor dispersión, pero en general tienen una tendencia creciente.
- De 5 a 6.1 metros el crecimiento de las curvas es más lineal, pero presenta menor dispersión.

Como ha quedado demostrado, podemos decir que la dispersión de los valores de RSSI muestra una cierta regularidad con los cambios de la distancia.

El objetivo siguiente consiste en describir cómo se producen las variaciones RSSI con la distancia, para ello, se hace un experimento para conseguir las muestras de la varianza de 100 valores de RSSI recogidos a determinadas distancias. En la Figura 5-2, dibujados como cuadrados verdes, se representan los cambios de la varianza con la distancia.

Como se puede observar, la varianza muestral se ha visto sometida al mismo proceso que el descrito para la Figura 5-1, es decir, ha pasado del proceso de relativamente estable a aumentar progresivamente hasta el máximo y luego ha bajado de forma gradual. Se puede concluir que, para las redes inalámbricas de sensores, la varianza

muestral puede usarse para describir las variaciones de las señales RSSI a lo largo de la distancia.

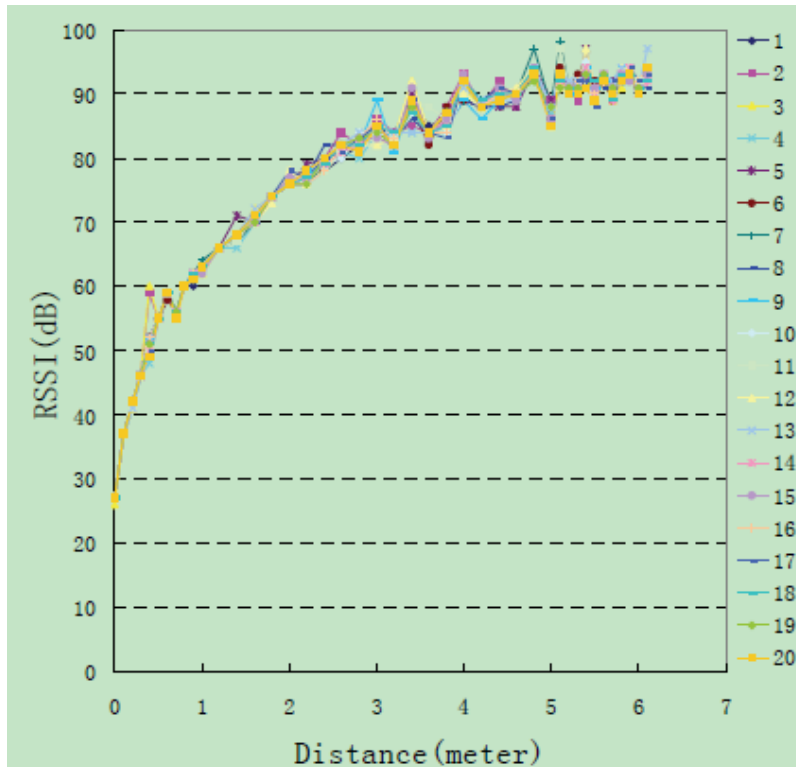


Figura 5-1. Relación entre RSSI y distancia [1].

Para el experimento del artículo, se ha conseguido aproximar la función de relación de distancia y dispersión, a través del software de analítica predictiva SPSS, obteniendo:

$$\sigma_s(d) = -0,0461d^3 + 0,4830d^2 - 0,4583d + 0,3998 \quad (5-1)$$

En la Figura 5-2, se ha superpuesto, en rojo, la curva obtenida mediante la ecuación (5-1).

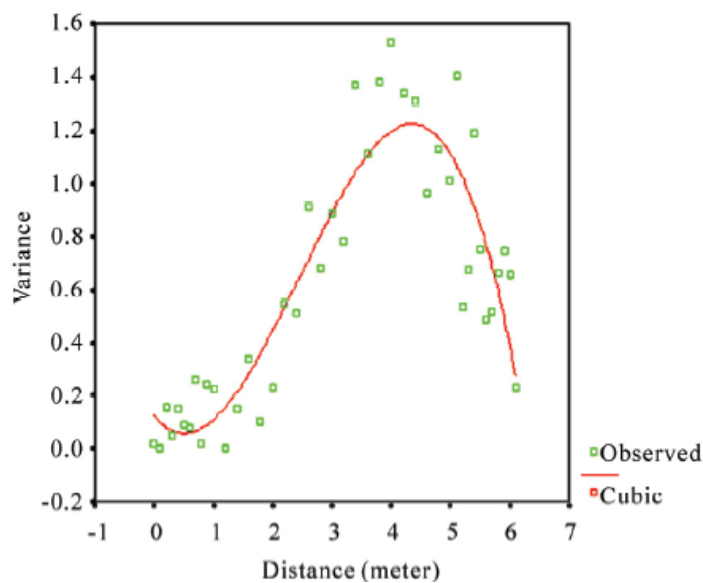


Figura 5-2. Evolución de la varianza RSSI con la distancia. [1]

Partiendo de la ecuación (16), correspondiente con el modelo LNSM:

$$PL(d)(dB) = \overline{PL(d_0)} + 10\eta \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma \quad (5-2)$$

Donde  $X_\sigma$  es una variable aleatoria Gaussiana de media cero y  $\sigma^2$  es la varianza de la población, se cumple:

$$VAR(X_\sigma) = \sigma^2, E(X_\sigma) = 0$$

Por otro lado, si definimos  $X$  como una variable aleatoria Gaussiana de media cero y dispersión unitaria,  $\mathcal{N}(0, 1)$ , entonces:

$$VAR(\sigma X) = \sigma^2, E(\sigma X) = 0$$

De las dos relaciones anteriores, podemos determinar que  $\sigma X$  tiene la misma distribución que  $X_\sigma$  y, por tanto, la ecuación (16) puede reescribirse como:

$$PL(d)(dB) = \overline{PL(d)} + 10\eta \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma = \overline{PL(d_0)} + 10\eta \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + \sigma X \quad (5-3)$$

Donde  $\sigma$  pasa a ser un valor dependiente de los valores RSSI recibidos y la distancias, definido como se indica en la ecuación (5-4):

$$\sigma_s(d) = ad^3 + bd^2 + cd + e \quad (5-4)$$

Usando  $\sigma_s$  (muestra de la dispersión RSSI) como una aproximación de la dispersión de población  $\varepsilon$ , se obtiene la ecuación (5-5):

$$\sigma(d) = ad^3 + bd^2 + cd + e \quad (5-5)$$

De las ecuaciones (5-3) y (5-5) definimos (5-6):

$$PL(d)(dB) = \overline{PL(d)} + 10\eta \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma = \overline{PL(d_0)} + 10\eta \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + \sigma(d)X \quad (5-6)$$

El modelo de sombra logarítmico-normal con varianza dinámica queda determinado por las ecuaciones (5-5) y (5-6). El establecimiento de la función  $\sigma(d)$  hace posible que el modelo LNSM sea capaz de ajustar dinámicamente la función de error de acuerdo con el cambio de distancia, provocando además la capacidad de eliminar los errores del modelo.

## 5.2 Realización de la adaptabilidad de los coeficientes en el modelo de sombra logarítmico-normal

Para que el modelo sea autoadaptable, además de ser ajustada dinámicamente la función de dispersión Gaussiana, los parámetros del modelo deben ajustarse dinámicamente en función del entorno en el que se encuentre. Para determinar todos estos coeficientes se recurre al método de mínimos cuadrados LS (del inglés, *Least Squares*).

Este método es ampliamente utilizado en el análisis de regresión por su simplicidad y pequeña cantidad de computación. El método LS se basa en la minimización de la suma de los errores cuadráticos medios.

Este método nos permite crear una función lineal capaz de describir el comportamiento de una variable dependiente  $Y$  en función de una o más variables independientes  $X$ . A esta función se le llama función de

regresión y se obtiene ajustando las observaciones a la función elegida mediante el método de mínimos cuadrados.

La finalidad de este método consiste en calcular la mejor aproximación posible de un conjunto de valores experimentales a través de una función polinómica de grado  $m$ .

$$y = a_m x^m + a_{m-1} x^{m-1} + \dots + a_1 x + a_0 \quad (5-7)$$

Donde  $a_m, a_{m-1}, \dots, a_0$  son los coeficientes que se calculan. Además, se debe tener en cuenta el error que se va arrastrando debido a estos datos experimentales, es por ello por lo que se introduce un coeficiente de error en el modelo.

Aplicando el método a nuestro sistema y renombrando la ecuación (5-6) para obtener (5-8):

$$r = f + 10\eta \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + \varepsilon \quad (5-8)$$

donde:

$$r = PL(d)(dB)$$

$$f = \overline{PL(d_0)}$$

$$\varepsilon = \sigma(d)X$$

Modificando el orden de los operandos de la ecuación (5-8), se obtiene:

$$\varepsilon = r - f - 10\eta \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) \quad (5-9)$$

Aplicando el principio de minimización de la suma del error cuadrático medio:

$$J = \sum_{i=1}^m (\varepsilon_i)^2 = \sum_{i=1}^m \left( r_i - f - 10\eta \log_{10} \left( \frac{d_i}{d_0} \right) \right)^2 \quad (5-10)$$

A continuación, se realizan dos derivadas parciales de  $J$  respecto a  $\eta$  y  $f$ , respectivamente y el resultado obtenido se iguala a 0, para obtener:

$$\frac{\partial J}{\partial \eta} = 10 \sum_{i=1}^m \left( \log_{10} \left( \frac{d_i}{d_0} \right) \right)^2 + f \sum_{i=1}^m \log_{10} \left( \frac{d_i}{d_0} \right) - \sum_{i=1}^m r_i \log_{10} \left( \frac{d_i}{d_0} \right) = 0 \quad (5-10)$$

$$\frac{\partial J}{\partial f} = \eta \sum_{i=1}^m \left( 10 \log_{10} \left( \frac{d_i}{d_0} \right) \right) + mf - \sum_{i=1}^m r_i = 0 \quad (5-11)$$

Luego, (5-10) y (5-11) constituyen las ecuaciones simultáneas lineales para resolver los coeficientes  $(f, \eta)$  de (5-9).

