



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

INGENIERO TÉCNICO DE TELECOMUNICACIÓN,
ESPECIALIDAD EN SONIDO E IMAGEN

Título del proyecto:

**ANÁLISIS DE LA DEPENDENCIA TOPOLÓGICA DE
UNA RED DE SENSORES ZIGBEE EN RELACIÓN
CON EL CANAL DE RADIOPROPAGACIÓN PARA
ENTORNOS INTERIORES**

Ángel Armendáriz Mateos

Francisco Javier Falcone Lanas

Pamplona, Febrero 2011



UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA
E.T.S.I.I. y de Telecomunicación
Campus de Arrosadía s/n
31006-Pamplona Navarra-Spain
Tfno: 34-48-169000 Fax: 34-48-169169

upna
Universidad
Pública de Navarra
Nafarroako
Unibertsitate Publikoa

Acta de Proyecto Final de Carrera

Título:

“Análisis de la dependencia topológica de una red de sensores ZigBee en relación con el canal de propagación para entornos interiores ”

Alumno: Ángel Armendáriz Mateos

Tutor del Proyecto: Dr. Francisco Javier Falcone Lanas

Reunido el tribunal, compuesto por los siguientes miembros,

Presidente,

Secretario,

Vocal 1º,

Fdo:.....

Fdo:.....

Fdo:.....

acuerda otorgar la calificación de

Pamplona,.....de.....de 20.....

Resumen

Este proyecto se centra en el análisis de la dependencia topológica de una red de sensores ZigBee en relación con el canal de radiopropagación para entornos interiores. Pretende ofrecer tanto nociones básicas de la especificación ZigBee, como un completo estudio radioeléctrico tanto teórico como práctico de un local. Se da a conocer en qué consiste y como operan las redes Zigbee, detallando las principales características de este medio inalámbrico y contrastándolo con otros medios inalámbricos usados en la actualidad.

Se presenta la utilidad de este sistema en domótica, apoyado por conceptos teóricos necesarios, una base radioeléctrica de propagación indoor y por último describiendo los modelos empíricos y el trazado de rayos utilizados en el estudio. Para terminar, se presenta el estudio radioeléctrico, comparando resultados teóricos obtenidos empíricamente y con modelo de trazado de rayos con medidas experimentales realizadas en el local. De todo este proceso se obtienen conclusiones interesantes para la posterior implantación de los sistemas.

Abstract

This project focuses on the analysis of the topological dependency of a ZigBee sensor network in relation with radio propagation channel for indoor environments. The project aims to provide both basic knowledge of the ZigBee specification, a complete radio analysis as well as theoretical and practical issues of the technology.

We report the usefulness of this system in home automation, the necessary theoretical concepts supported by indoor radio propagation properties and finally describing the empirical models and ray tracing used in the study. Finally, a radio study is presented, comparing empirical and theoretical results with ray-tracing models and with experimental measurements. In this process interesting conclusions are obtained related with the future deployment of these systems.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quisiera agradecer a Francisco Falcone el haberme dado la oportunidad de realizar este proyecto y el interés que ha mostrado a la hora de resolver todas las dudas que me han ido surgiendo a lo largo de todo el proyecto.

A mi madre, porque gracias a ella y a su sacrificio, he logrado formarme y realizar una carrera universitaria y así ofrecerme la posibilidad de obtener un futuro prometedor. Por supuesto, agradecer al resto de mi familia, mi hermana, Andrea, Luis, José, mis tíos, primos,... la confianza depositada en mí.

A todos mis profesores, desde el colegio hasta la universidad por todo lo que he aprendido gracias a vosotros.

A todos mis compañeros y amigos de la universidad, porque sin todos vosotros y sin vuestra ayuda no hubiese llegado hasta donde estoy.

A todos mis amigos de siempre, Pascal, Txepas, Jokin,... y a todos los demás que siempre estáis ahí para animarme cuando lo necesito.

A Paula, porque tu apoyo en este camino ha sido muy importante para mí, ayudándome siempre y confiando en mi en todo momento.

Y a mi padre, que aunque no esté aquí, se que siempre está conmigo.

Gracias a todos.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	- 7 -
LISTA DE TABLAS	- 9 -
GLOSARIO	- 10 -
1. INTRODUCCIÓN.....	- 11 -
1.1 CONTEXTO DEL PROYECTO	- 11 -
1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	- 15 -
1.3 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA	- 15 -
2. ZIGBEE.....	- 16 -
2.1 DEFINICIÓN ZIGBEE.....	- 16 -
2.2 ESTANDAR 802.15.4	- 17 -
2.2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL.....	- 17 -
2.2.2 TIPOS DE DISPOSITIVOS	- 18 -
2.2.3 TOPOLOGIAS DE RED	- 19 -
2.2.3.1 TOPOLOGIA EN ESTRELLA.....	- 19 -
2.2.3.2 TOPOLOGIA EN ÁRBOL	- 20 -
2.2.3.3 TOPOLOGIA IGUAL A IGUAL (PEER TO PEER)	- 21 -
2.2.3.3.1 TOPOLOGIA EN MALLA	- 21 -
2.2.3.3.2 TOPOLOGIA EN ÁRBOL DE CLÚSTERS	- 22 -
2.2.4 ARQUITECTURA	- 23 -
2.2.4.1 CAPA FISICA (PHY).....	- 24 -
2.2.4.2 CAPA MAC	- 27 -
2.2.4.2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL	- 27 -
2.2.4.2.2 MODOS DE FUNCIONAMIENTO	- 28 -
2.2.4.2.3 ALGORITMO CSMA-CA.....	- 28 -
2.2.4.2.4 INICIALIZACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PAN	- 28 -
2.2.4.2.5 FORMATO DE TRAMA.....	- 29 -
2.3 ESPECIFICACIÓN ZIGBEE.....	- 31 -
2.3.1 NIVEL DE RED	- 31 -
2.3.1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL	- 31 -
2.3.1.2 FUNCIONES	- 32 -
2.3.1.3 FORMATO DE TRAMA.....	- 34 -
2.3.2 NIVEL DE APLICACIÓN	- 35 -
2.3.2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL	- 35 -
2.3.2.2 SUBCAPAS	- 35 -
2.3.2.3 FORMATO DE TRAMA.....	- 36 -
2.4 SEGURIDAD	- 37 -
2.5 EL DISPOSITIVO ZIGBEE	- 38 -
3. PROPAGACIÓN DE ONDAS	- 40 -
3.1 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE LA PROPAGACIÓN DE ONDAS	- 40 -
3.1.1 ABSORCIÓN DE ONDAS DE RADIO.....	- 40 -
3.1.2 REFLEXIÓN DE ONDAS DE RADIO	- 41 -
3.1.3 REFRACCIÓN DE ONDAS DE RADIO	- 44 -
3.1.4 DIFRACCIÓN DE ONDAS DE RADIO	- 44 -
3.1.5 DISPERSIÓN DE ONDAS DE RADIO (SCATTERING DIFUSO).....	- 45 -
3.2 MODELOS DE PROPAGACIÓN	- 45 -
3.2.1 TÉCNICAS DE CONSTRUCCIÓN DE MODELOS	- 45 -
3.2.1.1 TIPOS DE MODELOS	- 45 -
3.2.1.2 VALIDEZ DE UN MODELO	- 46 -
3.2.2 MODELOS DE PROPAGACIÓN EN REDES INALÁMBRICAS.....	- 47 -
3.2.2.1 CONCEPTO Y CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN	- 47 -
3.2.2.2 MODELOS DE PROPAGACIÓN OUTDOOR (ENTORNOS EXTERIORES)	- 48 -

3.2.2.3 MODELOS DE PROPAGACIÓN INDOOR (ENTORNOS INTERIORES).....	- 49 -
3.2.2.3.1 MODELOS DE PROPAGACIÓN EMPÍRICOS O ESTADÍSTICOS	- 49 -
3.2.2.3.1.1 MODELO DE PROPAGACIÓN EN ESPACIO LIBRE	- 49 -
3.2.2.3.1.2 MODELO DE PÉRDIDA DE TRAYECTO BASADO EN COST 231.....	- 51 -
3.2.2.3.1.3 MODELO BASADO EN EL NÚMERO DE MUROS Y SUELOS	- 52 -
3.2.2.3.1.4 MODELO ITU-R.....	- 52 -
3.2.2.3.1.5 MODELO LINEAR PATH ATTENUATION	- 53 -
3.2.2.3.1.6 MODELO KEENAN-MOTLEY	- 53 -
3.2.2.3.1.7 MODELO MULTI WALL	- 53 -
3.2.3.3.2 MODELOS BASADOS EN TÉCNICAS DE TRAZADO DE RAYOS	- 54 -
3.2.3.3.2.1 SOFTWARE DE TRAZADO DE RAYOS	- 56 -
4. ANÁLISIS DE SIMULACIÓN Y MEDIDA DE UN ESCENARIO INDOOR ZIGBEE.....	- 58 -
4.1. INSTRUMENTACIÓN	- 58 -
4.2. COMPARATIVA CON DISTINTOS MEDIOS INALÁMBRICOS.....	- 61 -
4.3. ANALISIS DE RESULTADOS	- 62 -
5. CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS.....	- 76 -
5.1 CONCLUSIONES	- 76 -
5.2 LÍNEAS FUTURAS	- 76 -
6. REFERENCIAS	- 78 -
7. ANEXOS	- 80 -
ANEXO A: MODELO DE PROPAGACIÓN DE TIERRA PLANA	- 80 -
ANEXO B: FICHA TÉCNICA DEL MÓDULO XBEE-PRO ZNET.....	- 87 -
ANEXO C: FICHA TÉCNICA DEL ANALIZADOR RF FIELD FOX N9912A	- 89 -
ANEXO D: VALORES OBTENIDOS CON LOS MODELOS EMPÍRICOS	- 97 -
ANEXO E: PUBLICACIÓN EN LA XXV EDICIÓN DEL SIMPOSIUM URSI(BILBAO, 2010) -	- 106 -

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Espectro electromagnético	11
Figura 2: Tecnologías en 2.4GHz.....	12
Figura 3: Algunas de las frecuencias ISM para distintas localizaciones.....	13
Figura 4: Aplicaciones Zigbee.....	13
Figura 5: Comparativa Estándar IEEE 802.15.4 en términos de BER y SNR.	14
Figura 6: Casa domótica vía zigbee.....	14
Figura 7: Pila de protocolos ZigBee	17
Figura 8: Topología en estrella.....	20
Figura 9: Estructura de una red en árbol.....	21
Figura 10: Topología en malla.....	22
Figura 11: Topología en árbol de clusters	23
Figura 12: En la parte izquierda de la imagen la Pila de protocolos del Modelo OSI y en la parte derecha la Arquitectura del estándar 802.15.4.....	24
Figura 13: Canales radio 802.15.4.....	26
Figura 14: Trama 802.15.4 a nivel físico o PPDU	26
Figura 15: Tratamiento de la PPDU	27
Figura 16: Estructura de la Trama de datos	30
Figura 17: Estructura de la Trama de ACK.....	30
Figura 18: Estructura de la Trama de Comando MAC.....	31
Figura 19: Estructura de la Trama Beacon.	31
Figura 20: Ejemplo de red mostrando las direcciones de red.....	34
Figura 21: Formato general de trama de red.	34
Figura 22: Capa de aplicación	35
Figura 23: Formato general de trama de aplicación	36
Figura 24: Formato de trama con seguridad habilitada	38
Figura 25: Diagrama de bloques de un Dispositivo ZigBee.....	39
Figura 26: Reflexión de una onda	41
Figura 27: Propagación multitrayecto	42
Figura 28: Ejemplo de propagación multitrayecto (5 rayos).....	43
Figura 29: Interferencia constructiva y destructiva	43
Figura 30: Fenómeno de Difracción	44
Figura 31: Apertura recibida en una antena.....	50
Figura 32: Reflexión especular en la Ley de Snell.....	54
Figura 33: Figura del método de las imágenes	55
Figura 34: Figura del método de Ray Launching.....	55
Figura 35: Vista en 3D de los rayos lanzados en un escenario cualquiera.....	56
Figura 36: Módulo RF XBee-PRO.....	58
Figura 37: Analizador RF Field Fox N9912A.....	60
Figura 38: Local de Medidas	63
Figura 39: Modelo de trazado de rayos del local de medidas	64
Figura 40: Coordinador (Parte superior) con 3 dispositivos finales.....	65
Figura 41: Módulo XBee PRO sobre placa de montaje	65
Figura 42: Escenario 1	66
Figura 43: Modelos empíricos grupo sensores azul	67
Figura 44: Modelos empíricos grupo sensores verde	67
Figura 45: Simulación de trazado de rayos, con altura h = 1 mts.	68

Figura 46: Escenario 2	- 69 -
Figura 47: Modelos empíricos grupo sensores azul	- 70 -
Figura 48: Modelos empíricos grupo sensores verde	- 70 -
Figura 49: Simulación de trazado de rayos	- 71 -
Ilustración 50: Medidas realizadas con end devices a 1.6 m.....	- 71 -
Ilustración 51: Medidas realizadas con end devices a 1.8 m.....	- 72 -
Figura 52: Escenario 3	- 72 -
Figura 53: Comparación de modelos empíricos con medidas con el analizador RF..	- 73 -
Figura 54: Escenario 4	- 73 -
Figura 55: Comparación de modelos empíricos con medidas con el analizador RF..	- 74 -
Figura 56: Escenario 5	- 74 -
Figura 57: Comparación de modelos empíricos con medidas con el analizador RF..	- 75 -

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Características radio del Estándar IEEE 802.15.41

Tabla 2: Características de las frecuencias IEEE 802.15.41

Tabla 3: Parámetros de modulación

Tabla 4: Atenuación para diferentes materiales

Tabla 5: Valores medios de los factores de pérdida según categoría

Tabla 6: Características del módulo XBee- PRO ZNET

Tabla 7: Características técnicas del Analizador RF Field Fox N9912A

Tabla 8: Tabla comparativa de ZigBee con otros medios inalámbricos

Tabla 9: Medidas reales con end devices

Tabla 10: Medidas reales con analizador RF

GLOSARIO

ACK: Reconocimiento (Acknowledgement)
AP: Punto de acceso (Access Point)
APS: Subcapa de soporte de aplicación (Application Sublayer)
BPSK: Transmisión por Desplazamiento Binario de fase (Binary Phase Shift keying)
CCA: Indicador de canal libre (Clear Channel Assessment)
CRC: Código de redundancia cíclico
CSMA-CA: Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
DSSS: Direct Sequence Spread Spectrum
ED: Dispositivo final (End Device)
FCS: Frame Check Sequence
FFD: Dispositivo de funcionalidad completa (Full-Function Device)
FHSS: Frequency Hop Spread Spectrum
GHz: GigaHertzios
GTS: Guarantee Time Slots
ID: Identificador de red
IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISM: Banda frecuencial usada para fines industriales, científicos y médicos
ITU: Unión Internacional de Telecomunicaciones
LQI: Link Quality Indicator
LSB: Bit menos significativo (Less Significant Bit)
LLC: Control de Enlace Lógico basado en IEEE 802.2 (Logical Link Control)
MAC: Capa de control de acceso al medio (Medium Access Control layer)
MFR: Secuencia de control (MAC Footer)
MHR: Cabecera (MAC Header)
MHz: MegaHertzios
MIC: Código de integridad (Message Integrity Code)
MSB: Bit más significativo (Most Significant Bit)
OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OQPSK: Offset Quadrature Phase Shift Keying
PAN: Red de área personal (Personal Area Network)
PDU: Protocol Data Unit
PHY: Capa física (Physical layer)
PPDU: Physical Protocol Data Unit
RF: Radio frecuencia (Radio Frequency)
RFD: Dispositivo de funcionalidad reducida (Reduced-Function Device)
RX: Receptor
SHR: Cabecera de sincronización de una trama
SOF Indicador de comienzo de trama
TX: Transmisor
WPAN: Red de área personal inalámbrica (Wireless Personal Area Network)
ZC: Coordinador ZigBee (ZigBee coordinator)
ZDO: Objeto de dispositivo ZigBee (ZigBee Device Object)
ZED: Dispositivo final ZigBee (ZigBee end device)
ZigBee Stack: Pila de protocolos que agrupa todos los niveles y especificaciones
ZR: Router ZigBee (ZigBee Router)

1. INTRODUCCIÓN

1.1 CONTEXTO DEL PROYECTO

Durante muchos años, la comunicación mediante cables ha sido la forma más habitual de intercambiar información entre dos puntos. No obstante, y a pesar de sus evidentes ventajas, este tipo de comunicaciones presenta las siguientes limitaciones [1]:

- Geográficas: Dependiendo de la geografía del terreno donde queramos realizar las comunicaciones, la instalación y el mantenimiento de la infraestructura necesaria pueden resultar complicados. Esto sucede especialmente en áreas rurales, donde la orografía y la extensión del terreno son variables a tener en cuenta.

- Económicas: El coste de una red es proporcional a la longitud de cable requerido, así como al número de repetidores necesarios para contrarrestar los efectos de la atenuación. Esto significa que un aumento en la envergadura de nuestra red implica un aumento considerable en su coste.

- Comodidad: Teniendo en cuenta las necesidades de portabilidad de los usuarios de hoy en día, el uso de cables para el intercambio de información entre aparatos electrónicos se hace extremadamente inadecuado.

Estas tres principales limitaciones de las comunicaciones por cable explican el auge que están viviendo las tecnologías inalámbricas en los últimos años.

Dentro del espectro electromagnético, que podemos ver en la figura 1, se usan principalmente las bandas infrarrojos (IR) y de radiofrecuencia (RF) para transmitir señales de forma inalámbrica. Las comunicaciones por IR pueden alcanzar tasas de transferencia de hasta 4 Mbps o más, pero presentan el inconveniente de que sólo permiten las comunicaciones para pequeñas distancias y siempre que el transmisor y el receptor tengan línea directa de visión. Su uso se centra principalmente en las comunicaciones de periféricos electrónicos como teléfonos móviles. Por contra, las comunicaciones por radiofrecuencia a la vez que poseen altas tasas de transferencia, también permiten la comunicación entre dos puntos muy alejados y sin línea directa de visión.

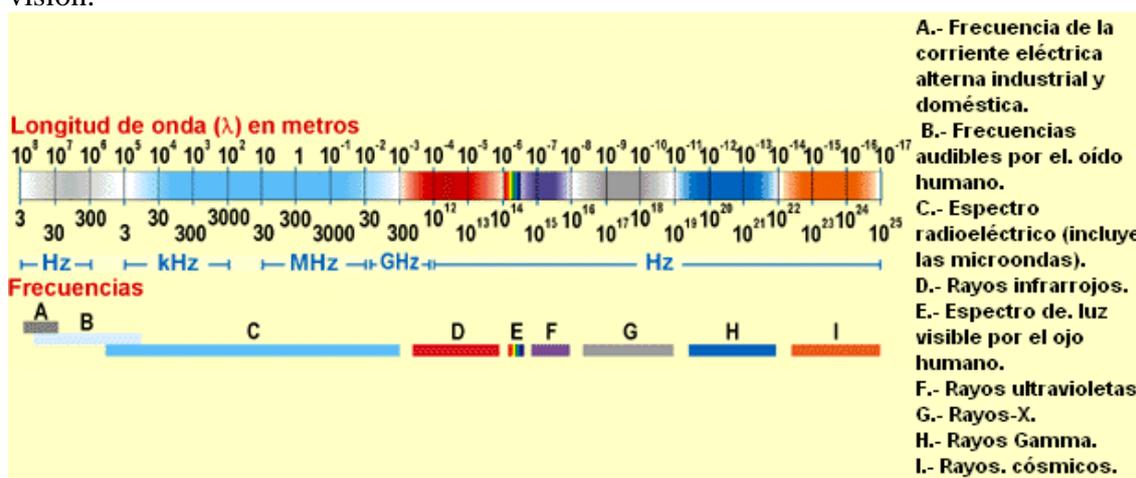


Figura 1: Espectro electromagnético. Fuente [2]

Dentro del espectro de RF podemos encontrar la banda ISM (Industrial, Scientific and Medical). Ésta es una parte del espectro electromagnético de propósito general, que

puede ser usada sin necesidad de licencia siempre que se respeten unos ciertos límites de potencia emitida. La banda ISM fue definida por el sector de radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU-R). El único requerimiento para desarrollar un producto que use la banda ISM es adaptarse a diversas normas especificadas por los organismos que regulan el espectro electromagnético en diversas zonas geográficas. En concreto, si nos encontramos en Europa tendremos que seguir las normas de la ETSI (European Telecommunications Standards Institute) y si nos encontramos en los Estados Unidos las de la FCC (Federal Communication Commision).

Los sistemas diseñados para trabajar en la banda ISM se caracterizan por un bajo consumo y, en principio, tasas de transmisión no muy altas. No obstante, en los últimos años se ha venido trabajando intensamente para aumentar dichas tasas de transmisión de datos. La mayor parte de los sistemas que trabajan en la banda ISM lo hacen bien a 2,4 GHz o bien en la banda por debajo de 1 GHz. Mientras la banda a 2,4 GHz es universal, por debajo de 1 GHz las frecuencias estandarizadas varían de un país a otro.

En la figura 3 podemos ver las frecuencias usadas en las diferentes partes del mundo.

La banda de 2,4 GHz es recomendable cuando la interoperabilidad es un requerimiento para nuestro dispositivo. Además, si necesitamos que dicho dispositivo funcione correctamente en distintas zonas geográficas, 2,4 GHz es la mejor elección. Por otro lado, puesto que a esta frecuencia trabajan un gran número de tecnologías (Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, etc) e incluso algunos hornos microondas, los altos niveles de interferencia son un problema a superar. En la siguiente figura se puede ver el espectro de ocupación en las bandas del protocolo 802.

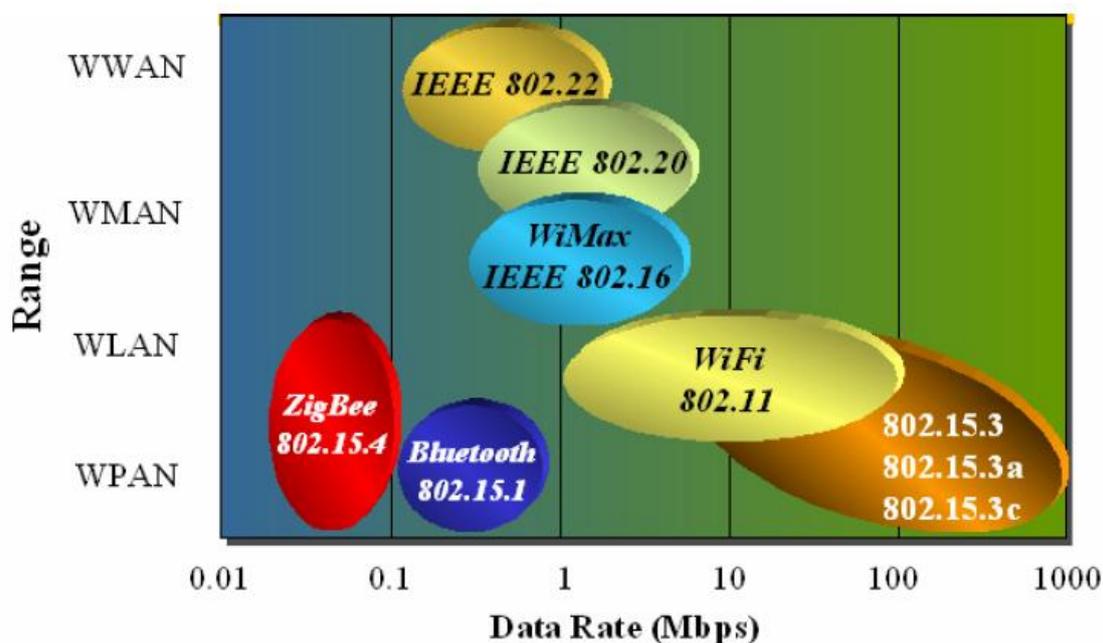


Figura 2: Tecnologías en 2.4GHz. Fuente [3]

Por último, una frecuencia mayor implica que la señal será absorbida más fácilmente por el entorno y los objetos circundantes, con lo que el rango de alcance disminuirá respecto al caso de usar frecuencias menores.

Usando el rango de frecuencias por debajo de 1 GHz mejoramos algunas de las características que presenta la banda de 2,4 GHz, en concreto aquellas relacionados con

las interferencias y con el rango de alcance. No obstante trabajar con una frecuencia menor hace que disminuya el ancho de banda.

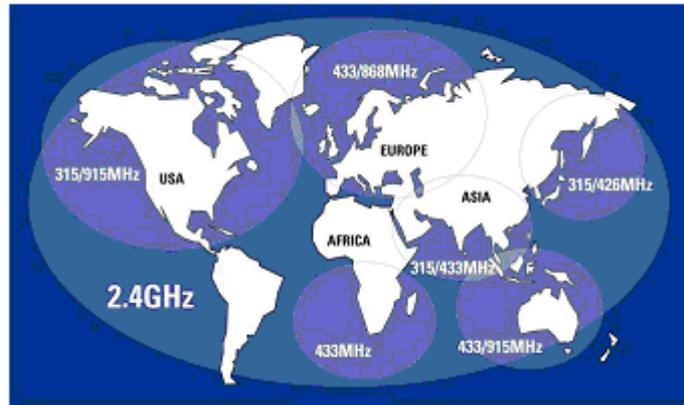


Figura 3: Algunas de las frecuencias ISM para distintas localizaciones. Fuente [4]

Para el caso de nuestro proyecto nos centraremos en el estudio de ZigBee, concretamente con dispositivos XBee Pro que trabajan en la banda de los 2,4 GHz. ZigBee es un estándar de comunicaciones inalámbrico diseñado por la ZigBee Alliance. No es una tecnología, sino un conjunto estandarizado de soluciones que pueden ser implementadas por cualquiera persona que lo desee en cualquier ambito; doméstico (domótica), sanitario o logístico entre otros. En la figura 4 se puede observar la gran variedad de aplicaciones de uso de Zigbee.



Figura 4: Aplicaciones Zigbee. Fuente [5]

Como acabo de mencionar, la investigación abordará la tecnología inalámbrica ZigBee, basada en el estándar 802.15.4 que por su poca introducción al mercado no es muy conocida a pesar de que no es muy reciente.

ZigBee comunica una serie de dispositivos haciendo que trabajen de una forma eficiente. La red emplea una serie de módulos con distintas funciones cada uno de

ellos, utilizando baja potencia de transmisión y teniendo como objetivo principal las aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos y maximización de la vida útil de sus baterías. Es ideal para conexiones con diversos tipos

de topología, lo que a su vez lo hace más seguro, barato y que no haya ninguna dificultad a la hora de su construcción porque es muy sencilla.

Como se puede apreciar en la figura 5 [3] proporciona buenas prestaciones en entornos de bajo SNR.

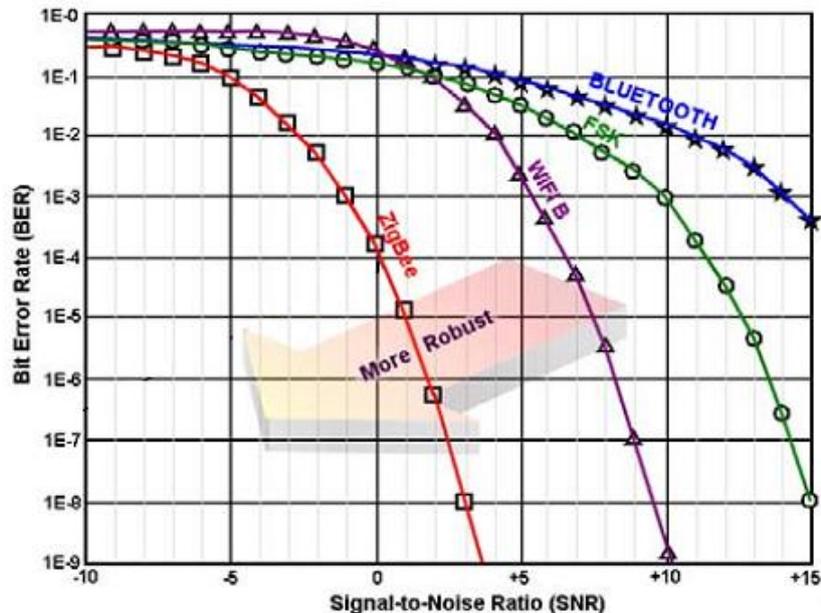


Figura 5: Comparativa Estándar IEEE 802.15.4 en términos de BER y SNR.

En principio, el ámbito donde se prevé que esta tecnología cobre más fuerza es en domótica.

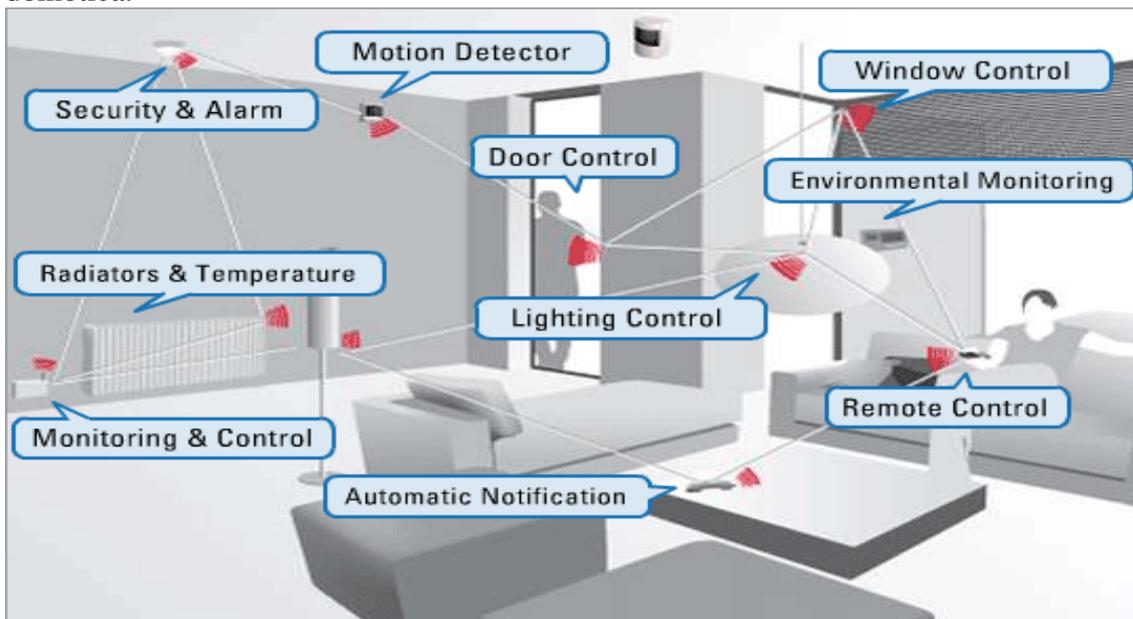


Figura 6: Casa domótica vía zigbee. Fuente [6]

Zigbee es la tecnología inalámbrica del futuro que no tiene competencia fuerte con las tecnologías existentes debido a que sus aplicaciones son de automatización de edificios, hogares e industriales, especialmente para aplicaciones con usos de sensores.

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

Se ha creído oportuno detallar de forma concisa los objetivos que se pretenden conseguir con el trabajo de este proyecto para que, de este modo, queden claros desde un principio.

El principal objetivo que se pretende alcanzar es analizar la dependencia topológica de una red de sensores ZigBee en relación con el canal de radiopropagación para entornos interiores.

Además se va dar a conocer en qué consiste y como operan las redes Zigbee. Se presentarán las características, ventajas y desventajas de este medio inalámbrico. Para finalizar se compararán las redes Zigbee con las diferentes tecnologías inalámbricas existentes. Consecuentemente deberán realizarse varias medidas en un recinto adecuado para poder realizar el posterior análisis.

1.3 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

La memoria está constituida por tres grandes bloques: explicación del funcionamiento de ZigBee, donde se incluye el estándar 802.15.4, características básicas de la propagación de ondas y por último, el análisis de los resultados obtenidos.

En un principio se ha estudiado y buscado información acerca del medio inalámbrico ZigBee. La importancia de este bloque es la de dar a conocer sus principales prestaciones y limitaciones. Se ha incluido también una tabla comparativa con distintos medios inalámbricos para cerciorarnos de que es una buena opción la utilización de ZigBee.

Una vez adquiridos los conocimientos suficientes, se ha pasado a la búsqueda de un recinto para realizar las medidas. Tras la selección del local hemos realizado las distintas mediciones para conseguir unos resultados fiables, para así, poder realizar seguidamente el análisis de los datos obtenidos.

Finalmente, y como síntesis de todo lo que se ha trabajado a lo largo del proyecto, se detallan las conclusiones a las que se han llegado. Mencionar que no solo se detallan las conclusiones finales, sino que también, una propuesta de posibles líneas futuras.

2. ZIGBEE

En este apartado se tratará de forma amplia y específica el funcionamiento de este tipo de medio inalámbrico, partiendo de una definición de ZigBee y posteriormente estudiando tanto sus principales características como su funcionamiento en una red ZigBee.

2.1 DEFINICIÓN ZIGBEE

ZigBee es el nombre de la especificación de un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica para su utilización con radios digitales de bajo consumo, basada en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal (wireless personal area network, WPAN). [7] Su objetivo son las aplicaciones para redes Wireless que requieran comunicaciones seguras y fiables con baja tasa de envío de datos y maximización de la vida útil de sus baterías.

Todo basado en un estándar público global que permita a cualquier fabricante crear productos que sean compatibles entre ellos.

La red, en su conjunto, utiliza una cantidad muy pequeña de energía de forma que cada dispositivo individual pueda tener una autonomía de hasta 5 años antes de necesitar un recambio en su sistema de alimentación.

El medio de transmisión ZigBee trabaja sobre la banda ISM. Éstas son reservadas internacionalmente para uso no comercial de radiofrecuencia electromagnética en áreas industrial, científica y médica. Las bandas ISM son definidas por la ITU en el artículo 5 de las Regulaciones Radio (RR), concretamente puntos 5.138 y 5.150.

En la Tabla 1 se puede observar las características principales de cada una de ellas.

<i>Frecuencia</i>	<i>Banda</i>	<i>Cobertura</i>	<i>Nº de canales</i>	<i>Sensitividad Rx (dBm)</i>	<i>Modulación</i>
2.4 GHz	ISM	Mundial	16	-85	O-QPSK
868 MHz		Europa	1	-92	BPSK
915 MHz	ISM	America	10	-92	BPSK

Tabla 1. Características radio del Estándar IEEE 802.15.4

La pila de protocolos ZigBee, también conocida como ZigBee Stack, se basa en el nivel físico (PHY) y el control de acceso al medio (MAC) definidos en el estándar IEEE 802.15.4, que desarrolla estos niveles para redes inalámbricas de área personal de baja tasa de transferencia (LR-WPAN, Low Rate - Wireless Personal Area Network). La especificación ZigBee completa este estándar añadiendo cuatro componentes principales:

- Nivel de red.
- Nivel de aplicación.
- Objetos de dispositivo ZigBee (ZDO, ZigBee Device Objects).
- Objetos de aplicación definidos por el fabricante.

Además de añadir dos capas de alto nivel (nivel de red y de aplicación) a la pila de protocolos, es importante la adición de los ZDO, responsables de llevar a cabo una serie

de cometidos, entre los que se encuentran el mantenimiento de los roles de los dispositivos, la gestión de peticiones de unión a una red, el descubrimiento de otros dispositivos y la seguridad. En la figura 7 vemos de forma esquematizada los distintos niveles del estándar 802.15.4 y de la especificación ZigBee.

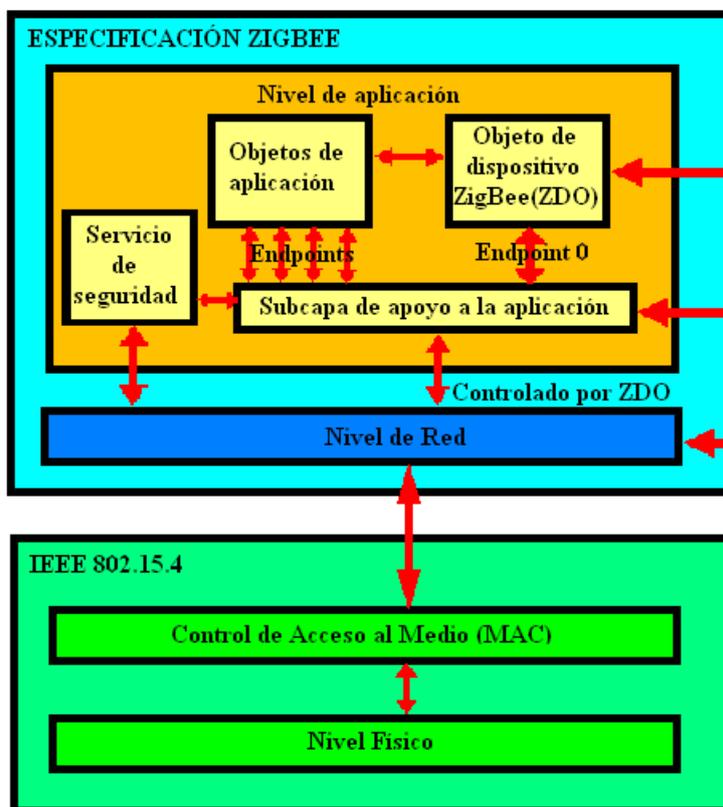


Figura 7: Pila de protocolos ZigBee. Fuente [8]

2.2 ESTANDAR 802.15.4

2.2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

El estándar IEEE 802.15.4 [8] define las características de la capa física y de la capa de control de acceso al medio (MAC) para redes inalámbricas de área personal (WPAN, *Wireless Personal Area Networks*) de baja tasa de transmisión. Las ventajas de utilizar el estándar IEEE 802.15.4 es que permite la utilización de dispositivos de fácil instalación que proveen transmisiones confiables a distancias cortas a un precio muy bajo. Por otro lado, el estándar IEEE 802.15.4 permite proporcionar un tiempo de vida razonable al utilizar fuentes de energía limitada (por ejemplo, las baterías alcalinas) y al mismo tiempo proporciona una pila de protocolo que es simple y sencilla.

Las características generales del estándar de comunicación IEEE 802.15.4, son:

- Tasas de transferencias de 250Kb/S, 40Kb/S y 20Kb/S.
- Direccionamiento corto con 16 bits y extendido con 64 bits.
- Garantía del manejo de las ranuras de tiempo (GTS, *guaranteed time slot*).
- Detección de los niveles de energía recibidos (ED, *energy detection*).
- Indicadores de calidad en el enlace así como de conmutación de canales para recibir paquetes (LQI, *link quality indication*).
- Acceso al canal por CSMA-CA (CCA, *clear channel assessment*).

El estándar de comunicaciones IEEE 802.15.4 tiene dos tipos de dispositivos que participan en la red: dispositivo con todas las funciones (FFD, *Full Function Device*) y dispositivo con funciones reducidas (RFD, *Reduced Function Device*), como se verá en el apartado 2.2.2.

Dependiendo de la aplicación a utilizar, el estándar permite operar en distintas topologías.

Éste estándar no establece un nivel de red pero si plantea parámetros para su implementación. El funcionamiento de la red depende de su configuración, debido a que una LR-WPAN puede utilizar uno de los dos mecanismos de acceso a los canales: sin *Beacon* y con *Beacon*.

2.2.2 TIPOS DE DISPOSITIVOS

Una red Zigbee la forman básicamente 3 tipos de elementos; un único dispositivo coordinador, dispositivos Routers y dispositivos finales (End points) [7] [8] [9]:

- Coordinador ZigBee (ZigBee coordinator, ZC): El tipo de dispositivo más completo, responsable de establecer el canal de comunicaciones y del PAN ID (identificador de red) para toda la red. Una vez establecidos estos parámetros, el Coordinador puede formar una red, permitiendo unirse a él routers y *end points*. Una vez formada la red, el Coordinador hace las funciones de router, esto es, participar en el enrutado de paquetes y ser origen y/o destinatario de información.

Puede actuar como director de una red en árbol así como servir de enlace a otras redes. Existe exactamente un coordinador por cada red, que es el nodo que la comienza en principio. Puede almacenar información sobre la red y actuar como su centro de confianza en la distribución de claves de cifrado.

- Router ZigBee (ZR): Es un nodo que crea y mantiene información sobre la red para determinar la mejor ruta para enrutar un paquete de información. Lógicamente un router debe unirse a una red Zigbee antes de poder actuar como router retransmitiendo paquetes de otros routers o de *end points*.

Además tienen la posibilidad de almacenar temporalmente en una tabla interna las tramas que le llegan para sus dispositivos asociados, de esa manera cuando un *end device* asociado a un determinado router despierta y le pregunta si hay algo para él, el router le enviará las tramas que tenga almacenadas para él.

- Dispositivo final (ZigBee end device, ZED): Posee la funcionalidad necesaria para comunicarse con su nodo padre (el coordinador o un router), pero no puede transmitir información destinada a otros dispositivos ni realizar funciones de enrutamiento. De esta forma, este tipo de nodo puede estar dormido la mayor parte del tiempo, aumentando la vida media de sus baterías. Un ZED tiene requerimientos mínimos de memoria y es por tanto significativamente más barato.

En base a su funcionalidad puede plantearse una segunda clasificación:

- Dispositivo de funcionalidad completa (FFD): Denominado también nodo activo. Es capaz de recibir mensajes en formato del estándar 802.15.4. Gracias

a la memoria adicional y a la capacidad de computar, puede funcionar como coordinador o router o puede ser usado en dispositivos de red que actúen de interface con los usuarios.

- Dispositivo de funcionalidad reducida (RFD): También conocido como nodo pasivo. Tiene capacidad y funcionalidad limitadas con el objetivo de conseguir un bajo coste y una gran simplicidad. Básicamente, son los sensores/actuadores de la red.

Está pensado para realizar tareas extremadamente simples en las que se envíen pequeñas cantidades de datos. Ejemplos de esto pueden ser interruptores de luz, sensores de infrarrojos u otros dispositivos con una funcionalidad básica. Sólo pueden estar conectados a un FFD. Únicamente pueden funcionar como dispositivos finales.

Un nodo ZigBee (tanto activo como pasivo) reduce su consumo gracias a que puede permanecer dormido la mayor parte del tiempo. Cuando se requiere su uso, el nodo ZigBee es capaz de despertar en un tiempo ínfimo, para volverse a dormir cuando deje de ser requerido. Un nodo cualquiera despierta en aproximadamente 15 ms. Además de este tiempo, se muestran otras medidas de tiempo de funciones comunes:

- Nueva enumeración de los nodos esclavo (por parte del coordinador): aproximadamente 30 ms.
- Acceso al canal entre un nodo activo y uno pasivo: aproximadamente 15 ms.

2.2.3 TOPOLOGIAS DE RED

Las redes están compuestas por grupos de dispositivos separados por distancias suficientemente reducidas. Cada dispositivo posee un identificador único de 64 bits, aunque en la red se utilizan identificadores cortos de 16 bits que son asignados por el coordinador.

Un aspecto a tener muy en cuenta son los tipos de topologías de red que permite el estándar que soporta ZigBee. Su nivel de red permite tres topologías distintas:

- Topología en estrella.
- Topología en árbol.
- Topología igual a igual.

Toda red necesita al menos un dispositivo coordinador (FFD), encargado de su creación, mantenimiento básico y control de sus parámetros. Seguidamente estudiaremos de forma detallada los distintos tipos de topologías de ZigBee, dónde se sitúa en cada uno de ellos el coordinador de la red y cuál es la topología más adecuada.

2.2.3.1 TOPOLOGIA EN ESTRELLA

En redes en estrella el coordinador de red [1] [8], llamado coordinador PAN, se sitúa en el centro, y toda conexión que se quiera realizar entre los distintos nodos de la red debe pasar por éste. Éste nodo central activo dispone de los medios necesarios para prevenir problemas, ya que por él circulan todos los paquetes de las distintas conexiones entre módulos. En la figura 8 vemos ilustrada la típica estructura de una red en estrella.

