



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE
TELECOMUNICACIÓN

Master en Comunicaciones

*APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS
INALÁMBRICAS EN GRANDES SUPERFICIES
COMERCIALES*

Eduardo Salinero Aso

Dr. Francisco Javier Falcone Lanas

Resumen

En los últimos años los sistemas de comunicación inalámbrica han experimentado un gran crecimiento. En la mayoría de los sectores o ámbitos de la industria ha habido un gran aumento en el uso de sistemas de radiofrecuencia para mejorar sus servicios. Por ello, el estudio de posibles sistemas inalámbricos aplicados a ámbitos comerciales tiene un gran interés. En particular, las grandes superficies comerciales son un claro ejemplo en las que el despliegue de una red de dispositivos inalámbricos puede aportar grandes ventajas, como ofrecer mayor información al cliente sobre los productos que compra y proporcionarle una experiencia más interactiva y agradable a la hora de hacer la compra.

Abstract

In this work, the characterization of the radiopropagation in big commercial areas is presented. Due to the big size of this kind of scenarios, the huge number of obstacles within it (furniture, products and persons) and the presence of a great variety of wireless communication systems lead to the necessity of a thorough characterization of the radio channel before the deployment and implantation of new wireless communication systems. For that purpose, an in-house developed 3D ray launching code is used in order to obtain estimations of the received power level for the whole scenario. Measurements have been made in order to validate the simulation results. The results of this work can aid in the adequate deployment of different wireless systems, as sensor networks.

Gracias a él, a ella, y a ellos...

INDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	6
1.1. CONTEXTO DEL PROYECTO	6
1.2. OBJETIVOS	9
1.3. HERRAMIENTAS	10
1.3.1. Hardware.....	10
1.3.2. Software.....	11
1.3.2.1. Matlab	11
1.3.2.2. Sigmaplot	12
2. ESTADO DEL ARTE	13
2.1 REDES DE SENSORES (WSN)	13
2.1.1. Aplicaciones de las redes de sensores	13
2.1.2. Tecnología ZigBee.....	14
2.1.2.1. Definición de ZigBee	14
2.1.2.2. Descripción general.....	15
2.1.2.3. Tipos de dispositivos.....	16
2.1.2.4. Arquitectura	17
2.1.2.5. Empaquetamiento y Direccionamiento	18
2.1.2.6. Topologías.....	20
2.1.2.6.1. Topología en estrella	21
2.1.2.6.2. Topología en árbol.....	22
2.1.2.6.3. Topología igual a igual (peer to peer).....	23
2.1.2.6.4. Topología en malla.....	24
2.1.3. RFID.....	25
2.1.4. Bluetooth.....	26
2.2. APLICACIONES CON TECNOLOGÍA INALÁMBRICA EN EL SECTOR COMERCIAL	28
2.2.1. Código EPC.....	28
2.2.2. Caja autopago	29
2.2.3. Carro de compra inteligente:	29
2.2.4. Tarjeta inteligente.....	30
2.2.5. Balanzas inteligentes	30
2.2.6. Estanterías inteligentes:	30
2.3. EXPERIENCIAS PIONERAS.....	32
2.3.1. Metrogroup.....	32
2.3.2. Smarket.....	32
2.3.3. Wal-Mart	33
2.3.4. Hellmann	33
3. ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO EN UN ENTORNO COMERCIAL.....	34
3.1. TRAZADO DE RAYOS	34
3.2. DESCRIPCIÓN DEL ESCENARIO	36
3.3. RESULTADOS OBTENIDOS	38
3.3.1. Red Sensores WSN.....	38
3.3.1.1. Configuración en línea recta.....	38
3.1.1.2. Configuración en Zigzag	41
3.3.2. Estudio de propagación radioeléctrico en un ambiente comercial	43
3.3.2.1. Planos de Potencia recibida.....	44
3.3.2.2. Radiales de potencia.....	45
3.3.2.3. Escenario con personas	52
4. CONCLUSIONES	57
5. LÍNEAS FUTURAS	58
6. BIBLIOGRAFÍA	59

ÍNDICE DE FIGURAS	61
ANEXO 1	63
A.1.1. PLANO DE POTENCIA BIDIMENSIONAL	64
A.1.2. PLANO DE COBERTURA	64
ANEXO 2	65
APS	65
ANEXO 3	67
URSI.....	67

1. Introducción

1.1. Contexto del proyecto

Hoy en día existe gran variedad de productos y, sobretodo, de establecimientos en los cuales se venden estos productos. Los consumidores tienen mucho donde elegir y el criterio a la hora de elegir uno u otro depende de cada persona, puede ser la calidad, la proximidad, el precio, la variedad etc.

De forma general el consumidor busca la comodidad y la rapidez en el proceso de compra, pero también el consumidor intenta disfrutar del hecho de “comprar”.

La preocupación por la vida saludable y por la concienciación medioambiental es, actualmente, fundamental para el consumidor y por ello se tiende a mirar mucho más la composición y datos de procedencia del producto. Cabe destacar la vital importancia que tiene saber la composición o trazabilidad del producto para los consumidores con alguna intolerancia alimenticia.