Procediendo de mismo modo, podemos determinar los coeficientes de la ecuación (5-5). Para ello, se añade el coeficiente de error  $\varepsilon$  y se sustituye  $\sigma(d)$  por  $y$ , obteniendo:

$$y = ad^3 + bd^2cd + e + \varepsilon \quad (5-12)$$

Reordenando (5-12):

$$\varepsilon = y - ad^3 - bd^2 - cd - e \quad (5-13)$$

Se vuelve a aplicar el ajuste por mínimos cuadrados sobre (5-13):

$$J = \sum_{i=1}^m (\varepsilon)^2 = \sum_{i=1}^m (y_i - ad^3 - bd^2 - cd - e)^2 \quad (5-14)$$

De igual modo, se realizan derivadas parciales de J respecto a los coeficientes  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $e$  y se igualan a 0. De esta forma, se obtienen las ecuaciones simultáneas lineales para resolver los coeficientes ( $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $e$ ):

$$\begin{aligned} a \sum_{i=1}^m (d_i^6) + b \sum_{i=1}^m (d_i^5) + c \sum_{i=1}^m (d_i^4) + e \sum_{i=1}^m (d_i^3) - \sum_{i=1}^m (y_i d_i^3) &= 0 \\ a \sum_{i=1}^m (d_i^5) + b \sum_{i=1}^m (d_i^4) + c \sum_{i=1}^m (d_i^3) + e \sum_{i=1}^m (d_i^2) - \sum_{i=1}^m (y_i d_i^2) &= 0 \\ a \sum_{i=1}^m (d_i^4) + b \sum_{i=1}^m (d_i^3) + c \sum_{i=1}^m (d_i^2) + e \sum_{i=1}^m (d_i) - \sum_{i=1}^m (y_i d_i) &= 0 \\ a \sum_{i=1}^m (d_i^3) + b \sum_{i=1}^m (d_i^2) + c \sum_{i=1}^m (d_i) + me - \sum_{i=1}^m (y_i) &= 0 \end{aligned} \quad (5-15)$$

### 5.3 Análisis experimental en el artículo de referencia

En el experimento descrito en el artículo se hace uso de dos nodos baliza y un nodo que actúa como estación base. Para el desarrollo del experimento se han escogido dos entornos diferentes:

- Entorno interior con 15 m de longitud y 10 m de ancho.
- Entorno exterior con 30 m de longitud y 10 m de ancho.

Los datos han sido recogidos del envío y recepción de paquetes entre los nodos 1 y 2. Siendo el nodo 1 el encargado de enviar señales al nodo 2. Mientras que el nodo 2 se encarga de recibir los datos del nodo 1 y de enviarlos al nodo de la estación base al mismo tiempo. El nodo de la estación base está conectado a un ordenador encargado de la recepción y procesado.

En el nodo 2 se recolectó alrededor de 100 valores RSSI en cada uno de los puntos a distintas distancias. Una vez que la estación base recibe estos valores los convierte en  $PL(dB)$  y el resultado se pasa al ordenador.

En el equipo se comienza con el procesado de los datos. En primer lugar, se calcula el promedio de  $PL(dB)$  para cada punto de distancia, obteniéndose un grupo de muestras  $(d, \overline{PL(dB)})$ . Seguidamente, se calcula la dispersión de las muestras de  $PL(dB)$  para conseguir un grupo de valores  $(d, \sigma_s)$  para cada punto de distancia.

A partir de las ecuaciones (5-10) y (5-11) se obtienen los valores para  $\overline{PL(d_0)}$  y  $\eta$ , acorde a los datos  $(d, \overline{PL(dB)})$ . Los valores  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $e$  se obtienen mediante la ecuación (5-15), haciendo uso del grupo de datos  $(d, \sigma_s)$ . Se obtiene:

- Entorno interior:
  - $\overline{PL(d_0)} = 40,9951$
  - $\eta = 3,5306$
  - $a = -0,0493$

- $b = 0,3938$
- $c = -0,5599$
- $e = 0,4745$

Los coeficientes del modelo LNSM se muestran en la tabla 5-1.

$\overline{PL}(d_0)$	$\eta$	$\sigma$
41	3	2

Tabla 5-1. Valor de los coeficientes del modelo LNSM [1].

En la Figura 5-3 se ha dibujado los datos RSSI recibidos, los datos RSSI calculados con el modelo LNSM y los datos RSSI obtenidos con el modelo LNSM-DV.

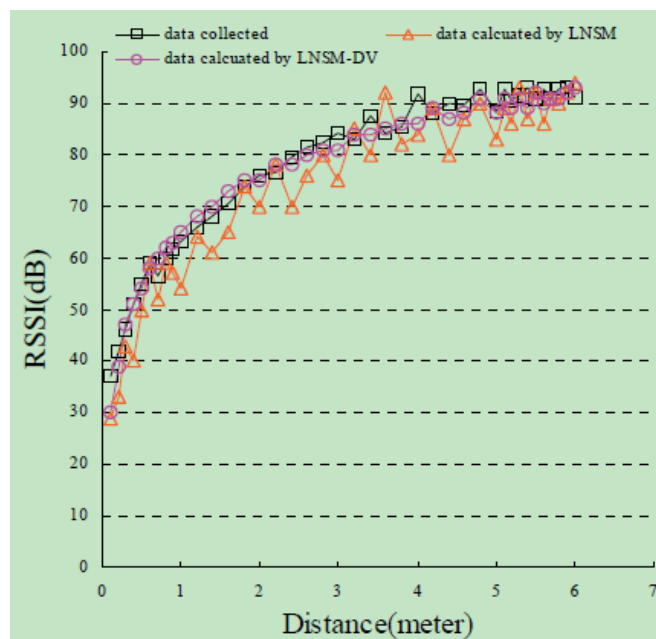


Figura 5-3. Relación RSSI(dB) y distancia (m) en entorno interior [1].

- Entorno exterior:
  - $\overline{PL}(d_0) = 41,1320$
  - $\eta = 2,8306$
  - $a = -0,0415$
  - $b = 0,4103$
  - $c = -0,5411$
  - $e = 0,4521$

De igual modo, los coeficientes del modelo LNSM quedan registrados en la Tabla 5-1. En la Figura 5-4, se representan todas las curvas RSSI para el entorno exterior:

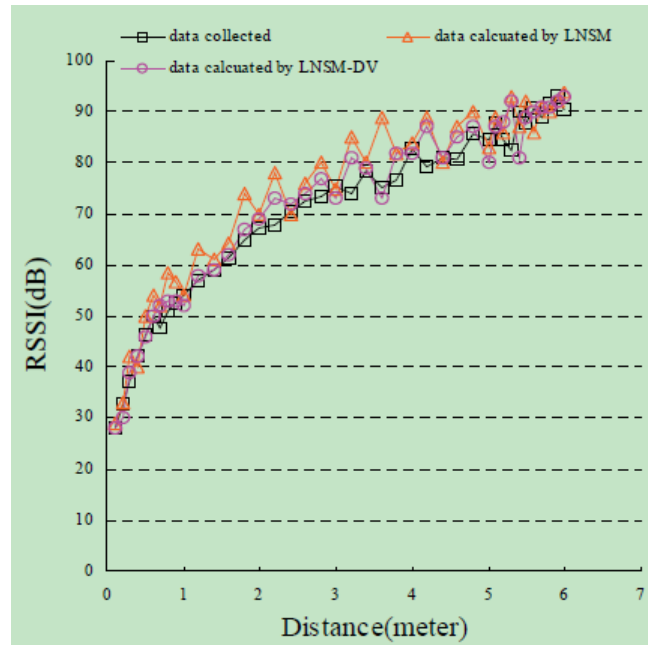


Figura 5-4. Relación RSSI(dB) y distancia (m) en entorno exterior [1].

Observando las Figuras 5-3 y 5-4, se puede apreciar cómo las curvas obtenidas con LNSM-DV pueden cambiar dinámicamente con el cambio de medios interior y exterior, y las variaciones producidas son consistentes con la curva dibujada a través de los datos recogidos.

Sin embargo, la curva trazada a través del modelo LNSM no puede cambiar dinámicamente con los diferentes medios, y las variaciones de esta se desvía en gran medida de la curva trazada a través de los datos recopilados.

Esto se debe a que los coeficientes y la varianza con LNSM se basan en la experiencia y son fijos, mientras que la varianza con LNSM-DV varía dinámicamente con la distancia.

Además, gracias al método de LS para obtener los coeficientes de LNSM-DV acordes al tipo de entorno, se consigue dotar al modelo de auto-adaptabilidad. Se puede concluir que con LNSM-DV se describe mejor la relación entre la distancia y los valores de RSSI de las señales recibidas.

El establecimiento de LNSM-DV tiene una gran importancia práctica para mejorar la precisión de la distancia, posicionamiento y la auto-adaptabilidad de los modelos de distancias en redes inalámbricas de sensores.





# 6 RESULTADOS

---

*Nothing in life is to be feared, it is only to be understood. Now is the time to understand more, so that we may fear less.*

*Nada en la vida debe ser temido, solo debe ser entendido. Ahora es el momento de comprender más, para que podamos temer menos.*

*- Marie Curie -*

**E**n este capítulo, se va a desarrollar todo el proceso práctico seguido para la evaluación experimental de modelos de radiopropagación en la red inalámbrica de sensores que se ha creado.

A partir de los valores de potencia recibida y la distancia de los puntos de medida desde el nodo final al *gateway*, se van a determinar una serie de parámetros que definen el modelo de sombra logarítmico-normal mejorado. Además, se comparará con otros modelos de propagación para comprobar cual se adapta mejor en relación con los datos obtenidos.

## 6.1 Trabajo previo

Como se ha comentado anteriormente, se han tenido que realizar unas medidas de campo para evaluar la potencia recibida en diferentes puntos. Se ha acordado tomar como distancia máxima 1.100 metros en línea recta. Por tanto, en relación con estas restricciones se ha decidido tomar las medidas de campo en la calle Camino de los Descubrimientos, Sevilla.

Se ha tomado como distancia de referencia  $d_0 = 10 \text{ m}$  y se han tomado medidas cada  $\Delta d = 20 \text{ m}$ . Por tanto, como se puede observar en la ecuación (6-1), se han realizado medidas en un total de 55 puntos.

$$\frac{1.100}{20} = 55 \quad (6-1)$$

Para determinar en qué puntos se debían realizar las medidas, cumpliendo que haya entre dos puntos consecutivos 20 m, se ha utilizado una cinta métrica con una longitud máxima de 50 m.