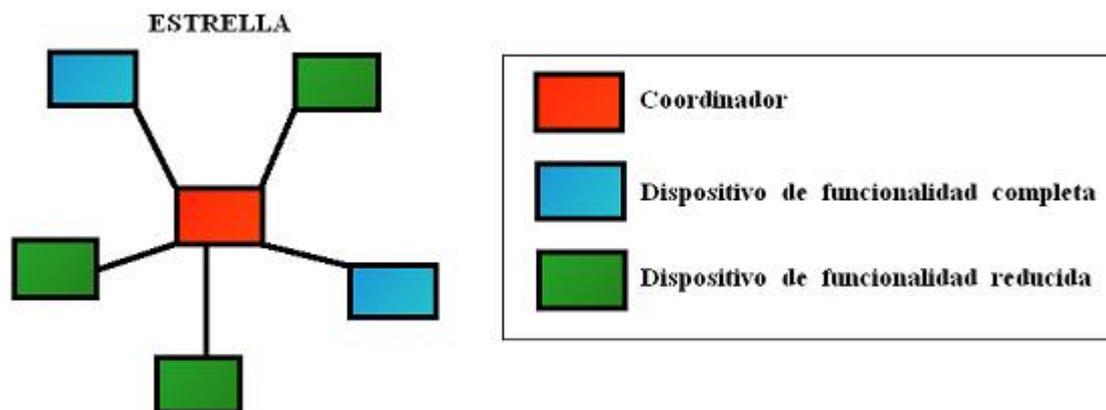


Figura 8: Topología en estrella

La alimentación de los dispositivos finales puede ser por baterías mientras que el coordinador debe estar directamente conectado a través de la red eléctrica ya que su consumo es mucho mayor.

Las ventajas que nos puede aportar una red en estrella sería la facilidad a la hora de implementarla, adecuada para redes temporales, el fallo de un nodo periférico no influiría en el comportamiento del resto de la red y no hay problemas con colisiones de datos ya que cada estación tiene su propia conexión al coordinador central.

En contrapartida, la utilización de una red en estrella nos limita el número de nodos que pueden estar conectados a la red. También se debe tener muy en cuenta que los costes de mantenimientos pueden aumentar a largo plazo, y que el fallo del nodo central puede echar abajo la red entera.

Otro problema de esta configuración es que la expansión de la red está muy limitada puesto que el rango de alcance del coordinador es el que define el tamaño de la red.

A causa de todo ello, podemos confirmar que una red en estrella puede ser poco fiable en el momento de realizar transferencias de información.

2.2.3.2 TOPOLOGIA EN ÁRBOL

Topología de red en la que los nodos están colocados como su propio nombre indica en forma de árbol, como se puede observar en la figura 9 [1] [8].

Para este tipo de topología el coordinador será la raíz del árbol. Desde una vista topológica, la conexión en árbol es parecida a una serie de redes en estrella interconectadas, salvo en que no tiene un nodo central. En cambio, tiene un nodo de enlace troncal, desde el que se ramifican los demás nodos.

En este tipo de redes se permite el uso de router ZigBee para interconectar los distintos nodos de la red. Así mismo, la comunicación en árbol es estrictamente jerárquica con lo que puede utilizar opcionalmente tramas balizas (véase capítulo 2.2.4.2.2). Un fallo de un nodo no implica la interrupción en las comunicaciones. Se comparte el mismo canal de comunicaciones.

Los problemas asociados a este tipo de topología radican en que los datos son recibidos por todas las estaciones sin importar para quien vayan dirigidos. Por lo tanto es necesario dotar a la red de un mecanismo que permita identificar al destinatario de los mensajes. Además, debido a la presencia de un medio de transmisión compartido entre

muchos dispositivos, pueden producirse interferencias entre las señales cuando dos o más transmitan al mismo tiempo. La solución al primero de estos problemas aparece con la introducción de un identificador de módulo destino. Para darle solución al segundo problema, hay que mantener una coordinación entre todos los nodos, y para eso se utiliza cierta información de control en las tramas que controlan quien transmite en cada momento, utilizando tramas balizas mencionadas anteriormente.

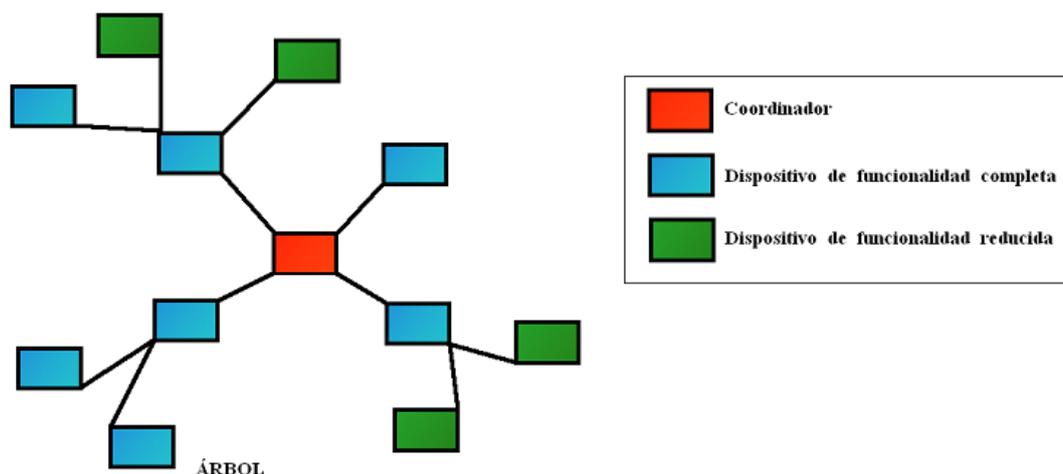


Figura 9: Estructura de una red en árbol

2.2.3.3 TOPOLOGIA IGUAL A IGUAL (PEER TO PEER)

En este tipo de red se puede establecer comunicación directa entre cualquier par de nodos [1] [8]. El coordinador no realiza funciones muy diferentes a las que realizan el resto de routers de la red; de hecho, la función de coordinador la realiza el primer router que forme parte de la red. Al no depender de un único dispositivo para gestionar la red, la fiabilidad de esta configuración es mayor.

En la topología *peer to peer* ganamos en flexibilidad a costa de aumentar la complejidad. Esto se debe a que para comunicar cualquier par de dispositivos hay más de un camino posible. La elección de dicho camino conlleva un aumento de computación que debe realizarse a nivel de red. Por lo tanto, estas consideraciones no se tienen en cuenta en la especificación del IEEE 802.15.4 si no que se definen en la especificación de ZigBee.

Ésta topología solo tiene un coordinador PAN, sin embargo, es diferente de la topología estrella debido a que cualquier dispositivo puede comunicarse con cualquier otro mientras la distancia entre ellos esté en el rango de comunicación directa. La topología *peer to peer* permite formaciones de redes más complejas, tales como las topologías tipo *malla (mesh)* o árbol de clusters (*clustertree*).

2.2.3.3.1 TOPOLOGIA EN MALLA

La topología más interesante es la topología de malla [1] [8]. Consiste en que al menos uno de los nodos tendrá más de dos conexiones. Con ello conseguimos que si en un

momento dado, un nodo del camino falla y se cae, pueda seguir la comunicación entre todos los demás nodos debido a que se rehacen todos los caminos.

El establecimiento de una red de malla es una manera de encaminar datos, voz e instrucciones entre los nodos. Las redes de malla se diferencian de otras redes en que las piezas de la red (los nodos) están conectadas unas con otras por uno u otro camino. Esta configuración ofrece caminos redundantes por toda la red, de modo que si falla una conexión, otra se hará cargo del tráfico.

Esta topología, a diferencia de las vistas en apartados anteriores, no requiere de un servidor o nodo central, con lo que se reduce el mantenimiento. Un error en un nodo, sea importante o no, no implica la caída de toda la red.

Las redes de malla son autogenerables, es decir, la red puede funcionar incluso cuando un nodo desaparece o la conexión falla, ya que el resto de nodos evitan el paso por ese punto. Consecuentemente, se forma una red muy confiable.

Gracias a las estructuras arbitrarias que permite la topología en malla, figura , es posible llevar los mensajes de un nodo a otro por diferentes caminos. A consecuencia de este tipo de estructura no se pueden usar tramas balizas.

Estas redes permiten el uso de routers ZigBee para habilitar la comunicación en el nivel de red. Estos no son Coordinadores ZigBee, pero pueden serlo de sus respectivos espacios de operación personal definidos por 802.15.4.

Aunque la facilidad de solución de problemas y el aumento de la fiabilidad son ventajas muy interesantes, estas redes resultan más caras de instalar.

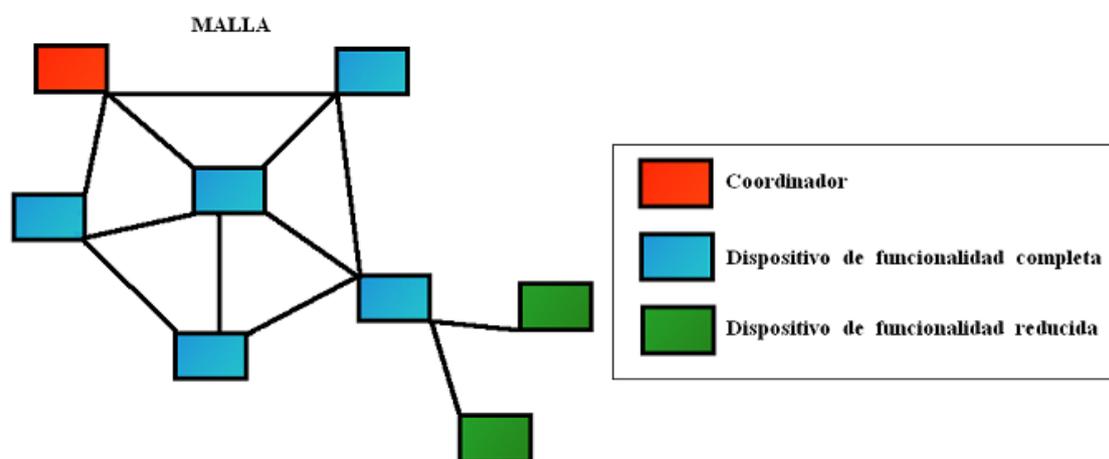


Figura 10: Topología en malla

2.2.3.3.2 TOPOLOGIA EN ÁRBOL DE CLÚSTERS

Esta topología emplea redes punto a punto [1] [8]. Las redes punto a punto pueden formar patrones arbitrarios de conexión, donde su extensión se ve limitada únicamente por la distancia existente entre cada par de nodos.

Como se puede observar en la figura 11 las estructuras árbol de *clusters* están formadas por el conexionado entre nodos FFD y RFD. Puesto que se necesita de al menos un nodo FFD para poder conectar diferentes RFD's, se aprovecha de ello para generar estructuras donde los nodos RFDs simbolizan las hojas de un árbol, y donde la mayoría de los nodos son FFD's. A partir de los árboles de *clusters* podemos generar grandes

redes de malla, cuyos nodos sean árboles de *clusters* con un coordinador local para cada *cluster*, junto con un coordinador global.

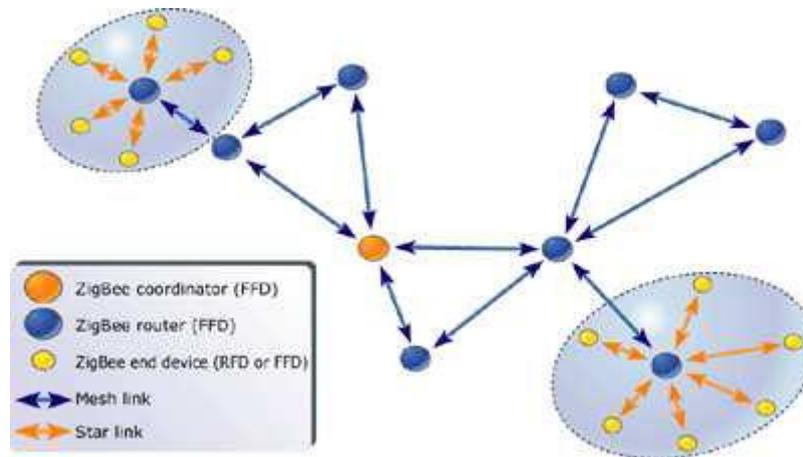


Figura 11: Topología en árbol de clusters. Fuente [10]

2.2.4 ARQUITECTURA

La arquitectura de Zigbee esta definida por capas. Cada capa es responsable de los servicios ofrecidos a capas superiores.

La pila de protocolos ZigBee, ZigBee Stack, se basa en el modelo OSI como se puede visualizar en la figura 12. Aunque solamente los niveles inferiores (físico y enlace de datos) se definen en el estándar 802.15.4, se prevé la interacción con el resto de niveles por medio de un subnivel de Control de Enlace Lógico basado en IEEE 802.2 (LLC, *Logical Link Control*), subcapa que tiene acceso al Control de Acceso al Medio (MAC) a través de un subnivel de convergencia, como se puede observar en la siguiente imagen.

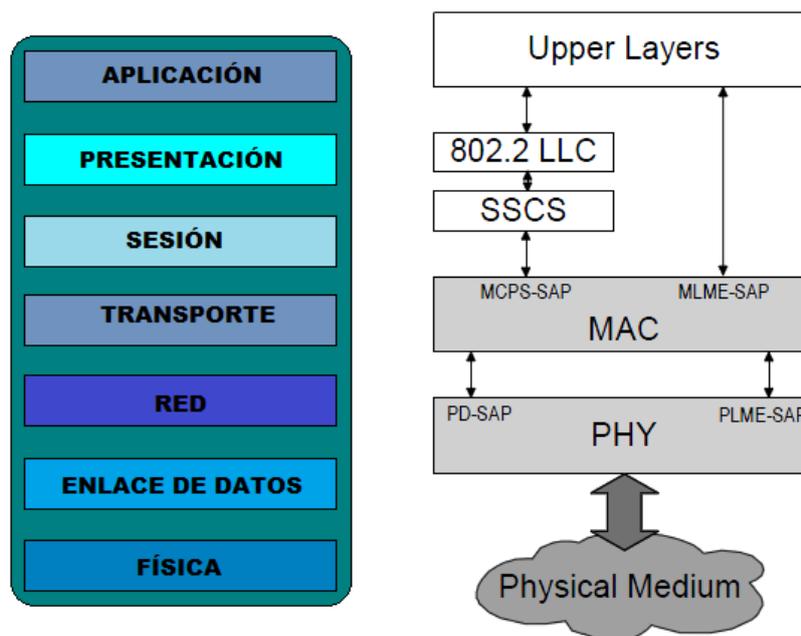


Figura 12: En la parte izquierda de la imagen la Pila de protocolos del Modelo OSI y en la parte derecha la Arquitectura del estándar 802.15.4. Fuente [8]

El estándar 802.15.4 incluye a la capa física (PHY), que define las Frecuencias de Radio (RF) que se utilizan para los enlaces, además de los mecanismos de control de bajo nivel. También incluye a la capa MAC que proporciona acceso al canal físico, a través de diferentes tipos de transferencia.

Las capas superiores que se muestran en la figura 12 (Arquitectura del estándar 802.15.4), consisten en la capa de red y la capa de aplicación. La capa de red provee la configuración, manipulación y encaminado de mensajes mientras que la capa de aplicación provee las funciones que se quiere implementar en el dispositivo. La definición de estas capas superiores no le corresponde al estándar 802.15.4, pero están definidas en la especificación Zigbee.

2.2.4.1 CAPA FÍSICA (PHY)

El IEEE 802.15.4 ofrece dos opciones de capa física PHY [7] [8] [11], que se combinan con el MAC para permitir un amplio rango de aplicaciones en red. Ambas PHYs se basan en métodos de secuencia directa de espectro expandido (DSSS) que resultan de bajo coste de implementación digital en circuitos integrados y ambas comparten la misma estructura de paquetes con operaciones de bajo consumo de energía. La principal diferencia entre ambas PHYs radica en la banda de frecuencias.

La PHY de los 2.4GHz, especifica operación en la banda industrial, médica y científica (ISM), que está disponible a nivel mundial, mientras que la PHY de los 868/915 MHz especifica operaciones en la banda de 865 MHz en Europa y 915 MHz en la banda ISM en Estados Unidos.

La disponibilidad internacional de la banda de los 2.4 GHz ofrece ventajas en términos de mercados más amplios y costos de manufactura más bajos. Por otro lado las bandas de 868 MHz y 915 Mhz ofrecen una alternativa a la congestión creciente y demás interferencias (redes WLAN, hornos microondas, telefonos inalambricos,etc.) asociadas

a la banda de 2.4 GHz y mayores rangos por enlace debido a que existen menores pérdidas de propagación.

Existe una segunda distinción de las características de la PHY que es el rango de transmisión. La PHY de 2.4 GHz permite un rango de transmisión de 250 Kb/s, mientras que la PHY de los 868/915 MHz ofrece rangos de transmisión de 20 Kb/s y 40 Kb/s respectivamente. Este rango superior de transmisión en la PHY de los 2.4 GHz se atribuye principalmente a un mayor orden en la modulación, en la cual cada símbolo representa múltiples bits.

Los diferentes rangos de transmisión se pueden explotar para lograr una variedad de objetivos y aplicaciones. Por ejemplo la baja densidad de datos en la PHY de los 868/915 se puede ocupar para lograr mayor sensibilidad y mayores áreas de cobertura, con lo que se reduce el número de nodos requeridos para cubrir un área geográfica grande, mientras que el rango superior de transmisión en la PHY de los 2.4 GHz se puede utilizar para conseguir salidas superiores y de poca latencia.

En la tabla 2 mostramos la tasa de transferencia y el tipo de modulación usada para las distintas frecuencias de transmisión.

Banda de frecuencia	Tasa de transferencia	Modulación
868 MHz	20 kbps	BPSK
915 MHz	40 kbps	BPSK
2,4 GHz	250 kbps	O-QPSK

Tabla 2. Características de las frecuencias IEEE 802.15.41

La capa física tiene 2 primitivas de servicio:

- PHY Data Service: Servicio de Datos de Capa Física. Se encarga de intercambio de paquetes entre la capa PHY y MAC.
- PHY Management Service: Manejo de servicios de Capa Física. Encargada de la limpieza del canal, de detección de energía, de setear y recuperar parámetros y de habilitar y deshabilitar al transmisor.

En el IEE 802.15.4 se definen 27 canales de frecuencia entre las tres bandas. La PHY de los 868/915 MHz soporta un solo canal entre los 868 y los 868.6 MHz, y diez canales entre los 902.0 y 928.8 MHz. La PHY de los 2.4 GHz soporta 16 canales de 2 MHz entre los 2.4 y los 2.4835 GHz con un amplio espacio entre canales (5 MHz) y esto con el objetivo de facilitar los requerimientos de filtrado en la transmisión y en la recepción. En la figura 13 se puede observar la canalización del IEEE 802.15.4.

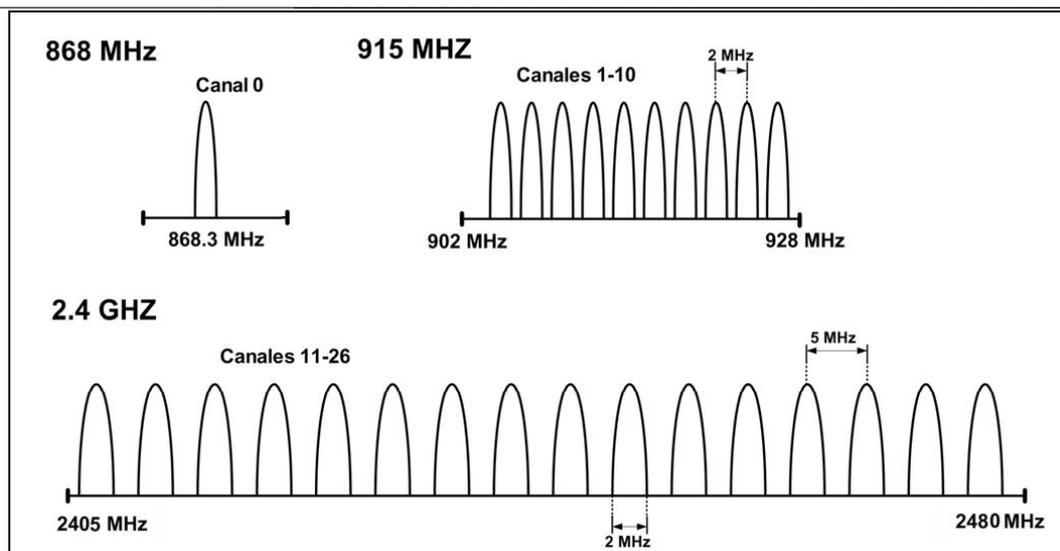


Figura 13: Canales radio 802.15.4. Fuente [8]

Respecto a las funciones que realiza la capa física en 802.15.4 podemos destacar:

- Activar y desactivar el transceptor radio: El transceptor radio tiene tres modos de funcionamiento: transmisión, recepción y sleeping (descanso). Bajo petición de la capa MAC la capa física debe conmutar entre estos tres estados.
- Detección de energía de cada canal (ED, Energy Detection): La capa física también es la encargada de comprobar qué nivel de potencia tiene un determinado canal. Esta medida es utilizada por la capa de red como parte de su algoritmo para la elección de canal.
- Indicación de la calidad de enlace (LQI, Link Quality Indicator): Mide la potencia en dBm de la señal que ha transmitido el último paquete.
- Evaluación de canal libre (CCA, Clear Channel Assessment). Este indicador será utilizado por el algoritmo CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) como veremos en el apartado 2.2.4.2.3.
- Selección de frecuencia: Dentro de los 27 canales posibles de ZigBee, la capa física debe ser capaz de seleccionar aquel que le especifiquen las capas superiores.
- Envío y recepción de datos: De acuerdo con el estándar 802.15.4, el sistema radio debe ser capaz de emitir con una potencia de -3 dBm o superior y debe tener una sensibilidad mínima de -20 dBm.

En la figura 14 se muestra el formato de trama 802.15.4 a nivel físico. Dicha trama está compuesta principalmente por una cabecera de sincronización (SHR), un campo para indicar la longitud de la trama (PHR) y la carga útil.

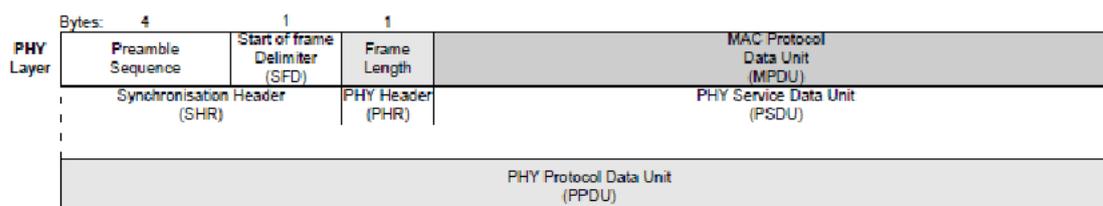


Figura 14: Trama 802.15.4 a nivel físico o PPDU. Fuente [8]

Una vez generada la PPDU, y de acuerdo con el estándar 802.15.4, los bits se convierten en símbolos. Puesto que cada símbolo está formado por 4 bits, se tienen 16 posibles símbolos. Para cada uno de ellos existe una secuencia de chips (formada por 32 bits cada una) que será la que definitivamente se module y envíe gracias al sistema de radio.

A continuación se presenta el proceso esquematizado de la capa física, una vez generada la PPDU.

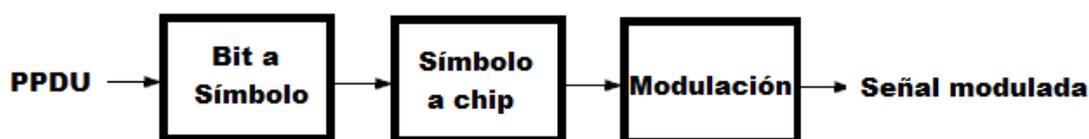


Figura 15: Tratamiento de la PPDU. Fuente [8]

Segun la banda seleccionada se emplea una modulación distinta. La modulación de PHY en los 868/915 MHz utiliza DSSS(*Direct Sequence Spread Spectrum*: Espectro expandido de Secuencia Directa) en la cual cada bit transmitido se representa por un chip de máxima longitud de secuencia (secuencia m). Los datos binarios son codificados al multiplicar cada secuencia m por +1 o -1, y la secuencia de chip que resulta se modula dentro de la portadora utilizando BPSK(Binary Phase Shift keying: Transmisión por desplazamiento binario de fase). La capa física de 2.4 GHz emplea una técnica de modulación semi-ortogonal basada en el método de DSSS. Los datos binarios son agrupados en símbolos de 4 bits, y cada símbolo especifica una de las 16 secuencias de transmisión semi-ortogonales. Los parámetros de modulación para ambas capas físicas se resumen en la tabla 3.

PHY	BANDA	Parámetros de los datos			Parámetros del chip	
		Velocidad de bits (Kbps)	Velocidad de símbolos (Kbaud)	Modulación	Velocidad de chip (Mchips/s)	Modulación
868/915 MHz	868.0-868.8 MHz	20	20	BPSK	0.3	BPSK
	902.0-928.0 MHz	40	40	BPSK	0.6	BPSK
2.4GHz	2.4-2.4835 GHz	250	62.5	16-ary ortogonal	2	O-QPSK

Tabla 3. Parámetros de modulación

2.2.4.2 CAPA MAC

2.2.4.2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

La capa MAC [8], o capa de acceso al medio, es la responsable de asegurar la comunicación entre un nodo y todos los nodos conectados directamente a él, evitando colisiones y mejorando la eficiencia. Las tareas que la capa MAC tiene que realizar son:

- Generar balizas si el dispositivo es un coordinador y se funciona en modo balizado.
- Sincronizar las balizas de la red.
- Gestionar la conexión y desconexión a la red de los dispositivos asociados al propio nodo.
- Emplear el algoritmo CSMA-CA para gestionar el acceso al canal.
- Asegurar un enlace fiable con la capa MAC de los nodos contiguos.

2.2.4.2.2 MODOS DE FUNCIONAMIENTO

El protocolo MAC soporta dos modos de funcionamiento (el coordinador es el encargado de seleccionar uno u otro en el momento de iniciar la red) [12]:

- *Modo balizado*: La baliza es generada periódicamente por el coordinador y distribuida por toda la red gracias a los routers. Dicha baliza sirve para sincronizar todos los nodos de la red, de modo que estos puedan despertarse en un momento determinado (conocido por todos), enviar los datos almacenados y volver al modo de ahorro energético (*sleep*). Así, tanto el coordinador, como los routers y los dispositivos finales pueden pasar gran parte del tiempo en modo de bajo consumo. La topología en malla no admite el modo balizado debido a la complejidad que ello conllevaría (a un mismo dispositivo podrían llegarle balizas provenientes de distintos routers).

- *Modo no balizado*: En este modo los dispositivos no están sincronizados unos con otros. Así, únicamente los dispositivos finales pueden entrar en el modo sleep mientras que los routers y el coordinador deben estar continuamente con el sistema radio en modo recepción y así estar preparados para recibir datos en cualquier momento. Este modo es más simple pero hace que gran parte de sus nodos (el coordinador y los routers) tengan un mayor consumo energético. Asimismo, impide que los coordinadores puedan planificar sus envíos a los dispositivos finales.

2.2.4.2.3 ALGORITMO CSMA-CA

Cuando se emplea este algoritmo los dispositivos anuncian que están listos para enviar paquetes de datos antes de acceder al canal [8]. De esta forma se evita la colisión. Dependiendo de unos ciertos parámetros se da prioridad a uno de los candidatos, que podrá acceder al canal para enviar su paquete de datos. El resto de dispositivos esperarán un tiempo aleatorio (distinto en cada uno de ellos) para volver a intentar acceder al canal.

Se definen dos tipos distintos de algoritmo CSMA-CA según estemos usando el modo balizado o el no balizado. Para el modo balizado se emplea el CSMA-CA ranurado mientras que para el no balizado se utiliza el CSMA-CA no ranurado. En ambos casos, un transmisor sólo puede intentar acceder al medio con una periodicidad concreta, sincronizado con la baliza para el caso del CSMA-CA ranurado, y en el CSMA-CA no ranurado, cada transmisor tiene su propio tiempo.

2.2.4.2.4 INICIALIZACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PAN

Como hemos mencionado [8], la capa MAC es la encargada de gestionar la conexión y desconexión de un dispositivo a la red. Para realizar esta tarea, así como la de inicializar

la red para el caso del coordinador, la capa MAC se sirve de los siguientes procedimientos:

- Detección de energía de canal: Mediante este procedimiento, y a petición de las capas superiores, la capa MAC mide la energía de un canal o lista de canales determinados. Para ello indica a la capa física realizar una detección de energía de canal (ED) para cada uno de los canales elegidos. Mediante este procedimiento el coordinador puede elegir, entre varios, canales aquel con menos tráfico e iniciar la red PAN en él.
- Escaneo activo de canal: Permite a un dispositivo localizar a un coordinador que transmita balizas y esté dentro de su rango de alcance. Los routers y los dispositivos finales usan este procedimiento a la hora de asociarse a la red. Si el dispositivo se trata de un coordinador, este método se puede usar para detectar las redes PAN dentro de un canal y así seleccionar un identificador distinto a los ya existentes para la nueva red. Un dispositivo que realice un escaneo activo de canal transmitirá periódicamente balizas. Si la red trabaja en modo no balizado, el coordinador responderá a cada una de estas balizas con una nueva baliza. Si la red trabaja en modo balizado, el coordinador ignorará estas balizas y seguirá transmitiendo de forma regular las suyas. Así, en cualquier caso, el dispositivo que realiza el escaneo recibirá una serie de balizas como respuesta a su petición de asociación.
- Escaneo pasivo de canal: La única diferencia con el caso anterior es que el dispositivo que realiza el escaneo no transmite baliza alguna. Lo único que hará será escuchar el canal en busca de balizas emitidas por el coordinador. Obviamente, este modo no es adecuado para el modo no balizado.
- Escaneo de canal por un dispositivo huérfano: Si el dispositivo ha perdido la sincronización con su coordinador emitirá lo que se conoce como notificaciones de orfandad. Las capas superiores indicarán a la capa MAC por qué canales transmitir dichas notificaciones. El coordinador debe responder a dicha notificación haciendo que la sincronización entre él y el dispositivo huérfano se recupere.

2.2.4.2.5 FORMATO DE TRAMA

El formato general de las tramas MAC [8] se diseñó para ser muy flexible y para que se ajustara a las necesidades de las diferentes aplicaciones con diversas topologías de red y al mismo tiempo mantener un protocolo simple.

El estándar IEEE 802.15.4 tiene cuatro diferentes tipos de tramas. Estas son:

- Tramas de datos (data Frame)
- Tramas de confirmación (Acknowledgement Frame)
- Tramas de comandos MAC (MAC Command Frame)
- Tramas de Beacon “Guía” (Beacon Frame)

Estas tramas están compuestas por:

- Cabecera (MHR o MAC Header): Se compone por un campo de control, número de secuencia, información de dirección destino y fuente e información relativa a la seguridad utilizada.
- Carga útil. Este campo varía para cada uno de los cuatro tipos de tramas. Las tramas de ack no contienen este campo.

- Secuencia de control (MFR o MAC Footer): secuencia de 16 bits conocida como FCS (Frame Check Sequence) que no es más que un código CRC (código de redundancia cíclico).

Formato de la trama de datos (data Frame)

La trama de datos se origina en capas superiores. La carga útil de datos es enviada a la subcapa MAC y se le denomina MSDU, es limitada por una trama MHR (Header) al inicio y por una trama MFR (Footer) al final. El MPDU es enviado a la capa física como carga útil (payload) de datos de la capa física (PSDU), el cual junto con una trama SHR y una trama PHR forman el paquete de datos de la capa física PHY (PPDU)

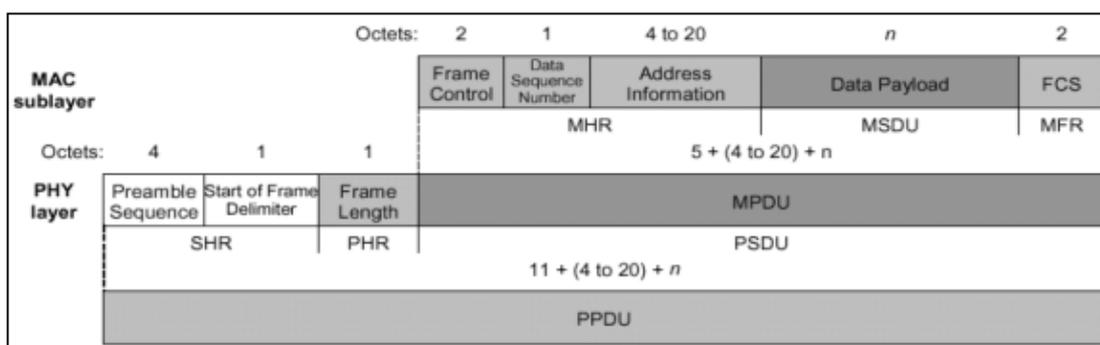


Figura 16: Estructura de la Trama de datos. Fuente [8]

Formato de trama de confirmación (Acknowledgement Frame)

La trama ACK proporciona el intercambio de información activa desde el receptor al emisor de que el paquete fue recibido sin error. Este paquete corto aprovecha el tiempo de silencio (quiet time), especificado por la norma, inmediatamente después de la transmisión del paquete de datos.

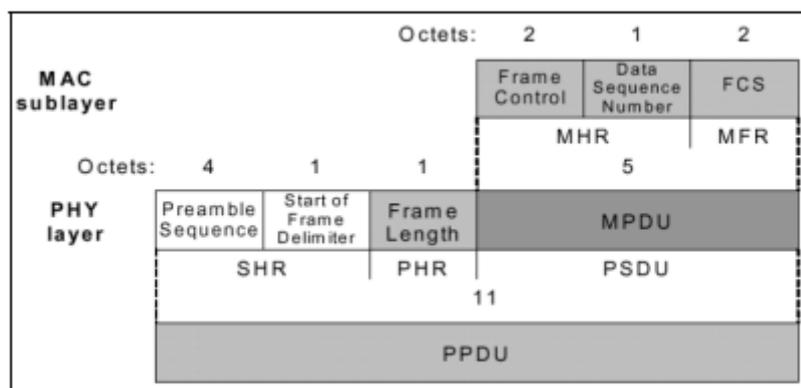


Figura 17: Estructura de la Trama de ACK. Fuente [8]

Formato de trama comandos MAC (MAC Command Frame)

La trama de comandos MAC es un mecanismo para el control o configuración a distancia de los dispositivos de los nodos. Permite que un coordinador de la red pueda configurar a los dispositivos individualmente sin importar el tamaño de la red.

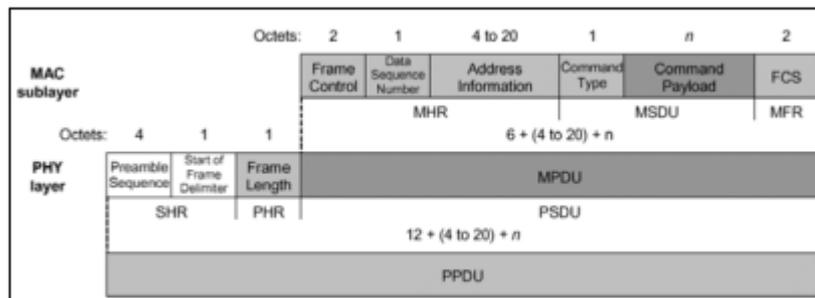


Figura 18: Estructura de la Trama de Comando MAC. Fuente [8]

En la estructura se puede observar que solo se añade el campo “Command Type” a la estructura de trama de Datos.

Formato de trama Beacon “Guía” (Beacon Frame)

La trama Beacon añade un nuevo nivel de funcionalidad a la red. Los dispositivos de los nodos pueden despertarse solamente cuando es transmitida una señal guía o “beacon”, escuchar su dirección y volver al estado dormido, con el consecuente ahorro de energía. Las tramas Beacon son importantes en las redes malla y cluster tree para mantener todos los nodos sincronizados sin requerir que los nodos consuman energía de la batería.

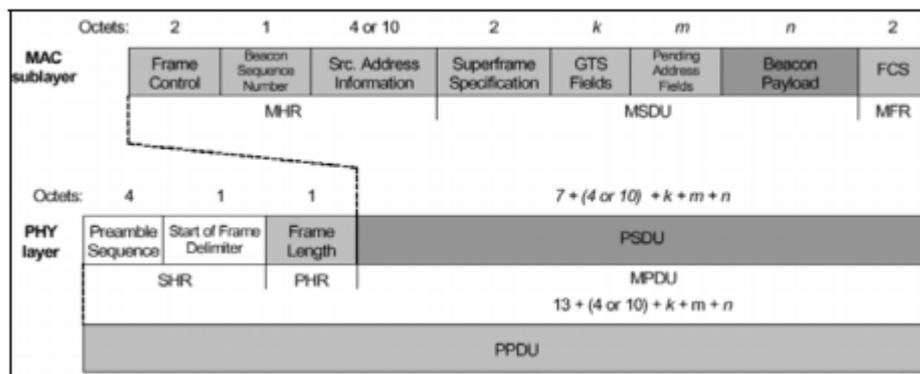


Figura 19: Estructura de la Trama Beacon. Fuente [8]

2.3 ESPECIFICACIÓN ZIGBEE

2.3.1 NIVEL DE RED

2.3.1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

La capa de red, definida en la especificación de ZigBee [13], es necesaria para gestionar las capas físicas y MAC del estándar 802.15.4 y para proveer de una adecuada interfaz de servicio al nivel de aplicación. Básicamente las tareas que realiza la capa de red son las siguientes:

- Configuración de nuevos dispositivos.
- Inicialización de la red PAN.
- Asociación, reasociación y abandono de una red.
- Adjudicación de direcciones de red.
- Descubrimiento de la topología de red.
- Encaminamiento (routing).

A nivel de red, existen dos tipos de direcciones: direcciones cortas (16 bits) y direcciones largas o direcciones IEEE (64 bits). Cada dispositivo debe tener asignada una dirección IEEE única. No puede haber dos dispositivos que cumplan con la especificación ZigBee y que posean la misma dirección IEEE.

Así, esta dirección es asignada en el momento de la fabricación del dispositivo. Por contra, la dirección corta es asignada por la capa de red de forma dinámica. Dentro de una red ZigBee no puede haber más de un dispositivo con igual dirección corta.

2.3.1.2 FUNCIONES

A continuación explicamos de forma más detallada las funciones principales que realiza la capa de red ZigBee.

- Establecer una nueva red: Sólo los dispositivos con capacidad para comportarse como coordinador y no están actualmente asociados a una red pueden realizar este procedimiento. El primer paso para establecer una nueva red es indicar a la capa MAC que realice una detección de energía de canal para un determinado conjunto de canales o, en su defecto, para todos. Una vez realizada la detección de energía de los canales, se ordenan de mayor a menor calidad, descartando aquellos con un nivel de interferencia demasiado elevado. A continuación se realiza un escaneo activo de canal para cada uno de ellos. Finalmente se elige aquel canal con menor interferencia y en el que trabaje un menor número de redes ZigBee.

Una vez seleccionado el canal se elige un identificador de red y se indica a la capa MAC dicho valor. A continuación el dispositivo que ha iniciado la red, el coordinador, se autoasigna la dirección corta 0x0000. Por último se indica a la capa MAC que la red ha sido establecida con éxito.

- Permitir a los dispositivos unirse a una red: Sólo el coordinador y los routers pueden realizar este procedimiento. La capa de red modificará el valor del atributo *macAssociationPermit* de la capa MAC a TRUE el dispositivo en cuestión permitirá a otros dispositivos asociarse a él. La capa de red puede modificar dicho valor de forma indefinida o simplemente durante una cantidad de tiempo determinada.

- Descubrimiento de red: Mediante este procedimiento la capa de red indica a la capa superior qué redes ZigBee están operando dentro del rango de alcance del dispositivo en cuestión. La capa de red solicita a la capa MAC realizar un escaneo activo de canal para un determinado grupo de canales. Una vez realizado la capa MAC responderá indicando en qué canales lógicos están trabajando las redes encontradas, cuáles son sus identificadores (PAN ID) y si permiten o no a otros dispositivos unirse a ellas.

- Unirse a una red: El primer paso para unirse a una red es efectuar un “descubrimiento de red”, como hemos visto en el punto anterior. Una vez seleccionada la red en la que vamos a trabajar se realiza un listado con los candidatos; routers o el coordinador que este dentro del rango de alcance del dispositivo en cuestión. Lógicamente se descartan aquellos que no tengan activado el permiso para unirse ellos. Entre los candidatos restantes se selecciona el más cercano.

Durante el procedimiento de unión a la red, el dispositivo debe enviar su dirección IEEE al candidato a dispositivo. El dispositivo padre guardará en su

lista de direcciones dicha dirección IEEE, le asociará una dirección corta y, acto seguido, enviará esta dirección corta al dispositivo. En adelante ambos dispositivos, padre e hijo, utilizarán esta dirección corta para comunicarse.

- Tablas de vecindad: Un dispositivo debe guardar información de cada uno de los dispositivos dentro de su rango de alcance. Esta información es almacenada en la tabla de vecindad. Dicha tabla es de utilidad en diferentes contextos. Primero, cuando un dispositivo intenta unirse a la red utiliza esta tabla para realizar el listado de candidatos a dispositivos padre, como hemos visto en el punto anterior. Segundo, una vez asociado, esta tabla se utiliza para almacenar parámetros relacionados con la calidad del enlace, tipo de relación y demás información referente a los dispositivos dentro del rango de alcance.

Los parámetros que se almacenan en esta tabla para cada uno de los distintos dispositivos son: dirección IEEE, dirección corta, tipo de dispositivo, relación con dicho dispositivo (el dispositivo es el padre, hijo, hijo asociado a un padre común, antiguo hijo, etc), LQI, número de saltos hasta dicho dispositivo, permiso de asociación, si ha sido seleccionado como candidato a padre, etc.

- Mecanismo distribuido de asignación de dirección corta: Cuando un dispositivo padre (coordinador o router) recibe la petición de conexión por parte de otro dispositivo (candidato a dispositivo hijo), el dispositivo padre debe asignarle una dirección corta.

Este algoritmo se basa en la generación de subgrupos de direcciones. El coordinador elige la primera dirección libre, 0x0000. A continuación, asigna un subgrupo de las direcciones restantes a cada uno de sus hijos con capacidades de router. Cada uno de esos hijos tendrá como dirección propia la primera del subgrupo que le ha sido asignado, teniendo las restantes direcciones disponibles para repetir el proceso con los dispositivos hijos que se conecten a él. Una vez asignados estos subgrupos de direcciones a los routers, se asignan las direcciones a los dispositivos finales, comenzando por la primera dirección libre. Para calcular el tamaño de estos subgrupos de direcciones se tienen en cuenta ciertos parámetros de la red definidos por el coordinador: máximo número de hijos que un padre puede tener, máxima profundidad de la red (número de saltos necesarios por el camino más corto hasta llegar al coordinador) y máximo número de routers que un padre puede tener como hijos.

Además de este método, existe otro mecanismo de asignación de direcciones. Su nombre es mecanismo estocástico de asignación de dirección. En él, todas las direcciones (excepto la del coordinador, que sigue siendo la 0x0000) se asignan de manera aleatoria.

- Abandonar una red: A la hora de abandonar una red se pueden dar dos casos distintos: el padre decide que un hijo debe abandonar la red o el hijo comunica al padre que quiere abandonar la red. En ambos casos el dispositivo padre debe actualizar su tabla de vecindad de forma que el dispositivo eliminado no aparezca en ella.

- Encaminamiento: El coordinador de red y los routers tienen la opción de crear tablas de encaminamiento. Dichas tablas contienen datos como la dirección corta del destino, el estatus de la ruta, o la dirección corta del siguiente dispositivo en la ruta.