Esta situación, por un lado de saturación de formatos, y por otra de nuevos hábitos de compra, puede o hace plantearse a las empresas de este sector a innovar, empleando nuevas tecnologías en el proceso de compra.

La necesidad de innovar está provocando que numerosas cadenas comerciales de todo el mundo, estén iniciando sus propios proyectos para aplicar nuevas tecnologías en este sector. En muchos casos aún es sólo con carácter experimental, pero en otros ya se están empezando a planificar supermercados inteligentes, en los que el consumidor desde el momento en que accede a la tienda tiene a su disposición carros con ordenadores incorporados, que le permiten obtener información de cada uno de los productos disponibles (composición, modo de preparación, fecha de caducidad...).

Cada cadena de supermercados apuesta por la tecnología que cree que le retornara más beneficios, y como se trata de un sector aun sin explotar puede tomar numerosas variantes, como pantallas informativas, balanzas que detectan automáticamente el producto a pesar, cajas de autopago, estanterías inteligentes...

Los beneficios de estas apuestas tecnologías repercuten en el consumidor como un placer asociado a la compra, ya que por ejemplo con el autopago se eliminan las colas y esperas en las cajas, con las balanzas inteligentes no hace falta acordarse del número que hay que pulsar etc.



Figura 1 Futuro de los supermercados

Como se ha comentado con anterioridad el supermercado ideal con todas estas tecnologías no existe todavía, pero lo cierto es, que algunas innovaciones ya se han introducido parcialmente en los establecimientos convencionales (estanterías inteligentes, sistema de autopago...).

En aquellos casos en los que se han introducido estas mejoras, los resultados han sido buenos, incluso en grupos de consumidores (como personas de más edad) donde a priori, podría esperarse un rechazo.



Figura 2 Ejemplo de aplicación de la tecnologías inalámbricas en un Supermercado

El gran inconveniente de la realización de este trabajo es la escasez de literatura sobre este tema debido, principalmente a su carácter experimental y al secretismo que tienen las grandes cadenas comerciales, la mayoría de la información que se ofrece es puramente comercial, especificando a lo sumo la tecnología empleada pero sin entrar en profundidad en ella.

Este trabajo es fruto de la documentación recogida, en su mayoría, en páginas web, además de en artículos publicados en congresos y revistas internacionales.

Uno de los estándares con mayor proyección actualmente es el IEEE 802.15.4, debido a que es una opción muy interesante y que se ha mostrado exitosa para el despliegue de redes con un gran número de dispositivos de bajo consumo.

Basada en este estándar encontramos la tecnología ZigBee. Las características principales de ZigBee son el uso de las bandas frecuenciales ISM de 900 MHz y 2,4 GHz, su bajo consumo de energía, tasa baja de transmisión de datos y el uso de FDMA como esquema de multiplexación. Estas características, así como la flexibilidad que aporta debido a que soporta diferentes topologías de red, colocan a ZigBee como un candidato ideal para redes de sensores inalámbricos en entornos interiores complejos.

1.2. Objetivos

Las grandes superficies comerciales son escenarios complejos, debido fundamentalmente a su morfología cambiante y variada (hay gran cantidad de mobiliario, productos y personas). El hecho de que haya gran cantidad de personas, hace que el escenario sea más complejo. Al propio impacto en la radiopropagación que puede tener la presencia de personas, hay que añadir las emisiones de radiofrecuencia de los dispositivos que hoy en día portan las personas habitualmente, como son los smartphones.

Debido a esta complejidad inherente del entorno a estudiar, la caracterización y el análisis de la propagación electromagnética se convierten en algo fundamental a la hora de desplegar una red inalámbrica en él.

En este trabajo, se ha utilizado un modelo de propagación determinista para analizar el canal radio en el escenario propuesto. Concretamente, se ha utilizado un modelo 3D de lanzamiento de rayos basado en *Matlab*, desarrollado en la Universidad Pública de Navarra. Este método de simulación ha sido validado previamente para distintos tipos de entornos interiores complejos, como vehículos, habitaciones, edificios, etc. [9] [10]. Con esta herramienta de simulación se consigue estimar si el funcionamiento de la red inalámbrica desplegada será el adecuado, estimando el nivel de potencia recibida en cada punto del escenario, pudiendo además estimar si se producen interferencias entre distintas tecnologías o sistemas inalámbricos. Finalmente, se ha realizado una campaña de medidas en el escenario real con el fin de validar los resultados obtenidos mediante las simulaciones.

1.3. Herramientas

1.3.1. Hardware

El Hardware principal utilizado para las simulaciones ha sido una estación de trabajo Lenovo ThinkStation D20 con las siguientes características.

- Procesador Intel® Xeon® x5650 de doble núcleo (2,66 GHz, Turbo Boost, caché de nivel 2 (L2) de 12 MB)
- Memoria SDRAM DDR2 de 64 GB
- Tarjeta gráfica nVidia Quadro 600 GS de 128 MB
- Disco duro de 1 TB a 7200 rpm



Figura 3 Lenovo ThinkStation D20

El otro Hardware utilizado para simulaciones secundarias ha sido un portátil Acer TravelMate 5720G con las siguientes características:

- Procesador Intel® Core™ 2 Duo procesor T8300 (2'4 Ghz, 800 Mhz FSB, 3 MB L2 cache)
- Memoria DDR2 SDRAM de 4096 MB a 1333 MHz
- Tarjeta gráfica Intel® HD Graphics 3000 de 1 GB
- 2 Discos duros de 320 GB



Figura 4 Acer travelmate 5720G

1.3.2. Software

Todo el Software se ha utilizado sobre un sistema operativo Windows 7 Ultimate de 64 Bits.