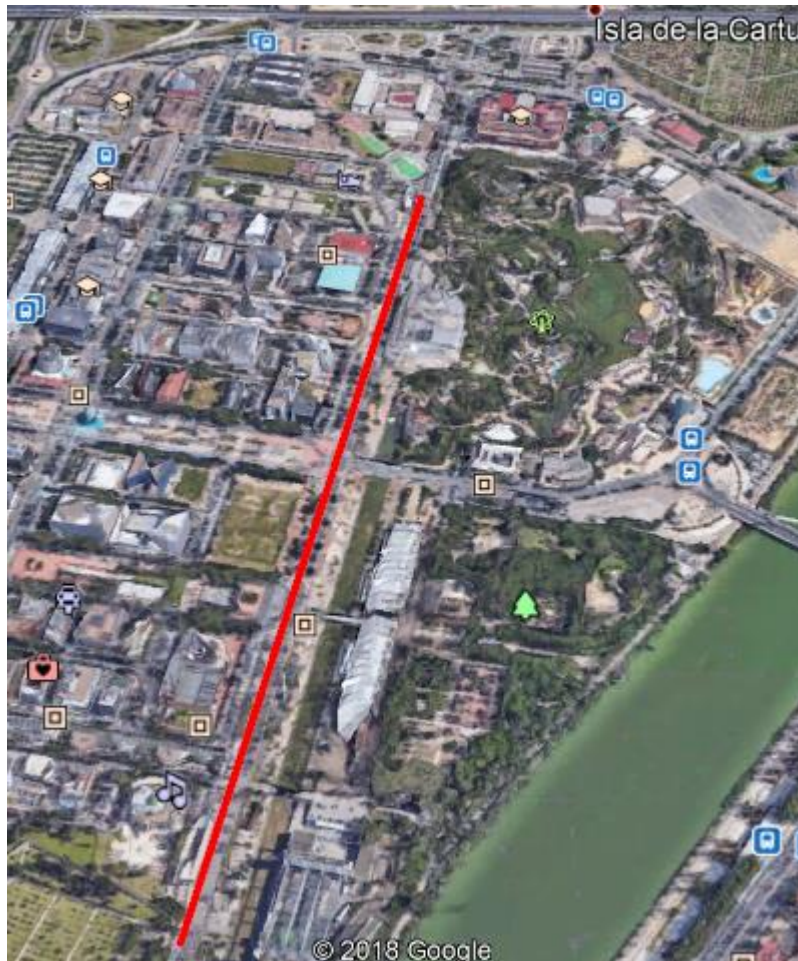


Figura 6-1. Entorno sobre el que se realizan las medidas.

## 6.2 Toma de medidas

Una vez que se ha trabajado la zona y se conocen los puntos sobre los que se va a medir, ya estamos en disposición de realizar las medidas.

Los sensores están programados para enviar los datos cada cierto tiempo, sin embargo, para la realización del trabajo no se ha hecho uso de esta configuración, sino que, mediante el botón que poseen los sensores, se ha transmitido en cada punto.

Para la transmisión de los datos, se ha considerado una altura para la antena transmisora de  $1,5\text{ m}$  y de  $0,5\text{ m}$  para la antena receptora. En la Figura 6-2, se muestra un breve esquema del proyecto, donde el valor de  $d$  es variable y va aumentando.

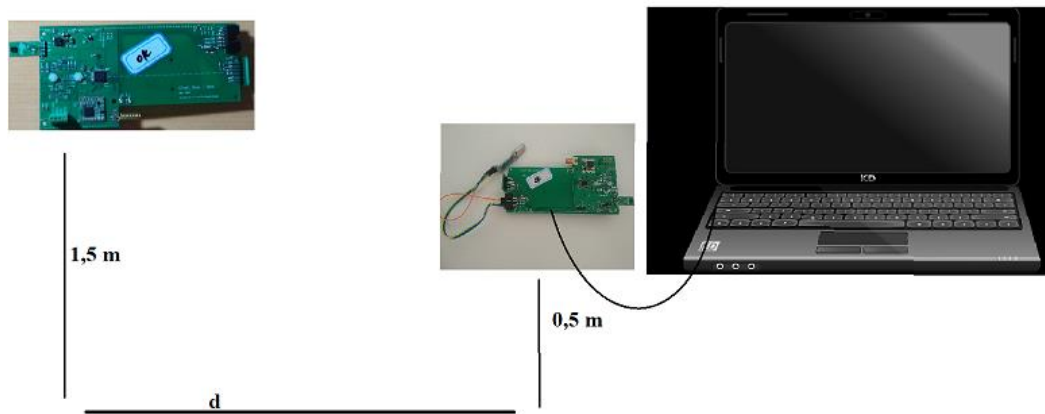


Figura 6-2. Distribución gráfica de los equipos.

Por cada punto establecido se han realizado medidas con tres sensores, etiquetados con número de identificación 30.421, 52.122 y 58.503. Como se ha mostrado en la Figura 4-7, cada mensaje llega etiquetado por el sensor que lo ha transmitido, y contiene el dato RSSI, el valor correspondiente a temperatura, humedad y PAR. Se debe trabajar sobre el valor RSSI leído, ya que el valor que nos llega no es exactamente el valor de RSSI y se deben realizar una serie de operaciones para determinar el valor de forma correcta. En las Tablas 6-1 y 6-2 se dejan los valores de RSSI recibidos al inicio y final de los puntos sobre lo que se ha medido.

<b>Distancia(m)/ Sensor</b>	<b>20</b>	<b>40</b>	<b>60</b>	<b>80</b>	<b>100</b>
<b>30421</b>	33	26	4	16	19
<b>52122</b>	32	26	9	16	14
<b>58503</b>	31	25	9	14	9

Tabla 6-1. Medida RSSI recibida en complemento a dos en los 5 primeros puntos.

<b>Distancia(m)/ Sensor</b>	<b>1020</b>	<b>1040</b>	<b>1060</b>	<b>1080</b>	<b>1100</b>
<b>30421</b>	232	230	230	230	230
<b>52122</b>	230	228	229	230	230
<b>58503</b>	229	228	229	229	228

Tabla 6-2. Medida RSSI recibida en complemento a dos en los últimos 5 puntos.

En la tabla anterior las lecturas recibidas de RSSI se encuentran en complemento a dos, por lo que se deben ser ajustadas bajo el siguiente criterio:

$$\begin{aligned}
 RSSI &= RSSI_{recibido} \text{ si } RSSI_{recibido} < 128 \\
 RSSI &= RSSI_{recibido} - 256 \text{ si } RSSI_{recibido} \geq 128
 \end{aligned}
 \tag{6-2}$$

Tras aplicar el criterio indicado en la ecuación (6-2), las tablas anteriores quedan:

<b>Distancia(m)/ Sensor</b>	<b>20</b>	<b>40</b>	<b>60</b>	<b>80</b>	<b>100</b>
<b>30421</b>	33	26	4	16	19
<b>52122</b>	32	26	9	16	14
<b>58503</b>	31	25	9	14	9

Tabla 6-3. Medida RSSI recibida en los 5 primeros puntos tras ajuste.

<b>Distancia(m)/ Sensor</b>	<b>1020</b>	<b>1040</b>	<b>1060</b>	<b>1080</b>	<b>1100</b>
<b>30421</b>	-24	-26	-26	-26	-26
<b>52122</b>	-26	-28	-27	-26	-26
<b>58503</b>	-27	-28	-27	-27	-28

Tabla 6-4. Medida RSSI recibida en los últimos 5 puntos tras ajuste.

Finalmente, para obtener el valor de potencia recibida en dBm, se debe realizar un último ajuste sobre los valores de RSSI:

$$P_r(\text{dBm}) = \text{RSSI} - 125 + 64 \quad (6-3)$$

<b>Distancia(m)/ Sensor</b>	<b>20</b>	<b>40</b>	<b>60</b>	<b>80</b>	<b>100</b>
<b>30421</b>	-28	-35	-57	-45	-42
<b>52122</b>	-29	-35	-52	-45	-47
<b>58503</b>	-30	-36	-52	-47	-52

Tabla 6-5. Potencia recibida en los 5 primeros puntos tras ajuste en dBm.

<b>Distancia(m)/ Sensor</b>	<b>1020</b>	<b>1040</b>	<b>1060</b>	<b>1080</b>	<b>1100</b>
<b>30421</b>	-85	-87	-87	-87	-87
<b>52122</b>	-87	-89	-88	-87	-87
<b>58503</b>	-88	-89	-88	-88	-89

Tabla 6-6. Potencia recibida en los últimos 5 puntos tras ajuste en dBm.

### 6.3 Procesado de los datos

Tras aplicar las correcciones sobre el valor RSSI recibido se determina la potencia recibida para cada punto, de modo que en un fichero Excel se construye una tabla como la mostrada en la Tabla 6-6, compuesta por 4 filas y un número de columnas que vendrá determinado por el número de puntos en los que se mida, en nuestro caso desde 20 metros hasta 1100 metros.

En primer lugar, se lee esta tabla del fichero Excel y se realiza un tratamiento sobre los datos leídos, obteniéndose el vector *distancias*, compuesto por la primera fila, y una matriz compuesta por los datos de potencia para cada sensor.

En la Figura 6-3 se puede observar la potencia recibida en el gateway correspondiente a cada nodo para los diferentes puntos en los que se ha medido. Se puede apreciar el comportamiento lógico de cualquier sistema radio, es decir, a medida que aumenta la distancia entre transmisor y receptor disminuye el valor de potencia recibida.

Generalmente los valores recibidos por los tres sensores están en un mismo margen donde no existe más de 5 dB de diferencia entre el valor superior e inferior. Sin embargo, es visible que en ciertos casos el valor recibido por uno de los nodos difiere en mayor medida con los otros dos valores, pudiéndose obtener más de 10 dB de diferencia entre ambos.

Se puede determinar que este fenómeno no se debe a un problema técnico relacionado con un sensor ya que afecta a los tres sensores, aunque está más presente en el nodo 30.421. No obstante, esta pérdida de potencia sí que podemos atribuirla a un desvanecimiento multitrayecto, que se da por la existencia de varios trayectos de propagación además del directo.

Aunque los tres nodos están expuestos al mismo entorno urbano y las medidas de cada punto han sido tomadas, relativamente, en el mismo instante, se debe mencionar que en la zona de estudio existen carreteras, no demasiado transitadas, que han podido ser el causante de este fenómeno, variando si pasaba algún vehículo en ese instante o no.