Para calcular la mejor ruta posible se usa un algoritmo que se basa en el número de saltos necesario y la calidad de los enlaces (usando el indicador LQI).

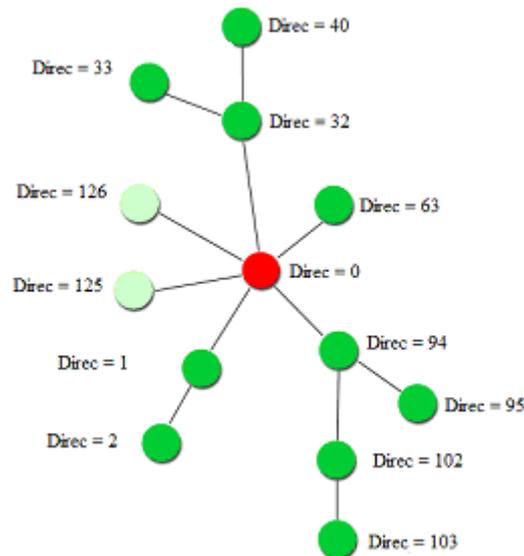


Figura 20: Ejemplo de red mostrando las direcciones de red

2.3.1.3 FORMATO DE TRAMA

El formato general de trama de capa de red se muestra en la figura 21:

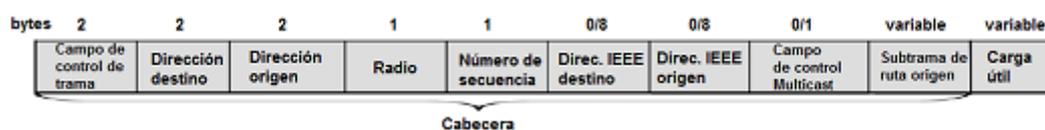


Figura 21: Formato general de trama de red. Fuente [8]

La trama está formada por los siguientes campos:

- Campo de control de trama: Compuesta por 16 bits que indican el tipo de trama, la versión del protocolo y si se está empleando seguridad en la transmisión, principalmente.
- Dirección corta de destino: El valor 0xFFFF se usa para enviar el paquete a todos los nodos dentro del rango de alcance.
- Dirección corta de origen.
- Radio: Cada dispositivo que reciba la trama restará uno al valor de esta variable. Así podremos limitar el máximo número de saltos de la trama.
- Número de secuencia: Gracias a la dirección origen y al número de secuencia se puede identificar una trama de forma unívoca.
- Dirección IEEE destino: Su uso es opcional y es indicado en el campo de control de trama.
- Dirección IEEE origen: Su uso es opcional y es indicado en el campo de control de trama.

- Campo de control Multicast: Su uso es opcional y es indicado en el campo de control de trama. Define parámetros necesarios para la transmisión multicast.
- Subtrama de ruta origen: Su uso es opcional y es indicado en el campo de control de trama.
- Carga útil.

2.3.2 NIVEL DE APLICACIÓN

2.3.2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

La capa de aplicación ZigBee [13] está compuesta por la subcapa de soporte de aplicación (APS), los objetos de aplicación definidos por el fabricante (*application framework*) y el objeto de dispositivo ZigBee (*ZigBee Device Object*, ZDO).

En la figura 22 podemos ver una representación de la capa de aplicación y sus diferentes partes.

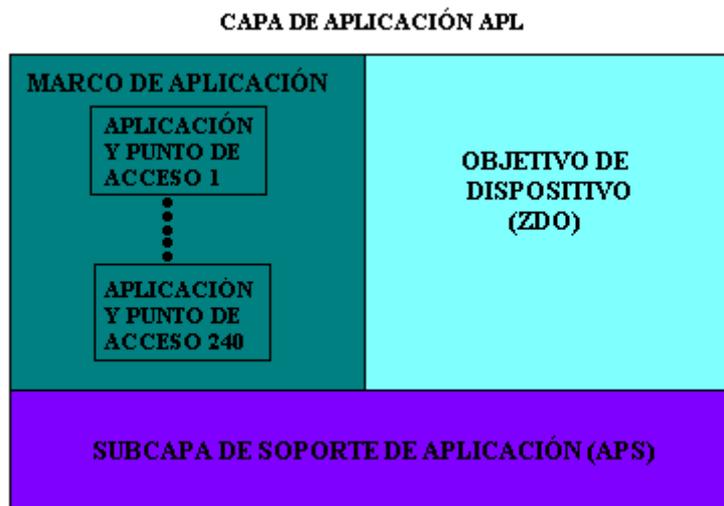


Figura 22: Capa de aplicación

2.3.2.2 SUBCAPAS

A continuación se detallan las distintas subcapas del nivel de aplicación:

Subcapa de soporte de aplicación (APS o Application Sublayer)

La subcapa de soporte de aplicación proporciona una interfaz de comunicación entre la capa de red y la capa de aplicación. Las tareas que realiza esta capa son:

- Genera la PDU a nivel de aplicación.
- Una vez los puntos de acceso de dos dispositivos están vinculados, la capa APS es la encargada de gestionar el intercambio de mensajes.
- Mejorar la fiabilidad de la capa de red. Por ejemplo, se puede definir una confirmación ack a nivel de aplicación.
- Rechaza mensajes recibidos por duplicado.

Marco de aplicación (AF o Application Framework)

El marco de aplicación es el entorno en el cual se gestionan las diferentes aplicaciones. Cada una de dichas aplicaciones está relacionada a un punto de acceso distinto.

Se permiten hasta 240 aplicaciones distintas dentro de un mismo dispositivo. El punto de acceso 0 está asignado al nivel ZDO. El rango de 241-254 está reservado para uso futuro. Por último, el punto de acceso 255 es usado para la comunicación broadcast con todas las aplicaciones dentro del marco de aplicación.

Esta capa es la encargada de definir tanto el perfil de aplicación como los diferentes clusters¹. Cada cluster se caracteriza por un identificador propio (cluster ID).

Objeto de dispositivo ZigBee (ZDO o ZigBee Device Object)

Este nivel satisface necesidades comunes a todas las aplicaciones dentro del marco de aplicación. Las tareas que realiza son:

- Inicializar las capas APS y de red.
- Definir el rol del dispositivo dentro de la red (coordinador, router o dispositivo final).
- Gestiona los vínculos entre puntos de acceso.
- Asegura una comunicación segura entre dispositivos.

Como hemos dicho anteriormente, el ZDO se encuentra en el punto de acceso 0.

2.3.2.3 FORMATO DE TRAMA

El formato general de trama de la capa de aplicación se muestra en la siguiente figura:

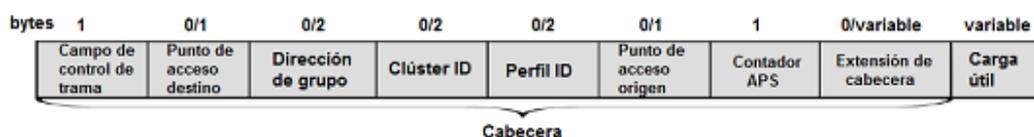


Figura 23: Formato general de trama de aplicación. Fuente [8]

La trama está compuesta por:

- Campo de control de trama: Está formado por 8 bits que indican el tipo de trama, si se utiliza seguridad, si estamos empleando la extensión de cabecera y si se requiere confirmación ack a nivel de aplicación.
- Dirección del punto de acceso destino.
- Dirección de grupo: Si se usa direccionamiento de grupo la trama no debe incluir la dirección del punto de acceso destino. Todos los puntos de acceso asociados a la dirección de grupo en cuestión recibirán esta trama.
- Cluster ID: Identificador de cluster.
- Perfil ID: Identificador del perfil de aplicación.
- Dirección del punto de acceso origen.
- Contador APS: Se usa para evitar la recepción de tramas duplicadas.
- Extensión de cabecera: Extiende la funcionalidad de la cabecera.
- Carga útil.

¹ Cluster: Es un conjunto de atributos que se utilizan en la comunicación de los distintos dispositivos ZigBee. Por ejemplo, dentro de un sistema de domótica, se puede definir un cluster para el control de luces, otro para el control de temperatura, etc.

2.4 SEGURIDAD

Desde el punto de vista de la seguridad [8] [13], las redes inalámbricas son altamente vulnerables debido a que no se requiere tener acceso a un medio cableado para participar en las comunicaciones. ZigBee está orientado hacia un mercado en el que el bajo consumo y el bajo coste son requisitos esenciales.

Debido a la restricción en lo que al coste se refiere, los dispositivos que trabajan con esta tecnología se enfrentan a una limitación computacional evidente. Esto quiere decir que los sistemas de seguridad son más difíciles de implementar en sistemas que trabajan bajo ZigBee. Es importante destacar que ZigBee está orientado hacia el envío de pequeños paquetes de información, por lo que los mecanismos de seguridad utilizados no deberían aumentar en exceso el tamaño de la cabecera.

En el estándar 802.15.4 y la especificación ZigBee definen mecanismos de seguridad para las capas MAC, de red y de aplicación. El mecanismo utilizado se basa en el uso de claves simétricas. La clave en cuestión debe ser generada por las capas superiores. Este mecanismo criptográfico debe ser capaz de asegurar:

- Confidencialidad de los datos o privacidad: Esto quiere decir que la información transmitida sólo llegará a los dispositivos asociados a la red.
- Autenticación de los datos: Se debe asegurar que la información recibida proviene de un dispositivo válido de la red.
- Detección de información duplicada: Los paquetes de información deben de ser recibidos únicamente una vez.

De acuerdo al estándar la clave utilizada puede ser conocida por los dos dispositivos que participan en la comunicación o por un grupo de dispositivos. Si utilizamos una única clave para un grupo de dispositivos ganamos en simplicidad pero, por contra, estamos desprotegidos ante el ataque de un dispositivo de la propia red.

ZigBee y el estándar 802.15.4 emplean el modo CCM*, *Counter with CBC-MAC*, bloques de encriptación basados en el algoritmo AES-128 (Advanced Encryption Standard). CCM* es un modo simétrico, lo que quiere decir que tanto el dispositivo que transmite como el que recibe usan la misma clave para descifrar el mensaje.

En caso de que la seguridad esté habilitada, el coordinador es normalmente el que realiza las funciones de centro de seguridad, permitiendo o no la asociación de un nuevo dispositivo. El centro de seguridad debe actualizar periódicamente la clave utilizada, cambiándola por una nueva si lo estima necesario. Para ello, distribuye la nueva clave encriptada con la antigua. Después comunica a todos los dispositivos que a partir de ese momento deben usar la nueva clave.

El centro de seguridad, que como hemos dicho suele ser el coordinador pero que también puede ser un dispositivo expresamente dedicado a ello, realiza las siguientes funciones:

- Autenticar dispositivos que quieren unirse a la red.
- Generar y distribuir nuevas claves.
- Habilitar el uso de seguridad punto a punto entre dispositivos.

ZigBee y el estándar 802.15.4 usa tres tipos de claves:

- Claves de enlace: Sirven para dotar de seguridad las comunicaciones punto a punto a nivel de aplicación. Sólo los dos dispositivos que participan en la comunicación conocen esta clave.

- Claves de red: Esta clave se usa para la seguridad a nivel de red. Todos los dispositivos dentro de una misma red deben compartir esta clave.
- Claves maestro: Esta clave es utilizada por dos dispositivos en el inicio de la comunicación para generar la clave de enlace. La clave maestro no se usa para encriptar tramas.

Existen dos modos de seguridad para definir una red:

- Modo de seguridad estándar: En este modo la lista de dispositivos pertenecientes a la red y las diferentes claves pueden estar almacenadas dentro de cada uno de los distintos dispositivos. El centro de seguridad solamente se encarga de mantener una clave de red común y de controlar las políticas de admisión. Así, el centro de seguridad no necesita una gran memoria para almacenar los datos relacionados con la seguridad de la red.

- Modo de seguridad avanzado: En este caso el centro debe almacenar tanto las claves como el listado de dispositivos, así como de controlar las políticas de admisión. Conforme crezca el número de dispositivos asociados a la red, aumentarán los requerimientos de memoria del centro de seguridad. Las diferentes capas añaden una cabecera auxiliar en el caso de que utilicemos un modo seguro de transmisión. Además, incluye un código de integridad (MIC o Message Integrity Code) a continuación de la carga útil, como se puede observar en la figura 24.

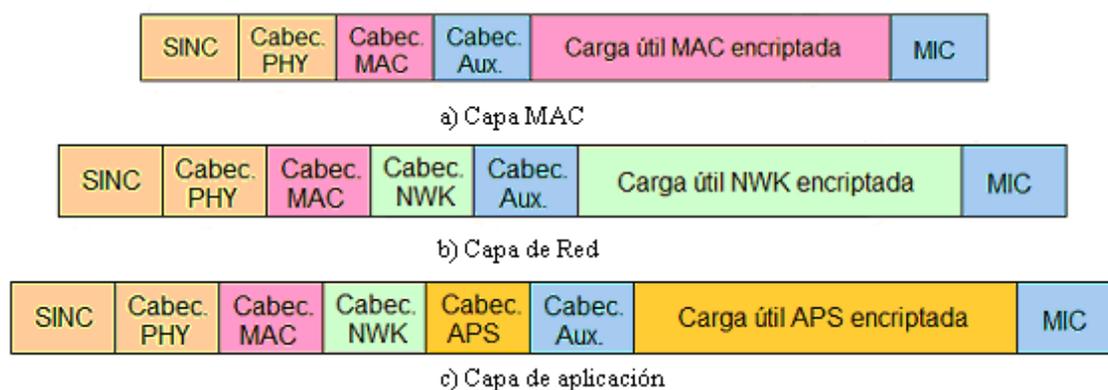


Figura 24: Formato de trama con seguridad habilitada

2.5 EL DISPOSITIVO ZIGBEE

Un dispositivo típico ZigBee consta de varias partes, que se detallan a continuación[14]:

- Módulo de sensores: posee los sensores o los actuadores manejados por la E/S del microcontrolador.
- Módulo de control: formado por un microcontrolador, encargado de controlar todas las funciones del dispositivo.
- Módulo de comunicaciones: formado por transceiver de RF, que realiza las emisiones y recibe información.
- Módulo de Potencia: contiene la fuente de energía.

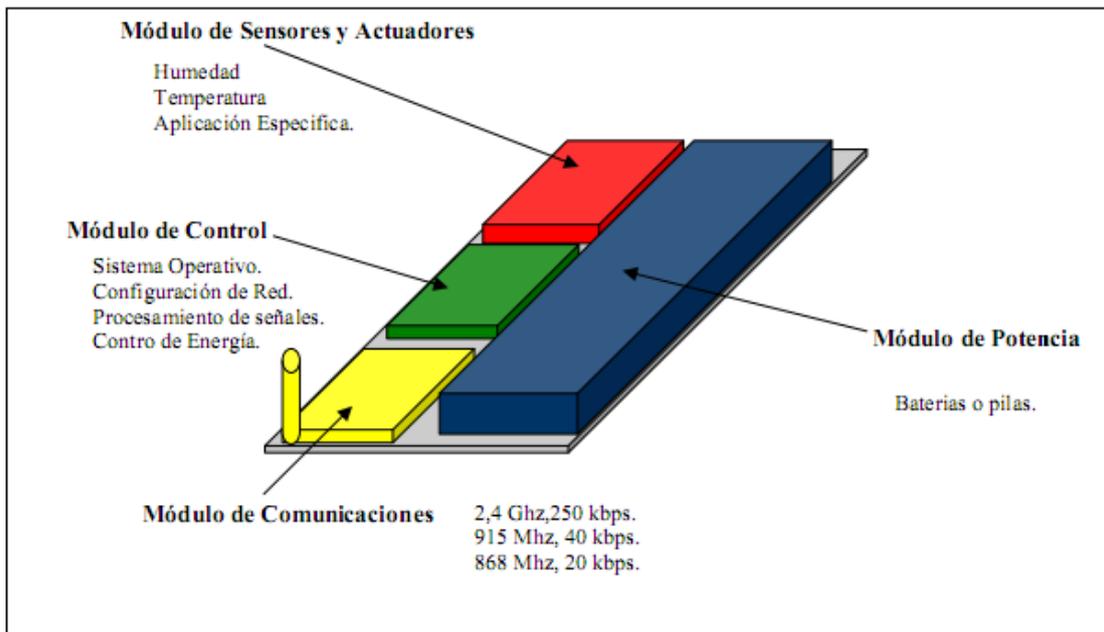


Figura 25: Diagrama de bloques de un Dispositivo ZigBee

3. PROPAGACIÓN DE ONDAS

Para instalar una red inalámbrica y, en particular, ubicar los puntos de acceso a fin de obtener el máximo alcance posible, se deben conocer algunos datos con respecto a la propagación de las ondas de radio. En el punto siguiente se detallan los fenómenos más frecuentes que se producen en la propagación de las ondas de radio.

Para completar la información de la propagación de ondas, se incluye una visión general sobre las distintas formas de modelar los procesos que ocurren en la propagación de señales de radiofrecuencia

3.1 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE LA PROPAGACIÓN DE ONDAS

Las ondas de radio se propagan en línea recta en varias direcciones al mismo tiempo [15]. En vacío, las ondas de radio se propagan a $3 \cdot 10^8$ m/s. En cualquier otro medio, la señal se vuelve más débil debido a:

- la absorción
- la reflexión
- la difracción
- la refracción
- la dispersión

3.1.1 ABSORCIÓN DE ONDAS DE RADIO

Cuando una onda de radio se topa con un obstáculo, parte de su energía se absorbe y se convierte en otro tipo de energía, mientras que otra parte se atenúa y sigue propagándose. Es posible que otra parte se refleje.

La atenuación se da cuando la energía de una señal se reduce en el momento de la transmisión. La atenuación se mide en belios (símbolo: B) y equivale al logaritmo de base 10 de la intensidad de salida de la transmisión, dividida por la intensidad de entrada. Por lo general, se suelen usar los decibelios (símbolo: dB) como unidad de medida. Cada decibelio es un décimo de belio. El cálculo se realiza de la siguiente forma:

$$R(\text{dB}) = (10) \cdot \log(P_2/P_1) \quad (1)$$

Cuando R es positivo, se denomina amplificación, y cuando es negativo se denomina atenuación. En los casos de transmisiones inalámbricas, la atenuación es más común.

La atenuación aumenta cuando sube la frecuencia o se aumenta la distancia. Asimismo, cuando la señal choca con un obstáculo, el valor de atenuación depende considerablemente del tipo de material del obstáculo.

El debilitamiento de la señal se debe en gran parte a las propiedades del medio que atraviesa la onda. La tabla siguiente muestra los niveles de atenuación para diferentes materiales:

Materiales	Grado de atenuación	Ejemplos
Aire	Ninguno	Aire libre, patio interno
Madera	Bajo	Puerta, piso, medianera
Plástico	Bajo	Medianera
Vidrio	Bajo	Ventanas sin teñir
Vidrio teñido	Medio	Ventanas teñidas
Agua	Medio	Acuario, fuente
Seres vivos	Medio	Multitud, animales, personas, plantas
Ladrillos	Medio	Paredes
Yeso	Medio	Medianeras
Cerámica	Alto	Tejas
Papel	Alto	Bobinas de papel
Concreto	Alto	Muros de carga, pisos, columnas
Vidrio a prueba de balas	Alto	Ventanas a prueba de balas
Metal	Muy alto	Concreto reforzado, espejos, armarios metálicos, cabina del ascensor

Tabla 4. Atenuación para diferentes materiales

3.1.2 REFLEXIÓN DE ONDAS DE RADIO

Cuando una onda de radio choca con un obstáculo, parte o la totalidad de la onda se refleja y se observa una pérdida de la intensidad. La reflexión es tal que el ángulo de incidencia equivale al ángulo de reflexión.

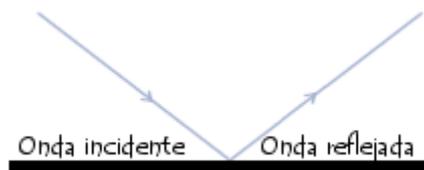


Figura 26: Reflexión de una onda. Fuente [15]

Por definición, una onda de radio es susceptible de propagarse en varias direcciones. Después de reflejarse varias veces, una señal de origen puede llegar a una estación o punto de acceso después de tomar muchas rutas diferentes (llamada multirayecto).

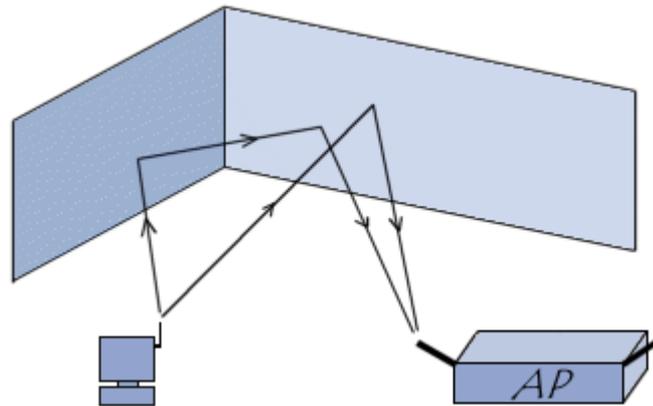


Figura 27: Propagación multirrayecto. Fuente [15]

La propagación multirrayecto es el mecanismo básico para la llegada de la energía radioeléctrica a dispositivos situados en entornos rodeados de obstrucciones. Gracias a esta modalidad de propagación se consigue obtener cobertura en puntos recónditos. Sin embargo frente a esta ventaja existen ciertos inconvenientes.

Como consecuencia del multirrayecto para una señal transmitida dada, llegan al receptor numerosas componentes o ecos a través de diferentes caminos con distintas interacciones con los obstáculos interpuestos. Por lo tanto, tales componentes acceden al receptor en tiempos diferentes y con amplitudes y fases aleatorias. La suma de estas componentes se manifiesta como una onda cuya amplitud presenta amplias y rápidas variaciones de nivel.

La diferencia temporal en la propagación (llamada retraso de propagación) entre dos señales que toman diferentes rutas puede interferir en la recepción, ya que los flujos de datos que se reciben se superponen entre sí. Esta interferencia se incrementa a medida que aumenta la velocidad de transmisión, ya que los intervalos de recepción de los flujos de datos se hacen cada vez más cortos. Por lo tanto, la multiruta limita la velocidad de transmisión en redes inalámbricas. Para Zigbee generalmente las longitudes serán pequeñas, por lo que el valor medio de la envolvente, es prácticamente constante.

En la figura 28, se ilustra una situación sencilla de propagación multirrayecto con únicamente cinco rayos para mayor sencillez.

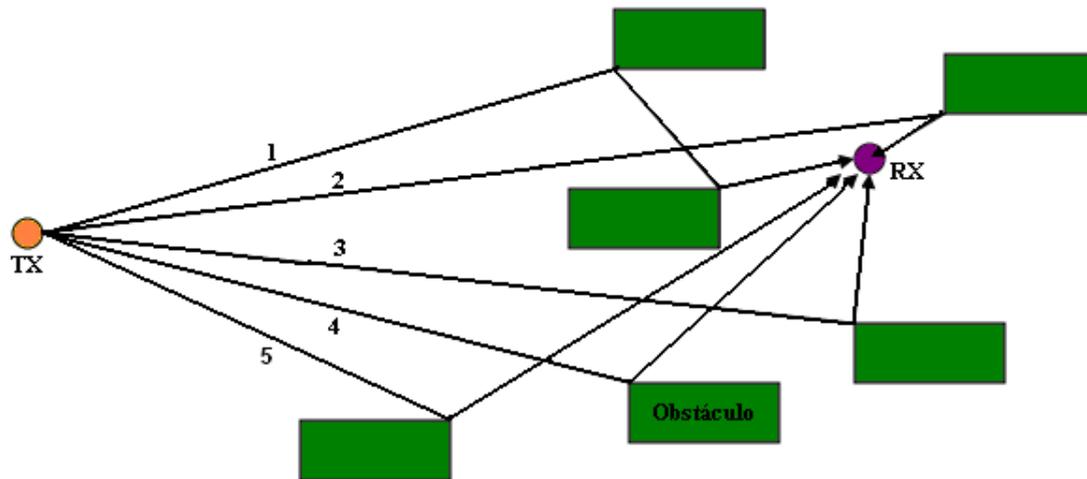


Figura 28: Ejemplo de propagación multirrayo (5 rayos)

Se supone que los 5 rayos llegan en igualdad de condiciones al entorno próximo al dispositivo Zigbee y son las estructuras dispersivas del entorno las que producen los efectos de propagación multirrayo.

Debido a las múltiples señales, que llegan por diferentes trayectos al receptor, se pueden dar dos tipos de interferencia, como he mencionado anteriormente dos tipos de interferencias: interferencia constructiva e interferencia destructiva; dependiendo de la fase relativa de las señales, como se muestra en la figura 29.

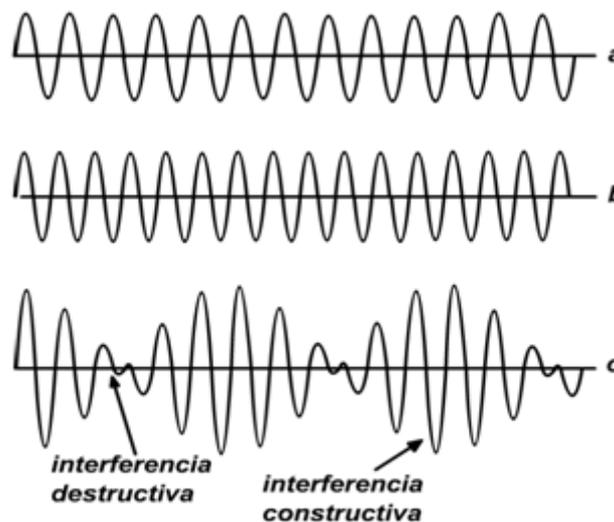


Figura 29: Interferencia constructiva y destructiva. Fuente [16]

La interferencia constructiva se produce cuando la suma vectorial de las señales, produce un aumento en la amplitud de la señal recibida. De modo análogo, la interferencia destructiva se produce cuando la suma vectorial de las señales, produce una disminución de la señal recibida.

De éste modo, dos señales se cancelan, cuando la diferencia de su longitud de trayecto está dada por:

$$\Delta d = (n + 0.5)\lambda \quad \text{Para } n = 0,1,2,\dots \quad (2)$$

Si la diferencia de longitud de trayecto (Δd) es constante, la cancelación ocurre cuando la frecuencia es dada por:

$$f = (n + 0.5) \frac{c}{\Delta d} \quad \text{Para } n = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

Donde c representa la velocidad de propagación de la señal.

Para superar el problema de la interferencia destructiva, se suelen emplear dos antenas por emisor. Mediante un controlador automático de ganancia (AGC), que cambia inmediatamente de una antena a otra según la fuerza de la señal, el punto de acceso puede distinguir dos señales que vienen de la misma estación.

3.1.3 REFRACCIÓN DE ONDAS DE RADIO

La refracción es el cambio de dirección que experimenta una onda al pasar de un medio material a otro. Sólo se produce si la onda incide oblicuamente sobre la superficie de separación de los dos medios y si éstos tienen índices de refracción distintos. La refracción se origina en el cambio de velocidad de propagación de la onda.

Cuando un rayo se refracta al pasar de un medio a otro, el ángulo de refracción con el que entra es igual al ángulo en que sale al volver a pasar de ese medio al medio inicial.

3.1.4 DIFRACCIÓN DE ONDAS DE RADIO

Este fenómeno ocurre cuando el trayecto entre Tx y Rx se ve obstruido por objetos que tienen esquina y bordes marcados como se muestra en la figura 30 [17]. Al chocar la onda contra dichos objetos, se producen ondas secundarias que se asumen como nuevos frentes de onda propagándose en el espacio incluso “doblando” detrás del objeto. La naturaleza de la difracción, a altas frecuencias, depende de la geometría del obstáculo, así como de la amplitud, fase y polarización de la onda

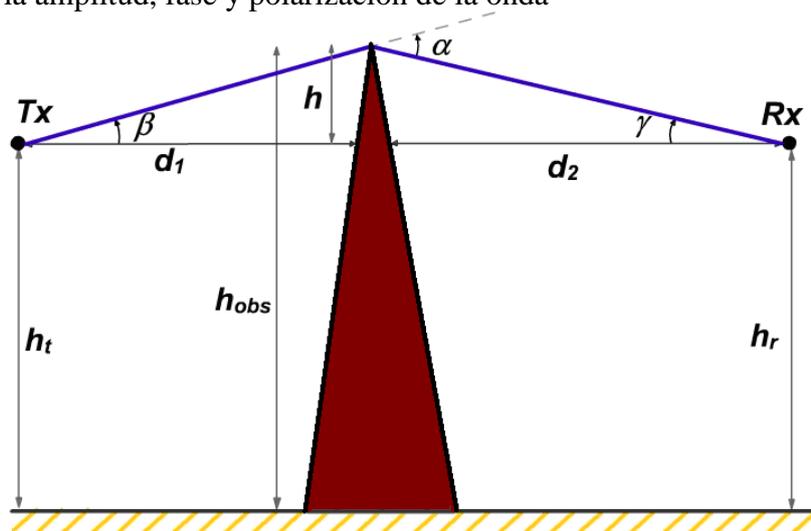


Figura 30: Fenómeno de Difracción

Todos los puntos sobre un frente de onda pueden considerarse como fuentes puntuales para la producción de pequeñas ondas secundarias, y que éstas pequeñas ondas se combinan para producir un nuevo frente de onda en la dirección de propagación.

La intensidad de campo de una onda difractada en la región de sombra es la suma vectorial de las componentes de campo eléctrico de todas las pequeñas ondas secundarias en el espacio alrededor del objeto.

En el anexo A se amplía la información sobre el fenómeno de la difracción. Éste nos aporta información sobre la difracción en tierra plana (difracción OUTDOOR).

3.1.5 DISPERSION DE ONDAS DE RADIO (SCATTERING DIFUSO)

Es el fenómeno que ocurre cuando una señal radio golpea contra una superficie rugosa o áspera y la energía reflejada es difundida o reflejada en varias direcciones.

3.2 MODELOS DE PROPAGACIÓN

La señal emitida por una antena (emisor) va a experimentar múltiples transformaciones en su señal y camino a lo largo de su trayectoria por el medio de propagación, llegando al receptor solo una pequeña parte [18]. El camino entre receptor y emisor puede variar en múltiples formas debido a la existencia de diferentes obstáculos.

Esto hace muy difícil predecir la señal recibida en un determinado punto o analizar el canal de radio.

Los modelos de propagación se han enfocado tradicionalmente en predecir la potencia promedio de la señal recibida, así como la variación de la potencia en la proximidad espacial de un lugar en particular.

En primer lugar y a modo de introducción se explicarán brevemente las técnicas de construcción de modelos que existen, para luego aplicarlas al modelado del canal de radiopropagación en ZigBee.

3.2.1 TÉCNICAS DE CONSTRUCCIÓN DE MODELOS

Un modelo es una representación simplificada de la realidad, por medio de un conjunto de restricciones e hipótesis. Se puede definir como una explicación de determinados fenómenos naturales representada de una forma determinada.

En la actualidad y como se verá más adelante, se desarrollan modelos para explicar el fenómeno de propagación de ondas de radiofrecuencia en redes inalámbricas.

3.2.1.1 TIPOS DE MODELOS

Según la precisión del modelo, se pueden diferenciar los siguientes tipos:

- Modelos matemáticos
- Modelos empíricos o estadísticos
- Modelos teóricos
- Modelos deterministas
- Modelos estocásticos
- Modelos de caja negra

Modelos matemáticos

Son procedimientos matemáticos que describen el comportamiento del fenómeno modelado. Dependiendo de la complejidad de las fórmulas matemáticas aplicadas y del número de parámetros de las que dependan, pueden llegar a necesitar gran cantidad de potencia de computación para generar los resultados.

Modelos empíricos o estadísticos

Se basan en la extrapolación estadística de resultados a partir de medidas del fenómeno realizadas sobre el terreno. La principal ventaja de este tipo de modelos 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.

Por el contrario, 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.

Modelos teóricos

Se basan en los principios fundamentales del medio que se intenta modelar. Pueden ser aplicados en diferentes entornos sin que se vea afectada su precisión.

En la práctica la implementación de modelos teóricos requiere enormes bases de datos de características relativas al entorno, las cuales en la práctica son imposibles de obtener en muchos casos, o muy difíciles de obtener.

Los algoritmos usados por los modelos teóricos son generalmente muy complejos y computacionalmente poco eficientes. Por esta razón su implementación se restringe a pequeñas áreas. Por el contrario, si su implementación es correcta, proporcionan gran precisión en su predicción, en comparación con los modelos empíricos.

Modelos deterministas

En este tipo de modelos los resultados de la simulación no tienen ninguna distribución de probabilidad, y son valores que sólo dependen de las condiciones de simulación (entradas). Siempre con la misma entrada van a producir la misma salida.

Modelos estocásticos

Son modelos en los que los resultados del modelo tienen una distribución de probabilidad. La misma entrada no tiene porqué producir los mismos resultados, en distintas simulaciones del modelo.

Modelos de caja negra

Son modelos en los que sólo se reproduce la entrada y salida del fenómeno, sin preocuparse de lo que pase en el interior.

3.2.1.2 VALIDEZ DE UN MODELO

Queda claro que existen muchos tipos de modelos, lo que puede dar lugar a que para un único fenómeno se puedan plantear diferentes modelos. Para definir si un modelo es correcto se pueden usar varios factores:

1. El modelo puede explicar las observaciones realizadas del fenómeno.
2. Se puede usar el modelo para predecir el comportamiento del fenómeno modelado.

3. El modelo es consistente con otras ideas acerca del funcionamiento del fenómeno modelado.

En primer lugar, de un modelo no se dice si es correcto, si no que se dice que es “aceptable”. La aceptabilidad del modelo se basa en su capacidad de cumplir los tres factores expuestos anteriormente: explicar, predecir y ser consistente con otros conocimientos.

En segundo lugar, puede haber más de un modelo que sea una explicación “aceptable” para el mismo fenómeno. No siempre es posible elegir un único modelo como aceptable.

Los modelos tampoco son inamovibles. Es frecuente que, con el aumento de observaciones del fenómeno, se cambien los modelos y aparezcan otros más “aceptables” capaces de explicar más casos de comportamiento que puedan predecirlos mejor o que sean más consistentes con otros tipos de conocimientos.

A modo de resumen podemos sacar las siguientes conclusiones:

- Los modelos son representaciones simplificadas de la realidad por medio de un conjunto de restricciones e hipótesis.
- Los modelos se consideran aceptables o no aceptables en base a lo bien que pueden explicar y predecir comportamientos; y si son consistentes con otros conocimientos contrastados.
- Los modelos se usan constantemente para responder cuestiones acerca de determinados fenómenos, y cuando se obtienen nuevos datos son susceptibles de ser revisados o descartados.

3.2.2 MODELOS DE PROPAGACIÓN EN REDES INALÁMBRICAS

Los modelos de propagación de radio se pueden clasificar según la zona de cobertura en dos tipos principales: modelos outdoor y modelos indoor. Además, ateniéndonos al tamaño de la zona de cobertura, los modelos outdoor se pueden dividir en modelos de propagación en zonas grandes (macrocelas) y de zonas pequeñas (microcelas).

Existen más modelos de propagación para sistema inalámbricos outdoor, debido a que la comunicación inalámbrica outdoor se viene utilizando desde hace mucho más tiempo: radio, televisión,.... Los modelos outdoor no tienen en cuenta las características particulares de la propagación indoor.

El campo de la propagación indoor es relativamente nuevo y las primeras investigaciones datan de primeros de los 1980s. La llegada de las WLAN hace todavía más necesario el disponer de modelos indoor de predicción de cobertura.

3.2.2.1 CONCEPTO Y CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS DE PROPAGACIÓN

Un modelo de propagación es un conjunto de expresiones matemáticas, diagramas y algoritmos usados para representar las características radio de un ambiente dado. Generalmente los modelos de predicción se pueden clasificar en empíricos o estadísticos, teóricos o deterministas o una combinación de estos dos (semi-empíricos).

Como he comentado previamente, los modelos empíricos o estadísticos se basan en mediciones, los modelos teóricos lo hacen en los principios fundamentales de los fenómenos de propagación de ondas de radio y a diferencia de los anteriores no se sustentan sobre amplias mediciones sino que disponemos de detalles del entorno con lo que podemos estimar la propagación de la señal.

Dentro de los empíricos (o estadísticos) se pueden citar modelos usados tanto en macroceldas como microceldas, para escenarios exteriores, como una ciudad o una calle...etc. Son importantes en este grupo el modelo de Hokumura, uno de los más utilizados en zonas urbanas, el de HATA que se trata de una fórmula empírica de las gráficas del modelo de Hokumura, el COST-231-Walfisch-Ikegami que hace uso del modelo Walfisch-Bertoni o el de Dual-Slope que está basado en el modelo de dos rayos muy utilizado cuando la antena transmisora está varias longitudes de onda por encima de la horizontal del plano del suelo. Todos estos modelos se traducen en procedimientos matemáticos simples de implementar aunque su utilización es recomendable cuando no se requiere una precisión elevada.

Sin embargo los deterministas hacen uso de las ecuaciones de Maxwell para el cálculo computacional de las características de la propagación que queremos estudiar.

Desafortunadamente este camino hace uso de operaciones matemáticas muy complejas y como consecuencia de unos requerimientos computacionales elevados.

Con estos modelos de propagación se predice la pérdida en la trayectoria que una señal de RF pueda tener entre un transmisor y un receptor, tanto móvil como fijo. La ventaja de modelar radiocanales teniendo en cuenta las características de la trayectoria entre Transmisor (Tx) y Receptor (Rx), es conocer la viabilidad de los proyectos que se deseen planear en determinados sectores, de esta manera se podrá hacer una estimación acerca de la necesidad, costos y capacidad de los equipos requeridos (especificaciones técnicas), conclusión a la que se puede llegar con una herramienta que implementara adecuadamente un fiable modelo de propagación. Evidentemente la calidad de un modelo u otro se mide por la veracidad de los resultados en comparación con medidas en campo reales.

3.2.2.2 MODELOS DE PROPAGACIÓN OUTDOOR (ENTORNOS EXTERIORES)

En el campo OUTDOOR existen muchos más modelos, debido principalmente a que se utilizan desde hace mucho tiempo.

Dentro de los modelos OUTDOOR se puede hacer una clasificación atendiendo al tamaño del área de cobertura. Así los modelos que cubren áreas del orden de varias decenas de Km, con emisiones de potencia de varias decenas de vatios, desde antenas bastante elevadas se clasifican como macroceldas.

Los modelos que cubren áreas del orden de 200 a 1000 metros, con emisiones de potencia del orden de 10 mW a 1W y antenas de entre 3 a 10 metros se clasifican como microceldas.

Existen multitud de modelos para macroceldas, entre otros: el modelo de Bullington, el modelo de Okumura, el modelo ITU (CCIR), el modelo Hata, el modelo Ericsson 9999, el modelo Lee, el modelo COST 231-Walfisch-Ikegami, el modelo ANN y muchos más. También hay bastantes modelos para microceldas como el modelo de dos rayos, modelos basados en UTD (Uniform Theory of Diffraction) y teoría de imágenes múltiples, el modelo Lee para microceldas, etc.

3.2.2.3 MODELOS DE PROPAGACIÓN INDOOR (ENTORNOS INTERIORES)

Los resultados de la predicción de cobertura de un AP proporcionada por un modelo son muy importantes para facilitar las siguientes tareas:

- Predecir el tamaño de las áreas que se pueden cubrir con un único TX.
- Planificar la ubicación de las celdas de modo que, aún utilizando la misma frecuencia, no se interfieran ni causen errores.

En entornos cerrados, los niveles de señal fluctúan en mayor medida que en entornos abiertos. Esta diferencia se explica en el hecho de que en una localización específica, el campo eléctrico se forma por un número mucho mayor de componentes indirectos que en el caso de un entorno abierto. Los modelos de propagación indoor difieren de los modelos de propagación tradicionales en dos aspectos:

- Las distancias cubiertas son mucho más pequeñas.
- El componente variable del entorno es mucho mayor para separaciones más pequeñas entre transmisor y receptor.

3.2.2.3.1 MODELOS DE PROPAGACIÓN EMPÍRICOS O ESTADÍSTICOS

Como se ha comentado en el apartado 3.2.1.1, los modelos empíricos se basan en la extrapolación estadística de resultados a partir de medidas realizadas sobre el terreno. La influencia del entorno se tiene en cuenta de manera implícita en su conjunto, sin ser reconocidas cada una de ellas de manera aislada, siendo ésta la principal ventaja de estos modelos.

A continuación se explican brevemente los modelos de propagación utilizados para el análisis del proyecto. Algunos de ellos no son los más adecuados para entornos Indoor, pero en el posterior análisis, podremos sacar conclusiones de cuales han sido los mas adecuados, fijándonos en los datos obtenidos.

3.2.2.3.1.1 MODELO DE PROPAGACIÓN EN ESPACIO LIBRE

En espacio libre, la energía radiada por una antena omnidireccional se propaga por la superficie de una esfera como se puede observar en la figura 31. El área de la superficie de una esfera de radio d es $(4\pi)^2 d^2$.

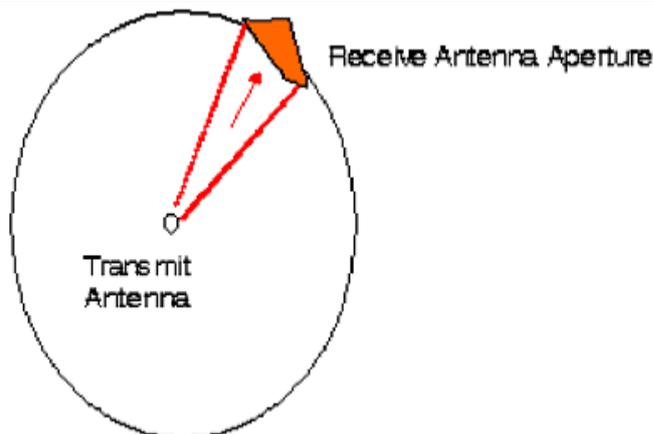


Figura 31: Apertura recibida en una antena. Fuente [15]

El Modelo de Propagación en Espacio Libre se utiliza para predecir la potencia de la señal cuando entre el transmisor y el receptor existe una clara línea de vista. Los sistemas de comunicación por satélite y los enlaces microondas se pueden modelar como propagación en el espacio libre.

Como la mayoría de los modelos de propagación a gran escala, el modelo del espacio libre predice que la potencia recibida decae como función de la distancia de separación

entre el transmisor y receptor elevada a alguna potencia. La potencia recibida en el espacio libre por una antena receptora, la cual está separada de la antena transmisora una distancia d , está dada por la ecuación de Friis:

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

Donde:

- $P_r(d)$ = potencia recibida; la cual es función de la separación T-R (transmisor-receptor)
- P_t = potencia transmitida
- G_t = ganancia de antena transmisora
- G_r = ganancia de la antena receptora
- λ = longitud de onda en metros
- d = la distancia de separación de T-R en metros
- L = pérdidas del sistema no achacables a la propagación

La ganancia de la antena está dada por:

$$G = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (5)$$

La apertura efectiva A_e se relaciona con el tamaño físico de la antena y con la frecuencia de la portadora mediante:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{2\pi c}{\omega_c} \quad (6)$$

dónde f es la frecuencia de la portadora en Hz, ω_c es la frecuencia de la portadora dada en radianes por segundo y c es la velocidad de la luz en metros/segundo.

Los valores de P_t y P_r deben ser expresados en las mismas unidades, y G_t y G_r son cantidades adimensionales. Las pérdidas L son usualmente debidas a la atenuación de la línea de transmisión, a las pérdidas por filtros, y a las pérdidas de la antena en los sistemas de comunicación. Cuando $L=1$ significa que no hay pérdidas en el sistema.