1.3.2.1. Matlab

MATLAB (MATrix LABoratory) es un entorno de desarrollo integrado de computación numérica que utiliza el lenguaje de programación M desarrollado en 1984 por la empresa Math-Works.

La elección de usar Matlab para implementar el algoritmo en el lenguaje de programación ha sido promovida por el hecho de que éste permite realizar operaciones matemáticas numéricas de un modo muy sencillo, gracias a la simplicidad de su sintaxis. Además, Matlab ofrece una gran facilidad a la hora de mostrar los resultados gracias a sus potentes herramientas gráficas. Las características más importantes de Matlab son:

- Lenguaje de programación de alto nivel.
- Entorno de desarrollo para la gestión de código, archivos y datos.
- Funciones matemáticas para el álgebra lineal, estadística, análisis de Fourier,
- filtrado, optimización e integración numérica.
- Funciones para la visualización de datos en gráficas en 2 y 3 dimensiones.
- Herramientas para la creación de interfaces gráficas de usuario personalizadas.
- Funciones para integrar los algoritmos basados en MATLAB con aplicaciones
- externas, e idiomas, tales como C, C, Fortran, Java, COM y Microsoft Excel.



Figura 5 Matlab 2009b

1.3.2.2. Sigmaplot

SigmaPlot es un programa de creación de gráficos el cual tiene guías de análisis estadístico con más de 50 métodos estadísticos y 100 tipos de gráficos. Es un programa creado por la empresa SYSTAT® y ha sido galardonado varias veces.

La elección de usar SigmaPlot para representar la mayor parte de los datos obtenidos de las simulaciones ha sido promovida por el hecho de que éste permite la representación de un modo muy sencillo, gracias a su simplicidad, y la gran capacidad de personalización de estos.

- Dispone de más de 80 tipos de gráficos de 2-D y 3-D.
- Personalización de cada detalle se los gráficos.
- Dibuja rápidamente los datos desde plantillas gráficas.
- Puede compartir gráficos de alta calidad en la Web.
- Combina las capacidades estadísticas de SPSS con SigmaPlot.
- Integración total con Microsoft Office.
- Puede dibujar cualquier fórmula matemática.



Figura 6 SigmaPlot 11

2. Estado del arte

2.1 Redes de sensores (WSN)

Las redes inalámbricas de sensores consisten en una gran cantidad de pequeños dispositivos, capaces de recoger todo tipo de información de su entorno: temperatura, humedad, luz, movimiento...etc., a través de los sensores que llevan incorporados. [20]

Su reducido tamaño y la capacidad de transmitir sin cables, permiten un despliegue rápido y flexible de centenares de dispositivos.

Los últimos avances tecnológicos han hecho realidad el desarrollo de unos mecanismos distribuidos, diminutos, baratos y de bajo consumo, que, además, son capaces tanto de procesar información localmente como de comunicarse de forma inalámbrica.

Estos dispositivos permiten desarrollar redes de sensores para un amplio rango de aplicaciones.

Una red de sensores puede describirse como un grupo de nodos que se coordinan para llevar a cabo una aplicación específica.

2.1.1. Aplicaciones de las redes de sensores

Las redes de sensores tienen una amplia variedad de aplicaciones [20]:

- Monitorización de un hábitat
- Monitorización del medio ambiente, observación del suelo o agua
- Mantenimiento de ciertas condiciones físicas (temperatura, luz)
- Control de parámetros en la agricultura
- Detección de incendios, terremotos o inundaciones
- Sensorización de edificios “inteligentes”
- Control de tráfico
- Asistencia militar o civil
- Control médico
- Detección acústica
- Cadenas de montaje, etc.

Actualmente el estándar utilizado para las implementar estas redes WSN es el IEEE 802.15.4, basada en este estándar encontramos la tecnología ZigBee.

2.1.2. Tecnología 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.

2.1.2.1. Definición de 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 área Network, WPAN).[22][23]

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.

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). [22][23]

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.

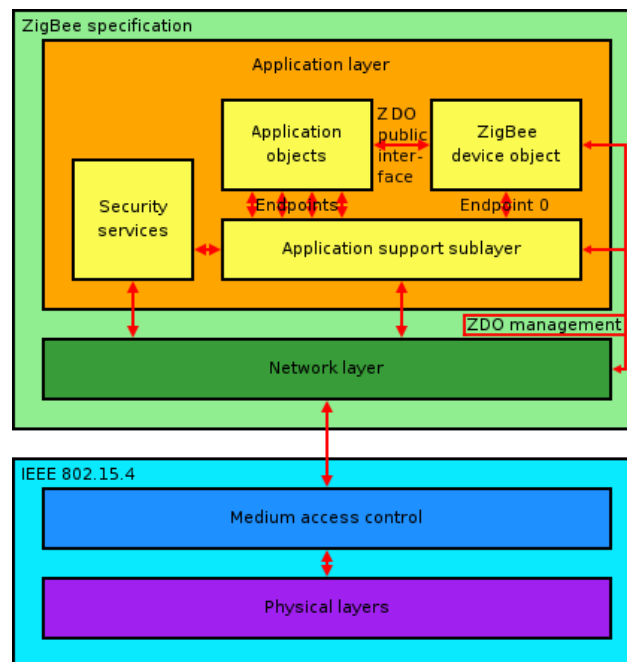


Figura 7 Pila de protocolos ZigBee [25]

2.1.2.2. Descripción general

El estándar IEEE 802.15.4 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. [22][23][24]

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).