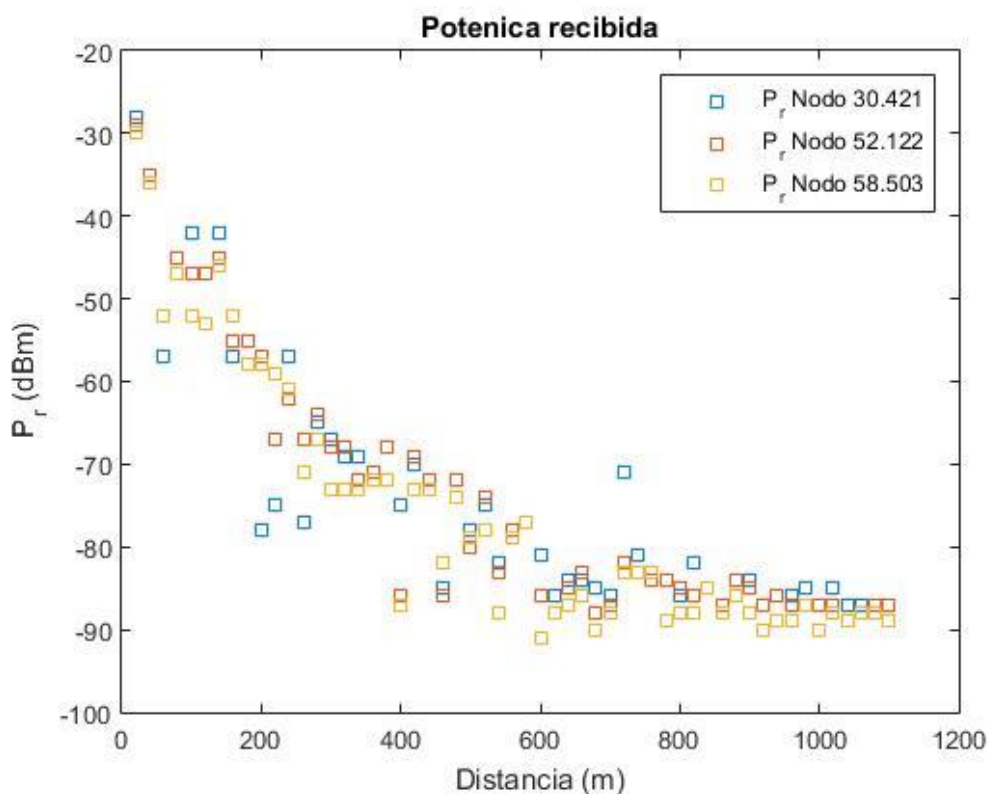


Figura 6-3. Potencia recibida frente a distancia.

Dado que se conoce la potencia de salida del transceptor,  $P_{out} = 13 \text{ dBm}$ , la ganancia de la antena transmisora,  $G_t = 2.15 \pm 0.5 \text{ dBi}$ , y la ganancia de la antena receptora,  $G_r = 5 \pm 0.7 \text{ dBi}$ , se pueden determinar las pérdidas básicas de propagación en el experimento realizado para cada punto por cada nodo. Teniendo en cuenta estos valores y aplicando (6-4) para cada punto, se obtiene:

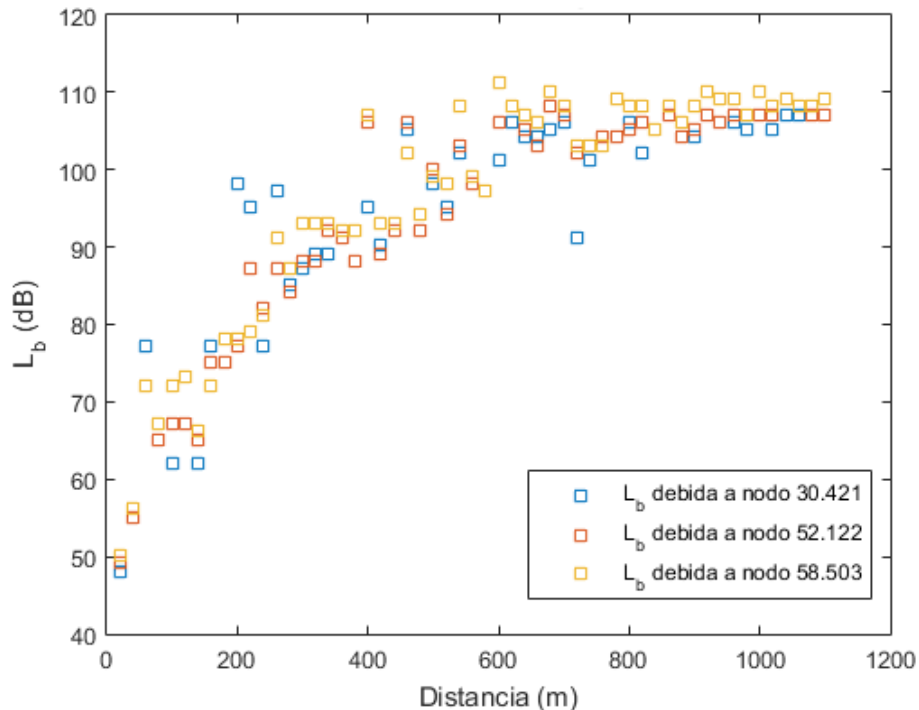


Figura 6-4. Pérdidas de propagación.

$$L_b(\text{dB}) = P_{out}(\text{dBm}) + G_t(\text{dBi}) + G_r(\text{dBi}) - P_r(\text{dBm}) \quad (6-4)$$

El objetivo es establecer el modelo que mejor se ajuste a lo obtenido en la Figura 6-4, es decir, modelar el comportamiento de la señal para una frecuencia de 868 MHz en un entorno exterior para una red WSN.

La finalidad del artículo descrito en el apartado 5 consiste en demostrar que para WSN en entornos urbanos el modelo que mejor describe esta situación es LNSM-DV. Para contrastar este desarrollo se va a comparar los valores recibidos con diferentes curvas ajustadas a varios modelos de corte determinista y empírico.

Para obtener las curvas de todos los modelos se ha hecho uso del vector *distancias* obtenido de los datos leídos del fichero Excel.

### 6.3.1 Modelos deterministas

Los modelos deterministas son modelos matemáticos en los que una misma entrada produce siempre la misma salida, sin verse afectado por ninguna distribución de probabilidad o cualquier otro factor que pueda perturbar a la realidad [32]. Se han elegido los modelos de espacio libre y propagación en tierra plana como ejemplos de modelos deterministas para compararlos con los datos recibidos.

- Modelo espacio libre. Descrito bajo la ecuación (3-1) o (3-2). Para la obtención de la curva se ha empleado el vector de distancias y se ha definido la frecuencia a 868 MHz.

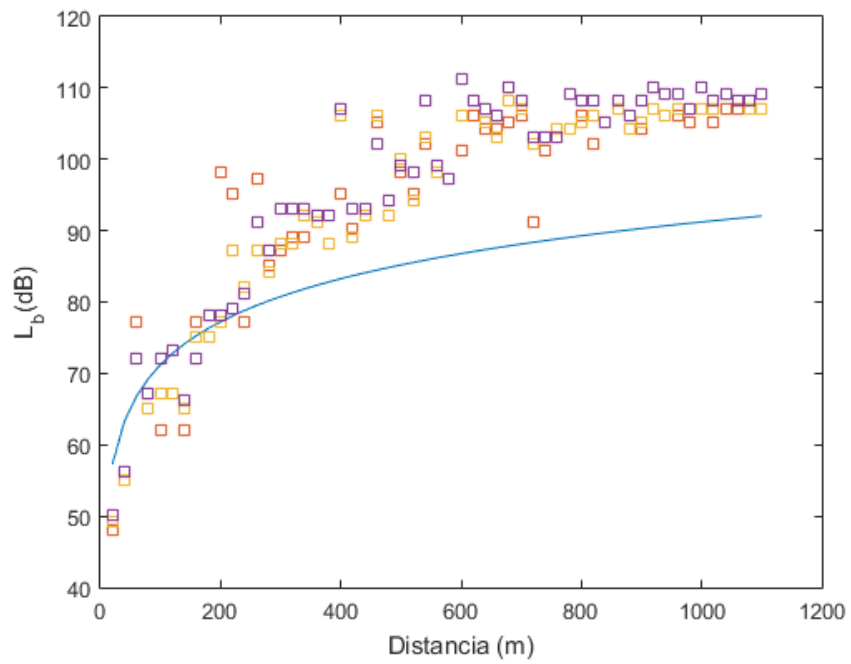


Figura 6-5. Superposición modelo espacio libre frente a valores reales.

- Modelo tierra plana. Descrito bajo la ecuación (3-11). En este caso, se ha definido la altura de la antena transmisora a 1.5 m. mientras que la antena receptora se encontraba a una altura de 0.5 m.

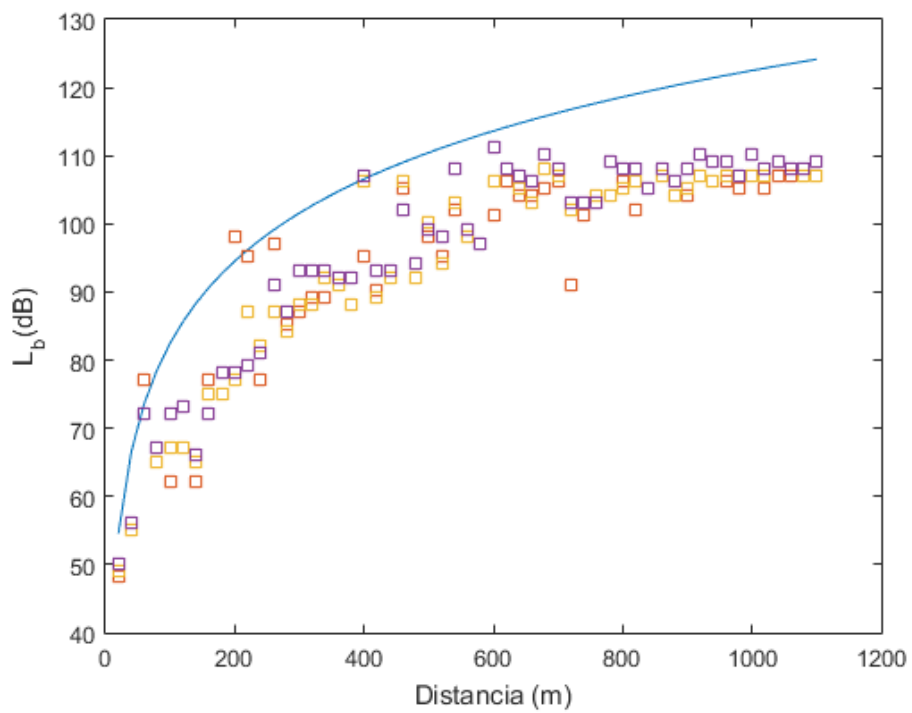


Figura 6-6. Superposición modelo tierra plana frente a valores reales.