Las pérdidas por trayectoria representan la atenuación de la señal como una cantidad positiva medida en dB, y se definen como la diferencia entre la potencia radiada efectiva y la potencia recibida. Puede o no incluir el efecto de ganancia de las antenas; cuando se incluyen la ecuación es la siguiente:

$$PL = 10 \log \left(\frac{P_t}{P_r} \right) = -10 \log \left(\frac{G_t G_r \lambda^2}{4\pi d^2} \right) \quad (7)$$

Cuando la ganancia de las antenas es excluida, se asume que tiene ganancia unitaria y la ecuación se convierte en:

$$PL = 10 \log \left(\frac{P_t}{P_r} \right) = -10 \log \left(\frac{\lambda^2}{4\pi d^2} \right) \quad (8)$$

La ecuación de Friis muestra que la potencia de la señal recibida se atenúa de acuerdo al cuadrado de la distancia entre el transmisor y el receptor, lo que implica que decae 20 dB/década.

Cuando se conoce la potencia recibida en una distancia de referencia d_0 , la ecuación siguiente puede utilizarse para calcular la potencia recibida en una distancia más lejana:

$$P_r(d) = P_r(d_0) \left(\frac{d_0}{d} \right)^2 \quad (9)$$

La misma ecuación expresada como pérdida de trayecto sería:

$$PL(d) = PL(d_0) + 20 \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + L_{FS} \quad (10)$$

3.2.2.3.1.2 MODELO DE PÉRDIDA DE TRAYECTO BASADO EN COST 231

Este es el modelo de propagación indoor utilizado en UMTS. El modelo esta definido como:

$$L = L_{FS} + L_C + \sum K_{wi} L_{wi} + n \left(\frac{n+2}{n+1} b \right) * L_f \quad (11)$$

Donde:

- L_{FS} = pérdida en espacio libre entre transmisor y receptor
- L_C = constante de perdida. Se fija normalmente en 37 dB
- K_{wi} = número de paredes de tipo i penetradas
- n = número de suelos penetrados
- L_{wi} = pérdida debida a muro de tipo i
- L_f = pérdida entre suelos adyacentes
- b = parámetro empírico

	Descripción	Factor (dB)
L_f	Suelos (estructura típica) - Baldosas - Revestimiento de hormigón - Espesor típico < 30 cm	18.3
L_{w1}	Muros internos finos - Yeso - Muros con muchos huecos (ventanas)	3.4
L_{w2}	Muros internos - Hormigón, ladrillos - Mínimo número de huecos	6.9

Tabla 5. Valores medios de los factores de pérdida según categoría

El modelo COST 231 es un modelo empírico que tiene en cuenta las pérdidas de propagación en espacio abierto así como las pérdidas introducidas por las paredes, suelos y techos penetrados en el trayecto directo entre transmisor y receptor.

3.2.2.3.1.3 MODELO BASADO EN EL NÚMERO DE MUROS Y SUELOS

Caracteriza la pérdida de trayecto en interior por un exponente fijo de 2 (como en el espacio libre) y unos factores de pérdida relacionados con el número de suelos y muros que atraviesa la línea recta entre emisor y receptor. Se define de la siguiente manera:

$$L = L_1 + 20 \log \left(n_f a_f + n_w a_w \right) \quad (12)$$

Donde:

- r = distancia en metros en línea recta
- L_1 = pérdida de referencia con $r=1$ metro
- a_f = atenuación por cada suelo que atraviesa
- a_w = atenuación por cada muro que atraviesa
- n_f = número de suelos que atraviesa
- n_w = número de muros que atraviesa

3.2.2.3.1.4 MODELO ITU-R

Es similar a los dos anteriores pero sólo tiene en cuenta explícitamente el número de suelos. Las pérdidas en el mismo piso por atravesar muros, se incluyen implícitamente cambiando el exponente en la pérdida de trayecto.

$$LT = L_1 + 20 \log_{10} \left(\frac{f_c}{\text{MHz}} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{h}{\text{m}} \right) + L_f n_f - 28 \quad (13)$$

3.2.2.3.1.5 MODELO LINEAR PATH ATTENUATION

El path loss medido en dB se obtiene del path loss en espacio libre (PL_{FS}) más un factor que es lineal del rango que experimentalmente se ha obtenido. La fórmula utilizada en este modelo es:

$$PL \left(\frac{d}{\text{m}} \right) = PL_{fs} + ad \quad (14)$$

Donde “a” es el coeficiente de atenuación lineal y “d” es la distancia entre transmisor y receptor. En el caso de un ambiente de oficinas, el coeficiente “a” sería 0.47 dB/m. No tiene en consideración efectos de desvanecimiento. Sólo toma en consideración la pérdida en espacio libre. Este modelo es susceptible de ser específico de un sitio, esto es debido a que el valor de “a” varía de un entorno a otro y debe ser medido con precisión para poder demostrar los beneficios de este modelo.

3.2.2.3.1.6 MODELO KEENAN-MOTLEY

Motley propuso un modelo que se basa tanto en la teoría, como en las medidas hechas en la práctica. Este modelo mide el path loss mediante la cantidad de señal recibida y una distancia de referencia. La fórmula utilizada es la siguiente:

$$PL_{KM} \left(\frac{d}{\text{m}} \right) = PL_M + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{\text{m}} \right) + k_F PL_{FS} \quad (15)$$

Donde:

- PL_M = es el path loss medido a 1 metro.
- PL_{FS} = es el path loss en espacio libre; incluyendo pérdidas por penetración a través de suelos/techos.
- K_F = número de suelos/techos penetrados.

Este modelo depende tanto de la teoría como del path loss medido. El path loss medido es una buena forma de saber el comportamiento del modelo. Sin embargo este modelo no puede ser utilizado para predecir el nivel de señal recibido, dado el requerimiento de medidas del path loss reales.

3.2.2.3.1.7 MODELO MULTI WALL

Este modelo esta caracterizado por un exponente de n=2, como path loss en espacio libre; junto con factores de pérdida relacionados con el número de plantas (nf) y muros (nw) que interceptan la línea en visión directa a la distancia (d) entre los terminales. La fórmula utilizada es la siguiente:

$$PL_{MW} = PL_1 + 20 \log_{10} \left(\frac{d}{\text{m}} \right) + n_f a_f + n_w a_w \quad (16)$$

Donde:

- PL₁ = path loss a 1 metro.
- a_f = factor de atenuación de suelos.

- n_f = número de suelos atravesados.
- a_w = factor de atenuación de muros.
- n_w = número de muros atravesados

3.2.3.3.2 MODELOS BASADOS EN TÉCNICAS DE TRAZADO DE RAYOS

Las técnicas basadas en trazado de rayos se fundamentan en la aplicación de la teoría de la óptica geométrica. Este método es uno de los más antiguos que se utilizan para alta frecuencia, ya que se desarrolló originalmente para analizar la propagación de la luz a frecuencias ópticas. A frecuencias elevadas no es necesario considerar la naturaleza ondulatoria de los campos electromagnéticos. Esta teoría proviene de considerar el transporte de energía a lo largo de un tubo de rayos, sin precisar si la energía se propaga en forma de ondas o de partículas [19].

Al no tener en cuenta la naturaleza ondulatoria de los campos, el método de óptica geométrica no es capaz de predecir la difracción por lo que las técnicas basadas en trazado de rayos también se apoyan, además de en GO, en teorías de difracción como en la Teoría Geométrica de la Difracción (GTD), en la Teoría Uniforme de la Difracción (UTD) o en la Teoría Física de la difracción (PTD).

La teoría de óptica geométrica se basa en los siguientes conceptos [19] [20]:

- Las líneas de flujo de energía o rayos son rectas en un medio homogéneo. En medios heterogéneos, siguen el camino de longitud óptica estacionaria, es decir, de longitud mínima (principio de Fermat).
- Los rayos son reflejados por la superficie conductora según la ley de Snell. En consecuencia, a un punto de observación determinado llegan únicamente los rayos provenientes de los puntos de reflexión especular (Figura 32) y no del resto de la superficie.
- La variación de la amplitud del campo a lo largo de un tubo de rayos está determinada por la ley de conservación de la energía. Por tanto, la amplitud del campo es inversamente proporcional a la sección recta transversal del tubo.

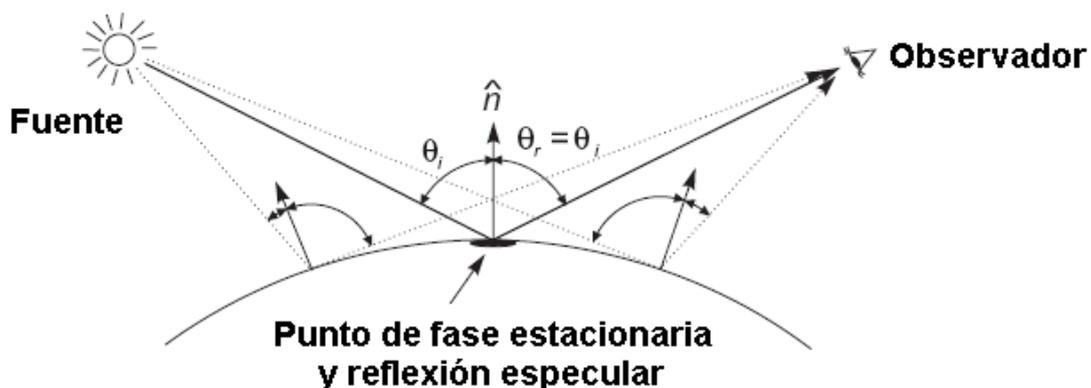


Figura 32: Reflexión especular en la Ley de Snell

En los algoritmos basados en trazado de rayos la señal se propaga al igual que si fuesen rayos ópticos (aproximación del frente de onda), lo que hace que el análisis sea más sencillo. Los fenómenos que se contemplan en la propagación son principalmente tres, reflexión, refracción y difracción comentados en el capítulo 3.1 [21]. También existen

otros fenómenos como el *Scattering Difuso* que algunos algoritmos también contemplan. Respecto al método de trazar los rayos existen dos formas principales:

Método de las imágenes:

Esta técnica consiste en calcular las imágenes del receptor con los objetos más importantes, generalmente los más cercanos, y posteriormente considerar las trayectorias desde el transmisor a cada una de las imágenes (Figura 33).

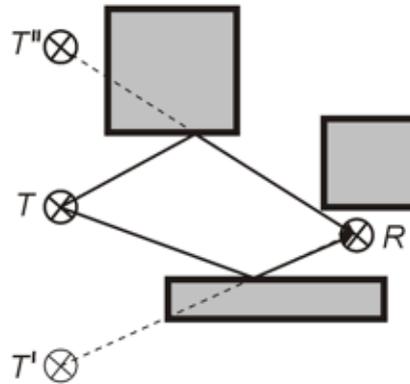


Figura 33: Figura del método de las imágenes

Las trayectorias de los rayos ópticos que definen el frente de onda quedan perfectamente definidas y pueden ser trazadas con gran exactitud. La potencia total recibida puede obtenerse como la suma coherente de todas las contribuciones.

Cuando el escenario se complica la utilización de este método es desaconsejable, sobre todo cuando se consideran reflexiones en número superior a dos, ya que el tiempo de cálculo crece exponencialmente con el orden de las reflexiones.

Lanzado de rayos

Esta técnica, también conocido como *Ray Launching*, consiste básicamente en lanzar un número finito de rayos del transmisor. La distribución de los rayos debe ser uniforme en las distintas direcciones del espacio, cubriendo así el ángulo sólido completo deseado. Para cada rayo se consideran las múltiples reflexiones y refracciones que pueda sufrir hasta alcanzar el receptor.

El número de estas reflexiones y refracciones a considerar dependerá del nivel de señal a partir de la cual una contribución pueda ser considerada como poco significativa, tras un periodo de tiempo determinado o tras un número limitado de interacciones con los obstáculos. En la figura 34 se puede ver una figura de esta técnica.

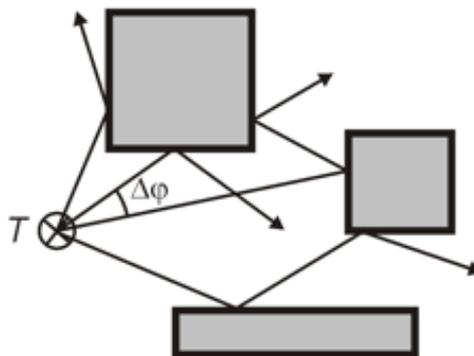


Figura 34: Figura del método de Ray Launching

Este método es muy útil en entornos complejos ya que es más fácil seguir los rebotes de los rayos, pero también es más complicado encontrar con los rayos los receptores ya que

es necesario un número suficiente de rayos para cubrir todo el espacio y que algún rayo alcance a esos receptores.

3.2.3.3.2.1 SOFTWARE DE TRAZADO DE RAYOS

Como ya se ha comentado, se ha utilizado un programa de trazado de rayos en tres dimensiones, que ha sido desarrollado completamente desde cero en la Universidad Pública de Navarra [19]. Este software ha sido programado con la herramienta matemática Matlab con la función de poder ser utilizado como una herramienta para el cálculo de radiopropagación en entornos interiores.

El método de trazado de rayos en 3D que se ha utilizado se basa en un algoritmo Ray-Launching [22] que consiste en lanzar rayos desde el transmisor con un cierto ángulo que se va incrementando discretamente ($\Delta\phi$, $\Delta\theta$). Se puede ver un ejemplo en la figura 35. Cada rayo es computado individualmente y el campo eléctrico de cada píxel es la suma de todas las contribuciones de los rayos que atraviesan ese píxel [23]. En nuestro caso cada píxel corresponde con un punto del mallado. El mallado utilizado es de forma hexaédrica y las celdas de resolución 0,2m*0,2m*0,2m generalmente.

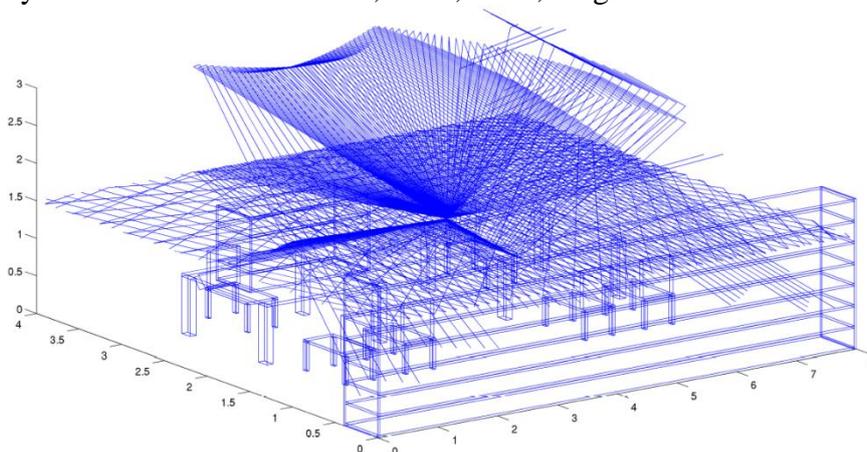


Figura 35: Vista en 3D de los rayos lanzados en un escenario cualquiera

Este método tiene en cuenta la reflexión y la refracción de los rayos, fenómenos clave en la propagación en interiores. El algoritmo es recursivo con cada rayo, por lo que el tiempo de computación depende en gran medida tanto del incremento del ángulo de salida como de las reflexiones y refracciones permitidas. En la mayoría de los casos 2 o 3 rayos proporcionan el 95% de la energía [23] pero en este caso se ha utilizado un máximo de 6 reflexiones y refracciones por rayo para mejorar la precisión. Esto aumenta el tiempo de cálculo, sin embargo, el coste computacional no ha sido elevado ya que los escenarios de simulación no son muy grandes.

A la hora de crear el escenario se puede construir cualquier tipo de objeto que pueda ser simplificado en hexaedros. Además para todos los objetos se define el material con el que están hechos y se caracterizan mediante su constante dieléctrica y su tangente de pérdidas. Se pueden incluir también antenas emisoras y receptoras definidas mediante sus parámetros básicos (frecuencia, directividad, polarización, potencia salida, etc.).

El tipo de resultados que se pueden extraer con este programa son de gran interés en la caracterización radio. Se puede calcular la potencia recibida en cada punto del espacio pudiendo crearse así mapas de cobertura tanto horizontales (altura fija) como verticales (distancia longitudinal fija). Se pueden crear mapas de interferencia cuando varias

antenas emiten a la vez y gracias a que se calcula el tiempo de propagación de cada rayo se pueden obtener perfiles de retardo potencia para cada punto así como mapas de dispersión.

Las principales limitaciones de este programa son que no se han implementado todavía fenómenos importantes en la propagación *indoor* como la difracción y el scattering y que solo admite la construcción de formas a partir de hexaedros, la incursión de objetos como esferas y cilindros no es posible.

4. ANÁLISIS DE SIMULACIÓN Y MEDIDA DE UN ESCENARIO INDOOR ZIGBEE

4.1. INSTRUMENTACIÓN

Los instrumentos utilizados para la realización del proyecto han sido los siguientes:

- Módulos RF XBee-PRO
- PC
- Analizador RF Field Fox N9912A

Una vez conocidos los dispositivos que debemos utilizar para poder implementar el proyecto, se van a detallar las características técnicas más importantes de éstos.

Módulos RF XBEE PRO

En la familia de módulos XBee [24] podemos encontrar, dos tipos de módulos muy similares: XBee ZNet y XBee-PRO ZNet. Para la realización del proyecto, hemos empleado el segundo tipo, ya que dispone de una mayor potencia de salida y por lo tanto mayor cobertura. Tiene dos inconvenientes, mayor tamaño y mayor consumo. En la siguiente imagen se muestra el dispositivo XBee-PRO ZNet utilizado.

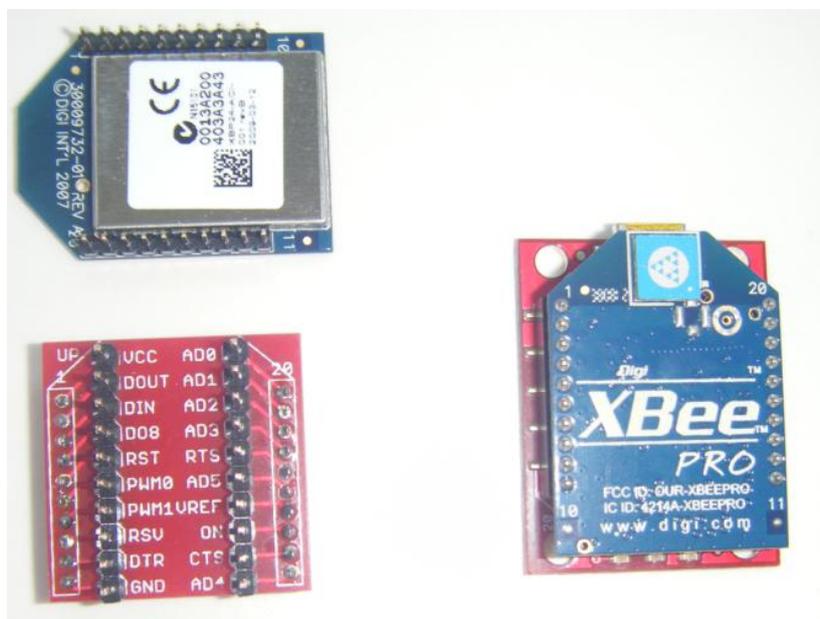


Figura 36: Módulo RF XBee-PRO

El módulo XBee-PRO ZNet satisface las necesidades de bajo coste y bajo consumo exigido en redes de sensores inalámbricas. Es de fácil uso, requiere niveles mínimos de potencia y proporciona una entrega fiable de datos entre dispositivos. Este módulo, totalmente compatible con ZigBee, opera a una frecuencia de 2.4 GHz dentro de la banda ISM.

Las principales especificaciones del módulo XBee-PRO ZNet son las siguientes:

Xbee-PRO ZB	
Performance	
RF Data Rate	250 Kbps
Indoor/Urban Range	300 ft (90 m)
Outdoor/RF Line-of-Sight Range	1 mi (1.6 km)
Transmit Power	50 mW (+17 dBm) / Int'l 10 mW (+10 dBm)
Receiver Sensitivity (1% PER)	-102 dBm
Features	
Serial Data Interface	3.3V CMOS UART
Configuration Method	API or AT commands, local or over-the-air
Frequency Band	2.4 GHz
Interference Immunity	DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)
Serial Data Rate	1200 bps - 1 Mbps
ADC Inputs	(4) 10-bit ADC inputs
Digital I/O	10
Antenna Options	Chip, Wire Whip, U.FL, RPSMA
Networking & Security	
Encryption	128-bit AES
Reliable Packet Delivery	Retries/Acknowledgments
IDs and Channels	PAN ID, 64-bit IEEE MAC, 13 channels
Power Requirements	
Supply Voltage	3.0 – 3.4VDC
Transmit Current	295 mA @ 3.3VDC
Receive Current	45 mA @ 3.3VDC
Power-Down Current	<10 uA @ 25° C

Tabla 6: Características del módulo XBee- PRO ZNET

Para más información, véase el Anexo B: Ficha técnica del módulo XBee- PRO ZNET.

Analizador de RF Field Fox N9912A

El analizador de RF Field Fox N9912A [25] es un equipo de medición electrónica, diseñado para proveer hasta 5 funcionalidades. Este puede combinar análisis de cable y antena, análisis de espectro, mediciones de potencia y análisis vectorial de redes.

En nuestro caso, hemos empleado las funciones de analizador de espectro y medidor de potencia, las cuales nos permiten visualizar en una pantalla las componentes espectrales presentes en un lugar con sus respectivos niveles. En el eje de ordenadas, suele presentarse el nivel en dBm de la señal, mientras que en eje de abscisas se representa la frecuencia, en una escala que es función de la separación temporal y el número de muestras capturadas.

En la figura 37 se puede visualizar el modelo de analizador empleado para la realización de las mediciones.

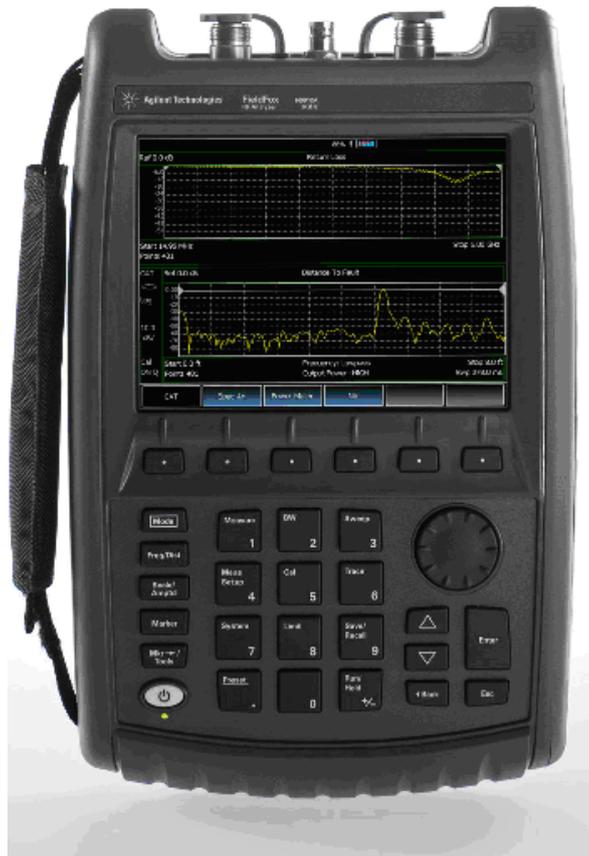


Figura 37: Analizador RF Field Fox N9912A

A continuación se detallan las principales características del analizador RF:

Analizador RF Field Fox N9912A			
Sensibilidad		-148dBm	
Rango de frecuencia		9 KHz a 6 GHz	
Dimensiones		292x188x72 mm	
Conectores		2 x USB 2.0; 1 x mini USB; 1 x LAN; 1 x mini SD slot	
Fuente de alimentación	External DC Input		15 a 19 VDC
	External AC power adapter	Input	100 to 250 VAC, 50 to 60 Hz; 1.25 to 0.56 A
	Consumo de potencia		15 VDC, 4 A
Medición de Magnitud y Fase		Si	
Voltimetro Vectorial		Si	
Calibración en el puerto de salida de RF		Si	

Tabla 7: Características técnicas del Analizador RF Field Fox N9912A

Para más información, acudir al Anexo C: Ficha técnica del analizador RF Field Fox N9912A

4.2. COMPARATIVA CON DISTINTOS MEDIOS INALÁMBRICOS

A continuación se presenta una tabla comparativa de Zigbee con otros medios inalámbricos [12]:

TABLA COMPARATIVA CON OTROS MEDIOS INALAMBRICOS DE TRANSMISIÓN DE DATOS			
	ZigBee	BLUETOOTH	WI-FI
Bandas de Frecuencias	2.4GHz, 868 / 915 MHz	2.4GHz	2.4GHz
Tasa de Transferencia	250kbps (2.4GHz), 40kbps (915MHz), 20kbps (868MHz)	3Mbps	11Mbps
Números de Canales	16 (2.4GHz), 10 (915MHz), 1 (868MHz)	79	11—14
Tipos de Datos	Digital (Texto)	Digital, Audio	Digital
Números de Dispositivos	255 / 65535	8	32
Requisitos de Alimentación	Muy Baja - Años de Batería	Media - Días de Bateria	Media - Horas de Batería
Introducción al Mercado	Baja	Media	Alta
Arquitecturas	Estrella, Árbol, Punto a Punto	Estrella	Estrella
Mejores de Aplicaciones	Control de Bajo Costo y Monitoreo	Computadoras y Teléfonos	Edificio con Internet
Consumo de Potencia	30mA transmitiendo, 3µA en reposo	40 mA transmitiendo, 0.2mA en reposo	400 ma transmitiendo, 20 ma en reposo
Precio	Bajo	Accesible	Costoso
Complejidad	Simple	Complejo	Complejo

Tabla 8: Tabla comparativa de ZigBee con otros medios inalámbricos

Como podemos observar en la tabla, la tecnología ZigBee es de cierta forma parecida a Bluetooth y a Wi-Fi. Su principal función es la del ahorro de energía, es por ello usado en la domótica, ya que esto te permite tener un dispositivo activo con una batería por muchos años, a diferencia de equipos Bluetooth o Wi-Fi que debes tener conectados a una red eléctrica o en su defecto, recargando las baterías diariamente/semanalmente para que siga activo. En términos exactos, ZigBee tiene un consumo de 30mA transmitiendo y de 3µA en reposo, frente a los 40mA transmitiendo y 0.2mA en reposo que tiene Bluetooth y los 400 mA transmitiendo y 20 mA en reposo de Wi-Fi. Este menor consumo se debe a que el sistema ZigBee se queda la mayor parte del tiempo

dormido, mientras que en los otros medios inalámbricos esto no se puede dar, porque siempre se está transmitiendo y/o recibiendo.

La transmisión de datos por este medio es muy limitada, pero suficiente para transmitir desde los sensores los bytes o bits necesarios que requiere el sistema inteligente para la toma de decisiones en las aplicaciones. Por ejemplo, para un sensor de presencia, al coordinador solo será necesario enviarle un bit de información, previamente encapsulado. ZigBee tiene una velocidad de hasta 250 kbps, mientras que en Bluetooth es de hasta 3 Mbps por los 11 Mbps de Wi-Fi. Debido a las velocidades de cada uno, cada medio es más apropiado para ciertas aplicaciones. Por ejemplo, mientras que Bluetooth se usa para aplicaciones como los teléfonos móviles y la informática casera, la velocidad del ZigBee se hace insuficiente para estas tareas, desviándolo a usos tales como la domótica, anteriormente comentado, los productos dependientes de la batería, los sensores médicos, y en artículos de juguetería, en los cuales la transferencia de datos es menor.

La banda de frecuencia utilizada por ZigBee es la banda ISM, empleada para usos industriales, científicos y médicos 868 MHz en Europa, 915 MHz en Estados Unidos y 2,4 GHz en todo el mundo. Por el contrario el resto de medios emplea únicamente la banda de 2,4 GHz.

Para finalizar, el tamaño de una red ZigBee puede ser mayor que en el resto de medios inalámbricos, ya que puede constar de un máximo de 65535 nodos distribuidos en subredes de 255 nodos, frente a los 8 máximos de una subred Bluetooth y los 14 de Wi-Fi.

Una vez analizados los distintos medios de transmisión inalámbricos podemos concluir diciendo que cada uno de los medios se adapta mejor a un tipo de necesidad, pero ZigBee, destaca claramente en comparación con el resto de medios inalámbricos en el bajo consumo y la baja tasa de transmisión de datos.

4.3. ANALISIS DE RESULTADOS

El escenario escogido para la realización de este trabajo es un laboratorio del centro de I+D+I en Electrónica y Comunicaciones Jerónimo de Ayanz en la Universidad Pública de Navarra. Como se puede apreciar en la figura 38, dos de sus paredes son de hormigón y dan al exterior mientras que el resto son de aglomerado y dan al interior del edificio. Además, el local dispone de dos pilares y de material de oficina.



Figura 38: Local de Medidas

La banda de frecuencias estudiada en este trabajo será la ISM de 2.4 GHz. Para el estudio del escenario se han utilizado dos tipos de técnicas, una basada en modelos empíricos y la otra, en la técnica determinista de trazado de rayos 3D.

La simulación en base a modelos de propagación empíricos tiene en cuenta principalmente la distancia entre el emisor y el receptor, características de las antenas y parámetros empíricos propios. Ciertos modelos, además, tienen en cuenta aspectos de la morfología del entorno (i.e. paredes atravesadas, suelo, techo, etc.). Los modelos utilizados en la simulación son COST 231, ITU R P. 1238, Multi Wall, etc., todos ellos explicados en el apartado 3.2.2.3.1.

Con el fin de aumentar la precisión en el análisis, se ha utilizado un programa basado en trazado de rayos en 3D, diseñado específicamente para el cálculo de radiopropagación en entornos interiores, previamente desarrollado en el apartado 3.2.3.3.2. El algoritmo implementado desde Matlab está basado en Ray Launching, considerando las propiedades de los materiales del entorno, así como efectos difractivos de primer orden. En la figura 39 se muestra el entorno de trabajo considerado por el algoritmo.

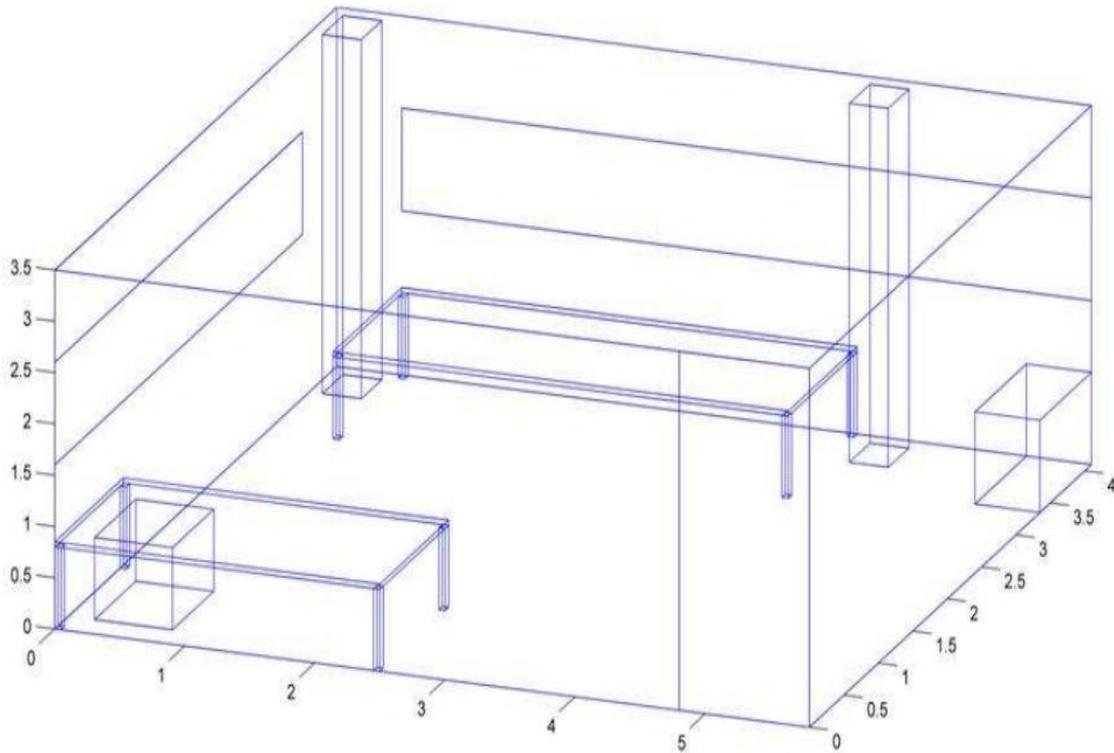


Figura 39: Modelo de trazado de rayos del local de medidas

Los módulos XBee PRO pueden ser configurados desde el PC para que funcionen como coordinador o como dispositivo final. Para la implementación del proyecto, se ha creído conveniente configurar un módulo como coordinador, propio de todas las redes y que irá conectado al PC, y tres dispositivos finales con una topología en estrella.

El coordinador recibirá un paquete de datos por segundo desde cada end device, aunque el tiempo de envío de paquetes puede ser modificado desde el PC. La ubicación de los módulos la hemos ido variando por la sala para conseguir valores representativos de todo el local. En la imagen siguiente se puede observar la red implementada.

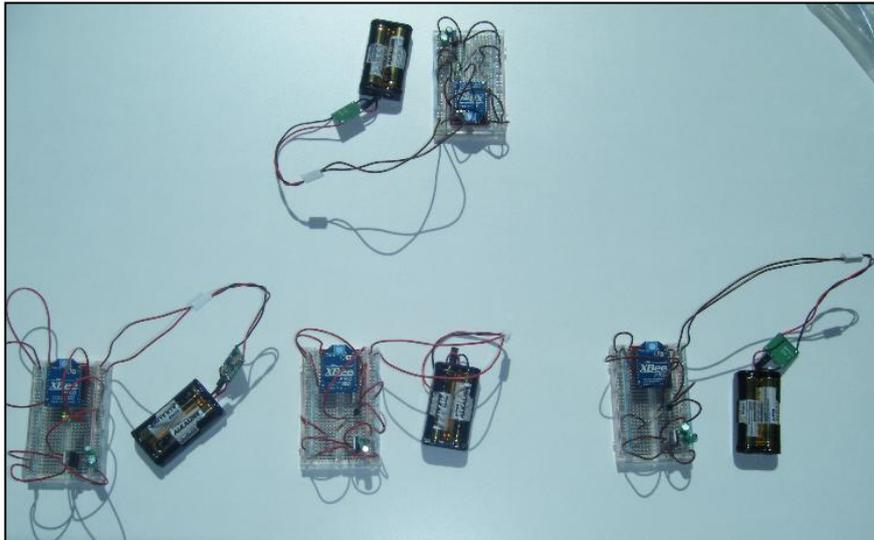


Figura 40: Coordinador (Parte superior) con 3 dispositivos finales

Para poder trabajar con la red, tanto los módulos RFD como FFD, han sido colocados sobre placas de montaje, como se puede apreciar en la figura 41. En ella, podemos observar la configuración de un dispositivo final. En la placa de montaje se encuentra el módulo XBee PRO alimentado por dos pilas de 1.5V cada una.

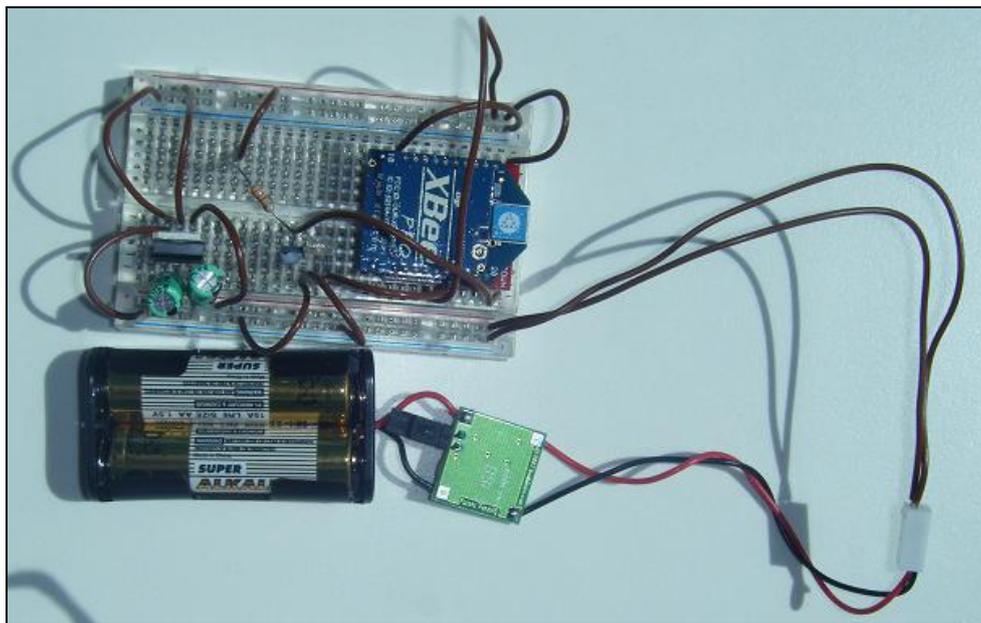


Figura 41: Módulo XBee PRO sobre placa de montaje

Como se ha comentado en el apartado 4.1 los módulos utilizados en el montaje son del tipo XBee PRO de la marca Digi, en concreto el modelos con antena chip integrada. La potencia de transmisión es configurable desde PC con un valor máximo por defecto de 18 dBm. La antena chip integrada presenta una ganancia de -1.5 dBi.

Se presentan a continuación los resultados de simulación obtenidos empleando diversos modelos empíricos y utilizando la técnica determinista de trazado de rayos 3D. Primero se procederá con el escenario 1, mostrado en la figura 42:

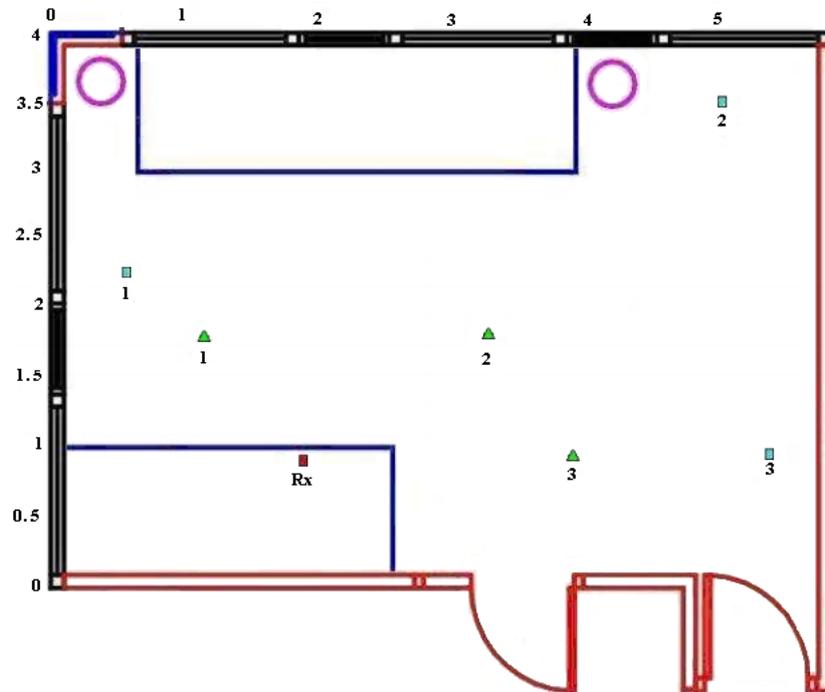


Figura 42: Escenario 1

Dentro del escenario 1, primero se realizará la simulación del grupo de sensores representados por rectángulos azules y posteriormente, la simulación de los triángulos verdes.

Utilizando los modelos de propagación empíricos se pueden ver los resultados obtenidos en las figuras 43 y 44.

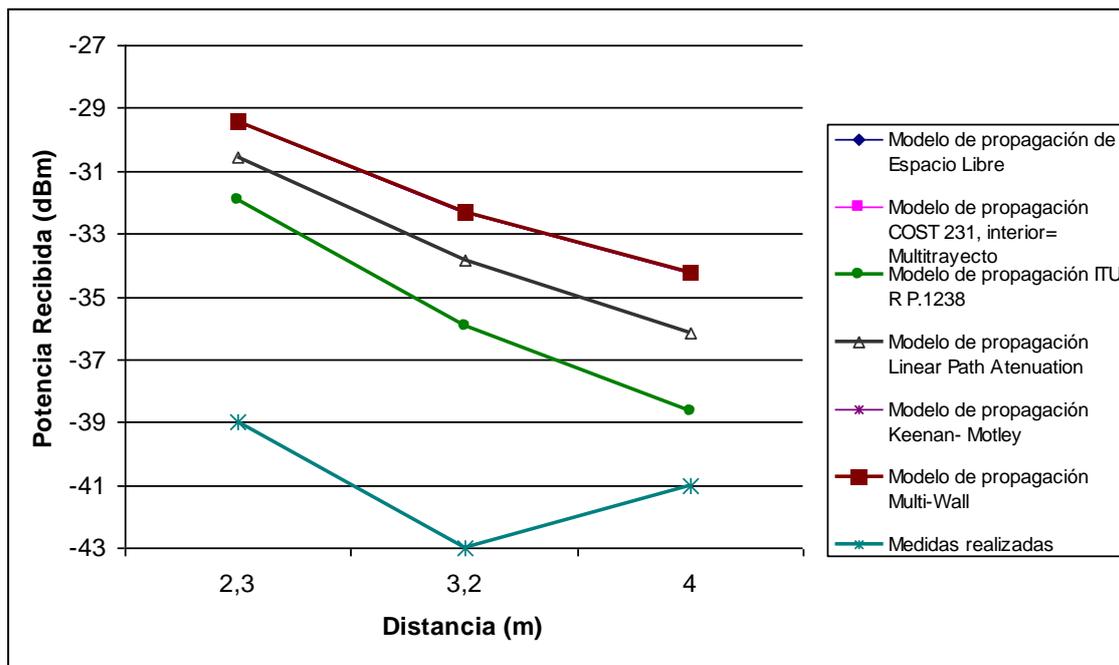


Figura 43: Modelos empíricos grupo sensores azul

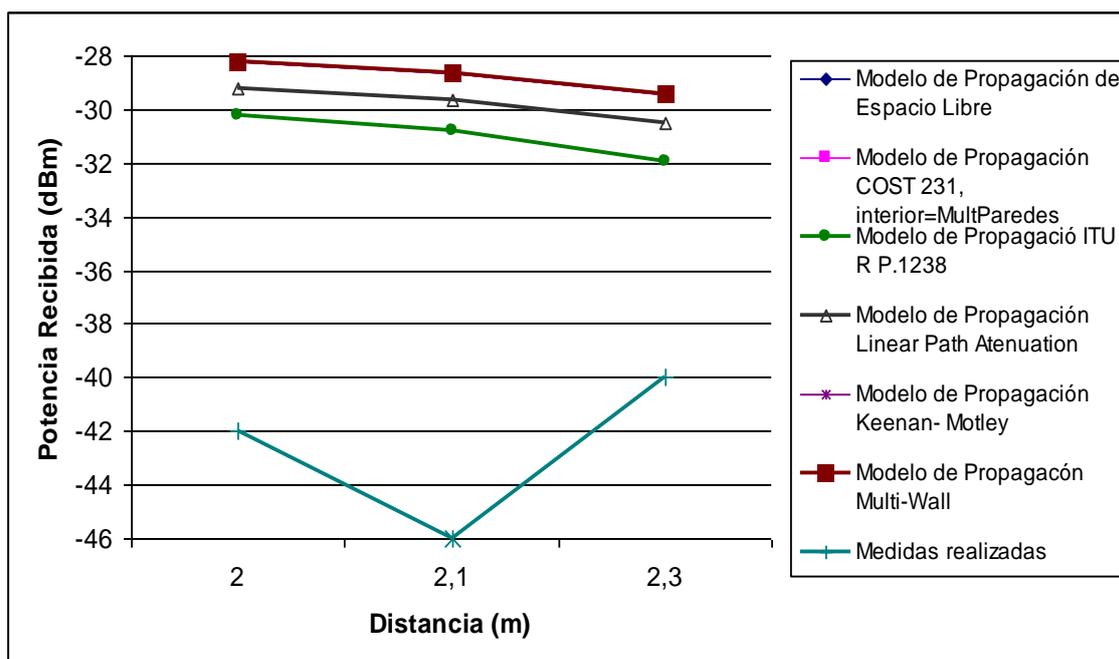


Figura 44: Modelos empíricos grupo sensores verde

Se puede apreciar claramente como todos los modelos de base empírica utilizados muestran unos resultados similares y se alejan de las medidas reales. Esta diferencia se explica en el hecho de que en una localización específica en un recinto cerrado, el campo eléctrico se forma por un número grande de componentes indirectos y estos modelos no tienen en cuenta factores como las componentes multitrayecto, los elementos difractivos, scattering difuso, etc.