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.

2.1.2.3. Tipos de dispositivos

Se definen tres tipos distintos de dispositivo ZigBee según su papel en la red:
[24]

1. **Coordinador ZigBee (ZigBee coordinator, ZC):** El tipo de dispositivo más completo. 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.
2. **Router ZigBee (ZR):** Además de ofrecer un nivel de aplicación para la ejecución de código de usuario, puede actuar como router interconectando dispositivos separados en la topología de la red.
3. **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. 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:

1. **Dispositivo de funcionalidad completa (FFD):** 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.
2. **Dispositivo de funcionalidad reducida (RFD):** tiene capacidad y funcionalidad limitadas (especificada en el estándar) con el objetivo de conseguir un bajo coste y una gran simplicidad. Básicamente, son los sensores/actuadores de la red.

2.1.2.4. Arquitectura

ZigBee es una pila de protocolos, que de manera similar al modelo OSI está constituido por diferentes capas, las cuales son independientes una de la otra. En la Figura 8 se muestran las diferentes capas que conforman la pila de protocolos para ZigBee. [24]

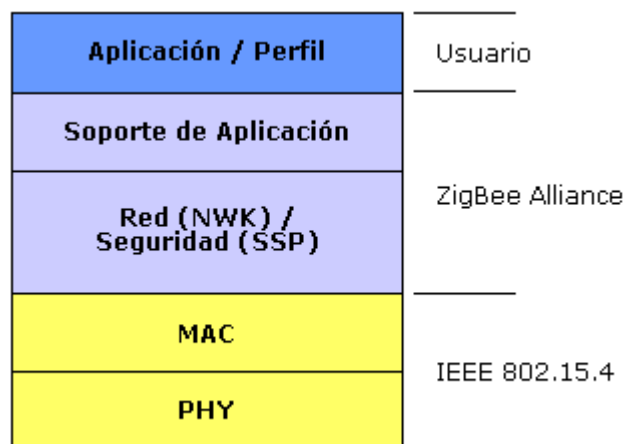


Figura 8 Capas que componen el sistema ZigBee [24]

- La capa de más bajo nivel es la capa física (PHY), que en conjunto con la capa de acceso al medio (MAC), brindan los servicios de transmisión de datos por el aire, punto a punto. Estas dos capas están descritas en el estándar IEEE 802.15.4-2003. El estándar trabaja sobre las bandas ISM de uso no regulado, donde se definen hasta 16 canales en el rango de 2.4 GHz, cada una de ellas con un ancho de banda de 5 MHz. Se utilizan radios con un espectro de dispersión de secuencia directa, lográndose tasas de transmisión en el aire de hasta 250 Kbps en rangos que oscilan entre los 10 y 75 m, los cuales dependen bastante del entorno.
- La capa de red (NWK) tiene como objetivo principal permitir el correcto uso del subnivel MAC y ofrecer una interfaz adecuada para su uso por parte de la capa de aplicación. En esta capa se brindan los métodos necesarios para: iniciar la red, unirse a la red, enrutar paquetes dirigidos a otros nodos en la red, proporcionar los medios para garantizar la entrega del paquete al destinatario final, filtrar paquetes recibidos, cifrarlos y autentificarlos. Se debe tener en cuenta que el algoritmo de enrutamiento que se usa es el de enrutamiento de malla, el cual se basa en el protocolo Ad Hoc On-Demand Vector Routing – AODV. Cuando esta capa se encuentra cumpliendo la función de unir o separar dispositivos a través del controlador de red, implementa seguridad, y encamina tramas a sus respectivos destinos; además, la capa de red del controlador de red es responsable de crear una nueva red y asignar direcciones a los dispositivos de la misma. Es en esta capa en donde se implementan las distintas topologías de red que ZigBee soporta (árbol, estrella y mesh network).

- La siguiente capa es la de soporte a la aplicación que es el responsable de mantener el rol que el nodo juega en la red, filtrar paquetes a nivel de aplicación, mantener la relación de grupos y dispositivos con los que la aplicación interactúa y simplificar el envío de datos a los diferentes nodos de la red. La capa de Red y de soporte a la aplicación son definidas por la ZigBee Alliance.
- En el nivel conceptual más alto se encuentra la capa de aplicación que no es otra cosa que la aplicación misma y de la que se encargan los fabricantes. Es en esta capa donde se encuentran los ZDO (ZigBee Device Objects) que se encargan de definir el papel del dispositivo en la red, si el actuará como coordinador, como router o dispositivo final; la subcapa APS y los objetos de aplicación definidos por cada uno de los fabricantes.