### 6.3.2 Modelos empíricos

Los modelos empíricos se basan en la extrapolación estadística de resultados a partir de medidas del fenómeno realizadas sobre el terreno. Su principal ventaja es que se tienen en cuenta de forma implícita las influencias propias del entorno en su conjunto, sin ser reconocidas cada una de ellas de manera aislada. Sin embargo, su precisión depende no sólo de la precisión de las medidas, si no de la similitud entre el entorno donde fueron llevadas a cabo las medidas y el entorno a analizar [32].

En este caso, los modelos elegidos han sido los modelos *log-distance*, *log-normal shadowing* y *log-normal shadowing with dynamic variance*. Para determinar estos modelos ha sido necesario realizar cálculos sobre los valores recibidos en el entorno.

En primer lugar, se debe calcular  $\overline{PL(d_0)}$  y  $\eta$  a partir de los valores de potencia recibida y el vector distancia. Para obtener estos valores se ha resuelto el sistema en descrito en (6-5):

$$\begin{bmatrix} 1 & 10 \sum_{i=1}^m \log_{10} \left( \frac{d_i}{d_0} \right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \overline{PL(d_0)} \\ \eta \end{bmatrix} = [PL(d)(dB)] \quad (6-5)$$

donde:

$[PL(d)(dB)]$ : valores de pérdidas básicas de propagación en el experimento ( $[PL(d)(dB)_{experimento}]$ ) calculados como se indica en la ecuación (6-4).

$d_i$ : determinado por el vector de distancias definido.

$d_0$ : distancia de referencia fijada a 10 m durante todo el proyecto.

Bajo estas condiciones se ha obtenido:

- $\overline{PL(d_0)} = 26,5891 \text{ dB}$
- $\eta = 3,7504$

A partir de este resultado queda determinado el modelo *log-distance*, mientras que para los otros dos modelos es necesario seguir trabajando con los datos obtenidos para determinar sus curvas.

A continuación, se define un vector como la diferencia entre los datos de pérdidas básicas recibidas en el experimento y los resultados esperados, es decir, los resultados calculados a partir de aplicar la ecuación (6-5) con los valores obtenidos para  $\overline{PL(d_0)}$  y  $\eta$ .

$$PL(d)(dB)_{esperado} = \overline{PL(d_0)} + 10 \cdot \eta \cdot \sum_{i=1}^m \log_{10} \left( \frac{d_i}{d_0} \right) \quad (6-6)$$

$$y = PL(d)(dB)_{experimento} - PL(d)(dB)_{esperado} \quad (6-7)$$

Para determinar el modelo *log-normal shadowing* basta con obtener la desviación típica sobre el vector  $y$ , en otros términos, la dispersión que sufren los datos con respecto a la media.

Finalmente, para determinar el modelo *log-normal shadowing with dynamic variance* queda pendiente obtener la dispersión dinámica definida en la ecuación (5-5). Para ello, se deben realizar nuevas operaciones haciendo uso del vector definido en (6-7). En primer lugar, se define la matriz  $J$ :

$$J = [distancias^3 \text{ distancias}^2 \text{ distancias}' \ 1]$$

donde  $J$  está formada por el vector distancia traspuesto elevado al cubo, el vector distancia traspuesto elevado al cuadrado, el vector distancia traspuesto y un vector de unos. Como se cumple que:



$$y = J * \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ e \end{bmatrix}$$

Podemos determinar los coeficientes que determinan la dispersión, obteniendo los siguientes valores:

- $a = -0,000000031080813$
- $b = 0,000041560910249$
- $c = -0,011736972205206$
- $e = 0,071500580036563$

Con estos últimos datos queda determinado el modelo *log-normal shadowing with dynamic variance*.

Seguidamente, se van a representar los tres modelos empíricos estudiados:

- Modelo de pérdida *log-distance*. Definido en la ecuación (3-16)

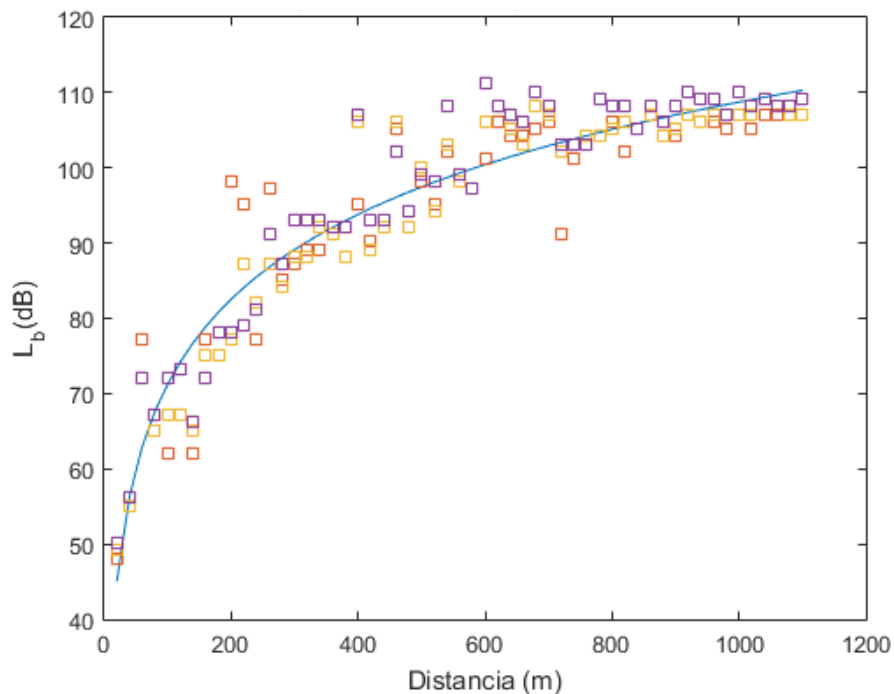


Figura 6-7. Superposición modelo *log-distance* frente a valores reales.

- Modelo *log-normal shadowing*. Definido en la ecuación (3-17).

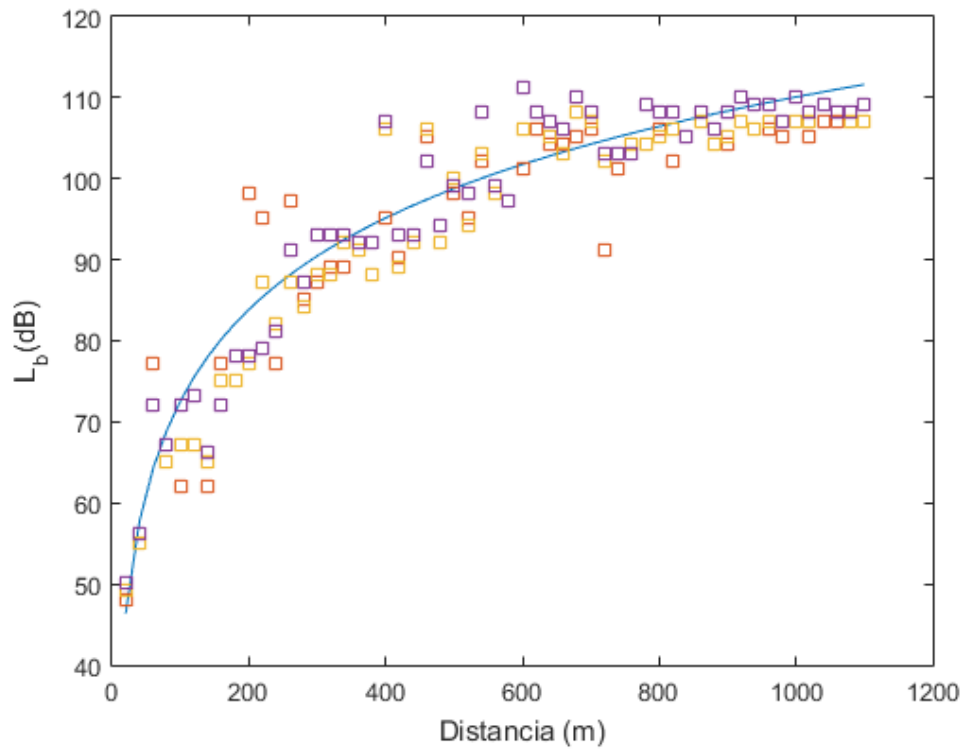


Figura 6-8. Superposición modelo *log-normal shadowing* frente a valores reales.

- Modelo *log-normal shadowing with dynamic variance*. Sustituyendo  $\sigma_d$  de la ecuación (5-5) en la ecuación (5-6), se obtiene en una única expresión la ecuación que define el modelo LNSM-DV:

$$PL(d)(dB) = \overline{PL(d_0)} + 10 \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) \eta + (ad^3 + bd^2 + cd + e)X \quad (6-8)$$

y, podemos representar las pérdidas básicas esperadas si aplicamos modelo de sombra logarítmico-normal con varianza dinámica.