Con el fin de poder caracterizar con mayor precisión el entorno de trabajo de las redes de sensores, se ha realizado la simulación de trazado de rayos 3D, implementado sobre Matlab. Se han introducido todos los datos del escenario (tanto topológicos

como morfológicos) y los resultados para un plano de altura concreto (altura $h = 1\text{m.}$) se muestran en la figura 45

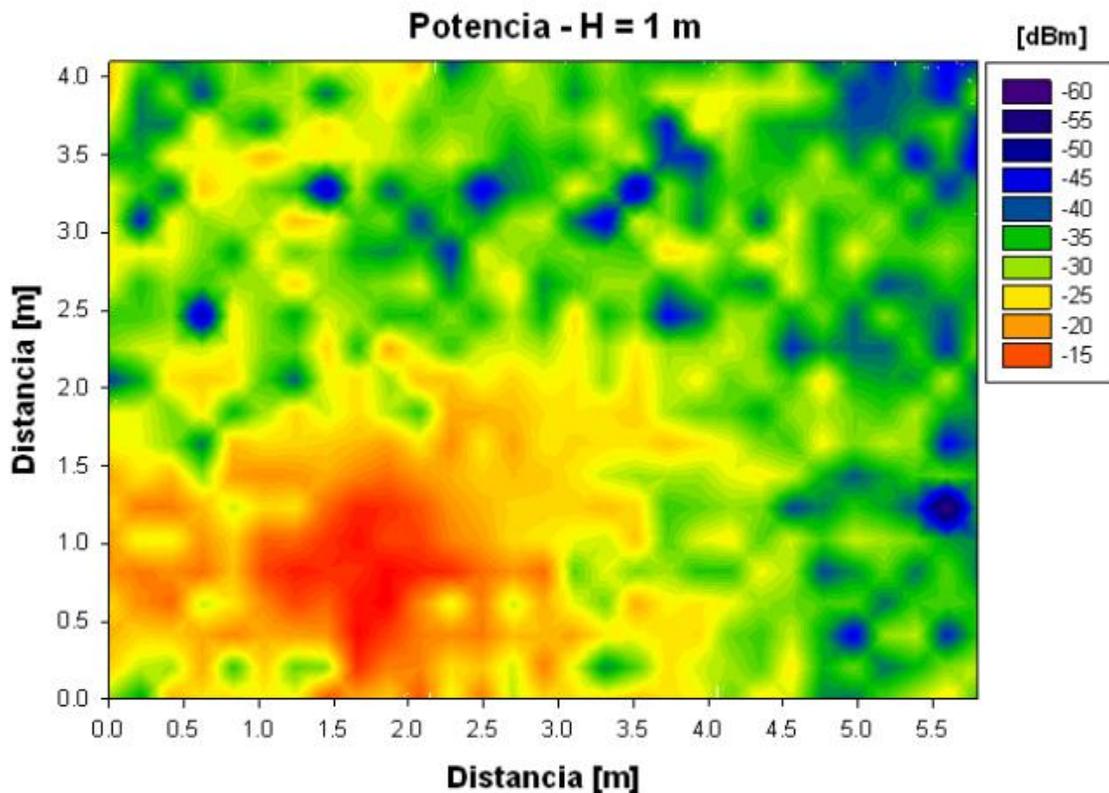


Figura 45: Simulación de trazado de rayos, con altura $h = 1\text{ mts.}$

Como podemos observar en esta simulación, los valores obtenidos se aproximan bastante a los medidos en el local, pero todavía perdura un cierto error, que puede ser debido a las limitaciones de este programa, ya que no es capaz de implementar fenómenos importantes en la propagación indoor como son la difracción y el scattering. Además, solo admite la construcción de formas a partir de hexaedros, la incursión de objetos como esferas y cilindros no es posible, y nuestro recinto dispone de dos pilares con forma cilíndrica.

Como se ha comentado en el apartado 3.2.3.3.2.1, el algoritmo es recursivo con cada rayo. En nuestro caso se ha utilizado un máximo de 6 reflexiones y refracciones por rayo para conseguir bastante precisión, pero en algún rayo puede que haya sido insuficiente, afectando en los valores obtenidos.

Para terminar con el escenario 1, podemos comentar también, que los módulos, tanto el coordinador como los dispositivos finales, a la hora de realizar las medidas se encontraban a una altura de 1.65 metros y en la simulación fueron definidos a 1 metro, pudiendo influir en los valores.

A continuación se analizará el escenario 2, mostrado en la figura 46. Como se puede apreciar, se ha trasladado el coordinador al centro de la sala.

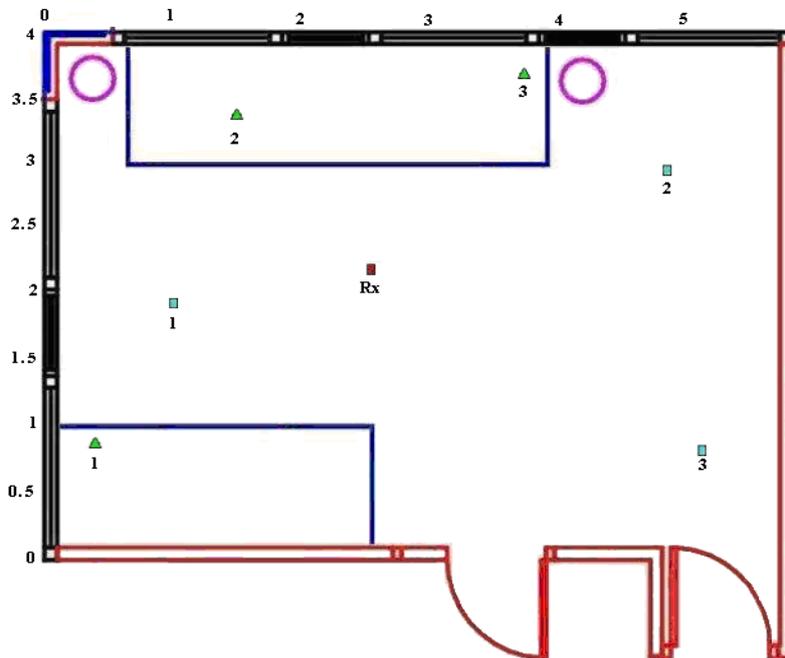


Figura 46: Escenario 2

Utilizando los modelos de propagación empíricos se obtienen los resultados representados en las figuras 47 y 48.

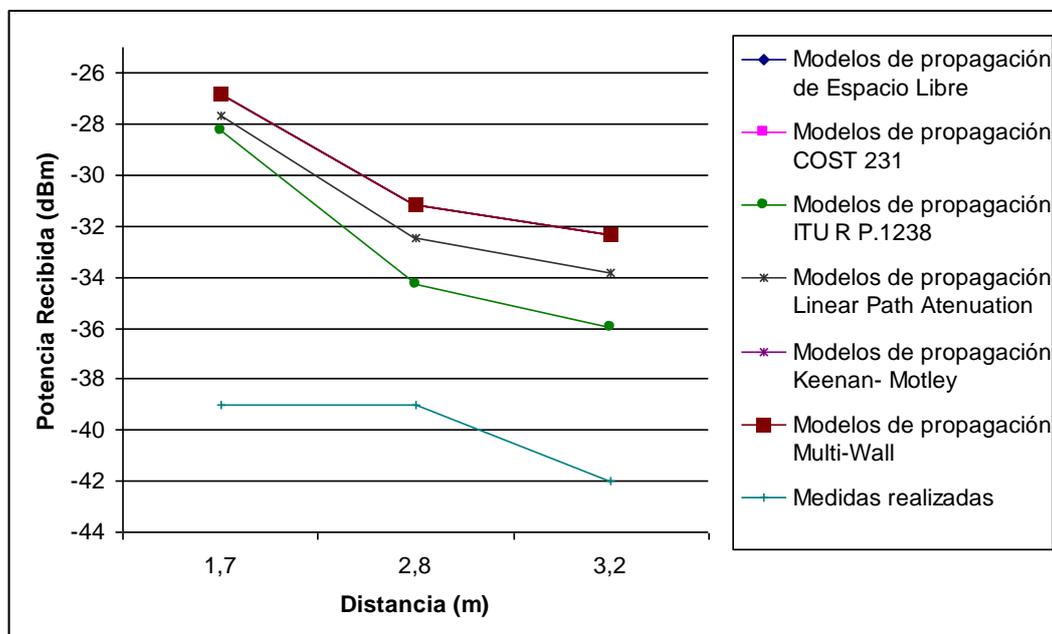


Figura 47: Modelos empíricos grupo sensores azul

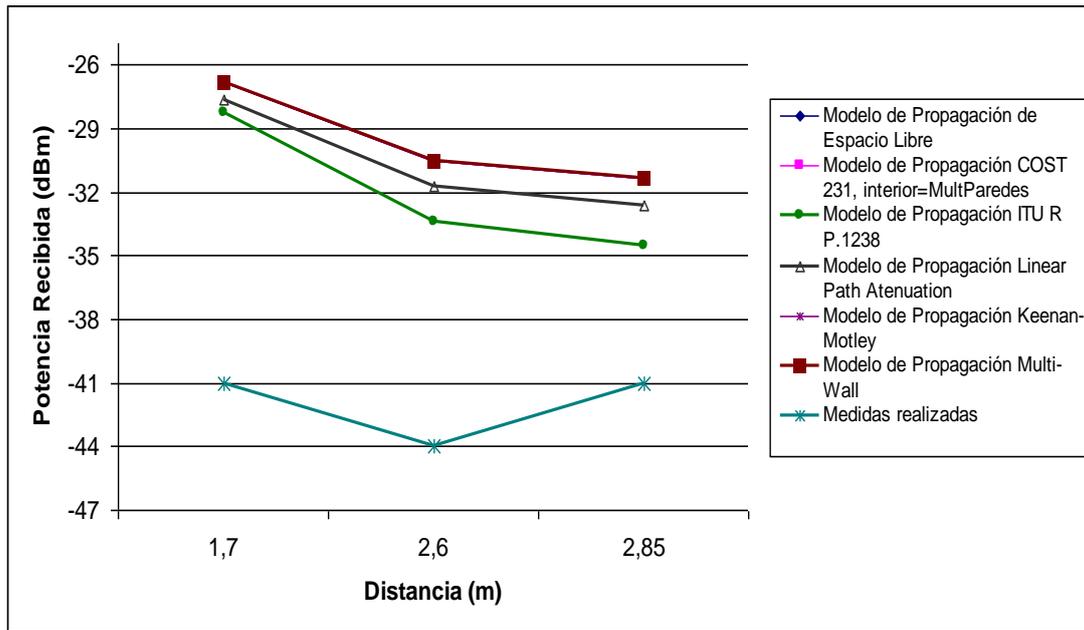


Figura 48: Modelos empíricos grupo sensores verde

Al igual que en el escenario 1, éste presenta una discrepancia en los valores medidos frente a la estimación dada por los modelos, motivado por la baja resolución de los mismos para las cortas distancias de análisis empleadas.

Al ser un recinto de pequeñas dimensiones, los valores generados por los distintos modelos son prácticamente similares, aunque como acabo de comentar, se alejan de los valores medidos.

Utilizando el trazado de rayos se obtiene la gráfica de la figura 49, que como se puede apreciar, los valores obtenidos se ajustan bastante bien a las medidas reales aunque con el error citado en el escenario 1.

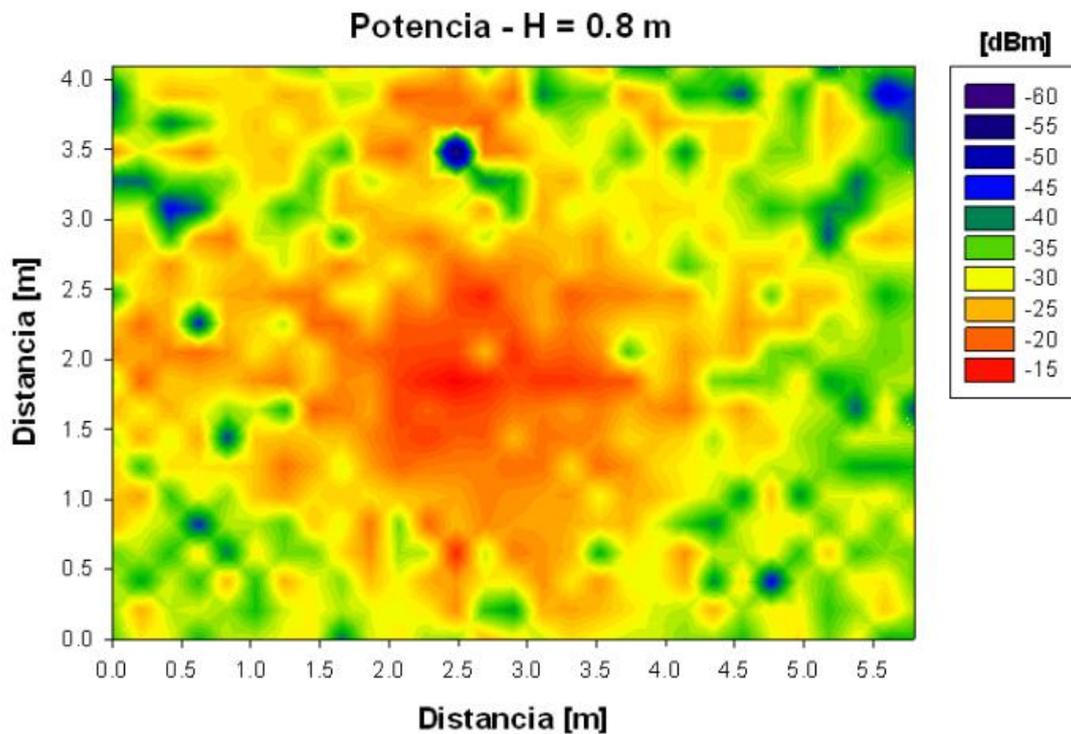


Figura 49: Simulación de trazado de rayos

Tras realizar estas mediciones, realizamos una prueba. Colocamos los tres dispositivos finales en el mismo lugar en la sala para ver si los tres módulos conseguían el mismo nivel de señal. En la figura 50 y 51, se puede observar los resultados obtenidos colocando los dispositivos a 1.6 mts. y 1.8 mts.:

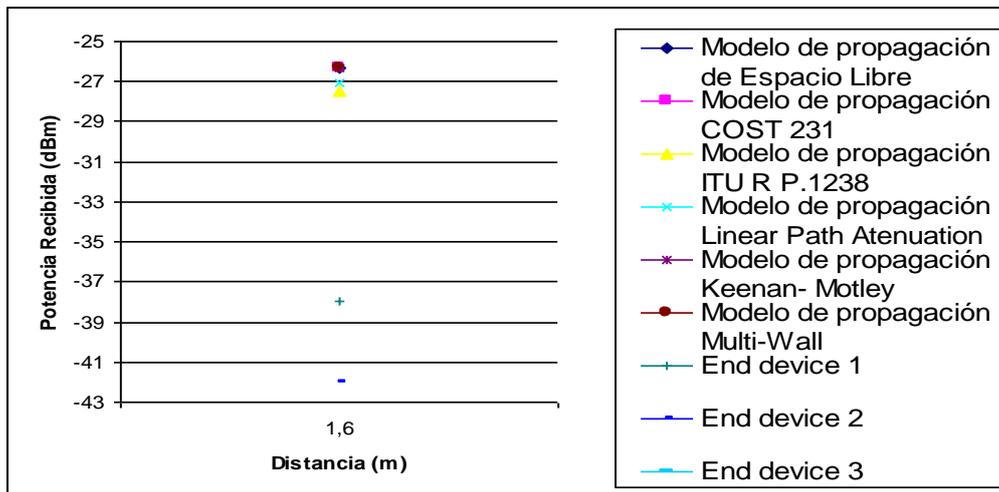


Ilustración 50: Medidas realizadas con end devices a 1.6 m.

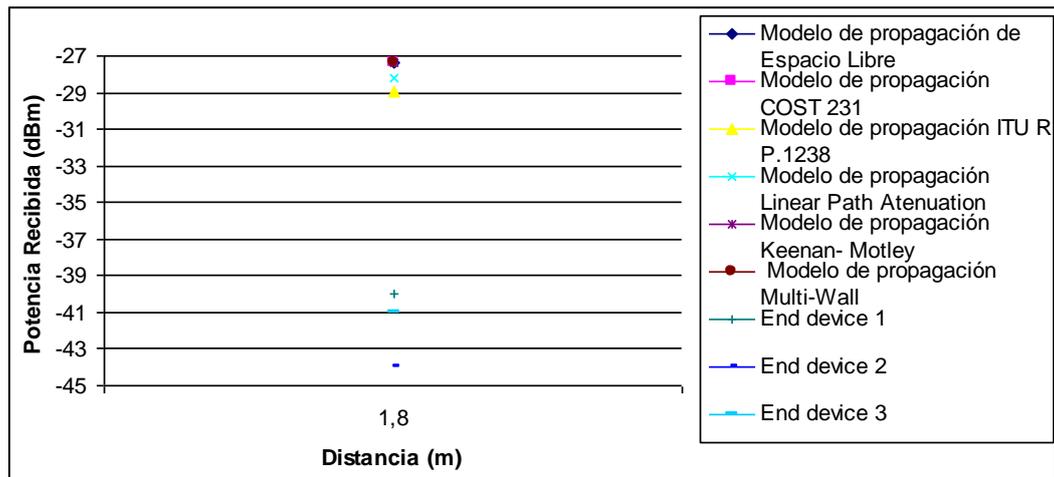


Ilustración 51: Medidas realizadas con end devices a 1.8 m.

Como se puede observar en las dos figuras anteriores, los valores obtenidos por los 3 módulos no coinciden teniendo una variación de unos 3 dB de uno a otro. Además, si comparamos esos valores con los modelos empíricos, vemos que existe una gran diferencia entre los valores medidos frente a la estimación dada por estos.

A continuación se analizará el escenario 3, mostrado en la figura 52, donde las medidas se han realizado con el analizador RF Field Fox, sustituyendo los dispositivos finales.

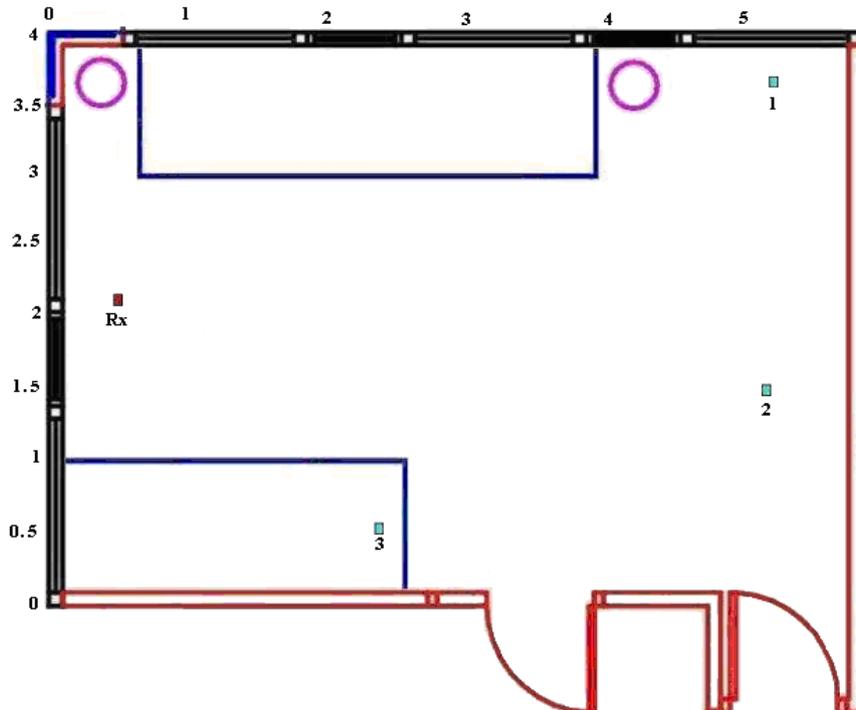


Figura 52: Escenario 3

Empleando los modelos de propagación empíricos se pueden ver los resultados obtenidos en la figura 53.

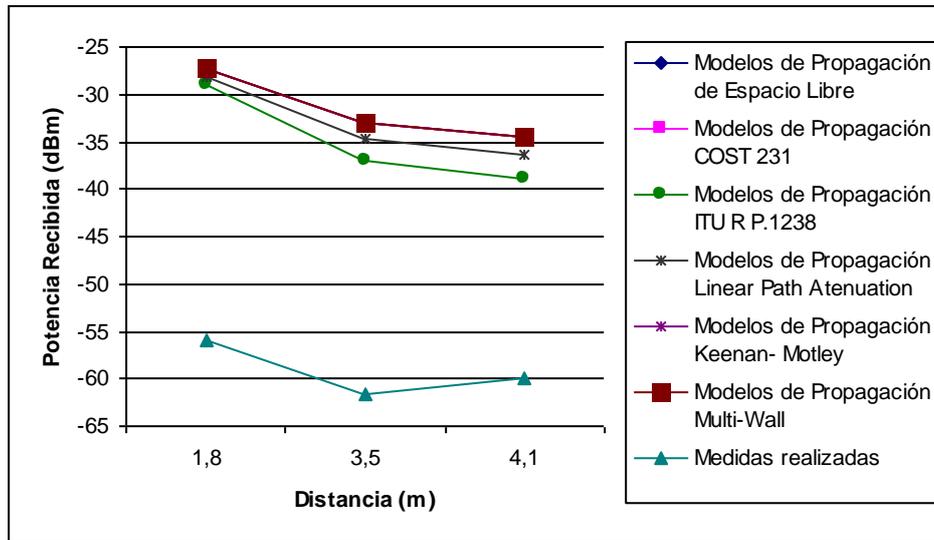


Figura 53: Comparación de modelos empíricos con medidas con el analizador RF

En la figura 54 se muestra el escenario 4, donde se puede observar la distribución de las medidas realizadas con el analizador RF Field Fox.

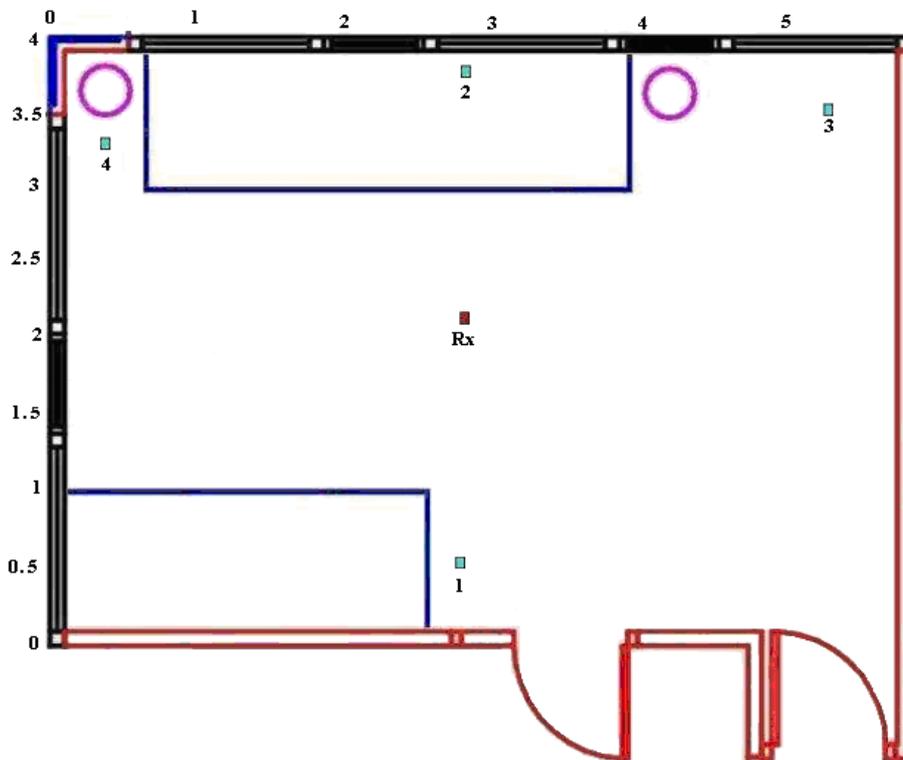


Figura 54: Escenario 4

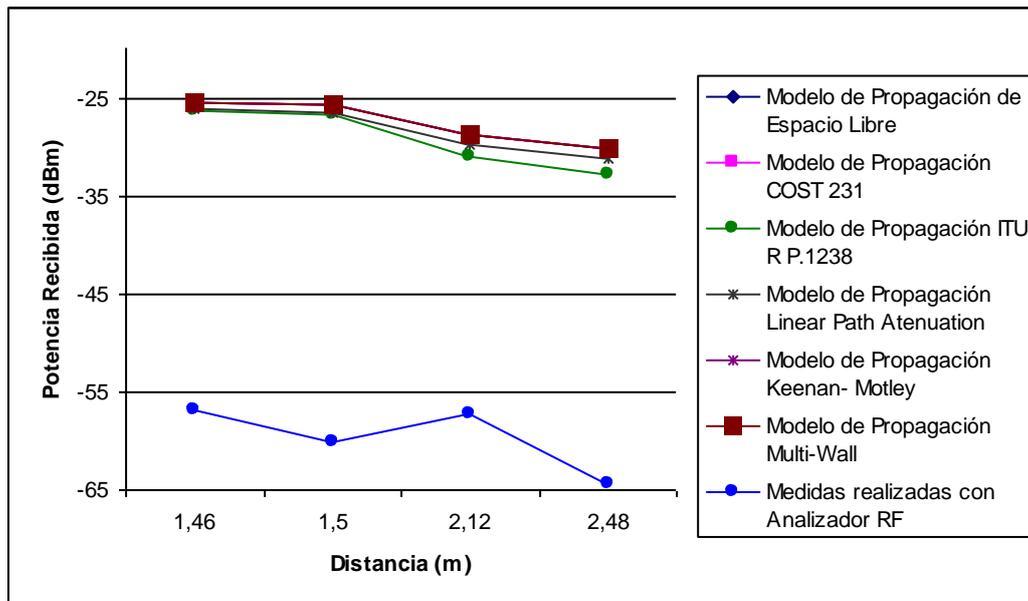


Figura 55: Comparación de modelos empíricos con medidas con el analizador RF

Para finalizar con las medidas, se analizará el escenario 5, mostrado en la figura 56. Al igual que las medidas realizadas en los escenarios 3 y 4, éstas, se han realizado con el analizador RF Field Fox.

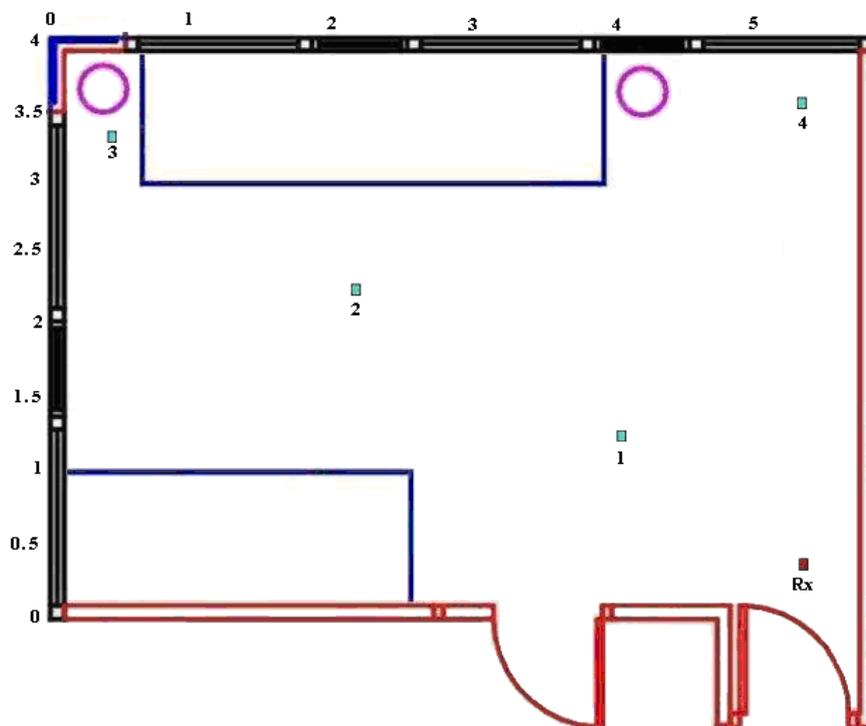


Figura 56: Escenario 5

A continuación se presenta los resultados obtenidos con los modelos de propagación empíricos y las medidas realizadas con el analizador RF

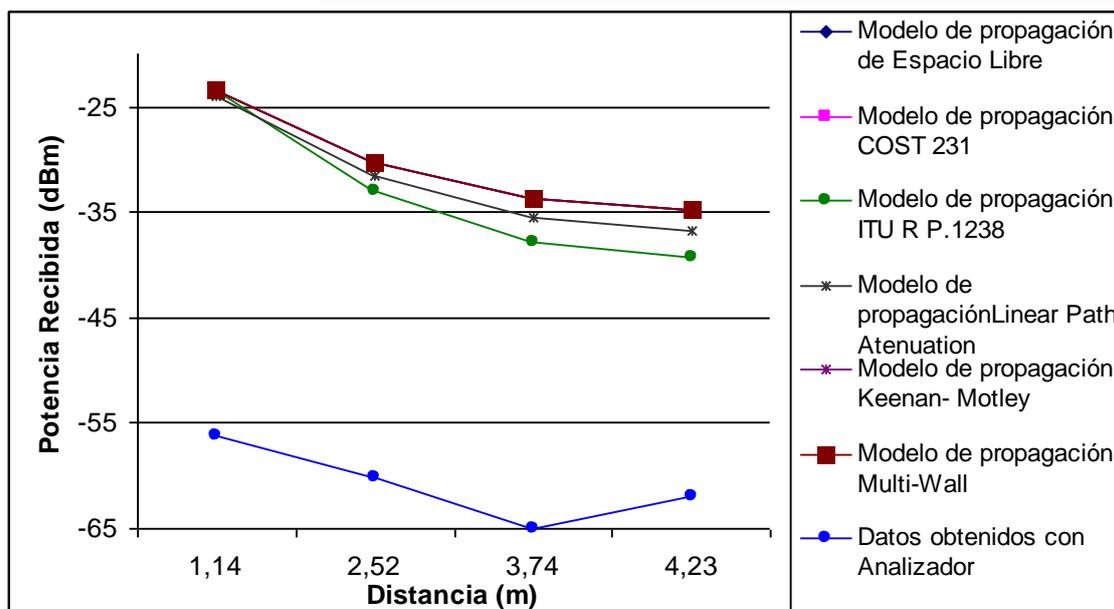


Figura 57: Comparación de modelos empíricos con medidas con el analizador RF

Al igual que ocurre en los escenarios 1 y 2 para las medidas realizadas con los dispositivos finales, las medidas realizadas con el analizador RF que se muestran en las figuras 53, 55 y 57 se alejan de los valores obtenidos con los modelos empíricos. Los distintos modelos empíricos muestran unos resultados muy parecidos pero que no se asemejan a las medidas realizadas en el local.

Como comente anteriormente, esto se produce porque los modelos empíricos utilizados no tienen en cuenta las componentes multirayecto, los elementos difractivos, scattering difuso, etc.

Finalmente se procederá a mostrar los resultados de las mediciones reales en las tablas 9 y 10:

Escenario	Grupo de sensores (Color)	Sensor 1 (dBm)	Sensor 2 (dBm)	Sensor 3 (dBm)
1	Azul	-39	-43	-41
1	Verde	-42	-46	-40
2	Azul	-39	-39	-42
2	Verde	-41	-44	-41

Tabla 9: Medidas reales con en devices

Escenario	Medida 1 (dBm)	Medida 2 (dBm)	Medida 3 (dBm)	Medida 4 (dBm)
3	-55,86	-61,7	-60	-
4	-56,86	-60,08	-57,23	-64,36
5	-56,18	-60,07	-64,99	-61,97

Tabla 10: Medidas reales con analizador RF

Se puede apreciar claramente, viendo las dos tablas anteriores, que los valores obtenidos en el local por el analizador RF son mucho menores que los valores captados por los dispositivos finales. La causa fundamental es la siguiente, la antena utilizada por el analizador RF dispone de mayor sensibilidad que la utilizada por la antena chip que disponen los módulos ZigBee. Además, esta antena estaba configurada con una atenuación de 5 dB.

Cabe resaltar la importancia que tienen las componentes multirayecto en las mediciones reales de los dispositivos ZigBee, lo que tiene como consecuencia una alta dependencia del nivel de recepción de los sensores en función de la ubicación de los mismos en el escenario.

5. CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS

5.1 CONCLUSIONES

ZigBee Alliance propone a Zigbee como el nuevo estándar global para la automatización del hogar, porque permite que las aplicaciones domóticas desarrolladas por los fabricantes sean completamente interoperables entre sí, garantizando así al cliente final fiabilidad, control, seguridad y comodidad.

Zigbee es una tecnología WPAN que tiene la habilidad de formar una red entre nodos permitiendo que el corto alcance entre nodos individuales sea expandido y multiplicado cubriendo un área mayor.

Zigbee a pesar de tener varios años de existencia y muchas ventajas en sus aplicaciones no es muy utilizado, debido a que no tiene compatibilidad con tecnologías actuales como Bluetooth o Wi-Fi.

Durante el desarrollo de esta investigación, hemos analizado la dependencia topológica de una red de sensores ZigBee en relación con el canal de radiopropagación para entornos interiores.

Debido a la característica de ultrabajo consumo y de bajo coste, por ejemplo, antenas chip de bajo perfil, los valores de potencia recibida presentan variaciones que requieren ser tenidas en cuenta de manera precisa. Para ello se han realizado tanto simulaciones sobre modelos empíricos como mediante trazado de rayos 3D, obteniendo en este último caso, información relevante ligada al valor de señal esperado.

Los modelos empíricos utilizados no se asemejan a las medidas realizadas en el local a diferencia del modelo de trazado de rayos. En éste, los valores obtenidos se aproximan bastante a los medidos en el local, aunque dispone de un cierto error, debido principalmente a las limitaciones del algoritmo, ya que no es capaz de implementar fenómenos importantes en la propagación indoor como son la difracción y el scattering. Gracias a la realización del trabajo hemos conseguido comprender aspectos técnicos que no sabíamos que existían de la tecnología inalámbrica Zigbee.

5.2 LÍNEAS FUTURAS

En el transcurso de la elaboración de este proyecto, se han podido localizar nuevas investigaciones relacionadas con este tema. Sería acertado proponer un seguido de líneas futuras que podrían seguirse una vez finalizado el proyecto.

- Realizar las pruebas prácticas presentadas en este proyecto, pero bajo la influencia de recintos que dispongan de otras características, por ejemplo, túneles, locales de uso sanitario, hoteles, estudios de grabación, fábricas, canalizaciones subterráneas, etc.
- Utilización de módulos de otros fabricantes para poder comparar resultados.
- Como la principal aplicación de ZigBee son los sistemas para redes domóticas, se podría diseñar una casa futurista automatizada, que disponga de seguridad, ventilación, control de iluminación y acceso, irrigación del jardín, control de consumo de energía, etc. Analizando posteriormente su comportamiento.
- Adaptación de los dispositivos utilizados al campo de la medicina.
- Realización de una comparativa más detallada entre el consumo u otras características de ZigBee con otros medios inalámbricos existentes como por ejemplo Bluetooth.
- Estudio de las interferencias entre ZigBee, Wi-Fi y Bluetooth.

6. REFERENCIAS

- [1] Gonzalo Campos Garrido, CARACTERIZACIÓN DEL CONSUMO EN REDES ZIGBEE/802.15.4, Universidad de Málaga, 2009
- [2] Espectro electromagnético
http://www.asifunciona.com/fisica/af_espectro/af_espectro_3.htm
- [3] Anexo I. Protocolo ZigBee (IEEE 802.15.4)
<http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/1109/1/InformeTecZB.pdf>
- [4] TI Low Power Wireless, *ZigBee Technical Overview*
<http://focus.ti.com/lit/ml/swrp086a/swrp086a.pdf>
- [5] Zigbee, Comunicación para Dispositivos
<http://www.sg.com.mx/content/view/392>
- [6] AMI-Inteligencia Ambiental, ZigBee
<http://ambientintelligence.wordpress.com/2008/05/15/zigbee-2008>
- [7] Gustavo Alexander Alvarez, El Standard ZigBee, Universidad Nacional de Trujillo
<http://www.scribd.com/doc/19049146/El-Standard-ZigBee>
- [8] IEEE Standard 802.15.4, Parte 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), 2006
- [9] Blog-electronica, Redes Zigbee
<http://www.blogelectronica.com/redes-zigbee-i-introduccion/>
- [10] El Zumbido de las Abejas, ZIGBEE
<http://www.osirizig.com/content.aspx?co=15&t=21&c=2>
- [11] Capitulo 4, El estándar IEEE 802.15.4
http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/archundia_p_fm/capitulo4.pdf
- [12] Zigbee: El nuevo estándar global para la domótica e inmótica
<http://www.monografias.com/trabajos61/zigbee-estandar-domotico-inmotica/zigbee-estandar-domotico-inmotica2.shtml>
- [13] ZigBee Alliance, ZigBee Specification
<http://www.zigbee.org>
- [14] El estandar ZigBee, Capitulo 3
<http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/206/4/Capitulo%203.pdf>
- [15] Propagación de las ondas de radio
<http://es.kioskea.net/contents/wireless/wlpropa.php3>

- [16] Movimiento ondulatorio, Interferencia de ondas-Principio de Superposición
http://www.didactika.com/fisica/ondas/ondas_interferencia.html
- [17] Jose María Hernando Rábanos, Transmisión por Radio, Editorial Centro de Estudios Ramón Areces S.A., Quinta Edición.
- [18] Modelo de Cobertura para Redes Inalámbricas de Interiores, Capítulo 6, Radiopropagación Indoor
- [19] Fermin Esparza, Algoritmo de trazado de rayos en tres dimensiones para la caracterización de entornos interiores, PFC Universidad Pública de Navarra, 2010.
- [20] S. Y. Seidel, T. S. Rappaport, Site-specific propagation prediction for wireless in building personal communication system design, IEEE Trans. Veh. Technol., vol 43, pp. 879-891, Nov. 1994.
- [21] D. J. Cichon, W. Wiesbeck, Indoor and outdoor propagation modeling in pico cells, Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC'94, vol. 2, pp. 491-495, 1994
- [22] R. E. Collin, Foundations for Microwave Engineering, IEEE Press, 2001
- [23] Victor Torres, CARACTERIZACIÓN DEL CANAL DE PROPAGACIÓN PARA APLICACIONES EN REDES INALÁMBRICAS WPAN, TFM Universidad Pública de Navarra, 2010
- [24] XBee-PRO ZNet 2.5 RF Module:
<http://www.digi.com/products/wireless/zigbee-mesh/xbee-pro-series2-module.jsp>
- [25] Ficha técnica del analizador RF field fox N9912A
<http://www.home.agilent.com/agilent/techSupport.jsp?pid=1456189&pageMode=SP&lc=eng&cc=ES>

7. ANEXOS

ANEXO A: MODELO DE PROPAGACIÓN DE TIERRA PLANA

El modelo de propagación de tierra plana es aplicable a distancias cortas, hasta unos 20 Km., para las cuales puede despreciarse la curvatura terrestre y con terreno poco ondulado. En la figura 58 se ilustra el esquema de rayos propio de este modelo consistente en un rayo directo (RD) y un rayo reflejado (RR). Los parámetros del modelo, son: h_t , h_r , alturas de las antenas transmisora y receptora, respectivamente, d la distancia y ψ , ángulo de incidencia para el rayo reflejado, cuyo valor es aproximadamente

$$\psi = \text{tg}^{-1}((h_t + h_r)/d) \quad (17)$$

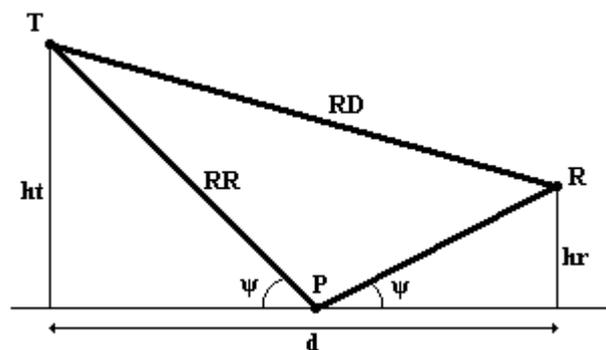


Figura 58: Modelo de propagación en tierra plana

El valor del campo recibido e , se obtiene como la suma vectorial del campo directo y el campo reflejado $e_0 \cdot R$, siendo R el coeficiente de reflexión para una onda plana, que es función de su frecuencia y polarización así como el ángulo de incidencia y tipo de terreno. Se define el plano de incidencia como el que contiene al rayo incidente y al vector normal a la superficie de reflexión.

Una onda con polarización vertical tiene sus vectores campo incidente y reflejado en el plano de incidencia. Si la polarización es horizontal, esos vectores son perpendiculares al plano de incidencia.

1. Difracción en obstáculos

La difracción es el fenómeno que ocurre cuando una onda electromagnética incide sobre un obstáculo. La existencia de obstáculos puede impedir la visibilidad entre la antena transmisora y receptora. La zona oculta a la antena transmisora se denomina zona de difracción. En esta zona los campos no son nulos debido a la difracción causada por el obstáculo y por tanto es posible la recepción.

La difracción ocurre en todo tipo de ondas, desde ondas sonoras, ondas en la superficie de un fluido y ondas electromagnéticas como la luz y las ondas de radio (ZigBee).

Se produce cuando la longitud de onda es mayor que las dimensiones del objeto, por tanto, los efectos de la difracción disminuyen hasta hacerse indetectables a medida que el tamaño del objeto aumenta comparado con la longitud de onda.

Para la valoración de las pérdidas por difracción en obstáculos, se idealiza la forma de éstos, asimilándolos a una arista de espesor despreciable (arista aguda o “filo de cuchillo”) o a una arista gruesa redondeada, con un cierto radio de curvatura en la cima.

1.1 Obstáculo aislado

El modelo de obstáculo aislado resulta aplicable a los trayectos que salvo esta obstrucción, son de visibilidad directa. Sea h el despejamiento. Hay pérdidas por difracción aunque el rayo pase por encima del obstáculo si $-0.6 R_1 < h < 0$ (despejamiento insuficiente) y, obviamente, para $h > 0$.

El cálculo de la pérdida se realiza siguiendo la metodología de la Recomendación UIT-R 526 que distingue dos casos de obstáculo aislado: obstáculo agudo y obstáculo redondeado.

1.1.1 obstáculo agudo

En la figura 59 se ilustran los parámetros básicos para el estudio del obstáculo agudo, que son: despejamiento h , distancia d_1 , d_2 a los extremos del enlace o, alternativamente, ángulo de difracción θ .