Cada capa se comunica con sus capas subyacentes a través de una interface de datos y otra de control, las capas superiores solicitan servicios a las capas inferiores, y éstas reportan sus resultados a las superiores. Además de las capas mencionadas, a la arquitectura se integran otro par de módulos: módulo de seguridad, que es quien provee los servicios para cifrar y autenticar los paquetes, y el módulo de administración del dispositivo ZigBee, que es quien se encarga de administrar los recursos de red del dispositivo local, además de proporcionar a la aplicación funciones de administración remota de red.

2.1.2.5. Empaquetamiento y Direccionamiento

En ZigBee, el empaquetamiento se realiza en cuatro tipos diferentes de paquetes básicos, los cuales son: datos, ACK, MAC y baliza. En la figura 9 se muestra los campos de los cuatro tipos de paquetes básicos [22] [23] [24].

El paquete de datos tiene una carga de datos de hasta 104 bytes. La trama esta numerada para asegurar que todos los paquetes llegan a su destino. Un campo nos asegura que el paquete se ha recibido sin errores. Esta estructura aumenta la fiabilidad en condiciones complicadas de transmisión.

La estructura de los paquetes ACK, llamada también paquete de reconocimiento, es dónde se realiza una realimentación desde el receptor al emisor, de esta manera se confirma que el paquete se ha recibido sin errores. Se puede incluir un tiempo de silencio entre tramas, para enviar un pequeño paquete después de la transmisión de cada paquete.

El paquete MAC, se utiliza para el control remoto y la configuración de dispositivos/nodos. Una red centralizada utiliza este tipo de paquetes para configurar la red a distancia.

El paquete baliza se encarga de “despertar” los dispositivos que “escuchan” y luego vuelven a “dormirse” si no reciben nada más. Estos paquetes son importantes para

mantener todos los dispositivos y los nodos sincronizados, sin tener que gastar una gran cantidad de batería estando todo el tiempo encendidos.

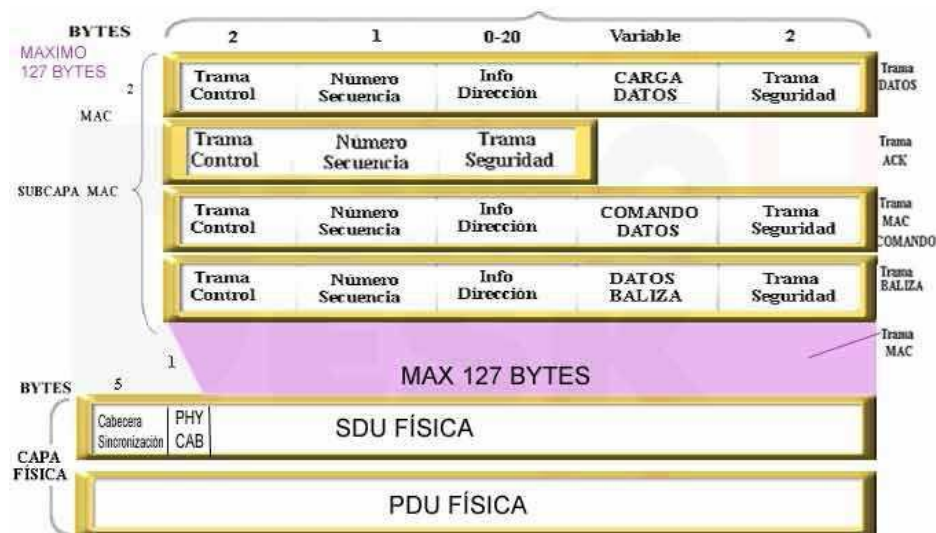


Figura 9 Campos de los cuatro tipos de paquetes básicos de ZigBee. [24]

Por otra parte, el direccionamiento es, a su vez, parte del nivel de aplicación. Un nodo está formado por un transceptor de radio compatible con el estándar 802.15.4 donde se implementan dos mecanismos de acceso al canal y una o más descripciones de dispositivo (colecciones de atributos que pueden consultarse o asignarse, o se pueden monitorizar por medio de eventos). El transceptor es la base del direccionamiento, mientras que los dispositivos dentro de un nodo se identifican por medio de un endpoint numerado entre 1 y 240.

Los dispositivos se direccionan empleando 64-bits y un direccionamiento corto opcional de 16 bits. El campo de dirección incluido en MAC puede contener información de direccionamiento de ambos orígenes y destinos (necesarios para operar punto a punto).

Este doble direccionamiento es usado para prevenir un fallo dentro de la red.

Los dos mecanismos de acceso al canal que se implementan en ZigBee corresponden para redes “con balizas” y “sin balizas”. Para una red “sin balizas”, un estándar

ALOHA CSMA-CA envía reconocimientos positivos para paquetes recibidos correctamente. En esta red, cada dispositivo es autónomo, pudiendo iniciar una conversación, en la cual los otros pueden interferir. A veces, puede ocurrir que el dispositivo destino puede no oír la petición, o que el canal esté ocupado.