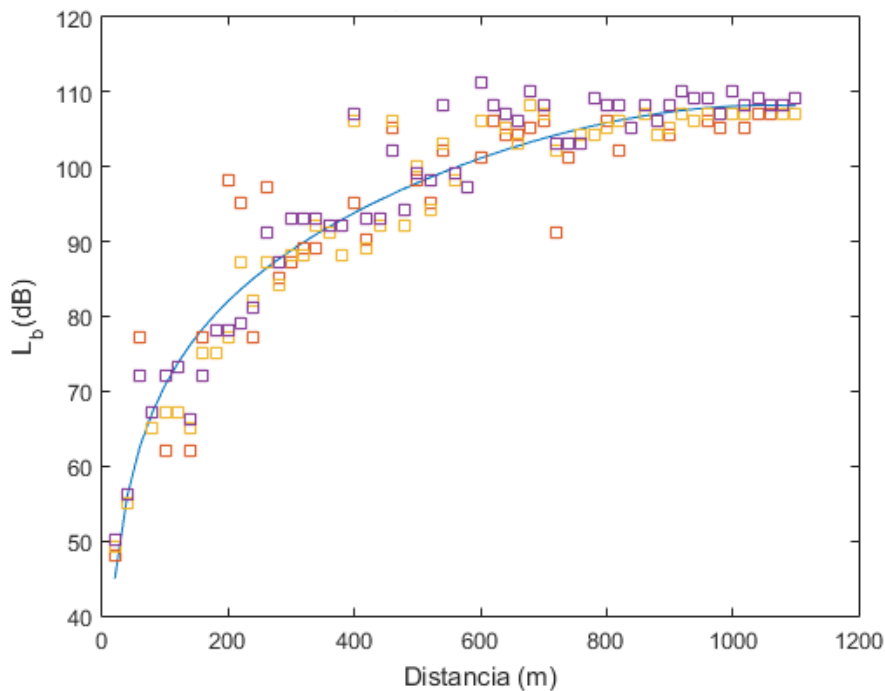


Figura 6-9. Superposición modelo *log-normal shadowing with dynamic variance* frente a valores reales.

## 6.4 Comparativa de los modelos estudiados

Para poder realizar una comparativa de todos los modelos y determinar cuál es el que mejor se ajusta se ha obtenido la Figura 6-10. Dicha figura la conforman todos los modelos estudiados y las pérdidas básicas obtenidas de las lecturas del experimento por cada sensor.

A primera vista, se puede comprobar cómo el modelo de Tierra Plana es aquel que menos se ajusta al modelo estudiado y no se asemeja en ninguna zona a los datos recogidos, obteniéndose para todos los puntos mayores pérdidas. El comportamiento es lógico ya que este modelo está pensando para distancias de varios kilómetros y una altura de la antena transmisora superior a 50 metros, condiciones que no aplican en el experimento. Este modelo pierde eficacia cuando se utiliza sobre experimentos con distancias cortas, ya que no estudia las condiciones ambientales y geográficas de propagación.

En relación con el modelo de espacio libre se observa que presenta menos variación con los valores reales que el modelo anterior, pero sigue presentando grandes cambios. Este modelo debe ser empleado cuando exista una línea de visión directa entre transmisor y receptor, motivo por el cual a partir de los 800 metros presenta mayor diferencia con los valores reales y, además, no exista ningún objeto cercano al enlace que pueda afectar a la propagación electromagnética.

Respecto a los modelos empíricos presentan grandes semejanzas con los resultados obtenidos en casi toda la zona de estudio. Sin embargo, a partir de los 900 metros los modelos *log distance* y *log normal shadowing* dejan de ajustarse a los valores recibidos ya que las curvas siguen con un comportamiento lineal, mientras que los valores recibidos por los sensores son constantes.

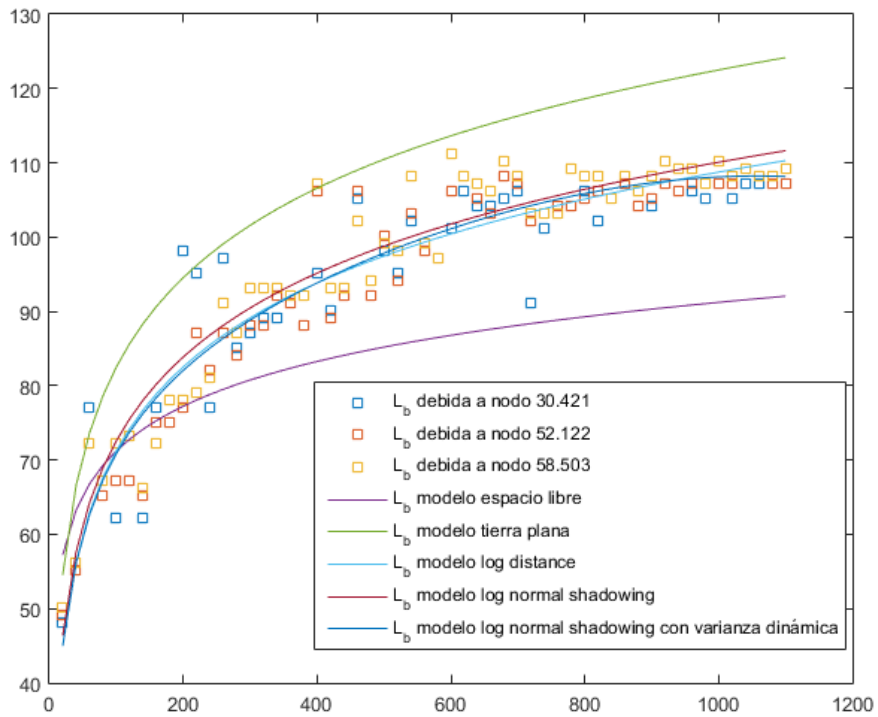


Figura 6-10. Representación de todos los modelos frente a los valores recibidos.

Si se observa el intervalo [900 – 1100] m. se puede comprobar cómo la curva que representa el modelo *log normal shadowing with dynamic variance* cambia el comportamiento lineal y se ajusta a los resultados obtenidos. Por lo que podemos determinar que es el modelo que mejor se ajusta a este tipo de entornos.

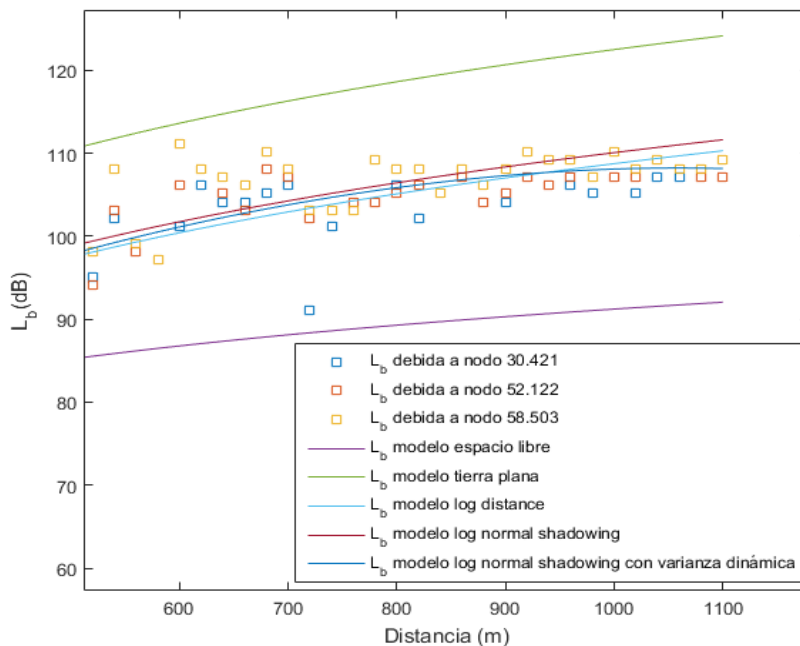


Figura 6-11. Zoom de las curvas y medidas obtenidas en los último 200 m.

## 7 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

---

*Chance is a word void of sense; nothing can exist  
without a cause.*

*Azar es una palabra vacía de sentido; nada puede  
existir sin causa.*

*- Voltaire -*

Después de evaluar los resultados obtenidos en el capítulo anterior podemos concluir que el modelo de sombra logarítmico-normal mejorado con varianza dinámica es el modelo que mejor predice las pérdidas básicas de propagación que afectan a este tipo de sistemas. Además, como es dinámico, ante posibles cambios no controlados podrá ir auto ajustándose.

Mediante la realización de este trabajo se ha comprobado cómo este modelo se ciñe a las medidas reales obtenidas en este entorno. Para darle mayor veracidad al modelo, una posible línea de mejora sería estudiar el modelo en un entorno rural y comprobar el compartimiento real frente al estimado, teniendo en cuenta que en entornos rurales con zonas de vegetación la potencia se verá afectada por otros factores.

En el trabajo realizado sólo se han tomado medidas de tres sensores en cada punto. Además, las medidas fueron tomadas en una misma estación, otoño, con unas condiciones meteorológicas parecidas siempre que se tomaron las medidas y en un mismo intervalo horario, a primera hora de la mañana. Una forma de darle mayor veracidad al modelo sería tomar medidas durante un intervalo de tiempo superior, como puede ser un año, tomando medidas en tramos horarios diferentes del día. Con esto no sólo conseguiríamos estudiar el modelo con mayor profundidad, sino que, también podemos ver cómo afecta el clima y el resto de los factores del entorno en las redes de sensores inalámbricas y especialmente determinar el comportamiento de los sensores empleados.