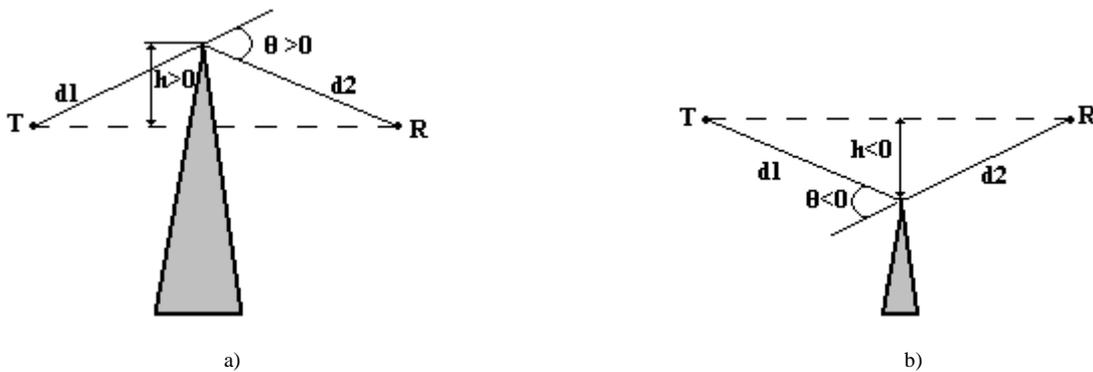


Figura 59: Difracción con obstáculo agudo con $h < 0$ y $h > 0$

La citada Rec. 526, proporciona valores de la atenuación en función del parámetro adimensional v definido como sigue:

$$v = h \left[\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right) \right]^{1/2} = \theta \left[\frac{2d_1 d_2}{\lambda(d_1 + d_2)} \right]^{1/2} \quad (18)$$

Expresando v en unidades usuales, resulta:

$$v = 2.58 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{fd}{d_1 d_2}} h \quad (19)$$

v tiene el mismo signo que h y estando h en m, d , d_1 , d_2 en Km. y f en MHz.

El estudio del obstáculo agudo o filo de cuchillo puede hacerse mediante tres casos, el primero donde el obstáculo está por encima de la línea de vista o rayo directo, lo indica la imagen a de la figura superior, la cual nos da parámetros positivos, es decir, despejamiento $h > 0$ y ángulo de difracción $\theta > 0$, haciendo que las pérdidas generadas por difracción sean superiores a 6dB.

El segundo caso, se produce cuando el obstáculo está justo a la altura del rayo directo, con lo cual se obtiene una $h=0$ y un $\theta = 0$, obteniendo una pérdidas de 6dB.

El tercer caso puede observarse en la imagen b de la figura 48, donde el obstáculo está por debajo de la línea de vista o rayo directo, la cual nos da parámetros negativos, es decir despejamiento $h < 0$ y ángulo de difracción $\theta < 0$ con unas pérdidas que se reducen a prácticamente 0 dB.

La atenuación por difracción en función de v es:

$$L_D = -10 * \log_{10} \left(0,5 * C(v) + 0,5 - S(v) \right) dB \quad (20)$$

Siendo $C(v)$ y $S(v)$ las integrales de Fresnel de argumento v :

$$C(v) = \int_0^v \cos\left(\frac{\pi t^2}{2}\right) dt \quad (21)$$

$$S(v) = \int_0^v \text{sen}\left(\frac{\pi t^2}{2}\right) dt \quad (22)$$

Para las aplicaciones usuales a la radiocomunicación, se puede aproximar $L_D(v)$ por la siguiente expresión numérica:

$$L_D(v) = 6,9 + 20 * \log_{10} \left(\sqrt{|v - 0,1|} + 1 + v - 0,1 \right) dB \quad (23)$$

1.1.2 obstáculo redondeado

En la figura 60 se representa la geometría del obstáculo redondeado.

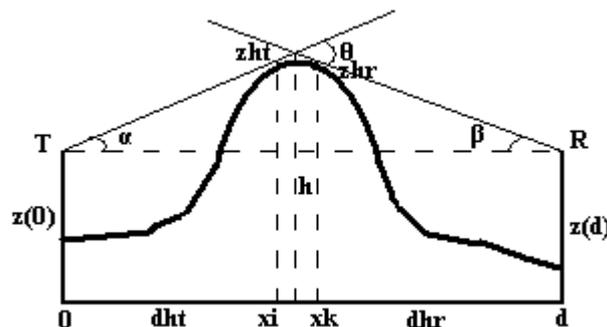


Figura 60: Difracción con obstáculo

Los parámetros geométricos que intervienen en el cálculo de la difracción en este caso, son los siguientes:

- 1) Longitud de enlace, d .
- 2) Distancias del transmisor y receptor a sus horizontes respectivos: d_{ht} y d_{hr} , en Km.
- 3) Alturas de los puntos de horizonte z_{ht} y z_{hr} , en metros.
- 4) Ángulo de difracción: θ en mrad.

5) Radio de curvatura del obstáculo: r, en Km.

6) Altura h el punto P de intersección de las visuales trazadas desde T y R a sus respectivos horizontes, con respecto a la línea T-R.

Para la aplicación de las fórmulas de difracción sobre obstáculo redondeado hay que evaluar r y h. Suponemos conocidas las alturas de las antenas transmisora y receptora sobre el nivel del mar, z (0) y z (d). Sea, además R=K*R₀ (k, factor de corrección del radio terrestre R₀).

El radio de curvatura del obstáculo se estima mediante la expresión:

$$r(Km) = \frac{d - d_{ht} - d_{hr} * 10^{-3}}{\theta} \quad (24)$$

Donde

$$\theta(mrad) = \frac{z_{ht} - z_{\text{obst}}}{d_{ht}} - \frac{z_{hr} - z_{\text{obst}}}{d_{hr}} \quad (25)$$

La altura h (m) se calcula como sigue:

$$h = x_p \left(\frac{z_{ht} - z_{hr}}{d_{ht}} - \frac{z_{\text{obst}} - z_{\text{obst}}}{d} \right) \quad (26)$$

donde x_p es la abcisa del punto P, dada por:

$$x_p = \frac{d\beta}{\theta} \quad (27)$$

Y el ángulo β (mrad) es:

$$\beta(mrad) = \left(\frac{z_{\text{obst}} - z_{\text{obst}}}{d} - \frac{z_{\text{obst}} - z_{hr}}{d_{hr}} \right) \quad (28)$$

Los parámetros radioeléctricos para el cálculo de la difracción son:

$$m = 0,45708 \left(\frac{d_{ht} - d_{hr}}{d_{ht} d_{hr}} \right) r^{2/3} f^{-1/3} \quad (29)$$

$$n = 4,787 \cdot 10^{-3} h * r^{-1/3} * f^{2/3}$$

Donde las distancias y el radio r están en Km., la altura h en m y la frecuencia f en MHz.

La atenuación por difracción viene dada por el obstáculo redondeado viene dado por:

$$A = L(v) + T(m, n) \quad (30)$$

1.2 Dos obstáculos aislados

En la figura 61 se representa la geometría general del modelo, con la siguiente notación: z₀=z (0): Altura absoluta de la antena transmisora

- $z_1=z(x_1)$: Altura del obstáculo O_1 .
 $z_2=z(x_2)$: Altura del obstáculo O_2 .
 $z_3=z(d)$: Altura absoluta de la antena receptora.
 x_1 : Distancia del transmisor al obstáculo O_1 .
 x_2 : Distancia del transmisor al obstáculo O_2 .

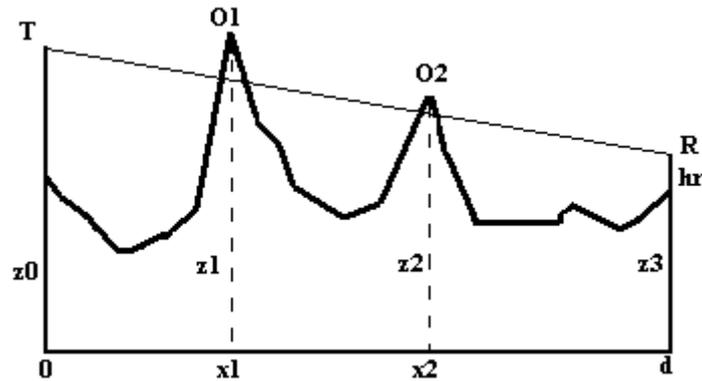


Figura 61: Difracción con dos obstáculos aislados

El cálculo de la atenuación para dos obstáculos aislados se realiza mediante una integral doble de fresnel, expresable en forma de desarrollos en serie. En la práctica se utilizan métodos pseudo empíricos simples y con aproximación suficiente para las aplicaciones. De entre los diversos modelos existentes, disponemos de tres que proporcionan resultados más acordes a las mediciones. La elección los modelos se basa en la situación del rayo T-R respecto a los obstáculos. A continuación se indican los tres casos posibles:

- Método EMP: Se aplica este método cuando el rayo T-R no corta a ningún obstáculo, sino que existe despojamiento insuficiente en ambos. En este caso la atenuación por difracción es igual a la suma de las pérdidas producidas por cada obstáculo por separado.
- Método Wilkerson: Resulta aplicable cuando el rayo corta a un obstáculo y existe despejamiento insuficiente en el otro. Sea, por ejemplo, O_2 el obstáculo que intercepta el rayo. La atenuación por difracción es igual a la pérdida producida por O_2 en el vano completo T-R más la pérdida debida a O_1 , en el subvano TO_2 .
- Método Epstein-Peterson: Se utiliza este método cuando el rayo corta a los dos obstáculos. La atenuación por difracción es igual a la pérdida en el subvano TO_1O_2 , interceptado por O_1 con altura h_1 más la pérdida en el subvano con O_1O_2R , interceptado por O_2 con altura h_2 . Éste método resulta apropiado cuando las pérdidas de cada obstáculo son similares. Si un obstáculo es claramente dominante, es más conveniente utilizar el método de Wilkerson.

En la figura 62 se pueden observar los tres casos:

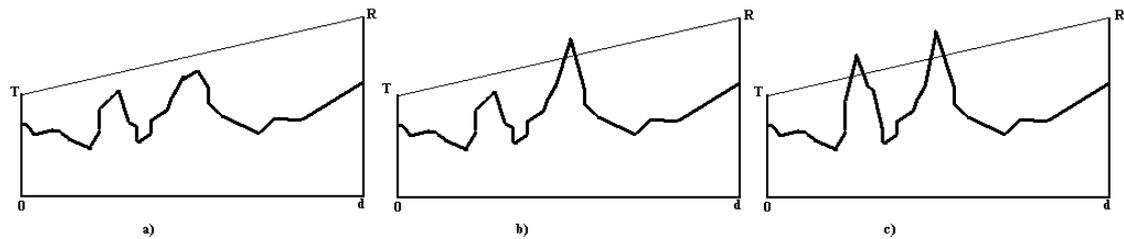


Figura 62: a) Método EMP b) Método Wilkerson c) Método Epstein-Peterson

1.3 Múltiples obstáculos

El método de tratamiento de múltiples obstáculos que propone la recomendación UIT-R 526, es una extensión del de Epstein-Peterson. En la figura inferior se representa la geometría genérica del modelo, cuyos elementos son:

h_i : Altura del obstáculo O_i respecto a la recta que une O_{i-1} con O_{i+1} .

x_i : Abcisa del obstáculo O_i .

$s_i = x_i - x_{i-1}$: Distancia entre los obstáculos O_i y O_{i-1} .

$s_1 = x_1$: Distancia del transmisor al primer obstáculo.

$s_{N+1} = d - x_N$: Distancia del último obstáculo al receptor.

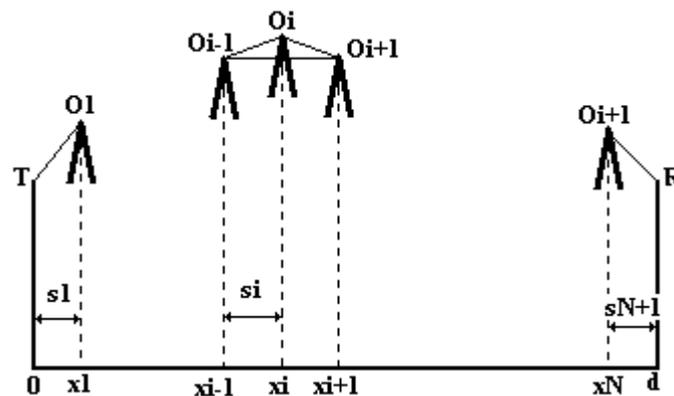


Figura 63: Múltiples Obstáculos

Para el cálculo de la atenuación, se determina el llamado polígono funicular, que es una línea quebrada cuyos vértices son T, R y los obstáculos dominantes.

Se llama así porque es la forma que adoptaría un hilo tenso tendido entre T y R a través del perfil. La atenuación por difracción viene dada por:

$$L_D = \sum_{i=1}^N L_D \langle v_i \rangle + \sum_{i=1}^i L_{sd} \langle v'_i \rangle \approx 10 \log C_N \quad (31)$$

Donde

$$v_i = 2,58 * 10^{-3} * h_i \sqrt{f \frac{s_i + s_{i+1}}{s_i s_{i-1}}} \quad (32)$$

$L_{sd}(v_i)$ es la pérdida debida a obstáculos que en el subvano $O_{i-1}O_iO_{i+1}$ queden por debajo de la línea $O_{i-1}O_{i+1}$ con despojamiento insuficiente. Solo se tendrá en cuenta un único obstáculo, el que tenga el parámetro 'v' menos significativo.

El factor de corrección C_N viene dado por:

$$C_n = \left[\frac{s_2 \dots s_N (s_1 + s_2 + \dots + s_{N+1})}{(s_1 + s_2) (s_2 + s_3) \dots (s_N + s_{N+1})} \right] \quad (33)$$

ANEXO B: FICHA TÉCNICA DEL MÓDULO XBEE-PRO ZNET

A critical component to Drop-in Networking, XBee and XBee-PRO ZB embedded RF modules deliver low-cost and low-power wireless end-point connectivity using the ZigBee PRO Feature Set.

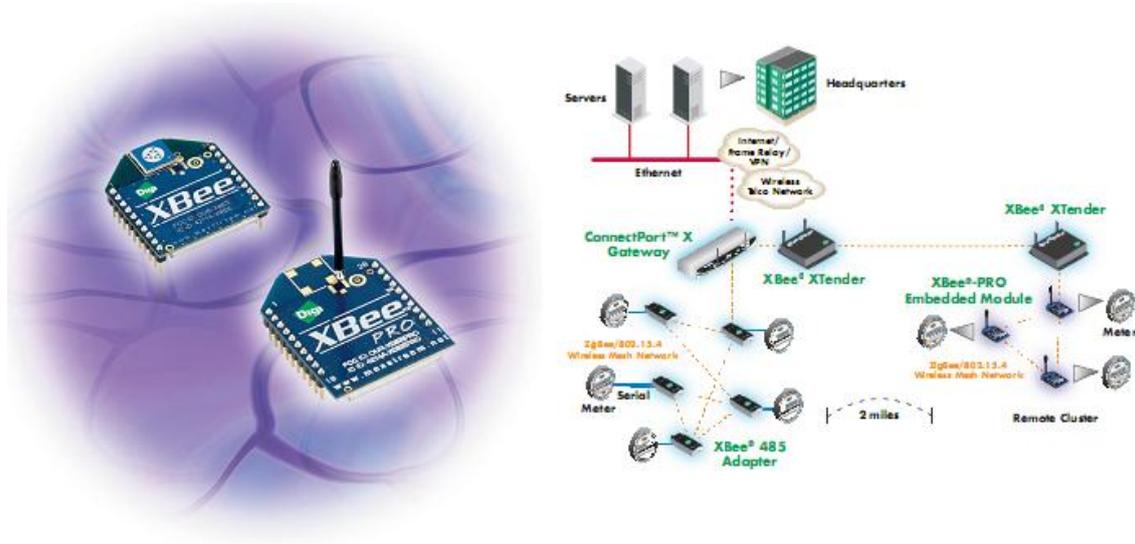


Figura 64: Módulos XBee

Overview

XBee and XBee-PRO ZB are the most advanced ZigBee modules available in the XBee footprints and are ideal for deployment in ZigBee networks. Available in the low-cost XBee or extended range XBee-PRO, and utilizing the ZigBee PRO Feature Set, these embedded RF modules are interoperable with ZigBee PRO Feature Set devices from other vendors. With advanced mesh networking functionality, XBee and XBee-PRO ZB modules improve data traffic management, allow for greater node density, and provide OEMs with the ability to change firmware remotely with over-the-air updates.

XBee Protocols

XBee embedded modules are available with different protocols to suit a variety of applications and networking topologies. Supported protocols include IEEE 802.15.4, the ZigBee PRO Feature Set, proprietary long range, and DigiMesh™. XBee embedded RF modules share a common hardware footprint and are modeled after a common software API. Once deployed into an application, OEMs can rapidly change from one protocol to another with minimal time and development risk.

Drop-in Networking Compatibility

XBee embedded RF modules are compatible with Digi's Drop-in Networking adapters, network extenders and gateways that use the same protocol. This allows OEMs to embed XBee Solutions into an application and have seamless communication to other devices using USB, RS-232, RS-485, digital I/O, analog I/O, Ethernet, Wi-Fi and even cellular connections with plug-and-play ease.

Platform	Xbee-PRO ZB	Xbee ZB
Performance		
RF Data Rate	250 Kbps	250 Kbps
Indoor/Urban Range	300 ft (90 m)	133 ft (40 m)
Outdoor/RF Line-of-Sight Range	1 mi (1.6 km)	400 ft (120 m)
Transmit Power	50 mW (+17 dBm) / Int'l 10 mW (+10 dBm)	1.25 mW (+1 dBm) / 2 mW (+3 dBm) boost mode
Receiver Sensitivity (1% PER)	-102 dBm	-96 dBm in boost mode
Features		
Serial Data Interface	3.3V CMOS UART	3.3V CMOS UART
Configuration Method	API or AT commands, local or over-the-air	API or AT commands, local or over-the-air
Frequency Band	2.4 GHz	2.4 GHz
Interference Immunity	DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)	DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)
Serial Data Rate	1200 bps - 1 Mbps	1200 bps - 1 Mbps
ADC Inputs	(4) 10-bit ADC inputs	(4) 10-bit ADC inputs
Digital I/O	10	10
Antenna Options	Chip, Wire Whip, U.FL, RPSMA	Chip, Wire Whip, U.FL, RPSMA
Networking & Security		
Encryption	128-bit AES	128-bit AES
Reliable Packet Delivery	Retries/Acknowledgments	Retries/Acknowledgments
IDs and Channels	PAN ID, 64-bit IEEE MAC, 13 channels	PAN ID, 64-bit IEEE MAC, 16 channels
Power Requirements		
Supply Voltage	3.0 - 3.4VDC	2.1 - 3.6VDC
Transmit Current	295 mA @ 3.3VDC	35 mA / 45 mA boost mode @ 3.3VDC
Receive Current	45 mA @ 3.3VDC	38 mA / 40 mA boost mode @ 3.3VDC
Power-Down Current	<10 uA @ 25° C	<1 uA @ 25° C
Regulatory Approvals		
FCC (USA)	Yes	Yes
IC (Canada)	Yes	Yes
ETSI (Europe)	Yes (int'l unit only)	Yes
C-TICK (Australia)	Pending	Yes
Telec (Japan)	Pending (int'l unit only)	Yes

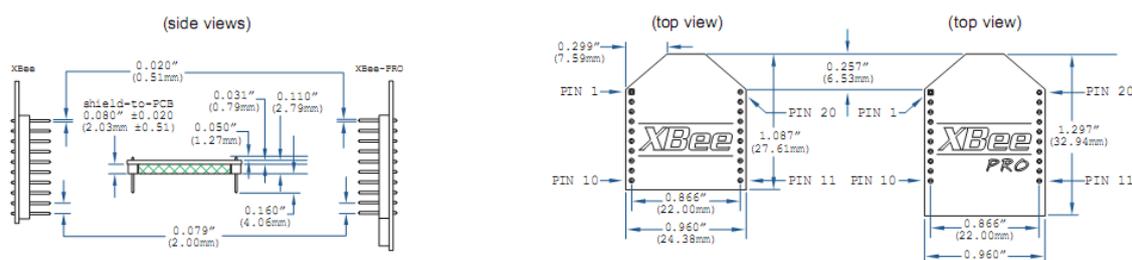


Figura 65: Distribución de PIN en módulo Xbee PRO y Xbee PRO

ANEXO C: FICHA TÉCNICA DEL ANALIZADOR RF FIELD FOX N9912A

With the proliferation of wireless communications, operating frequencies have soared from sub-GHz levels up to 5.8 GHz.

The Agilent FieldFox RF Analyzer is the tool to tackle today's increasingly complex networks in less time.

Key measurements

- Cable and antenna test (distance to fault, return loss, etc.)
- Cable loss measurement
- Insertion loss and transmission measurement
- Spectrum analyzer
- Power meter with USB power sensor
- Vector network analysis with Smith chart display



Figura 66: Vista frontal del analizador RF field fox N9912A



Figura 67: Vista superior e inferior del analizador RF field fox N9912A

Specifications

Warranted performance. Specifications include guardbands to account for the expected statistical performance distribution, measurement uncertainties, and changes in performance due to environmental conditions. The following conditions must be met:

- FieldFox has been turned on at least 90 minutes
- FieldFox is within its calibration cycle
- Storage or operation at 25 °C ±5 °C range (unless otherwise stated)

Typical

Expected performance of an average unit over a 20 °C to 30 °C temperature range, unless otherwise indicated; does not include guardbands. It is not covered by the product warranty. The FieldFox must be within its calibration cycle.

Nominal:

A general, descriptive term or design parameter. It is not tested, and not covered by the product warranty.

Cable and antenna analyzer

Frequency			
Frequency range	2 MHz to 4 GHz		
	2 MHz to 6 GHz		
Frequency reference	Accuracy ± 2 ppm		
	Aging rate ± 1 ppm/yr		
	Temperature stability ± 1 ppm over -10 to 55 °C		
Frequency resolution	2 MHz to 1.6 GHz 2.5 kHz		
	> 1.6 GHz to 3.2 GHz 5 kHz		
	> 3.2 GHz to 6 GHz 10 kHz		
Measurement speed	Return loss	1.5 ms/point (nominal)	1.75 GHz to 3.85 GHz, 1001 points, Cal ON
	Distance to fault	2.4 ms/point (nominal)	0 to 500 ft, 601 points, Cal ON
Data points	101, 201, 401, 601, 801, 1001		
Directivity	Corrected	> 42 dB	
	QuickCal	> 42 dB (typical)	
Source match	Corrected	> 36 dB	
	QuickCal	≥ 35 dB (typical)	
Reflection tracking	Corrected \pm	0.06 dB	
	QuickCal \pm	0.15 dB (typical)	

Dynamic range		
Reflection (RF Out port)	2 MHz to 4 GHz	60 dB (typical)
	> 4 GHz to 6 GHz	55 dB (typical)
Transmission measurement	2 MHz to 2 GHz	72 dB (typical)
	> 2 GHz to 4 GHz	67 dB (typical)
	> 3 GHz to 5 GHz	58 dB (typical)
	> 5 GHz to 6 GHz	49 dB (typical)
Output power range	High power	
	2 MHz to 4 GHz	< +8 dBm, +6 dBm (nominal)
	> 4 GHz to 6 GHz	< +7 dBm, +2 dBm (nominal)
	Low power	
	2 MHz to 4 GHz	< -23 dBm, -25 dBm (nominal)
	> 4 GHz to 6 GHz	< -24 dBm, -25 dBm (nominal)
Maximum input level (RF Out port)	+23 dBm	
Maximum input DC voltage (RF Out port)	± 50 VDC	

Cable and antenna measurements				
Return loss	Display range	0 to 100 dB		
	Resolution	0.01 dB		
VSWR	Display range	0 to 100		
	Resolution	0.01		
Distance to fault (DTF)	• Range	$= (\text{number of points} - 1) / (\text{span} * 2) \times V_f$ (velocity factor in cable) $\times c$ (light speed)		
	• Resolution	$= \text{range} / (\text{number of points} - 1)$		
	• Number of points	101, 201, 401, 601, 801, 1001,	reflection coefficient	
	• Distance to fault display	Return loss, VSWR		
Transmission measurement	Frequency range	2 MHz to 4 GHz (Option 104)		
		2 MHz to 6 GHz (Option 106)		
	Dynamic range	2 MHz to 2 GHz	72 dB (typical)	
		2 GHz to 3 GHz	67 dB (typical)	
		> 3 GHz to 5 GHz	58 dB (typical)	
		> 5 GHz to 6 GHz	49 dB (typical)	

Network analysis

Network análisis	
S11	Vector measurement, S11 magnitude and S11 phase. Specification is listed under Cable and antenna analyzer section (S11/Return loss).
S21	Scalar measurement, S21 magnitude. Specification is listed under transmission measurement. S21 requires Option 110 transmission measurement.
A	Reflected power
R	Source power
Display	Log, linear, phase, VSWR, Smith chart, polar, group delay
Calibration types	Mechanical cal, QuickCal, Normalization, Automatic cal update with frequency change or number of points change
IF bandwidth selections	300 Hz, 1 kHz, 3 kHz, 10 kHz and 30 kHz

Spectrum analyzer

Frequency			
Frequency range	Option 104	100 kHz to 4 GHz, usable to 5 kHz	
	Option 106	100 kHz to 6 GHz, usable to 5 kHz, tunable to 6.1 GHz	
Frequency reference	Accuracy	±2 ppm	
	Frequency aging	± 1 ppm/yr	
	Frequency reference Temperature stability	± 1 ppm over -10 to 55 °C	
Frequency readout accuracy	± (readout frequency x frequency reference accuracy + RBW centering + 0.5 x horizontal resolution)		
Frequency span	Range	0 Hz (zero span), 10 Hz to maximum frequency	
	Span accuracy	±(2 x RBW centering + horizontal resolution)	
	Span resolution	1 Hz	
Resolution bandwidth (RBW)	Range (-3 dB bandwidth)	Zero span	300 Hz to 1 MHz in 1-3-10 sequence; 2 MHz
		Non-zero span	10 Hz to 300 kHz in 1/1.5/2/3/5/7.5/10 sequence; 1 MHz, 2 MHz
	Accuracy	1 kHz to 1 MHz: ± 5% (nominal)	
		10 Hz to 100 KHz non-zero span: ± 1% (nominal)	
		2 MHz: ± 10% (nominal)	
		300 Hz zero span: ± 10% (nominal)	
Selectivity (-60 dB/ -3 dB)	4:1 (nominal)		
Video bandwidth (VBW)	Range	1 Hz to 2 MHz in 1/1.5/2/3/5/7.5/10 sequence	
Stability	Noise sidebands, CF = 1 GHz	10 kHz offset: -88 dBc/Hz (typical)	
		30 kHz offset: -89 dBc/Hz, (typical)	
		100 kHz offset: -95 dBc/Hz, (typical)	
		1 MHz offset: -115 dBc/Hz, (typical)	
Sweep acquisition, span > 0 Hz	Range	1 to 5000, number of data acquisitions per trace point; value is normalized to the minimum required to achieve amplitude accuracy with CW signals	
	Resolution	1	
	Readout	Measured value representing time required to tune receiver, acquire data, and process trace	
Trace updates	Span = 20 MHz, RBW = 3 kHz	1.5 updates/second	
	Span = 100 MHz, RBW auto coupled	7 updates/second	
	Span = 6 GHz, RBW auto coupled	1 update/second	
Trace points	101, 201, 401, 601, 801, 1001 points, default is 401		

Amplitude				
Measurement range	Displayed average noise level (DANL) to +20 dBm			
Input attenuator range	0 to 31 dB, 1 dB stops			
Maximum DC voltage at RF In port	±50 VDC			
Maximum input power at RF In port	+27 dBm (0.5 W)			
Displayed average noise level (DANL)	Preamplifier OFF	20 to 30 °C	10 MHz to 2.4 GHz	-130 dBm (typical)
			> 2.4 GHz to 5.0 GHz	-125 dBm (typical)
			> 5.0 GHz to 6.0 GHz	-119 dBm (typical)
	Preamplifier ON	20 to 30 °C	10 MHz to 2.4 GHz	-148 dBm (typical)
			> 2.4 GHz to 5.0 GHz	-145 dBm (typical)
			> 5.0 GHz to 6.0 GHz	-138 dBm (typical)
		-10 to 55 °C	10 MHz to 2.4 GHz	< -141 dBm
			> 2.4 GHz to 5 GHz	< -138 dBm
			> 5 GHz to 6 GHz	< -130 dBm
Total absolute amplitude accuracy	20 to 30 °C	2 MHz to 10 MHz	±1.8 dB ±0.60 dB (typical)	
		> 10 MHz to 3.0 GHz	±1.5 dB ±0.50 dB (typical)	
		> 3.0 GHz to 5.0 GHz	±1.9 dB ±0.60 dB (typical)	
		> 5.0 GHz to 6.0 GHz	±2.1 dB ±0.60 dB (typical)	
Second harmonic distortion (SHI)	2 MHz to 1.35 GHz		< -70 dBc, +40 dBm SHI (nominal)	
	1.35 GHz to 3.0 GHz		< -80 dBc, +50 dBm SHI (nominal)	
Residual responses	20 MHz to 3 GHz		-90 dBm (nominal)	
	> 3 GHz to 6 GHz		-85 dBm (nominal)	
Spurious responses	Input mixer level -30 dBm	RFsig = RFtune + 417 MHz -70 dBc (nominal)		
		RFsig = RFtune + 1.716 GHz -80 dBc (nominal)		
	Input mixer level -10 dBm, first IF image response	RFsig = RFtune - 2 x 0.8346 GHz, for RFtune 5.7 to 6.0 GHz		-50 dBc (nominal)
	Sidebands	-80 dBc (nominal)		
-60 dBc (nominal) when battery charging, 260 kHz Offset				
Reference level	Range	-170 dBm to +30 dBm		
	Resolution	0.1 dB		
	Accuracy	0 dB (no error)		
Traces	4 traces, data/max/average/min			
Trigger	External, video trigger, FFT gating with video (IF envelope) trigger			

Independent signal source						
Frequency range	2 MHz to 4 GHz (Option 230) or 2 MHz to 6 GHz (Option 231)					
Amplitude	High power	2 MHz to 4 GHz	< +8 dBm, +6 dBm (nominal) dBm (nominal)	Low power	2 MHz to 4 GHz	<-23 dBm, -25 dBm (nominal)
		>4 GHz to 6 GHz	<+7 dBm, +2 dBm (nominal)		>4 GHz to 6 GHz	< -24 dBm, -29 dBm (nominal)
	Attenuation		0 to 31 dB			
Functions		Continuous wave, stimulus / response				

Power meter measurement	
Frequency range	9 kHz to 24 GHz (sensor dependent)
USB power sensor	9 kHz to 24 GHz

General specifications			
Connector type	Type-N (female)		
Input impedance	50 ohm		
External reference	Input type	BNC female	
	Reference frequency	10 MHz	
	Required level	-5 dBm to 10 dBm	
Display	6.5" transfl ective, color VGA LED backlit 640 x 480 with anti-glare coating		
Speaker	Built-in speaker		
Headphone jack	Built-in headphone jack		
Connectivity	2 x USB 2.0; 1 x mini USB; 1 x LAN		
Internal storage	Minimum 16 MB, up to 1000 traces		
External storage	1 x mini SD slot and 2 x USB 2.0		
EMC	Complies with European EMC Directive 2004/108/EC (IEC/EN 61326-2-1), CISPR Pub 11 Group 1, Class A , AS/NZS CISPR 11, ICES/NMB-001		
ESD	IEC/EN 61000-4-2, functional up to 20 kV test		
Safety	Complies with European Low Voltage Directive 2006/95/EC: IEC/EN 61010-1 2nd Edition, Canada: CSA C22.2 No. 61010-1-04, USA: UL 61010-1 2nd Edition		
Environmental	Humidity	95% at 40 °C	
	Temperature	Operating	-10 °C to +55 °C
		Non-operating	-51 °C to 71 °C
Weight	6.2 lbs / 2.8 kg including battery		
Dimensions(H x W x D)	11.5" x 7.4" x 2.8" (292 x 188 x 72 mm)		
Power	Power supply	External DC input	15 to 19 VDC

		External AC power adapter	Input	100 to 250 VAC, 50 to 60 Hz; 1.25 to 0.56 A
			Output	15 VDC, 4 A
	Power consumption	12 W		
	Battery	6 cell Lithium Ion, 10.8 V, 4.6 A-h		
	Battery operating time	4 hours		

ANEXO D: VALORES OBTENIDOS CON LOS MODELOS EMPÍRICOS

1. Modelos empíricos grupo sensores azul en escenario 1

Frecuencia de Tx.	2450,00	MHz
Potencia de Tx.	18,00	dBm's
Altura de Antena Tx.	1,65	mts.
Altura de Antena Rx.	1,65	mts.

METROS	2,3	3,2	4
Modelo de Propagación de Espacio Libre	47,4579	50,3263	52,2645
Modelo de Propagación COST-231, interior = MultiParedes.	47,4579	50,3263	52,2645
Modelo de Propagación ITU-R P.1238	49,9117	53,9275	56,6410
Modelo de Propagación Linear Path Attenuation Model	48,5389	51,8303	54,1445
Modelo de Propagación Keenan-Motley	47,4579	50,3263	52,2645
Modelo de Propagación Multi-Wall	47,4579	50,3263	52,2645
Potencia Recibida	-29,4579	-32,3263	-34,2645
	-29,4579	-32,3263	-34,2645
	-31,9117	-35,9275	-38,6410
	-30,5389	-33,8303	-36,1445
	-29,4579	-32,3263	-34,2645
	-29,4579	-32,3263	-34,2645

PERDIDAS DE ESPACIO LIBRE REFERENCIA A 1MT.	40,22332169
--	--------------------

MEDIDAS			
Distancia (m)	2,3	3,2	4
Medidas realizadas	-39	-43	-41

2. Modelos empíricos grupo sensores verde en escenario 1

Frecuencia de Tx.	2450,00	MHz
Potencia de Tx.	18,00	dBm 's
Altura de Antena Tx.	1,65	mts.
Altura de Antena Rx.	1,65	mts.

METROS	2	2,1	2,3
Modelo de Propagación de Espacio Libre	46,2439	46,6677	47,4579
Modelo de Propagación COST-231, interior = MultiParedes.	46,2439	46,6677	47,4579
Modelo de Propagación ITU-R P.1238	48,2122	48,8055	49,9117
Modelo de Propagación Linear Path Atenuation Model	47,1839	47,6547	48,5389
Modelo de Propagación Keenan-Motley	46,2439	46,6677	47,4579
Modelo de Propagación Multi-Wall	46,2439	46,6677	47,4579
Potencia Recibida	-28,2439	-28,6677	-29,4579
	-28,2439	-28,6677	-29,4579
	-30,2122	-30,8055	-31,9117
	-29,1839	-29,6547	-30,5389
	-28,2439	-28,6677	-29,4579
	-28,2439	-28,6677	-29,4579

PERDIDAS DE ESPACIO LIBRE REFERENCIA A 1MT.	40,2233217
--	-------------------

MEDIDAS			
Distancia (m)	2	2,1	2,3
Medidas realizadas	-42	-46	-40

3. Modelos empíricos grupo sensores azul en escenario 2

Frecuencia de Tx.	2450,00	MHz
Potencia de Tx.	18,00	dBm's
Altura de Antena Tx.	1,65	Mts.
Altura de Antena Rx.	1,65	Mts.

METROS	1,7	2,8	3,2
Modelo de Propagación de Espacio Libre	44,8323	49,1665	50,3263
Modelo de Propagación COST-231, interior = MultiParedes.	44,8323	49,1665	50,3263
Modelo de Propagación ITU-R P.1238	46,2359	52,3037	53,9275
Modelo de Propagación Linear Path Atenuation Model	45,6313	50,4825	51,8303
Modelo de Propagación Keenan-Motley	44,8323	49,1665	50,3263
Modelo de Propagación Multi-Wall	44,8323	49,1665	50,3263
Potencia Recibida	-26,8323	-31,1665	-32,3263
	-26,8323	-31,1665	-32,3263
	-28,2359	-34,3037	-35,9275
	-27,6313	-32,4825	-33,8303
	-26,8323	-31,1665	-32,3263
	-26,8323	-31,1665	-32,3263

PERDIDAS DE ESPACIO LIBRE REFERENCIA A 1MT.	40,2233217
--	-------------------

MEDIDAS			
Distancia (m)	1,7	2,8	3,2
Medidas realizadas	-39	-39	-42

4. Modelos empíricos grupo sensores verde en escenario 2

Frecuencia de Tx.	2450,00	MHz
Potencia de Tx.	18,00	dBm/s
Altura de Antena Tx.	1,65	mts.
Altura de Antena Rx.	1,65	mts.

METROS	1,7	2,6	2,85
Modelo de Propagación de Espacio Libre	44,8323	48,5228	49,3202
Modelo de Propagación COST-231, interior = MultiParedes.	44,8323	48,5228	49,3202
Modelo de Propagación ITU-R P.1238	46,2359	51,4026	52,5190
Modelo de Propagación Linear Path Atenuation Model	45,6313	49,7448	50,6597
Modelo de Propagación Keenan-Motley	44,8323	48,5228	49,3202
Modelo de Propagación Multi-Wall	44,8323	48,5228	49,3202
Potencia Recibida	-26,8323	-30,5228	-31,3202
	-26,8323	-30,5228	-31,3202
	-28,2359	-33,4026	-34,5190
	-27,6313	-31,7448	-32,6597
	-26,8323	-30,5228	-31,3202
	-26,8323	-30,5228	-31,3202

PERDIDAS DE ESPACIO LIBRE REFERENCIA A 1MT.	40,22332169
--	--------------------

MEDIDAS			
Distancia (m)	1,7	2,6	2,85
Medidas realizadas	-41	-44	-41

5. Modelos empíricos y medidas realizadas con los end devices a 1.6 metros

Frecuencia de Tx.	2450,00	MHz
Potencia de Tx.	18,00	dBm's
Altura de Antena Tx.	1,65	mts.
Altura de Antena Rx.	1,65	mts.

METROS	1,6
Modelo de Propagación de Espacio Libre	44,3057
Modelo de Propagación COST-231, interior = MultParedes.	44,3057
Modelo de Propagación ITU-R P.1238	45,4987
Modelo de Propagación Linear Path Attenuation Model	45,0577
Modelo de Propagación Keenan-Motley	44,3057
Modelo de Propagación Multi-Wall	44,3057
	-26,3057
	-26,3057
Potencia Recibida	-27,4987
	-27,0577
	-26,3057
	-26,3057

PERDIDAS DE ESPACIO LIBRE REFERENCIA A 1MT.	40,2233217
--	-------------------

MEDIDAS End Devices	sensor 1	sensor 2	sensor 3
Distancia (m)	1,6	1,6	1,6
Medidas realizadas	-38	-42	39

6. Modelos empíricos y medidas realizadas con los end devices a 1.8 metros

Frecuencia de Tx.	2450,00	MHz
Potencia de Tx.	18,00	dBm s
Altura de Antena Tx.	1,65	mts.
Altura de Antena Rx.	1,65	mts.

METROS	1,8
Modelo de Propagación de Espacio Libre	45,3288
Modelo de Propagación COST-231, interior = MultiParedes.	45,3288
Modelo de Propagación ITU-R P.1238	46,9310
Modelo de Propagación Linear Path Atenuation Model	46,1748
Modelo de Propagación Keenan-Motley	45,3288
Modelo de Propagación Multi-Wall	45,3288
	-27,3288
	-27,3288
Potencia Recibida	-28,9310
	-28,1748
	-27,3288
	-27,3288

PERDIDAS DE ESPACIO LIBRE REFERENCIA A 1MT.	40,22332169
--	--------------------

MEDIDAS	sensor 1	sensor 2	sensor 3
Distancia (m)	1,81	1,81	1,81
Medidas realizadas	-40	-44	-41

7. Modelos empíricos y medidas realizadas con analizador RF en escenario 3

Frecuencia de Tx.	2450,00	MHz
Potencia de Tx.	18,00	dBm's
Altura de Antena Tx.	0,80	mts.
Altura de Antena Rx.	0,80	mts.

METROS	1,8	3,5	4,1
Modelo de Propagación de Espacio Libre	45,3288	51,1047	52,4790
Modelo de Propagación COST-231, interior = MultiParedes.	45,3288	51,1047	52,4790
Modelo de Propagación ITU-R P.1238	46,9310	55,0172	56,9413
Modelo de Propagación Linear Path Atenuation Model	46,1748	52,7497	54,4060
Modelo de Propagación Keenan-Motley	45,3288	51,1047	52,4790
Modelo de Propagación Multi-Wall	45,3288	51,1047	52,4790
Potencia Recibida	-27,3288	-33,1047	-34,4790
	-27,3288	-33,1047	-34,4790
	-28,9310	-37,0172	-38,9413
	-28,1748	-34,7497	-36,4060
	-27,3288	-33,1047	-34,4790
	-27,3288	-33,1047	-34,4790

PERDIDAS DE ESPACIO LIBRE REFERENCIA A 1MT.	40,2233
--	----------------

MEDIDAS FIELD FOX			
Distancia (m)	1,8	3,5	4,1
Medidas realizadas	-55,86	-61,7	-60

8. Modelos empíricos y medidas realizadas con analizador RF en escenario 4

Frecuencia de Tx.	2450,00	MHz
Potencia de Tx.	18,00	dBm's
Altura de Antena Tx.	0,80	mts.
Altura de Antena Rx.	0,80	mts.

METROS	1,46	1,5	2,12	2,48
Modelo de Propagación de Espacio Libre	43,5104	43,7451	46,7500	48,1124
Modelo de Propagación COST-231, interior = MultiParedes.	43,5104	43,7451	46,7500	48,1124
Modelo de Propagación ITU-R P.1238	44,3852	44,7139	48,9207	50,8280
Modelo de Propagación Linear Path Atenuation Model	44,1966	44,4501	47,7464	49,2780
Modelo de Propagación Keenan-Motley	43,5104	43,7451	46,7500	48,1124
Modelo de Propagación Multi-Wall	43,5104	43,7451	46,7500	48,1124
Potencia Recibida	-25,5104	-25,7451	-28,7500	-30,1124
	-25,5104	-25,7451	-28,7500	-30,1124
	-26,3852	-26,7139	-30,9207	-32,8280
	-26,1966	-26,4501	-29,7464	-31,2780
	-25,5104	-25,7451	-28,7500	-30,1124
	-25,5104	-25,7451	-28,7500	-30,1124

PERDIDAS DE ESPACIO LIBRE REFERENCIA A 1MT.	40,223322
--	------------------

MEDIDAS FIELD FOX				
Distancia (m)	1,46	1,5	2,12	2,48
Medidas realizadas	-56,86	-60,08	-57,23	-64,36

9. Modelos empíricos y medidas realizadas con analizador RF en escenario 5

Frecuencia de Tx.	2450,00	MHz
Potencia de Tx.	18,00	dBm's
Altura de Antena Tx.	0,80	mts.
Altura de Antena Rx.	0,80	mts.