Este sistema se usa típicamente en los sistemas de seguridad, en los cuales sus dispositivos (sensores, detectores de movimiento o de rotura de cristales), duermen prácticamente todo el tiempo (el 99,999%). Para que se les tenga en cuenta, estos elementos se “despiertan” de forma regular para anunciar que siguen en la red. Cuando se produce un evento, el sensor “despierta” instantáneamente y transmite la alarma correspondiente. Es en ese momento cuando el coordinador de red, recibe el mensaje

enviado por el sensor, y activa la alarma correspondiente. En este caso, el coordinador de red se alimenta de la red principal durante todo el tiempo.

En cambio, en una red “con balizas”, se usa una estructura de supertrama para controlar el acceso al canal, esta supertrama es estudiada por el coordinador de red para transmitir “tramas baliza” cada ciertos intervalos (múltiples cada de 15.38 ms hasta cada 52 s). Esta estructura garantiza el ancho de banda dedicado y bajo consumo. Este modo es más recomendable cuando el coordinador de red trabaja con una batería. Los dispositivos que conforman la red, escuchan a dicho coordinador durante el “balizamiento” (envío de mensajes a todos los dispositivos -broadcast-, entre 0,015 y 252 segundos). Un dispositivo que quiera intervenir, lo primero que tendrá que hacer es registrarse para el coordinador, y es entonces cuando mira si hay mensajes para él. En el caso de que no haya mensajes, este dispositivo vuelve a “dormir”, y se despierta de acuerdo a un horario que ha establecido previamente el coordinador. En cuanto el coordinador termina el “balizamiento”, vuelve a “dormirse”.

Otro aspecto muy importante es la seguridad de las transmisiones y de los datos, los cuales son puntos clave en la tecnología ZigBee que utiliza el modelo de seguridad de la subcapa MAC IEEE 802.15.4, la cual especifica 4 servicios de seguridad:

- Control de accesos, el dispositivo mantiene una lista de dispositivos “comprobados” en la red.
- Datos encriptados, las cuales utilizan una encriptación con un código de 128 bits.
- Integración de tramas, para proteger los datos de ser modificados por otros.
- Secuencias de refresco, para comprobar que las tramas no han sido reemplazadas por otras. El controlador de red comprueba estas tramas de refresco y su valor, para ver si son las esperadas.

2.1.2.6. Topologías

En ZigBee existen tres tipos de topologías: estrella, árbol, y en red mallada (mesh network), las cuales pueden observarse en la Figura 10. 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. Además, si se aplica el concepto de Mesh Network, pueden existir coordinadores o routers, alimentados permanentemente en espera de recibir/repetir las tramas de los dispositivos o sensores. Ambos dispositivos son del tipo FFD (Full Functionality Device), debido a que exigen empotrar la mayoría de primitivas definidas por el stack ZigBee. [22][23][24][26].

Los dispositivos que harán la función de sensores, termostatos o mandos a distancia serán de funcionalidad reducida (RFD, Reduced Functionality Device), y serán alimentados por baterías o pilas.

Sin lugar a dudas, una de las mayores aportaciones del ZigBee y el que mayor interés está despertando a las empresas desarrolladoras de productos, es el concepto de red nodal o mesh network por el que cualquier dispositivo ZigBee puede conectarse con otro dispositivo usando a varios de sus compañeros como repetidores. A este se le conoce como enrutado “multi-salto”, primero hace llegar la información al nodo ZigBee vecino, el cual puede además ser coordinador de la red, para así llegar al nodo destino, pasando por todos los que sean necesarios. De esta manera cualquier nodo ZigBee puede hacer llegar los datos a cualquier parte de la red inalámbrica siempre y cuando todos los dispositivos tengan un vecino dentro de su rango de cobertura.

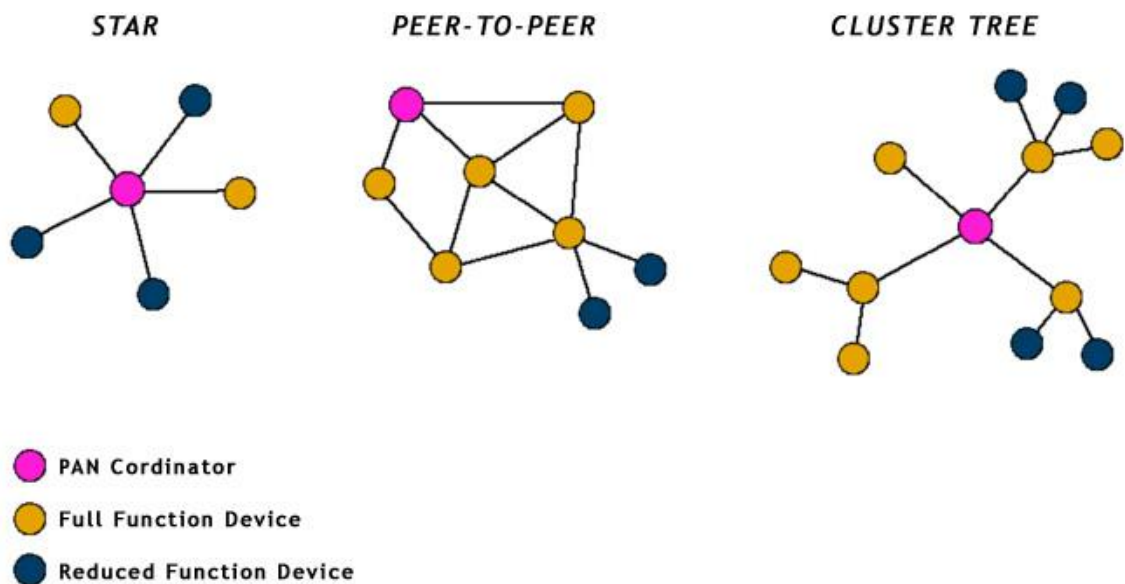


Figura 10 Diferentes topologías de red disponibles en ZigBee. [26]