Como anexo a este Trabajo Fin de Grado se deja el código Matlab empleado para su realización. Se parte de un fichero excel denominado “pruebas” donde se obtienen los datos de potencia recibidos en dBm. Sobre los datos recogidos en el fichero ya se han realizado las operaciones necesarias para adaptarlo de las medidas de RSSI recibidas a la potencia en dBm.

```
clear all
%% obtener los datos de potencia del fichero.
% Se forma una matriz de 4x55.
% La primera fila corresponde con el sensor 30421
% La segunda fila corresponde con el sensor 52122
% La tercera fila corresponde con el sensor 58503
tablaExcel = xlsread('pruebas','datos','B1:BD4');
[row,col] = size(tablaExcel);
distancias = tablaExcel(1,:);
P_rec_prac = tablaExcel(2:row,1:col);
P_out = 13; %dBm
G_trans = 2.15; %dBi. Ganancia de la antena transmisora. Antena helicoidal
de 10 vueltas
G_rec = 5; %dBi. Ganancia de la antena receptora. Antena tipo dipolo.
% Lora usa banda ISM : 433 MHz, 868 MHz o 915 MHz dependiendo de la zona, en
España a 868 MHz.
F = 868; % MHz
d_ref = 10; %metros
%%distancias = 20:20:1100; % metros. Vector de puntos donde se toman las
medidas
grid on;

%% Cálculos a partir de los resultados obtenidos
% Potencia recibida frente a distancia
figure (1)
plot(distancias,P_rec_prac(1,:), 's'); hold on;
plot(distancias,P_rec_prac(2,:), 's'); plot(distancias,P_rec_prac(3,:), 's');
hold off
% plot(distancias, mean(P_rec_prac));
xlabel('Distancia (m)')
ylabel('P_r (dBm)')
title('Potencia recibida')
legend('P_r Nodo 30.421', 'P_r Nodo 52.122', 'P_r Nodo 58.503');
% Pérdidas básicas de propagación
L_bas_prac = P_out + G_trans + G_rec - P_rec_prac; %PL(d)dB o r = PL(d)dB
r_medidas = L_bas_prac;
figure (2)
plot(distancias,L_bas_prac(1,:), 's'); hold on;
plot(distancias,L_bas_prac(2,:), 's'); plot(distancias,L_bas_prac(3,:), 's');
hold off
xlabel('Distancia (m)')
ylabel('L_b (dB)')
title('Pérdidas de propagación')
legend('L_b debida a nodo 30.421', 'L_b debida a nodo 52.122', 'L_b debida a
nodo 58.503');

%% Resolución de la ecuación
% Se debe obtener PL(d_0) y mu de la ec.14: r = f+10*mu*log(d/d_0)+exs. Se
% debe calcular a partir de los valores obtenidos en la práctica. Para
```

```

% ello:
% En primer lugar se calcula vector R con dimensión ((55*3)x1) con todos
% los valores de L_bas_prac obtenidos para los tres sensores.
R_medidas = r_medidas(:);

%% A continuación se construye el vector de pesos aplicando los logaritmos.
n=0;
pesos=0;
j = 1:length(distancias);
for control=1:length(distancias)
    for i = 1:3
        pesos(n+i) = 10*log10(distancias(j(control))/d_ref);
    end
    n=length(pesos);
end

%% Formamos matriz para resolver las incognitas.
X = [ones(length(pesos),1) pesos'];

% Se resuelve b formada por PL(d_0) y mu.
b = pinv(X)*R_medidas;

%% Se obtiene vector r_esperada = PL(d) dB
r_esperada = b(1)+pesos*b(2);
% Se llama "y" a la diferencia entre el valor medido y el esperado
y = R_medidas - r_esperada';
sigma = std(y);
%% Se crea la matriz J formada por los pesos de las distancias
% J = [d'^3 d'^2 d' 1]
n=0;
d_completa=0;
j = 1:length(distancias);
for control=1:length(distancias)
    for i = 1:3
        d_completa(n+i) = distancias(j(control));
    end
    n=length(d_completa);
end
J = [d_completa'.^3 d_completa'.^2 d_completa' ones(length(d_completa),1)];

% Conocemos y = R_medidas - r_esperada' y J. Se cumple que y=J*coef,
% donde coef = [a b c e] son los coeficientes de la varianza.
% sigma(d) = a*d^3+b*d^2+c*d+e
coef = pinv(J)*y;

%% Cálculos modelo espacio libre
L_bas_esp_lib = 32.45 + 20*log10(F)+20*log10(distancias/1000);
P_rec_esp_lib = P_out +G_trans + G_rec - L_bas_esp_lib;

figure (3)
plot(distancias,L_bas_esp_lib,'b');
xlabel('Distancia (m)')
ylabel('L_b(dB)')
title('Pérdidas básicas de propagación modelo espacio libre')

figure (4)
plot(distancias,L_bas_esp_lib);
hold on;

```



```

plot(distancias,L_bas_prac(1,:), 's'); plot(distancias,L_bas_prac(2,:), 's');
plot(distancias,L_bas_prac(3,:), 's'); hold off
xlabel('Distancia (m)')
ylabel('L_b(dB)')
title('Pérdidas básicas de propagación modelo espacio libre frente a los
valores recibidos')

%% Modelo de dos rayos o tierra plana
h_t=1.5; %metros
h_r=0.5; %metros

L_b_TP = 120+40*log10(distancias/1000)-20*log10(h_t*h_r);

figure (5)
plot(distancias, L_b_TP, 'b');
xlabel('Distancia (m)')
ylabel('L_b(dB)')
title('Pérdidas básicas de propagación modelo tierra plana')

figure (6)
plot(distancias,L_b_TP);
hold on;
plot(distancias,L_bas_prac(1,:), 's'); plot(distancias,L_bas_prac(2,:), 's');
plot(distancias,L_bas_prac(3,:), 's'); hold off
xlabel('Distancia (m)')
ylabel('L_b(dB)')
title('Pérdidas básicas de propagación modelo tierra plana frente a los
valores recibidos')

%% Modelo log-distance path-loss model
L_b_ld = b(1)+10*b(2)*log10(distancias/d_ref);

figure (7)
plot(distancias,L_b_ld, 'c');
xlabel('Distancia (m)');
ylabel('L_b(dB)');
title('Pérdidas básicas de propagación modelo log-distance');

figure (8)
plot(distancias,L_b_ld);
hold on;
plot(distancias,L_bas_prac(1,:), 's'); plot(distancias,L_bas_prac(2,:), 's');
plot(distancias,L_bas_prac(3,:), 's'); hold off
xlabel('Distancia (m)')
ylabel('L_b(dB)')
title('Pérdidas básicas de propagación modelo log-distance frente a los
valores recibidos');

%% Modelo log-normal shadowing LNSM
figure (9)
L_b_LNSM = b(1)+10*b(2)*log10(distancias/d_ref) + sigma*rand(1);
plot(distancias,L_b_LNSM, 'r')
xlabel('Distancia (m)')
ylabel('L_b(dB)')
title('Pérdidas básicas de propagación modelo log-normal shadowing')

figure (10)
plot(distancias,L_b_LNSM);
hold on;

```

```

plot(distancias,L_bas_prac(1,:), 's'); plot(distancias,L_bas_prac(2,:), 's');
plot(distancias,L_bas_prac(3,:), 's'); hold off
xlabel('Distancia (m)')
ylabel('L_b(dB)')
title('Pérdidas básicas de propagación modelo log-normal shadowing frente a
los valores recibidos');

%% Modelo log-normal shadowing con varianza dinámica LNSM-DV
L_b_LNSM_DV =
b(1)+10*b(2)*log10(distancias/d_ref)+(coef(1)*(distancias).^3+coef(2)*(dista
ncias).^2+coef(3)*(distancias)+coef(4))*rand(1);
figure (11)
plot(distancias,L_b_LNSM_DV, 'm')
xlabel('Distancia (m)')
ylabel('L_b(dB)')
title('Pérdidas básicas de propagación modelo de sombra logarítmico-normal
con varianza dinámica')

figure (12)
plot(distancias,L_b_LNSM_DV);
hold on;
plot(distancias,L_bas_prac(1,:), 's'); plot(distancias,L_bas_prac(2,:), 's');
plot(distancias,L_bas_prac(3,:), 's'); hold off
xlabel('Distancia (m)')
ylabel('L_b(dB)')
title('Pérdidas básicas de propagación modelo de sombra logarítmico-normal
con varianza dinámica frente a los valores recibidos')

%% Superposición de todos lo modelos con los datos recibidos
figure (13)
plot(distancias,L_bas_prac(1,:), 's');
hold on;
plot(distancias,L_bas_prac(2,:), 's');
plot(distancias,L_bas_prac(3,:), 's');
plot(distancias,L_bas_esp_lib);
plot(distancias,L_b_TP);
plot(distancias,L_b_ld);
plot(distancias,L_b_LNSM);
plot(distancias,L_b_LNSM_DV);
hold off
xlabel('Distancia (m)')
ylabel('L_b(dB)')
legend('L_b debida a nodo 30.421', 'L_b debida a nodo 52.122', 'L_b debida a
nodo 58.503', ...
'L_b modelo espacio libre', 'L_b modelo tierra plana', 'L_b modelo log
distance', ...
'L_b modelo log normal shadowing', 'L_b modelo log normal shadowing con
varianza dinámica');

%% obtener la norma para cada modelo con los valores
% MSE x
% Obtener media total de los sensores y obtener errores
N = length(L_bas_prac);
L_bas_media_todos = mean(L_bas_prac);
MSE_esp_libre = sum((L_bas_media_todos-L_bas_esp_lib).^2)/N;
MSE_TP = sum((L_bas_media_todos-L_b_TP).^2)/N;
MSE_ld = sum((L_bas_media_todos-L_b_ld).^2)/N;
MSE_LNSM = sum((L_bas_media_todos-L_b_LNSM).^2)/N;
MSE_LNSM_DV = sum((L_bas_media_todos-L_b_LNSM_DV).^2)/N;
% obtener error de cada sensor con respecto a la media de cada modelo
% Sobre el sensor 1: 30.421

```

```
MSE_esp_libre_n1 = sum((L_bas_prac(1,:)-L_bas_esp_lib).^2)/N;
MSE_TP_n1 = sum((L_bas_prac(1,:)-L_b_TP).^2)/N;
MSE_ld_n1 = sum((L_bas_prac(1,:)-L_b_ld).^2)/N;
MSE_LNSM_n1 = sum((L_bas_prac(1,:)-L_b_LNSM).^2)/N;
MSE_LNSM_DV_n1 = sum((L_bas_prac(1,:)-L_b_LNSM_DV).^2)/N;
% Sobre el sensor 2: 52.122
MSE_esp_libre_n2 = sum((L_bas_prac(2,:)-L_bas_esp_lib).^2)/N;
MSE_TP_n2 = sum((L_bas_prac(2,:)-L_b_TP).^2)/N;
MSE_ld_n2 = sum((L_bas_prac(2,:)-L_b_ld).^2)/N;
MSE_LNSM_n2 = sum((L_bas_prac(2,:)-L_b_LNSM).^2)/N;
MSE_LNSM_DV_n2 = sum((L_bas_prac(2,:)-L_b_LNSM_DV).^2)/N;
% Sobre el sensor 3: 58.503
MSE_esp_libre_n3 = sum((L_bas_prac(3,:)-L_bas_esp_lib).^2)/N;
MSE_TP_n3 = sum((L_bas_prac(3,:)-L_b_TP).^2)/N;
MSE_ld_n3 = sum((L_bas_prac(3,:)-L_b_ld).^2)/N;
MSE_LNSM_n3 = sum((L_bas_prac(3,:)-L_b_LNSM).^2)/N;
MSE_LNSM_DV_n3 = sum((L_bas_prac(3,:)-L_b_LNSM_DV).^2)/N;
```