METROS	1,14	2,52	3,74	4,23
Modelo de Propagación de Espacio Libre	41,3614	48,2513	51,6808	52,7501
Modelo de Propagación COST-231, interior = MultiParedes.	41,3614	48,2513	51,6808	52,7501
Modelo de Propagación ITU-R P.1238	41,3767	51,0225	55,8237	57,3209
Modelo de Propagación Linear Path Atenuation Model	41,8972	49,4357	53,4386	54,7382
Modelo de Propagación Keenan-Motley	41,3614	48,2513	51,6808	52,7501
Modelo de Propagación Multi-Wall	41,3614	48,2513	51,6808	52,7501
Potencia Recibida	-23,3614	-30,2513	-33,6808	-34,7501
	-23,3614	-30,2513	-33,6808	-34,7501
	-23,3767	-33,0225	-37,8237	-39,3209
	-23,8972	-31,4357	-35,4386	-36,7382
	-23,3614	-30,2513	-33,6808	-34,7501
	-23,3614	-30,2513	-33,6808	-34,7501

PERDIDAS DE ESPACIO LIBRE REFERENCIA A 1MT.	40,2233
--	----------------

MEDIDAS FIELD FOX				
Distancia (m)	1,14	2,52	3,74	4,23
Medidas realizadas	-56,18	-60,07	-64,99	-61,97

ANEXO E: PUBLICACIÓN EN LA XXV EDICIÓN DEL SIMPOSIUM URSI (BILBAO, 2010)

A continuación se adjunta el trabajo “ANÁLISIS DE TOPOLOGÍA DE SENSORES EN PRESTACIONES DE SISTEMAS ZIGBEE INTERIORES” publicado en la XXV edición.

ANÁLISIS DE TOPOLOGÍA DE SENSORES EN PRESTACIONES DE SISTEMAS ZIGBEE INTERIORES

Juan Antonio Nazabal⁽¹⁾, Ángel Armendáriz⁽¹⁾, Victor Torres⁽¹⁾, Jorge Becerra⁽¹⁾, Carlos Fernández⁽¹⁾, Francisco Falcone⁽¹⁾

juanantonio.nazabal@unavarra.es, angel4armendariz@hotmail.com,
victor_torres85@hotmail.com,

jab_t_23@hotmail.com, carlos.fernandez@unavarra.es, francisco.falcone@unavarra.es

(1) Dpto. de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Pública de Navarra, C.P. 31006 Pamplona

Fig. 2. Comparativa ZigBee

Abstract- In this work, the influence of the topological configuration of ZigBee network sensors is analyzed. In order to gain insight in the operation of the network, empirical as well as deterministic simulation results as well as measurements have been obtained. The results confirm the topological dependence and the gain in performing previous sensor network planning to optimize the behaviour of the overall system.

INTRODUCCIÓN

El empleo de tecnologías inalámbricas en el ámbito de redes de área personal es cada vez más relevante. En este sentido, juegan un papel fundamental tecnologías de redes de área personal WPAN, dentro de los estándares IEEE 802.15, con aplicaciones en sectores domésticos (domótica), sanitarios o logísticos entre otros.

ZigBee es un protocolo de comunicaciones inalámbrico de área personal (WPAN) que trabaja sobre el estándar IEEE 802.15.4 [1], que como se puede apreciar en la Fig. 1 proporciona buenas prestaciones en entornos de bajo SNR y cuyas prestaciones se enumeran en la figura 2:

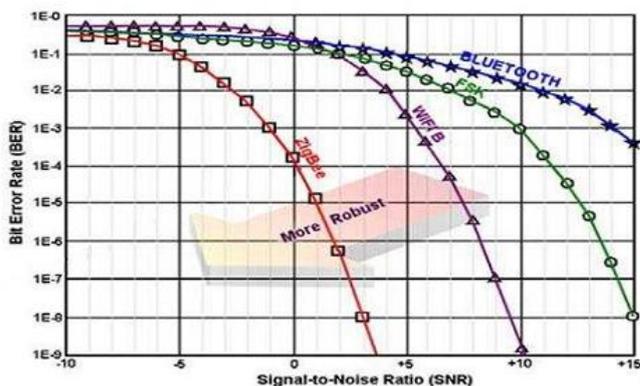


Fig. 1. Comparativa Estándar IEEE 802.15.4 en términos de BER y SNR10

Características	IEEE 802.11b	Bluetooth	ZigBee
Perfil de potencia	Horas	Días	Años
Complejidad	Muy complejo	Complejo	Simple
Nodos	32	7	64000
Latencia	Enumeración mas de 3 segundos	Enumeración mas de 10 segundos	Enumeración 30 ms
Rango	100 m	10 m	70 m – 300 m
Extensibilidad	Roaming posible	No	Si
Tasa de datos	11 Mbps	1 Mbps	250 Kbps
Seguridad	Authentication Service Set ID (SSID)	64 bits, 128 bits	128 bit AES y capa de aplicación definida por el usuario

El estándar IEEE 802.15.4 contempla su operación en diferentes bandas de frecuencia con distintas características de canal radio, tal y como se describe en la Fig. 3.

Frecuencia	Banda	Cobertura	Datos	# de canales	Sensibilidad Rx	Modulación
2.4 GHz	IMS	Mundial	250 Kbps	16	-85 dBm	O-QPSK
868 MHz		Europa	20 Kbps	1	-92 dBm	BPSK
915 MHz	IMS	America	40 Kbps	10	-92 dBm	BPSK

Fig. 3. Características radio Estándar IEEE 802.15.4

La principal aplicación de ZigBee son los sistemas para redes domésticas, pues ha sido diseñado para cubrir las necesidades del mercado en este campo. No obstante, ZigBee

tiene amplias capacidades de desarrollo que le permite ser utilizado en múltiples aplicaciones en otros entornos.

Existen distintos tipos de módulos ZigBee según el papel que desempeñan en la red:

- Coordinador ZigBee (ZC): Dispositivo más completo capaz de actuar como director de una red así como servir de enlace a otras redes. Existe un coordinador por red. Esta capacitado para almacenar información sobre la red.

- Router ZigBee (ZR): Amplía la cobertura de red de área. Proporciona una copia de seguridad de las rutas en caso de congestión o fallo del coordinador.

- Dispositivo final (ZED): Posee la funcionalidad necesaria para comunicarse con su nodo padre (el coordinador o un router), pero no puede transmitir información destinada a otros dispositivos.

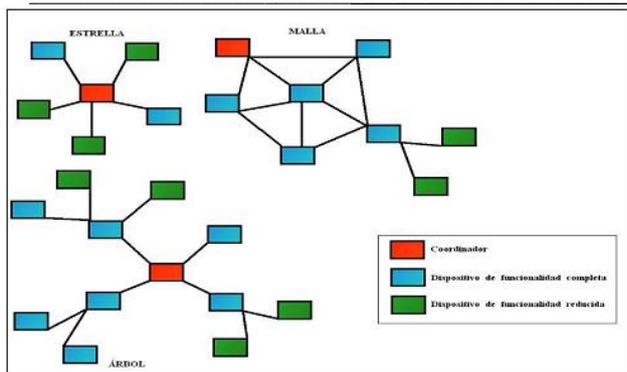


Fig. 4. Topología de redes ZigBee

Las ZigBee puede trabajar con tres tipos de topologías: estrella, árbol, y malla, las cuales se pueden observar en la Fig. 4. En ellas, siempre hay un nodo de red que asume el papel de coordinador central encargado de centralizar la adquisición y las rutas de comunicación entre dispositivos.

En este trabajo, se va a analizar la dependencia topológica de las configuraciones de sensores ZigBee en relación con el entorno de radiopropagación para casuística de entornos interiores domésticos. Dicho resultado permite una adecuada planificación de la ubicación de dicha sensorica con el fin de optimizar tanto el nivel de interferencia como el consumo de los sensores.

ANÁLISIS DE SENSORES ZIGBEE

El escenario escogido para la realización de este trabajo es un laboratorio del edificio de I+D de la Universidad Pública de Navarra. Como se puede apreciar en la Fig. 5, dos de sus paredes son de hormigón y dan al exterior mientras que el resto son de aglomerado y dan al interior del edificio.



Fig. 5. Local de medidas

La banda de frecuencias estudiada en este trabajo será la ISM 2.4 GHz. Para la simulación del escenario se han utilizado dos tipos de técnicas, una basada en modelos empíricos, así como técnica determinista (trazado de rayos 3D). La simulación en base a modelos de propagación empíricos tiene en cuenta principalmente la distancia entre el emisor y el receptor, características de las antenas y

parámetros empíricos propios. Ciertos modelos, además, tienen en cuenta aspectos morfología del entorno (i.e. paredes atravesadas, suelo, techo, etc.). Los modelos utilizados en la simulación son COST 231, ITU R P. 1238 y Multi - Wall, [2].

Con el fin de aumentar la precisión en la simulación se ha utilizado un programa basado en trazado de rayos en 3D implementado específicamente para el cálculo de radiopropagación en entornos interiores [3]. Se ha implementado un algoritmo en Matlab basado en Ray Launching, considerando las propiedades de los materiales del entorno, así como efectos difractivos de primer orden. En la Figura 6 se muestra el entorno de trabajo considerado por el algoritmo.

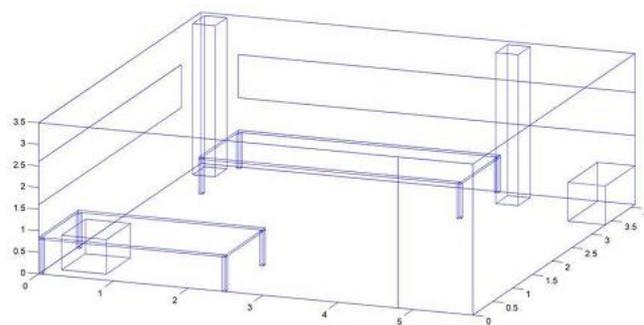


Fig. 6. Modelo de trazado de rayos del local de medidas

Para realizar las medidas reales se ha utilizado una red ZigBee compuesta por un coordinador de red que recibirá un paquete de datos por segundo de tres dispositivos finales.

Para ello se han montado los componentes sobre placas de montaje, como se puede apreciar en la Fig. 7.

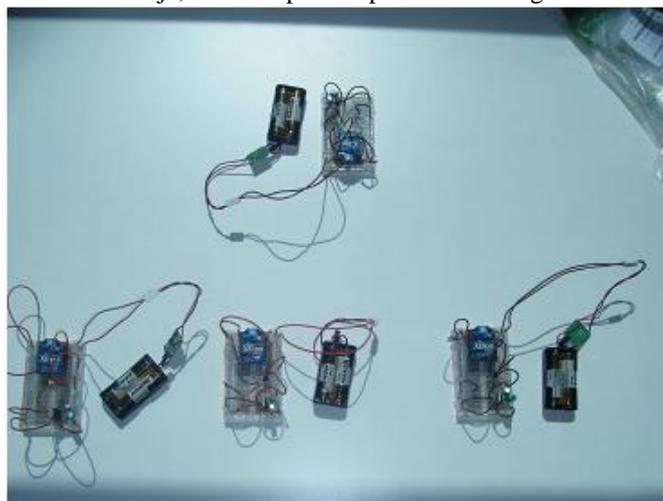


Fig. 7. Coordinador (Parte superior) con 3 dispositivos finales

Los módulos utilizados en el montaje son del tipo XBee Pro de la marca Digi, en concreto los modelos con antena chip integrada. La potencia de transmisión es configurable con un valor máximo por defecto de 18 dBm. La antena chip integrada presenta una ganancia de -1.5 dBi.

Se presentan a continuación los resultados de simulación obtenidos empleando diversos modelos empíricos. Primero se procederá con el escenario 1, mostrado en la Fig. 8:

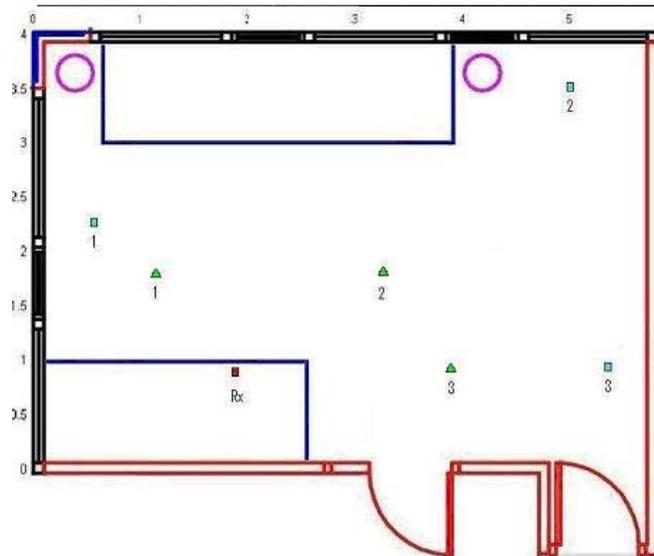


Fig. 8. Escenario 1

Dentro del escenario 1, primero se realizará la simulación del grupo de sensores representados por rectángulos azules y después aquellos con triángulos verdes.

Utilizando los modelos de propagación empíricos se pueden ver los resultados obtenidos en la Fig. 9.

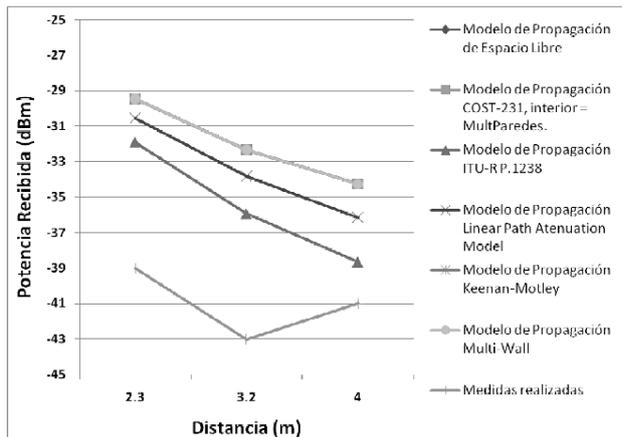


Fig. 9. Modelos empíricos grupo sensores azul

Se puede apreciar nuevamente como todos modelos de base empírica utilizados muestran unos resultados similares y se alejan de las medidas reales. Esto es debido a que no se tienen en cuenta factores como las componentes multitrayecto, los elementos difractivos, scattering difuso, etc.

Con el fin de poder caracterizar con mayor precisión el entorno de trabajo de las redes de sensores, se han realizado simulación de trazado de rayos 3D, implementado ad-hoc sobre Matlab. Se han introducido todos los datos del escenario (tanto topológicos como morfológicos) y los resultados para un plano de altura concreto (altura $h = 1\text{m}$) se muestran en la figura 10:

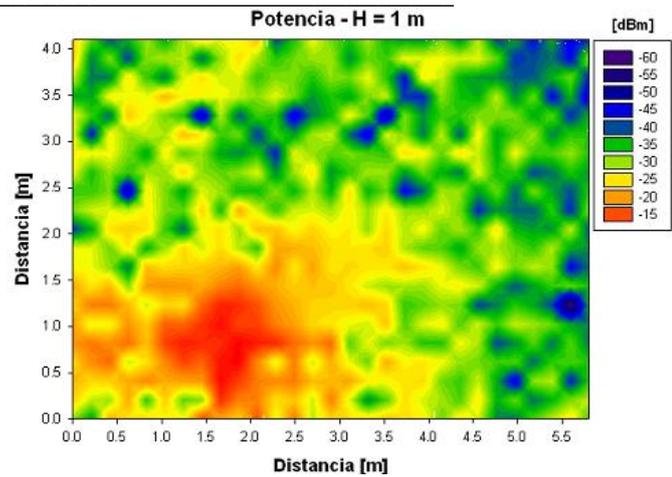


Fig. 10. Simulación de trazado de rayos, con altura $h = 1\text{ mts}$.

A continuación se analizará el escenario 2, mostrado en la Figura 11:

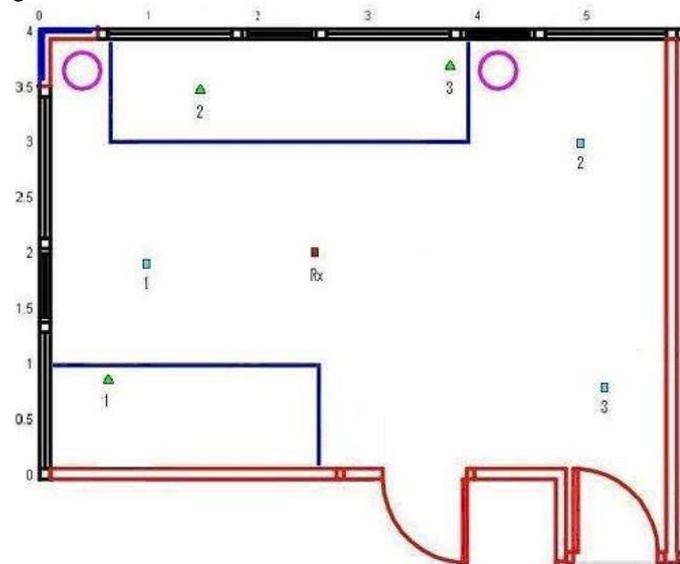


Fig. 11. Escenario 2

Utilizando los modelos de propagación empíricos se obtienen los resultados representados en las Fig. 12 y 13.

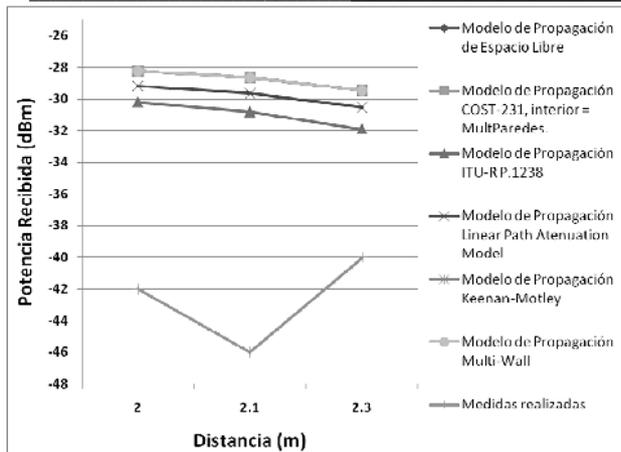


Fig. 12. Modelos empíricos grupo sensores azul

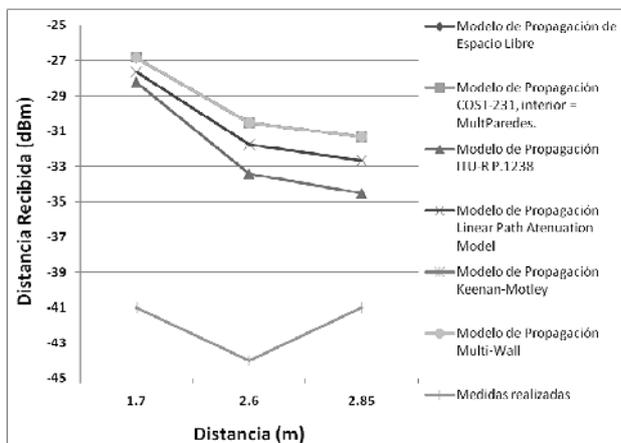


Fig. 13. Modelos empíricos grupo sensores verde

Se observa una discrepancia en los valores medidos frente a la estimación dada por los modelos, motivado por la baja resolución de los mismos para las cortas distancias de análisis empleadas.

Utilizando el trazado de rayos se obtiene la gráfica de la Fig. 13. Se puede apreciar que como en el caso del escenario 1, los valores obtenidos se ajustan bastante bien a las medidas reales.

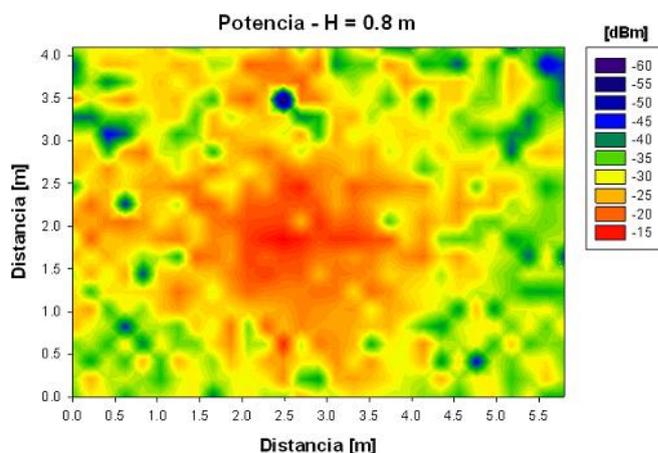


Fig. 14. Simulación de trazado de rayos

Finalmente se procederá a mostrar los resultados de las mediciones reales en la siguiente tabla:

Escenario	Grupo sensores (color)	RSSI Sensor 1 (dBm)	RSSI Sensor 2 (dBm)	RSSI Sensor 3 (dBm)
1	Azul	-39	-42	-41
1	Verde	-42	-39	-39
2	Azul	-41	-44	-41
2	Verde	-39	-39	-42

Fig. 15. Medidas reales

Cabe resaltar la importancia que tienen las componentes multitrayecto en las mediciones reales de los dispositivos ZigBee, lo que tiene como consecuencia una alta dependencia del nivel de recepción de los sensores en función de la ubicación de los mismos en el escenario.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha analizado la dependencia topológica de una red de sensores ZigBee en relación con el canal de radiopropagación para entornos interiores. Debido a la característica de funcionamiento de ultrabajo consumo y de elementos de bajo coste (e.g., antenas chip de bajo perfil), los valores de potencia recibida presentan variaciones que requieren ser tenidas en cuenta de manera precisa. Para ello se han realizado tanto simulaciones sobre modelos empíricos como mediante trazado de rayos 3D, obteniendo en este último caso información relevante ligada al valor de señal esperado. Esta información puede ser utilizada en la futura planificación en interiores de redes ZigBee de múltiples elementos, en el contexto del Hogar Inteligente..

REFERENCIAS

- [1] IEEE Standard 802.15.4, 2006
- [2] Jose María Hernando Rábanos, Transmisión por Radio, Quinta Edición.
- [3] S. Y. Seidel, T. S. Rappaport, "Site-specific propagation prediction for wireless in building personal communication system design", IEEE Trans. Veh. Technol., vol 43, pp. 879-891, Nov. 1994.

ANÁLISIS DE TOPOLOGÍA DE SENSORES EN PRESTACIONES DE SISTEMAS ZIGBEE INTERIORES

Juan Antonio Nazabal⁽¹⁾, Angel Armendáriz⁽¹⁾, Victor Torres⁽¹⁾, Jorge Becerra⁽¹⁾, Carlos Fernández⁽¹⁾, Francisco Falcone⁽¹⁾

juanantonio.nazabal@unavarra.es, angel4armendariz@hotmail.com, victor_torres85@hotmail.com, jab_t_23@hotmail.com, carlos.fernandez@unavarra.es, francisco.falcone@unavarra.es

(1) Dpto. de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Universidad Pública de Navarra, C.P. 31006 Pamplona

Abstract- In this work, the influence of the topological configuration of ZigBee network sensors is analyzed. In order to gain insight in the operation of the network, empirical as well as deterministic simulation results as well as measurements have been obtained. The results confirm the topological dependence and the gain in performing previous sensor network planning to optimize the behaviour of the overall system.

I. INTRODUCCIÓN

El empleo de tecnologías inalámbricas en el ámbito de redes de área personal es cada vez más relevante. En este sentido, juegan un papel fundamental tecnologías de redes de área personal WPAN, dentro de los estándares IEEE 802.15, con aplicaciones en sectores domésticos (domótica), sanitarios o logísticos entre otros.

ZigBee es un protocolo de comunicaciones inalámbrico de área personal (WPAN) que trabaja sobre el estándar IEEE 802.15.4 [1], que como se puede apreciar en la Fig. 1 proporciona buenas prestaciones en entornos de bajo SNR y cuyas prestaciones se enumeran en la figura 2:

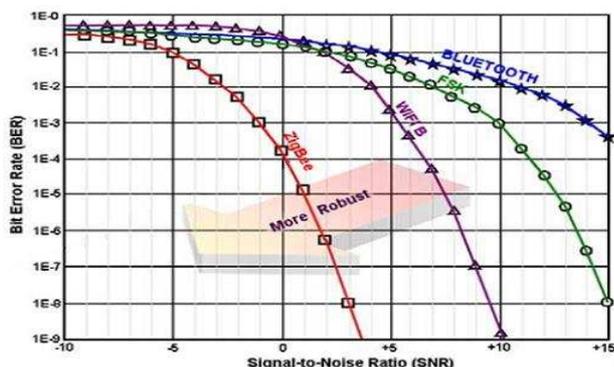


Fig. 1. Comparativa Estándar IEEE 802.15.4 en términos de BER y SNR

Características	IEEE 802.11b	Bluetooth	ZigBee
Perfil de potencia	Horas	Días	Años
Complejidad	Muy complejo	Complejo	Simple
Nodos	32	7	64000
Latencia	Enumeración mas de 3 segundos	Enumeración mas de 10 segundos	Enumeración 30 ms
Rango	100 m	10 m	70 m – 300 m
Extensibilidad	Roaming posible	No	Si
Tasa de datos	11 Mbps	1 Mbps	250 Kbps
Seguridad	Authentication Service Set ID (SSID)	64 bits, 128 bits	128 bit AES y capa de aplicación definida por el usuario

Fig. 2. Comparativa ZigBee

El estándar IEEE 802.15.4 contempla su operación en diferentes bandas de frecuencia con distintas características de canal radio, tal y como se describe en la Fig. 3.

Frecuencia	Banda	Cobertura	Datos	# de canales	Sensibilidad Rx	Modulación
2.4 GHz	IMS	Mundial	250 Kbps	16	-85 dBm	O-QPSK
868 MHz		Europa	20 Kbps	1	-92 dBm	BPSK
915 MHz	IMS	America	40 Kbps	10	-92 dBm	BPSK

Fig. 3. Características radio Estándar IEEE 802.15.4

La principal aplicación de ZigBee son los sistemas para redes domóticas, pues ha sido diseñado para cubrir las necesidades del mercado en este campo. No obstante, ZigBee tiene amplias capacidades de desarrollo que le permite ser utilizado en múltiples aplicaciones en otros entornos.

Existen distintos tipos de módulos ZigBee según el papel que desempeñan en la red:

- Coordinador ZigBee (ZC): Dispositivo más completo capaz de actuar como director de una red así como servir de enlace a otras redes. Existe un coordinador por red. Esta capacitado para almacenar información sobre la red.
- Router ZigBee (ZR): Amplía la cobertura de red de área. Proporciona una copia de seguridad de las rutas en caso de congestión o fallo del coordinador.
- Dispositivo final (ZED): Posee la funcionalidad necesaria para comunicarse con su nodo padre (el coordinador o un router), pero no puede transmitir información destinada a otros dispositivos.

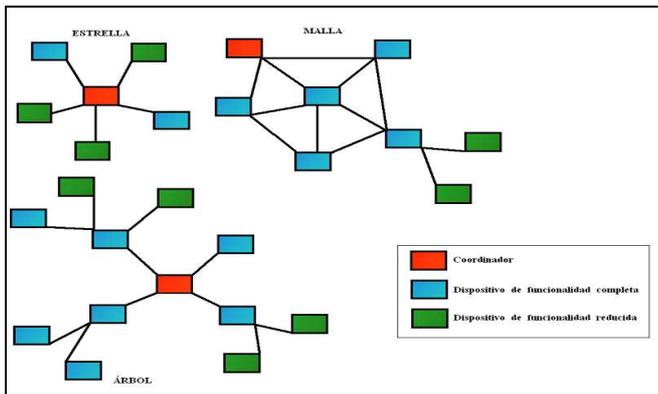


Fig. 4. Topología de redes ZigBee

ZigBee puede trabajar con tres tipos de topologías: estrella, árbol, y malla, las cuales se pueden observar en la Fig. 4. En ellas, siempre hay un nodo de red que asume el papel de coordinador central encargado de centralizar la adquisición y las rutas de comunicación entre dispositivos.

En este trabajo, se va a analizar la dependencia topológica de las configuraciones de sensores ZigBee en relación con el entorno de radiopropagación para casuística de entornos interiores domésticos. Dicho resultado permite una adecuada planificación de la ubicación de dicha sensorica con el fin de optimizar tanto el nivel de interferencia como el consumo de los sensores.

II. ANÁLISIS DE SENSORES ZIGBEE

El escenario escogido para la realización de este trabajo es un laboratorio del edificio de I+D de la Universidad Pública de Navarra. Como se puede apreciar en la Fig. 5, dos de sus paredes son de hormigón y dan al exterior mientras que el resto son de aglomerado y dan al interior del edificio.



Fig. 5. Local de medidas

La banda de frecuencias estudiada en este trabajo será la ISM 2.4 GHz. Para la simulación del escenario se han utilizado dos tipos de técnicas, una basada en modelos empíricos, así como técnica determinista (trazado de rayos 3D). La simulación en base a modelos de propagación empíricos tiene en cuenta principalmente la distancia entre el emisor y el receptor, características de las antenas y parámetros empíricos propios. Ciertos modelos, además, tienen en cuenta aspectos morfología del entorno (i.e. paredes

atravesadas, suelo, techo, etc.). Los modelos utilizados en la simulación son COST 231, ITU R P. 1238 y Multi – Wall, [2].

Con el fin de aumentar la precisión en la simulación se ha utilizado un programa basado en trazado de rayos en 3D implementado específicamente para el cálculo de radiopropagación en entornos interiores [3]. Se ha implementado un algoritmo en Matlab basado en Ray Launching, considerando las propiedades de los materiales del entorno, así como efectos difractivos de primer orden. En la Figura 6 se muestra el entorno de trabajo considerado por el algoritmo.

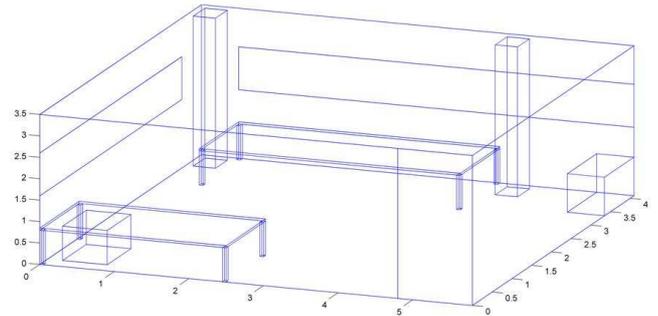


Fig. 6. Modelo de trazado de rayos del local de medidas

Para realizar las medidas reales se ha utilizado una red ZigBee compuesta por un coordinador de red que recibirá un paquete de datos por segundo de tres dispositivos finales. Para ello se han montado los componentes sobre placas de montaje, como se puede apreciar en la Fig. 7.

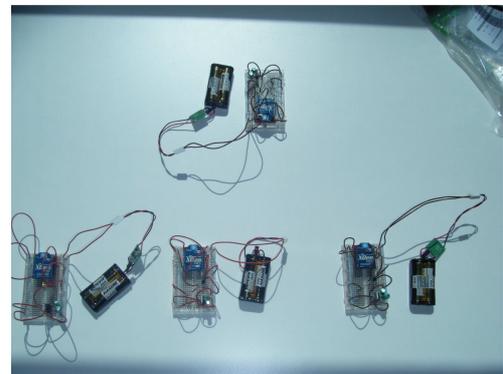


Fig. 7. Coordinador (Parte superior) con 3 dispositivos finales

Los módulos utilizados en el montaje son del tipo XBee Pro de la marca Digi, en concreto los modelos con antena chip integrada. La potencia de transmisión es configurable con un valor máximo por defecto de 18 dBm. La antena chip integrada presenta una ganancia de -1.5 dBi.

Se presentan a continuación los resultados de simulación obtenidos empleando diversos modelos empíricos. Primero se procederá con el escenario 1, mostrado en la Fig. 9:

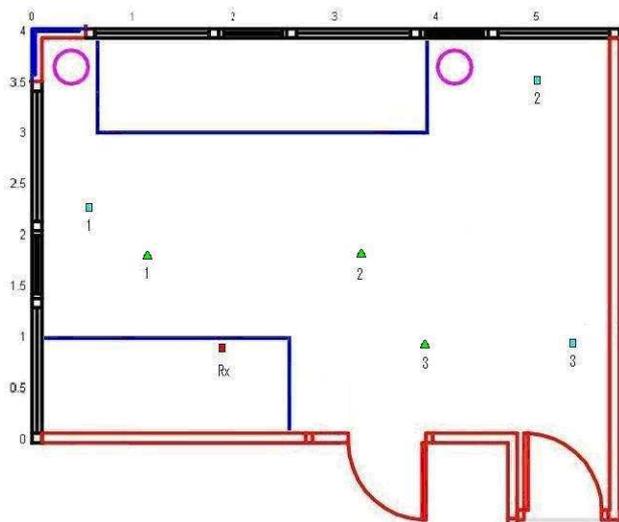


Fig. 8. Escenario 1

Dentro del escenario 1, primero se realizará la simulación del grupo de sensores representados por rectángulos azules y después aquellos con triángulos verdes.

Utilizando los modelos de propagación empíricos se pueden ver los resultados obtenidos en la Fig. 9.

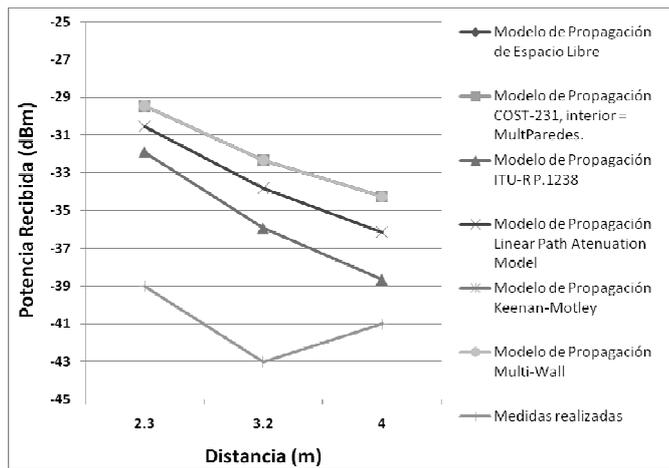


Fig. 9. Modelos empíricos grupo sensores azul

Se puede apreciar nuevamente como todos modelos de base empírica utilizados muestran unos resultados similares y se alejan de las medidas reales. Esto es debido a que no se tienen en cuenta factores como las componentes multirrayecto, los elementos difractivos, scattering difuso, etc.

Con el fin de poder caracterizar con mayor precisión el entorno de trabajo de las redes de sensores, se han realizado simulación de trazado de rayos 3D, implementado ad-hoc sobre Matlab. Se han introducido todos los datos del escenario (tanto topológicos como morfológicos) y los resultados para un plano de altura concreto (altura $h = 1$ m) se muestran en la figura 10:

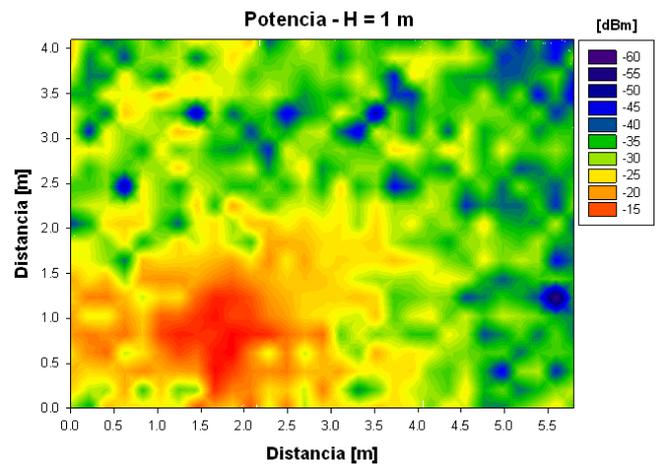


Fig. 10. Simulación de trazado de rayos, con altura $h = 1$ mts.

A continuación se analizará el escenario 2, mostrado en la Fig. 11:

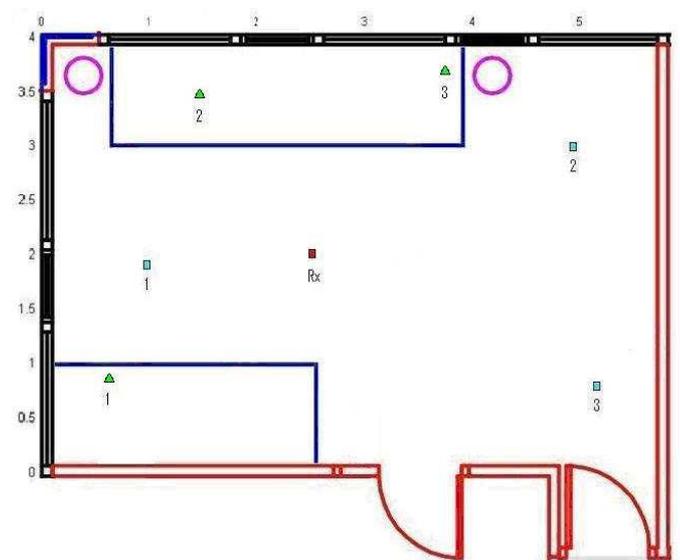


Fig. 11. Escenario 2

Utilizando los modelos de propagación empíricos se obtienen los resultados representados en las Fig. 12 y 13.

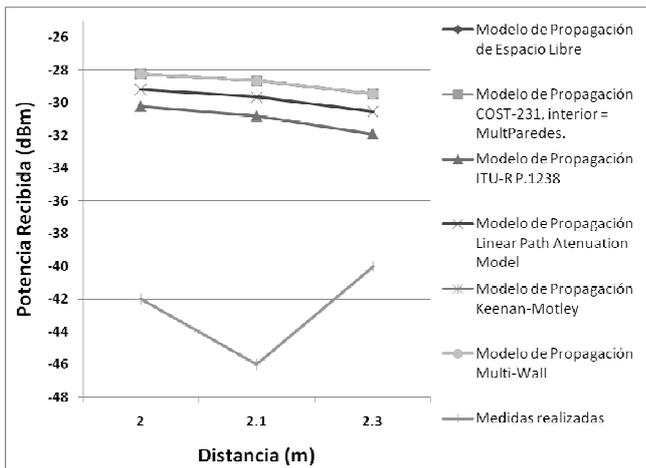


Fig. 12. Modelos empíricos grupo sensores azul

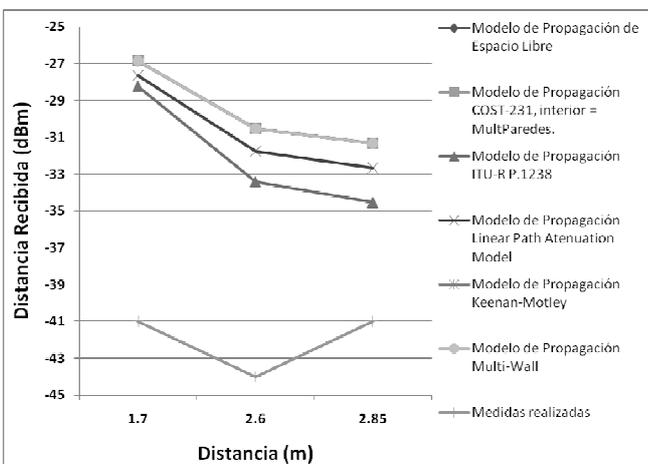


Fig. 13. Modelos empíricos grupo sensores verde

Se observa una discrepancia en los valores medidos frente a la estimación dada por los modelos, motivado por la baja resolución de los mismos para las cortas distancias de análisis empleadas.

Utilizando el trazado de rayos se obtiene la gráfica de la Fig. 13. Se puede apreciar que como en el caso del escenario 1, los valores obtenidos se ajustan bastante bien a las medidas reales.

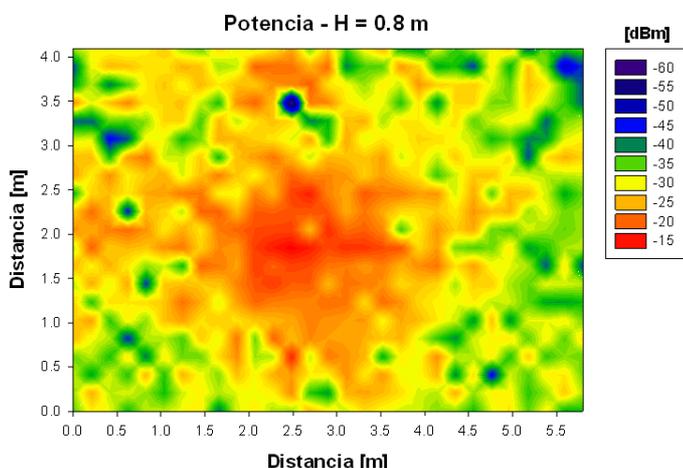


Fig. 13. Simulación de trazado de rayos

Finalmente se procederá a mostrar los resultados de las mediciones reales en la siguiente tabla:

Escenario	Grupo sensores (color)	RSSI Sensor 1 (dBm)	RSSI Sensor 2 (dBm)	RSSI Sensor 3 (dBm)
1	Azul	-39	-42	-41
1	Verde	-42	-39	-39
2	Azul	-41	-44	-41
2	Verde	-39	-39	-42

Tabla 1. Medidas reales

Cabe resaltar la importancia que tienen las componentes multirrayecto en las mediciones reales de los dispositivos ZigBee, lo que tiene como consecuencia una alta dependencia del nivel de recepción de los sensores en función de la ubicación de los mismos en el escenario.

III. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha analizado la dependencia topológica de una red de sensores ZigBee en relación con el canal de radiopropagación para entornos interiores. Debido a la característica de funcionamiento de ultrabajo consumo y de elementos de bajo coste (e.g., antenas chip de bajo perfil), los valores de potencia recibida presentan variaciones que requieren ser tenidas en cuenta de manera precisa. Para ello se han realizado tanto simulaciones sobre modelos empíricos como mediante trazado de rayos 3D, obteniendo en este último caso información relevante ligada al valor de señal esperado. Esta información puede ser utilizada en la futura planificación en interiores de redes ZigBee de múltiples elementos, en el contexto del Hogar Inteligente.

REFERENCIAS

- [1] IEEE Standard 802.15.4, 2006
- [2] Jose María Hernando Rábanos, *Transmisión por Radio*, Quinta Edición.
- [3] S. Y. Seidel, T. S. Rappaport, "Site-specific propagation prediction for wireless in building personal communication system design", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol 43, pp. 879-891, Nov. 1994.