2.1.2.6.1. Topología en estrella

En redes en estrella el coordinador de red, 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 11 vemos ilustrada la típica estructura de una red en estrella.

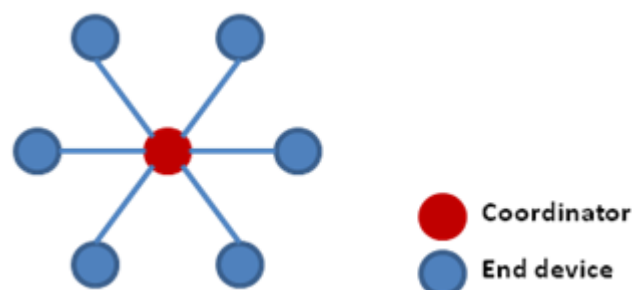


Figura 11 Topología en estrella [27]

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.

2.1.2.6.2. Topología en árbol

Topología de red en la que los nodos están colocados como su propio nombre indica en forma de árbol.

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. 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.

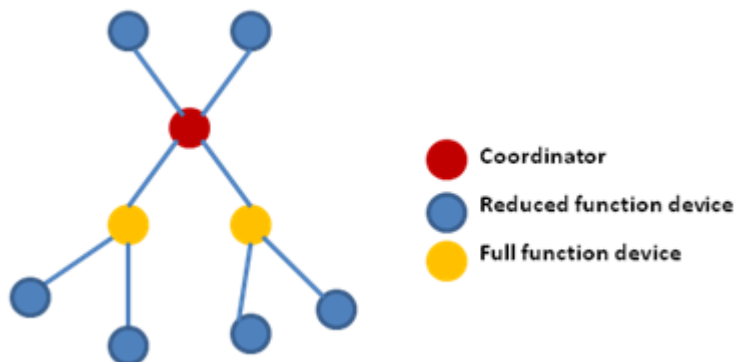


Figura 12 Topología en árbol [27]

2.1.2.6.3. Topología igual a igual (peer to peer)

En este tipo de red se puede establecer comunicación directa entre cualquier par de nodos. 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 clúster (clustertree).

Peer to Peer Network

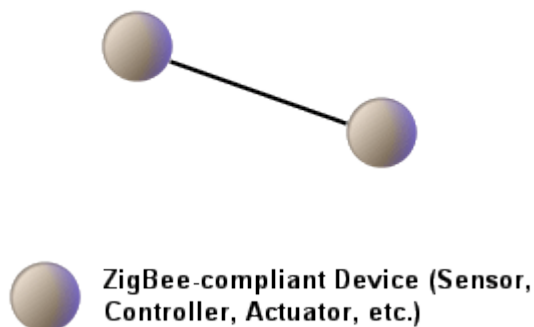


Figura 13 Topología Peer to Peer [27]

2.1.2.6.4. Topología en malla

La topología más interesante es la topología de malla. 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 se autogeneran, 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, 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.

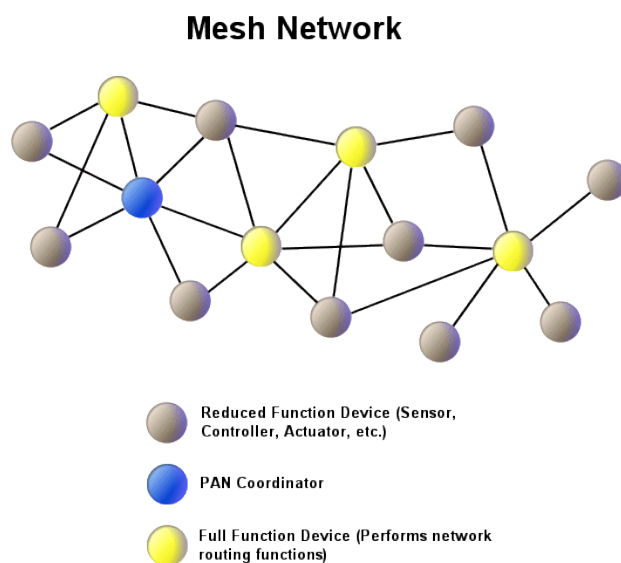


Figura 14 Topología en Malla [24]

2.1.3. RFID

Se va a explicar brevemente el funcionamiento de este sistema.

El esquema básico del sistema RFID se compone de un tag y un lector conectado a una antena y una base de datos, el lector puede hacer las veces de emisor y receptor pero normalmente se usa un dispositivo que emite la señal interrogante y otro que recibe la respuesta del tag.