# REFERENCIAS

---

- [1] Jiuqiang Xu, Wei Liu, Fenggao Lang, Yuanyuan Zhang, Chenglong Wang, «Distance Measurement Model Based on RSSI in WSN,» *Wireless Sensor Network*, vol. 2, nº 8, 2010.
- [2] A. J. Wixted, P. Kinnaird, H. Larijani, A. Tait, A. Ahmadinia and N. Strachan, «Evaluation of LoRa and LoRaWAN for Wireless Sensor Networks,» *2016 IEEE Sensors*, Orlando, FL, 2016
- [3] Fei Hu, Xiaojun Cao, «Wireless Sensor Networks: Principles and Practice», Boca Raton, FL: CRC Press
- [4] Holger Karl, Andreas Willing, «Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks,» Hoboken, NJ: Wiley, 2007
- [5] Shuang-Hua Yang, «Wireless Sensor Networks: Principles, Design and Applications,» London: Springer London, 2014
- [6] José María Hernando Rábanos, «Transmisión por radio,» Madrid: Centro de Estudios Ramón Areces, 2008, 6ª edición
- [7] Sinan Kurt and Bulent Tavli, «Path-Loss Modeling for Wireless Sensor Networks,» *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, PP. 10.1109/MAP.2016.2630035
- [8] Paul Rosero, Santiago Núñez, Stalin Realpe, Vanessa Alvear, Luis Beltrán y Christian Rosado, «Internet de las cosas y redes de sensores inalámbricos: review,» *Sistemas Embebidos Estado Actual con Visión al Futuro*, 3ª edición. Asociación Mexicana de Software Embebido A.C., Marzo 2017, pp. 31-37
- [9] LoRaWAN – Long Range Wide Area Network, Blog Deusto, [consulta: 21 febrero 2019]. Available: <https://blogs.deusto.es/aplicaciones-tic/lorawan-long-range-wide-area-network/>
- [10] Esther Elena Flores Carbajal, Redes de sensores Inalámbricas Aplicado a la Medicina, Octubre 2012. Trabajo Fin de Máster de la Universidad de Cantabria.
- [11] Wireless Sensor Netwok. [consulta: 21 febrero 2019]. Available: <http://www.mfbarcell.es/conferencias/wsn.pdf>
- [12] David Gastón, «Redes de Sensores Inalámbricos, la tecnología invisible», Tecnología y Sociedad. Artículo de la revista BIT del Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación (COIT), [consulta: 21 febrero 2019]. Available: <http://www.libelium.com/libelium-downloads/libelium-bit-coit.pdf>
- [13] Tekniker: «Redes de sensores», [consulta: 21 febrero 2019]. Available: <http://www.tekniker.es/es/redes-de-sensores>
- [14] ¿Qué es una Red de Sensores Inalámbricos?, National Instruments, Abril 2009, [consulta: 21 febrero 2019]. Available: <http://www.ni.com/white-paper/7142/es/>

- [15] Francisco Ortiz Tapia, «Redes de sensores inalámbricos,» [consulta: 21 febrero 2019]. Available: [http://profesores.elo.utfsm.cl/~tarredondo/info/networks/Presentacion\\_sensores.pdf](http://profesores.elo.utfsm.cl/~tarredondo/info/networks/Presentacion_sensores.pdf)
- [16] Carlos Guijarro Fernández-Arroyo, Diseño y despliegue de una red de sensores de monitorización ambiental, Septiembre 2014. Trabajo Fin de Grado de la Universidad de Castilla la Mancha.
- [17] María Eugenia López García, Modelo de estimación de la distancia en interiores basado en medida RSSI en una WSN, Sevilla 2016. Trabajo Fin de Grado de la Universidad de Sevilla.
- [18] Geovanny Calderon, «Redes Inalámbricas,» [consulta: 21 febrero 2019]. Available: <http://redesinalambricasunidad5y6.blogspot.com/2014/12/unidad-6-redes-inalambricas-de-sensores.html>
- [19] Alfonso Calvo Montes, Ismael Nistal González, «Wireless Sensor Networks», [consulta: 21 febrero 2019]. Available: <http://www.tsc.uc3m.es/docencia/SyCT/docencia/SyCT/2007/Wireless%20Sensor%20Networks.pdf>
- [20] Miguel Ángel Casanova, «El protocolo LoRaWAN», [consulta: 21 febrero 2019]. Available: <http://www.alfaiot.com/index.php/es/2018/05/27/el-protocolo-lorawan/>
- [21] Asis Rodríguez, «Tecnología LoRa para sistemas IoT», [consulta: 21 febrero 2019]. Available: <https://www.comunicacionesinalambricashoy.com/tecnologia-lora-sistemas-iot/>
- [22] José Vera Pérez, Análisis e implementación de redes inalámbricas de sensores deterministas robustas, Agosto 2017. Trabajo Fin de Máster de la Universidad Politécnica de Valencia.
- [23] Paul Pickering, «Descripción general de la plataforma LoRa», [consulta: 21 febrero 2019] Available: <https://www.digikay.es/es/articulos/techzone/2017/jun/develop-lora-for-low-rate-long-range-iot-applications>
- [24] Carlos Caballero, «Así es SIGFOX, la red alternativa para el Internet de las cosas». Available: <https://www.nobbot.com/redes/sigfox-la-red-para-el-internet-de-las-cosas/>
- [25] «LoRa Alliance», [consulta: 21 febrero 2019] Available: <https://lora-alliance.org/>
- [26] Ignacio Esnoz, «Internet de las Cosas de largo alcance: LoRa», [consulta: 21 febrero 2019] Available: <https://www.teldat.com/blog/es/internet-de-las-cosas-de-largo-alcance-lora/>
- [27] «Semtech», [consulta: 21 febrero 2019]. Available: <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-transceivers/sx1272>
- [28] «Tecnología BLE (Smart Bluetooth Low Energy)», [consulta: 21 de febrero 2019]. Available: <http://www.global-tag.com/es/tecnologia-ble/>
- [29] Juan José Murillo Fuentes, «Radiación y Radiocomunicación». [consulta: 12 marzo 2019]. Available: <https://personal.us.es/murillo/docente/radio/documentos/tema7.pdf>
- [30] Angela Daboin, «Medición de RSSI y pruebas de cobertura para diferentes escenarios de propagación en una red inalámbrica de sensores, » REDIP-Revista Digital de Investigación y Postgrado, Venezuela, vol 2, N° 1, Abril 2012

- [31] O. Gualdrón, S. Pinzón, L. De Luque, I. Díaz, S. Vásquez, «Una herramienta para la predicción de la intensidad de la señal recibida (RSSI) para Wireless LAN 802.11b,» Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, vol 1, N° 7, 2006
- [32] José Luis Camargo Olivares, Modelo de Cobertura para Redes Inalámbricas de Interiores, Sevilla 2009. Proyecto Fin de Carrera de la Universidad de Sevilla, pp 117-142. [consulta: 12 marzo 2019]. Available: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11761/fichero/Volumen2%252F10-Capítulo5+-+El+canal+de+radiopropagación.pdf>
- [33] Wikipedia: la enciclopedia libre. [consulta: 12 marzo 2019]. <https://en.wikipedia.org/>
- [34] «Modelos y leyes de propagación». [consulta: 12 marzo 2019]. Available: <https://modelosleyespropagacion.wordpress.com/>
- [35] Jairo Beltrán, José Fermín, María Hernández, «Comparación de los modelos de propagación electromagnética implementados en la telefonía móvil,» Multiciencias [en línea], Vol 12, N° Extraordinario, 2012, pp 305-310 [consulta: 12 marzo 2019]. Available: <https://www.redalyc.org/html/904/90431109050/>
- [36] Manuel Jesús Cano Moreno, Red de sensores inalámbricos para el Canal del Bajo Guadalquivir: Planificación y Pruebas de viabilidad, Sevilla 2012. Proyecto Fin de Carrera de la Universidad de Sevilla, pp 7-30. [consulta: 12 marzo 2019]. Available: [http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/12046/fichero/2\\_Capitulo2.pdf](http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/12046/fichero/2_Capitulo2.pdf)
- [37] D. Bartolomé Arquillo, D. Claros Moreno, M. Domínguez Durán, C. Urdiales García, R. Trapero Miralles, F. Sandoval, «Caracterización del alcance y la potencia en redes de sensores inalámbricos,» 2007. [consulta: 12 marzo 2019]. Available: [http://www.grupoisis.uma.es/isis/administrator/components/com\\_jresearch/files/publications/BartolomeUrsi2007.PDF](http://www.grupoisis.uma.es/isis/administrator/components/com_jresearch/files/publications/BartolomeUrsi2007.PDF)
- [38] «Ministerios de Economía y Empresa - Avance Digital ». [consulta: 12 marzo 2019]. Available: <https://www.mincotur.gob.es/telecomunicaciones/es-es/Paginas/index.aspx>
- [39] Antonio Carmona Sánchez, Planificación mediante Atoll de red WiMAX móvil para los centro de la Universidad de Sevilla, Sevilla 2008. Proyecto Fin de Carrera de la Universidad de Sevilla. Capítulo 3: Espectro Radioeléctrico. [consulta: 12 marzo 2019]. Available: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11677/fichero/Volumen+1%252F4.-+Espectro+Radioel%C3%A9ctrico.pdf>
- [41] Diego Espuelas, «El rincón de la tecnología: El espectro radioeléctrico». Available: <http://tecnologia-escolapioslogrono.blogspot.com/2010/12/el-espectro-radioelectrico.html>
- [42] «Unión Internacional de Telecomunicaciones(UIT) » [consulta: 12 marzo 2019]. Available: <https://www.itu.int/es/Pages/default.aspx>
- [43] «Redes LPWAN». Available: <https://www.aprendiendoarduino.com/2018/03/05/redes-lpwan/>
- [44] Oscar Ubierna, «Las bandas libres de frecuencia». Available: <https://www.comunicacionesinalambricashoy.com/wireless/las-bandas-libres-de-frecuencias/>
- [45] «Modelos de propagación de gran escala». Available: <http://www.tsc.uc3m.es/docencia/SyCT/Tema%203/Tema3.pdf>

- [46] María José Madero , «Apuntes Sistemas Emergentes de Comunicaciones», Universidad de Sevilla, curso 2016-17.
- [47] Carlos Crespo, María José Madero , «Apuntes Fundamentos de Radiocomunicación», Universidad de Sevilla, curso 2015-16.