PROYECTO FIN DE CARRERA

**ANÁLISIS DE LA DEPENDENCIA TOPOLÓGICA DE UNA RED DE
SENSORES ZIGBEE EN RELACIÓN CON EL CANAL DE
RADIOPROPAGACIÓN PARA ENTORNOS INTERIORES**

Ingeniero Técnico de Telecomunicación

Pamplona, 24 de Febrero 2011

Tutor: Francisco Falcone

ÍNDICE

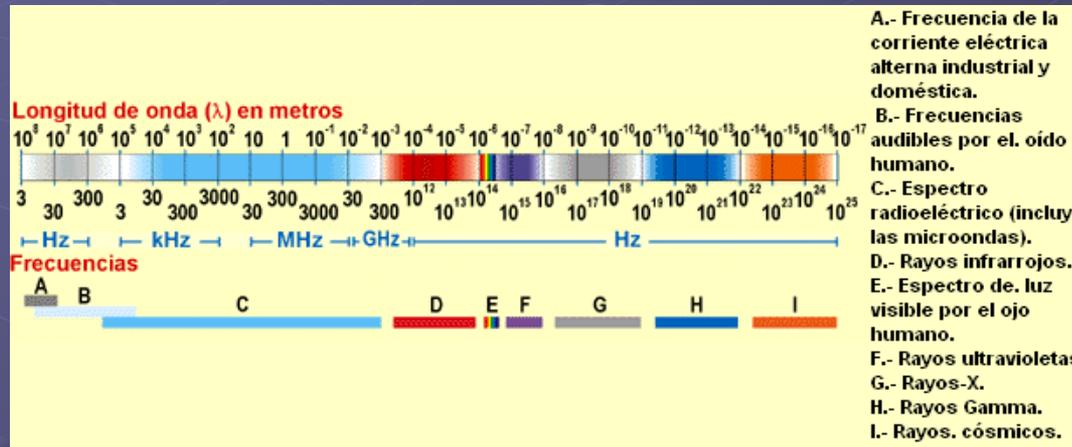
- INTRODUCCIÓN
- ZIGBEE
 - ESTANDAR 802.15.4
 - ESPECIFICACIÓN ZIGBEE
- PROPAGACIÓN DE ONDAS RADIOELECTRICAS
 - CARACTERISTICAS BÁSICAS
 - MODELOS DE PROPAGACIÓN EMPÍRICOS
 - MODELO BASADO EN TRAZADO DE RAYOS
- ANÁLISIS DE SIMULACIÓN Y MEDIDA
- CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS

INTRODUCCIÓN

• INTRODUCCIÓN

- ZIGBEE
 - ESTANDAR 802.15.4
 - ESPECIFICACIÓN ZIGBEE
- PROPAGACIÓN DE ONDAS
 - CARACTERÍSTICAS BÁSICAS
 - MODELOS DE PROPAGACIÓN EMPÍRICOS
 - MODELO BASADO EN TRAZADO DE RAYOS
- ANÁLISIS DE SIMULACIÓN Y MEDIDA
- CONCLUSIONES
- LINEAS FUTURAS

- **ANTES:** COMUNICACIÓN MEDIANTE CABLES
- **ACTUALIDAD:** AUJE REDES INALÁMBRICAS



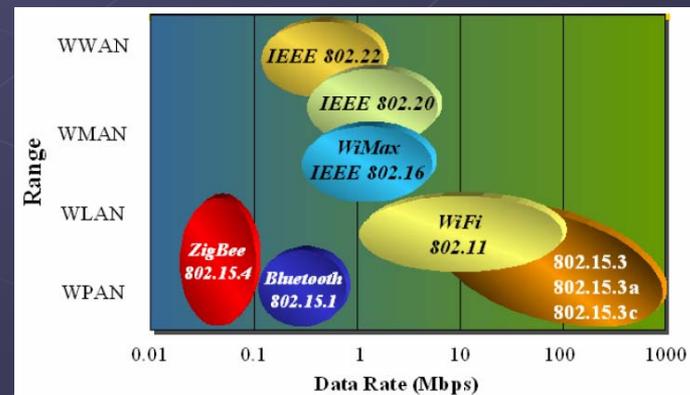
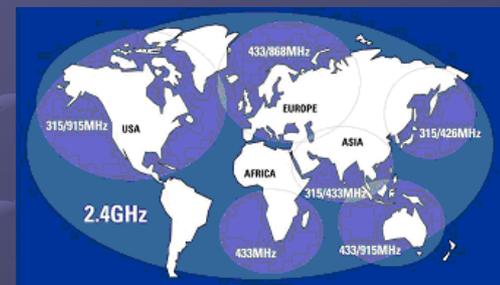
INTRODUCCIÓN

• INTRODUCCIÓN

- ZIGBEE
 - ESTANDAR 802.15.4
 - ESPECIFICACIÓN ZIGBEE
- PROPAGACIÓN DE ONDAS
 - CARACTERÍSTICAS BÁSICAS
 - MODELOS DE PROPAGACIÓN EMPÍRICOS
 - MODELO BASADO EN TRAZADO DE RAYOS
- ANÁLISIS DE SIMULACIÓN Y MEDIDA
- CONCLUSIONES
- LINEAS FUTURAS

ZIGBEE

- USO DE BANDA ISM
- BAJO CONSUMO
- BAJA TASA DE TRANSMISIÓN
- VARIEDAD DE APLICACIONES



ZIGBEE / 802.15.4

• INTRODUCCIÓN

• ZIGBEE

- ESTANDAR 802.15.4
- ESPECIFICACIÓN ZIGBEE

• PROPAGACIÓN DE ONDAS

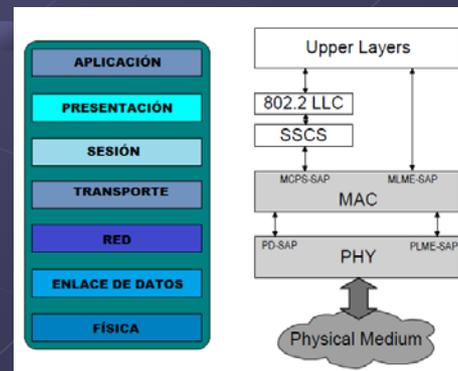
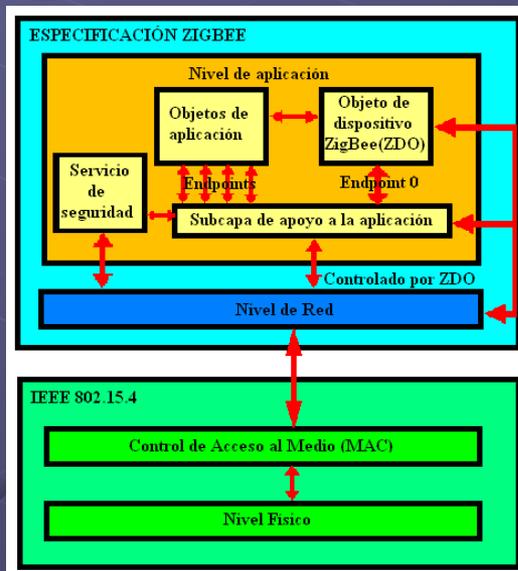
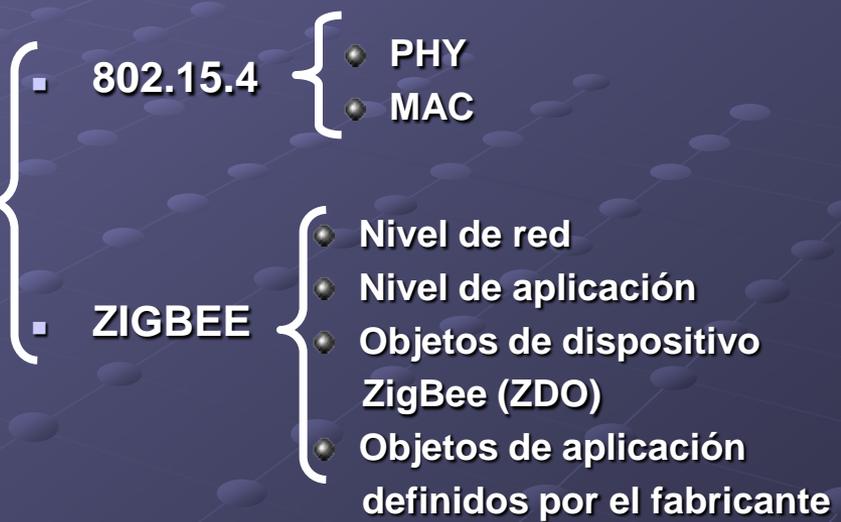
- CARACTERÍSTICAS BÁSICAS
- MODELOS DE PROPAGACIÓN EMPÍRICOS
- MODELO BASADO EN TRAZADO DE RAYOS

• ANÁLISIS DE SIMULACIÓN Y MEDIDA

• CONCLUSIONES

• LINEAS FUTURAS

ZIGBEE STACK



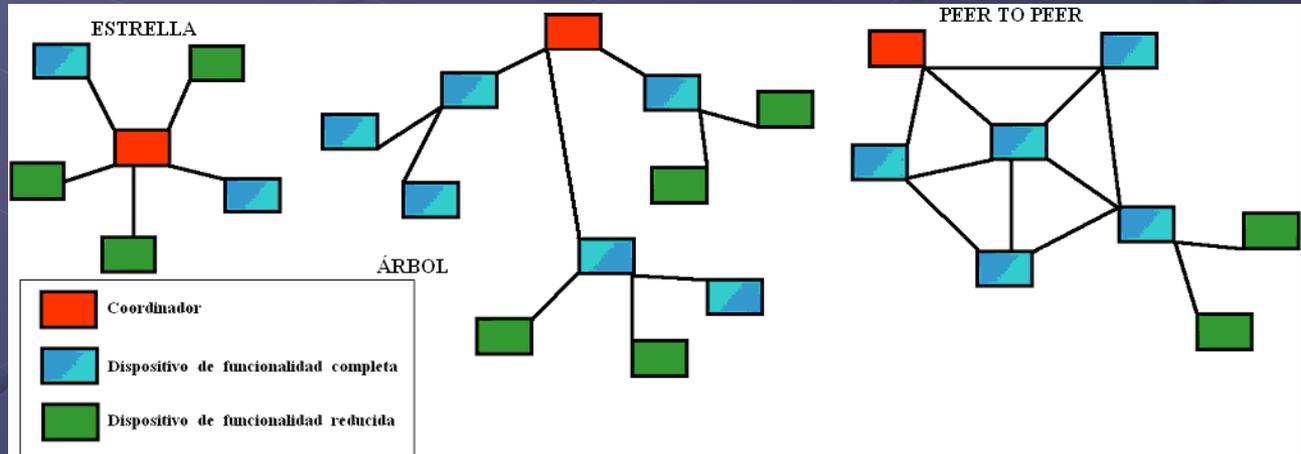
ZIGBEE / 802.15.4

ESTANDAR 802.15.4

TIPOS DE DISPOSITIVOS

- Coordinador (FFD)
- Router (FFD)
- Dispositivo final (RFD)

TOPOLOGIA



• INTRODUCCIÓN

• ZIGBEE

- ESTANDAR 802.15.4
- ESPECIFICACIÓN ZIGBEE

• PROPAGACIÓN DE ONDAS

- CARACTERÍSTICAS BÁSICAS
- MODELOS DE PROPAGACIÓN EMPÍRICOS
- MODELO BASADO EN TRAZADO DE RAYOS

• ANÁLISIS DE SIMULACIÓN Y MEDIDA

• CONCLUSIONES

• LINEAS FUTURAS

ZIGBEE / 802.15.4

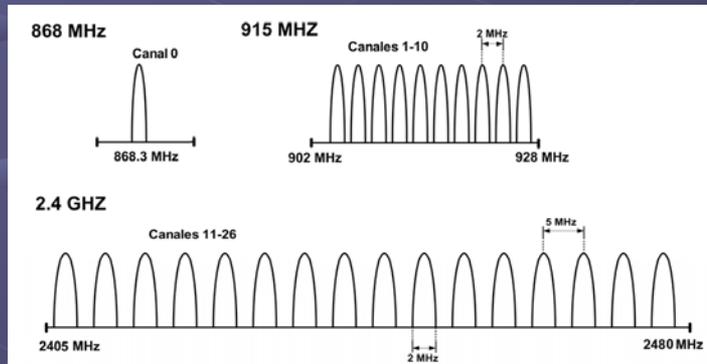
● ARQUITECTURA ESTANDAR 802.15.4

● PHY

- PHY 2.4GHz / PHY 868-915MHz

- FUNCIONES

- Activar y desactivar el transceptor radio
- Detección de energía de cada canal
- Indicación de la calidad de enlace
- Selección de frecuencia
- Envío y recepción de datos



Banda de frecuencia	Tasa de transferencia	Modulación
868 MHz	20 kbps	BPSK
915 MHz	40 kbps	BPSK
2,4 GHz	250 kbps	O-QPSK

• INTRODUCCIÓN

• ZIGBEE

- ESTANDAR 802.15.4
- ESPECIFICACIÓN ZIGBEE

• PROPAGACIÓN DE ONDAS

- CARACTERÍSTICAS BÁSICAS
- MODELOS DE PROPAGACIÓN EMPÍRICOS
- MODELO BASADO EN TRAZADO DE RAYOS

• ANÁLISIS DE SIMULACIÓN Y MEDIDA

• CONCLUSIONES

• LINEAS FUTURAS

ZIGBEE / 802.15.4

ARQUITECTURA ESTANDAR 802.15.4

MAC

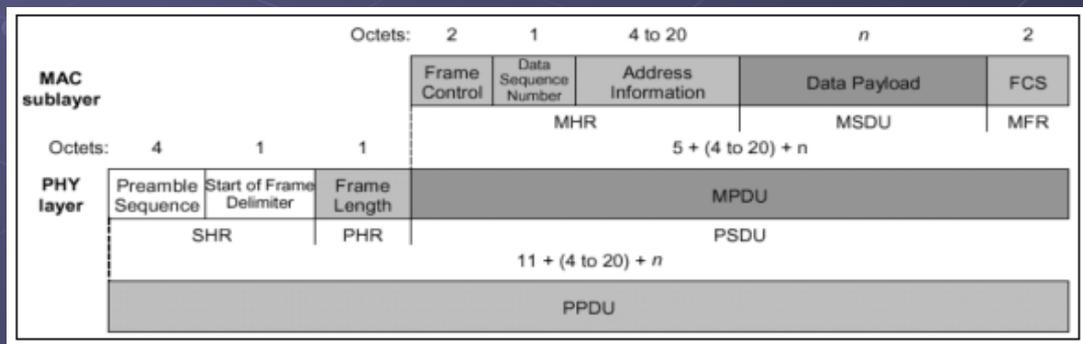
MODOS DE FUNCIONAMIENTO

- Modo balizado
- Modo no balizado

ALGORITMO CSMA-CA

FUNCIONES

- Gestionar la conexión y desconexión a la red de dispositivos
- Generar y sincronizar balizas



• INTRODUCCIÓN

• ZIGBEE

- ESTANDAR 802.15.4
- ESPECIFICACIÓN ZIGBEE

• PROPAGACIÓN DE ONDAS

- CARACTERÍSTICAS BÁSICAS
- MODELOS DE PROPAGACIÓN EMPÍRICOS
- MODELO BASADO EN TRAZADO DE RAYOS

• ANÁLISIS DE SIMULACIÓN Y MEDIDA

• CONCLUSIONES

• LINEAS FUTURAS

ZIGBEE / 802.15.4

ARQUITECTURA ESPECIFICACIÓN ZIGBEE

NIVEL DE RED

FUNCIONES

- Inicialización de la red PAN.
- Descubrimiento de una red
- Unión y abandono de dispositivos a una red.
- Adjudicación de direcciones de red.

NIVEL DE APLICACIÓN

SUBCAPAS

- Subcapa de soporte de aplicación (APS)
- Marco de aplicación (AF)
- Objeto de dispositivo ZigBee (ZDO)



• INTRODUCCIÓN

• ZIGBEE

- ESTANDAR 802.15.4
- **ESPECIFICACIÓN ZIGBEE**

• PROPAGACIÓN DE ONDAS

- CARACTERÍSTICAS BÁSICAS
- MODELOS DE PROPAGACIÓN EMPÍRICOS
- MODELO BASADO EN TRAZADO DE RAYOS

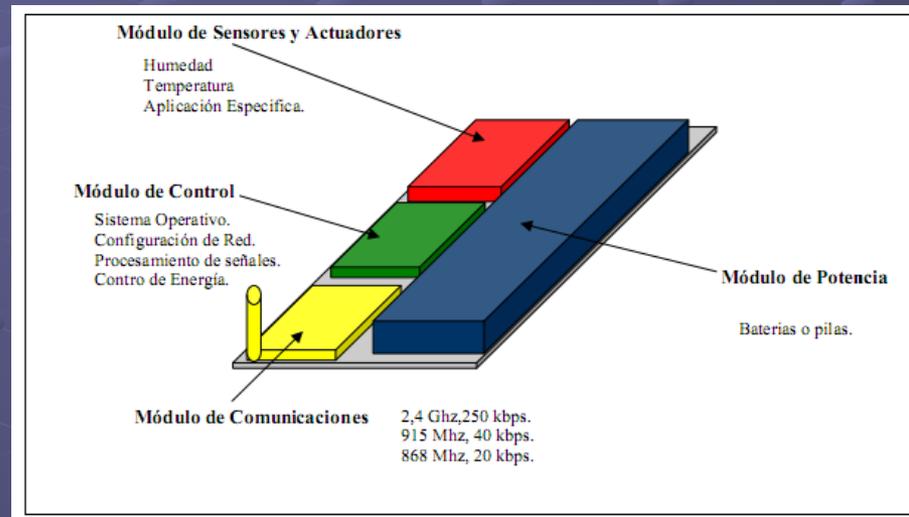
• ANÁLISIS DE SIMULACIÓN Y MEDIDA

• CONCLUSIONES

• LINEAS FUTURAS

ZIGBEE / 802.15.4

DISPOSITIVO ZIGBEE



• INTRODUCCIÓN

- **ZIGBEE**
 - ESTANDAR 802.15.4
 - **ESPECIFICACIÓN ZIGBEE**

• PROPAGACIÓN DE ONDAS

- CARACTERÍSTICAS BÁSICAS
- MODELOS DE PROPAGACIÓN EMPÍRICOS
- MODELO BASADO EN TRAZADO DE RAYOS

• ANÁLISIS DE SIMULACIÓN Y MEDIDA

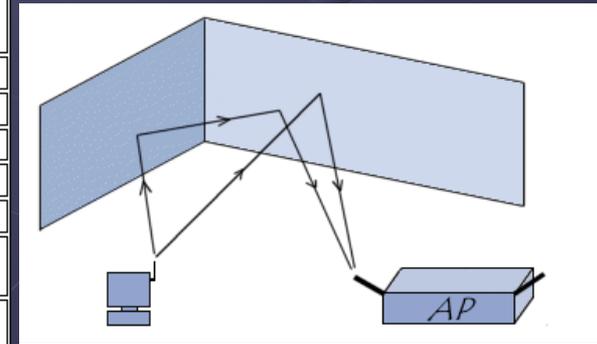
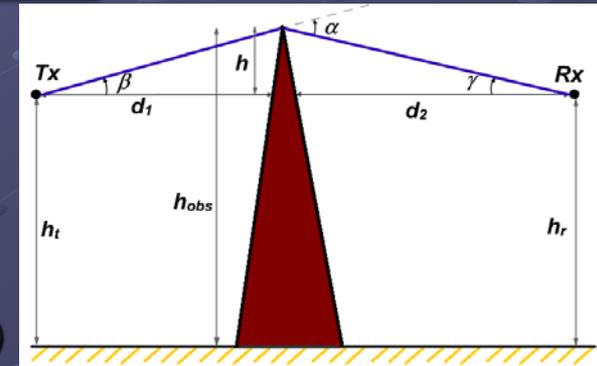
• CONCLUSIONES

• LINEAS FUTURAS

PROPAGACIÓN DE ONDAS RADIOELECTRICAS

CARACTERÍSTICAS: PROPAGACIÓN DE ONDAS RADIOELECTRICAS INDOOR

- ABSORCIÓN
- REFLEXIÓN
- DIFRACCIÓN
- REFRACCIÓN
- DISPERSIÓN (SCATTERING DIFUSO)



Materiales	Grado de atenuación	Ejemplos
Aire	Ninguno	Aire libre, patio interno
Madera	Bajo	Puerta, piso, medianera
Ladrillos	Medio	Paredes
Yeso	Medio	Medianeras
Concreto	Alto	Muros de carga, pisos, columnas
Vidrio a prueba de balas	Alto	Ventanas a prueba de balas
Metal	Muy alto	Concreto reforzado, espejos, armarios metálicos, cabina del ascensor

- INTRODUCCIÓN
- ZIGBEE
 - ESTANDAR 802.15.4
 - ESPECIFICACIÓN ZIGBEE
- PROPAGACIÓN DE ONDAS
 - CARACTERÍSTICAS BÁSICAS
 - MODELOS DE PROPAGACIÓN EMPÍRICOS
 - MODELO BASADO EN TRAZADO DE RAYOS
- ANÁLISIS DE SIMULACIÓN Y MEDIDA
- CONCLUSIONES
- LINEAS FUTURAS

PROPAGACIÓN DE ONDAS RADIOELECTRICAS

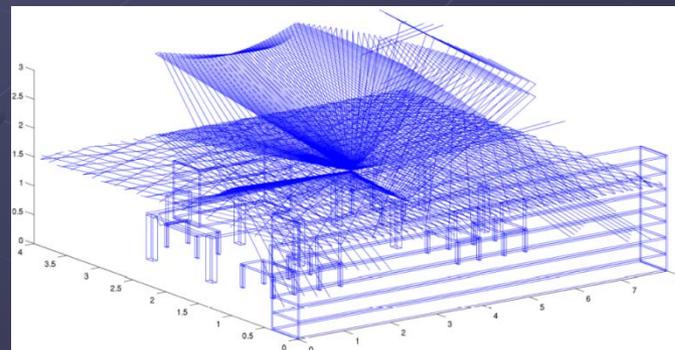
- INTRODUCCIÓN
- ZIGBEE
 - ESTANDAR 802.15.4
 - ESPECIFICACIÓN ZIGBEE
- **PROPAGACIÓN DE ONDAS**
 - CARACTERÍSTICAS BÁSICAS
 - **MODELOS DE PROPAGACIÓN EMPÍRICOS**
 - **MODELO BASADO EN TRAZADO DE RAYOS**
- ANÁLISIS DE SIMULACIÓN Y MEDIDA
- CONCLUSIONES
- LINEAS FUTURAS

MODELOS DE PROPAGACIÓN RADIOELÉCTRICA

- MODELO DE PROPAGACIÓN EN ESPACIO LIBRE
- MODELO DE PROPAGACIÓN COST 231
- MODELO DE PROPAGACIÓN ITU R P.1238
- MODELO DE PROPAGACIÓN MULTI WALL
- MODELO DE PROPAGACIÓN LINEAR PATH ATTENUATION
- MODELO DE PROPAGACIÓN KEENAN MOTLEY
- MODELO DE TRAZADO DE RAYOS

$$L = L_{FS} + L_C + \sum K_{wi} L_{wi} + n \left(\frac{n+2}{n+1} b \right) * L_f$$

Modelo COST 231



ANÁLISIS DE SIMULACIÓN Y MEDIDA

- INTRODUCCIÓN
- ZIGBEE
 - ESTANDAR 802.15.4
 - ESPECIFICACIÓN ZIGBEE
- PROPAGACIÓN DE ONDAS
 - CARACTERÍSTICAS BÁSICAS
 - MODELOS DE PROPAGACIÓN EMPÍRICOS
 - MODELO BASADO EN TRAZADO DE RAYOS
- ANÁLISIS DE SIMULACIÓN Y MEDIDA
- CONCLUSIONES
- LINEAS FUTURAS

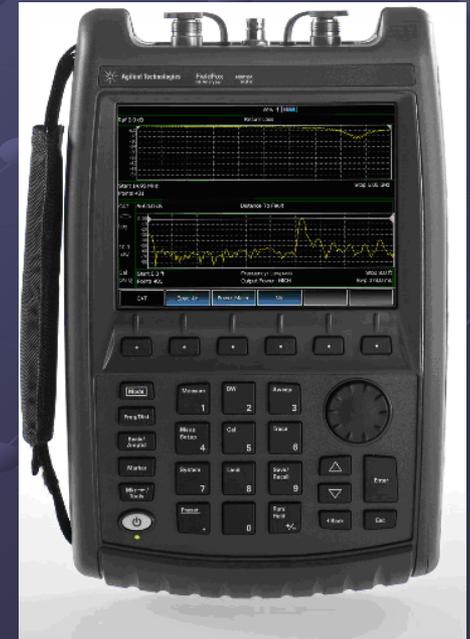
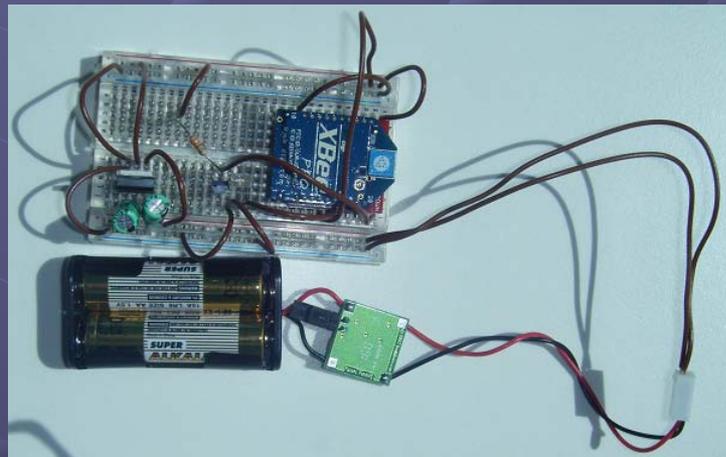
COMPARATIVA CON DISTINTOS MEDIOS INALÁMBRICOS

TABLA COMPARATIVA CON OTROS MEDIOS INALÁMBRICOS DE TRANSMISIÓN DE DATOS			
	ZigBee	BLUETOOTH	WI-FI
Bandas de Frecuencias	2.4GHz, 868 / 915 MHz	2.4GHz	2.4GHz
Tasa de Transferencia	250kbps (2.4GHz), 40kbps (915MHz), 20kbps (868MHz)	3Mbps	11Mbps
Números de Canales	16 (2.4GHz), 10 (915MHz), 1 (868MHz)	79	11—14
Tipos de Datos	Digital (Texto)	Digital, Audio	Digital
Números de Dispositivos	255 / 65535	8	32
Requisitos de Alimentación	Muy Baja - Años de Batería	Media - Días de Batería	Media - Horas de Batería
Introducción al Mercado	Baja	Media	Alta
Arquitecturas	Estrella, Árbol, Punto a Punto	Estrella	Estrella
Mejores de Aplicaciones	Control de Bajo Costo y Monitoreo	Computadoras y Teléfonos	Edificio con Internet
Consumo de Potencia	30mA transmitiendo, 3µA en reposo	40 mA transmitiendo, 0.2mA en reposo	400 ma transmitiendo, 20 ma en reposo
Precio	Bajo	Accesible	Costoso
Complejidad	Simple	Complejo	Complejo

ANÁLISIS DE SIMULACIÓN Y MEDIDA

● INSTRUMENTACIÓN

- MÓDULOS RF XBEE-PRO
- PC
- ANALIZADOR RF FIELD FOX N9912A

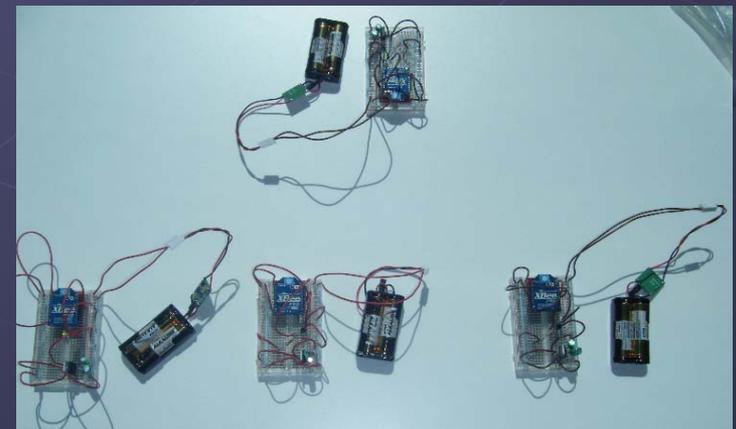
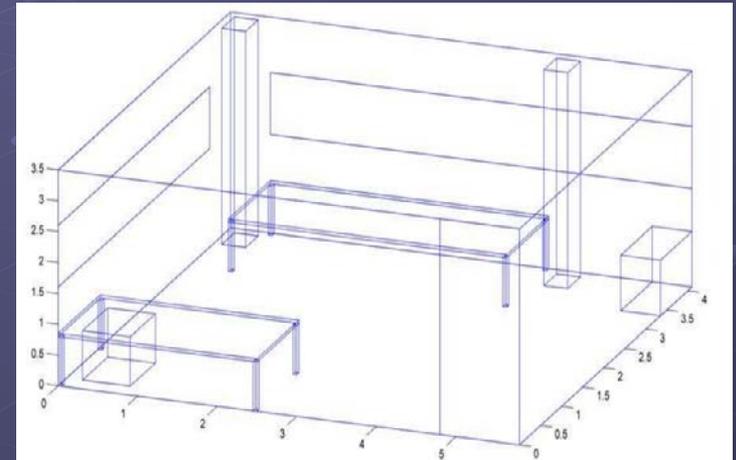


- INTRODUCCIÓN
- ZIGBEE
 - ESTANDAR 802.15.4
 - ESPECIFICACIÓN ZIGBEE
- PROPAGACIÓN DE ONDAS
 - CARACTERÍSTICAS BÁSICAS
 - MODELOS DE PROPAGACIÓN EMPÍRICOS
 - MODELO BASADO EN TRAZADO DE RAYOS
- ANÁLISIS DE SIMULACIÓN Y MEDIDA
- CONCLUSIONES
- LINEAS FUTURAS

ANÁLISIS DE SIMULACIÓN Y MEDIDA

- INTRODUCCIÓN
- ZIGBEE
 - ESTANDAR 802.15.4
 - ESPECIFICACIÓN ZIGBEE
- PROPAGACIÓN DE ONDAS
 - CARACTERÍSTICAS BÁSICAS
 - MODELOS DE PROPAGACIÓN EMPÍRICOS
 - MODELO BASADO EN TRAZADO DE RAYOS
- **ANÁLISIS DE SIMULACIÓN Y MEDIDA**
- CONCLUSIONES
- LINEAS FUTURAS

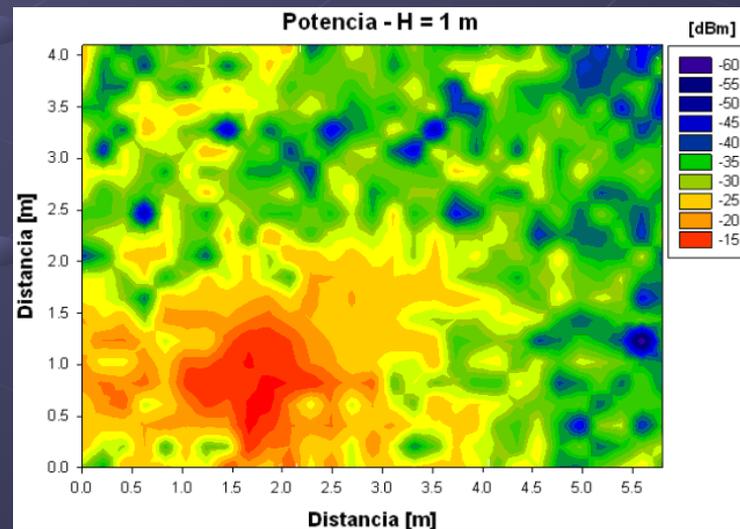
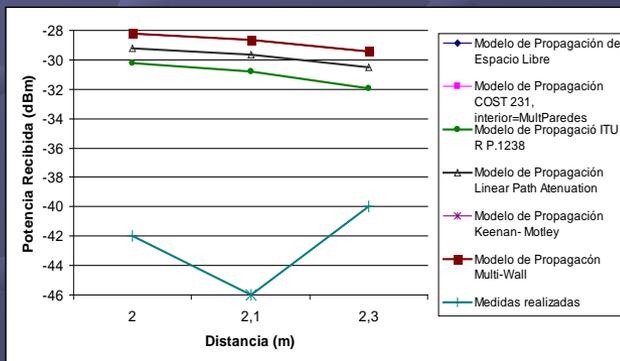
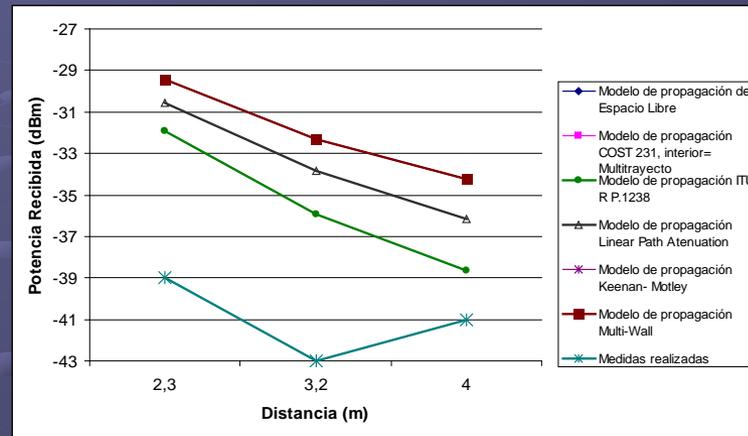
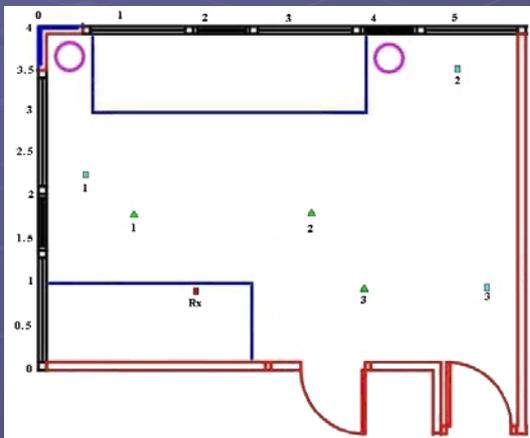
● LOCAL Y RED DISEÑADA



ANÁLISIS DE SIMULACIÓN Y MEDIDA

- INTRODUCCIÓN
- ZIGBEE
 - ESTANDAR 802.15.4
 - ESPECIFICACIÓN ZIGBEE
- PROPAGACIÓN DE ONDAS
 - CARACTERÍSTICAS BÁSICAS
 - MODELOS DE PROPAGACIÓN EMPÍRICOS
 - MODELO BASADO EN TRAZADO DE RAYOS
- ANÁLISIS DE SIMULACIÓN Y MEDIDA
- CONCLUSIONES
- LINEAS FUTURAS

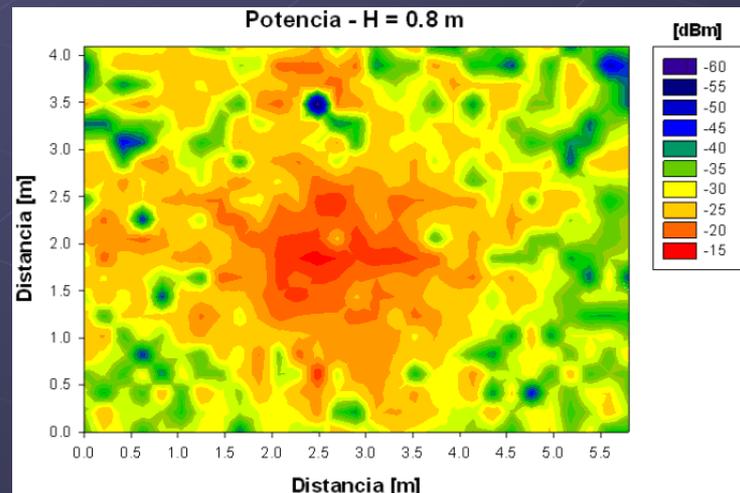
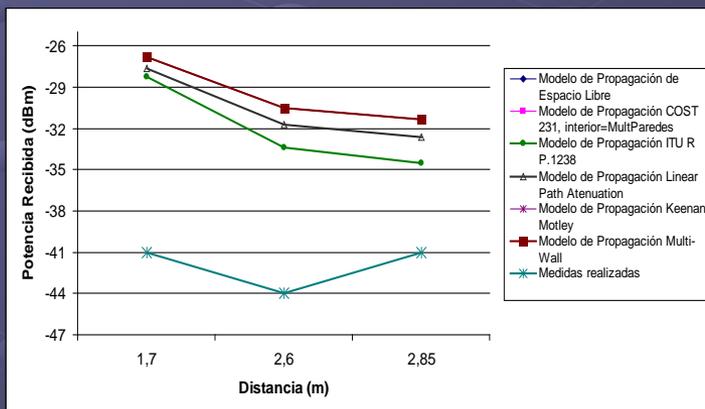
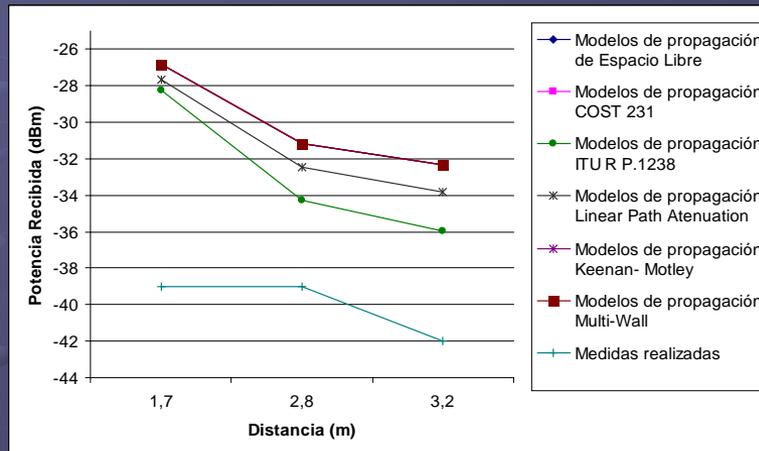
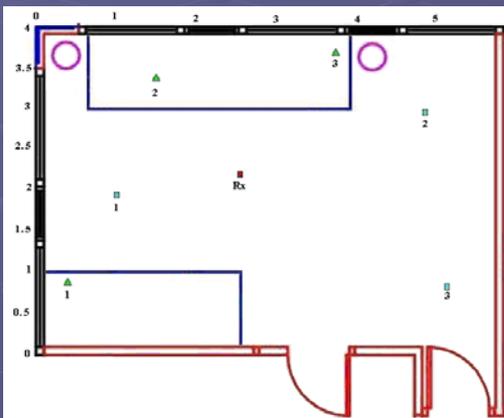
ESCENARIO 1



ANÁLISIS DE SIMULACIÓN Y MEDIDA

- INTRODUCCIÓN
- ZIGBEE
 - ESTANDAR 802.15.4
 - ESPECIFICACIÓN ZIGBEE
- PROPAGACIÓN DE ONDAS
 - CARACTERÍSTICAS BÁSICAS
 - MODELOS DE PROPAGACIÓN EMPÍRICOS
 - MODELO BASADO EN TRAZADO DE RAYOS
- ANÁLISIS DE SIMULACIÓN Y MEDIDA
- CONCLUSIONES
- LINEAS FUTURAS

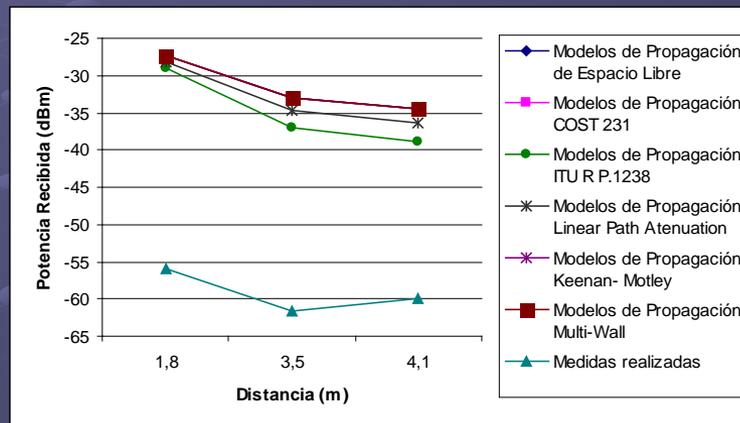
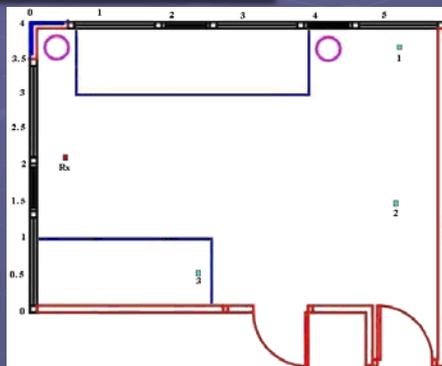
ESCENARIO 2



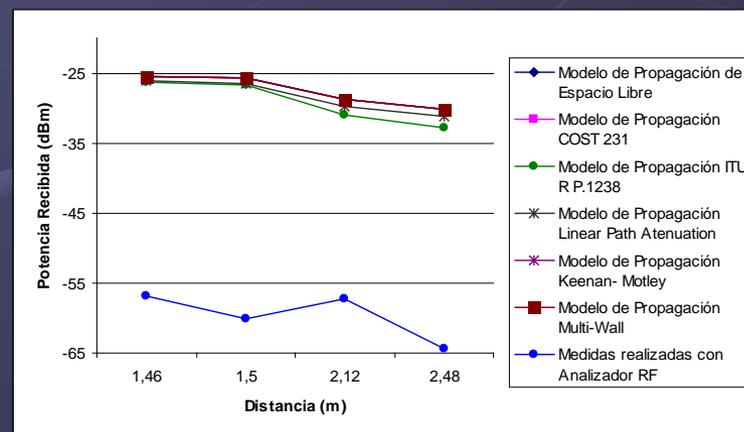
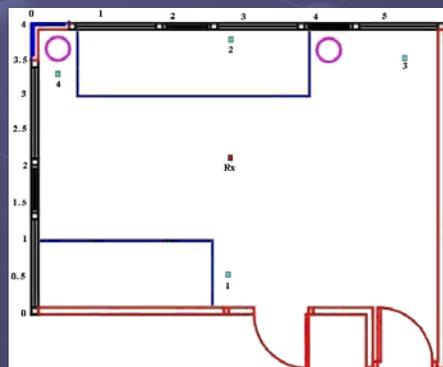
ANÁLISIS DE SIMULACIÓN Y MEDIDA

- INTRODUCCIÓN
- ZIGBEE
 - ESTANDAR 802.15.4
 - ESPECIFICACIÓN ZIGBEE
- PROPAGACIÓN DE ONDAS
 - CARACTERÍSTICAS BÁSICAS
 - MODELOS DE PROPAGACIÓN EMPÍRICOS
 - MODELO BASADO EN TRAZADO DE RAYOS
- ANÁLISIS DE SIMULACIÓN Y MEDIDA
- CONCLUSIONES
- LINEAS FUTURAS

ESCENARIO 3



ESCENARIO 4



CONCLUSIONES

- INTRODUCCIÓN
- ZIGBEE
 - ESTANDAR 802.15.4
 - ESPECIFICACIÓN ZIGBEE
- PROPAGACIÓN DE ONDAS
 - CARACTERÍSTICAS BÁSICAS
 - MODELOS DE PROPAGACIÓN EMPÍRICOS
 - MODELO BASADO EN TRAZADO DE RAYOS
- ANÁLISIS DE SIMULACIÓN Y MEDIDA
- **CONCLUSIONES**
- LINEAS FUTURAS



CONCLUSIONES

- USO DE BANDA ISM
- BAJO CONSUMO
- BAJA TASA DE TRANSMISIÓN
- MODELOS EMPÍRICOS: POCO REPRESENTATIVOS
- MODELO DE TRAZADO DE RAYOS: BASTANTE FIABLE PERO CON LIMITACIONES



LINEAS FUTURAS

- INTRODUCCIÓN
- ZIGBEE
 - ESTANDAR 802.15.4
 - ESPECIFICACIÓN ZIGBEE
- PROPAGACIÓN DE ONDAS
 - CARACTERÍSTICAS BÁSICAS
 - MODELOS DE PROPAGACIÓN EMPÍRICOS
 - MODELO BASADO EN TRAZADO DE RAYOS
- ANÁLISIS DE SIMULACIÓN Y MEDIDA
- CONCLUSIONES
- **LINEAS FUTURAS**

LINEAS FUTURAS

- ANALISIS EN OTROS LUGARES: HOTELES, HOSPITALES, FÁBRICAS...
- ANALISIS CON MÓDULOS DE OTROS FABRICANTES
- DISEÑO DE VIVIENDA AUTOMATIZADA
- COMPARATIVA DETALLADA CON OTROS MEDIOS INALAMBRICOS
- ESTUDIO DE INTERFERENCIAS ENTRE ZIGBEE, WI-FI Y BLUETOOTH



TRABAJOS PUBLICADOS

- ANÁLISIS DE TOPOLOGÍA DE SENSORES EN PRESTACIONES DE SISTEMAS ZIGBEE INTERIORES

URSI BILBAO
25 2010


XXV Simposium Nacional
UNIÓN CIENTÍFICA
INTERNACIONAL DE RADIO



PROYECTO FIN DE CARRERA

ANÁLISIS DE LA DEPENDENCIA TOPOLÓGICA DE UNA RED DE
SENSORES ZIGBEE EN RELACIÓN CON EL CANAL DE
RADIOPROPAGACIÓN PARA ENTORNOS INTERIORES

¡MUCHAS GRACIAS POR SU ATENCIÓN!

Ingeniero Técnico de Telecomunicación

Pamplona, 24 de Febrero 2011

Tutor: Francisco Falcone