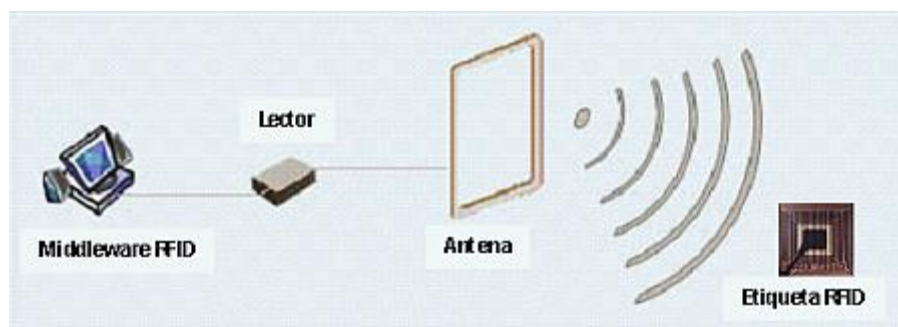


Figura 15 Esquema básico de un sistema RFID [28]

El ordenador central es el encargado de controlar el funcionamiento del conjunto de los elementos y realizar la gestión de los datos obtenidos. El lector es el encargado de comunicarse con el tag o etiqueta que contiene la información que queremos obtener mediante radiofrecuencia.

La comunicación entre lector y el tag consiste en que el lector genera un campo electromagnético que excita el transpondedor lo que provoca que este envíe la información previamente guardada en él.

Los tags RFID típicamente se componen de una antena emisora y un chip que guarda la información, aunque también existen las etiquetas que no contienen ninguna información y solo informan de su presencia.

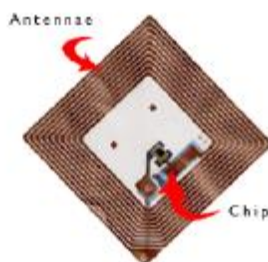


Figura 16 Tag RFID [29]

Los tags se pueden dividir en dos grupos, activos y pasivos. La diferencia entre ellos es que las etiquetas pasivas no tienen ninguna fuente de alimentación incorporada y su alimentación depende del campo electromagnético generado por el lector.

Los tags activos, cuentan con una fuente de alimentación interna, la ventaja principal de estos es que permite comunicaciones a más largas distancias.

2.1.4. Bluetooth

Bluetooth está basado en el estándar IEEE 802.15.1. Gracias a este protocolo, los dispositivos que lo implementan pueden comunicarse entre ellos cuando se encuentran dentro de su alcance.

Estos dispositivos se clasifican como Clase 1, Clase 2 o Clase 3 en referencia a su potencia de transmisión, siendo totalmente compatibles los dispositivos de una clase con los de las otras.

	Power	Range
Class 1	20 dBm	100 m
Class 2	0-4 dBm	10 m
Class 3	0 dBm	1 m

Figura 17 Clases Bluetooth [30]

1. Las especificaciones principales del Bluetooth son:
2. Banda de Frecuencia: 2,4 GHz (Banda ISM).
3. Uso global y gratuito
4. Capacidad de transmisión de voz y datos
5. Bajo consumo
6. Chips de transmisión baratos

En cuanto a la arquitectura:

La arquitectura de Bluetooth especifica el conjunto de protocolos con los que pueden operar las distintas aplicaciones.

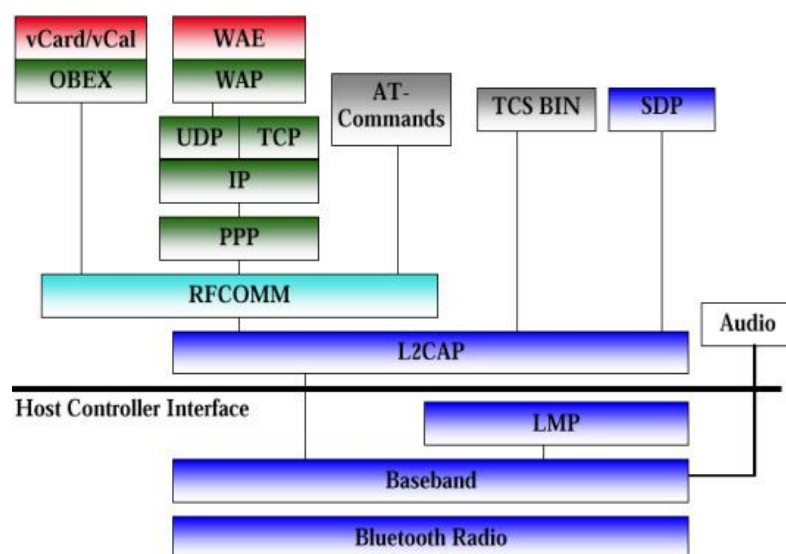


Figura 18 Arquitectura Bluetooth [31]

La especificación es abierta, lo que permite el desarrollo de nuevos protocolos de aplicación en las capas superiores, lo cual se traduce en el desarrollo de una gran variedad de servicios.

Bluetooth permite hasta 8 dispositivos activos por piconet y 10 piconets pueden coexistir en misma área de cobertura.

Cada piconet tiene 1 maestro el resto son esclavos y solo se conectan a través del maestro.

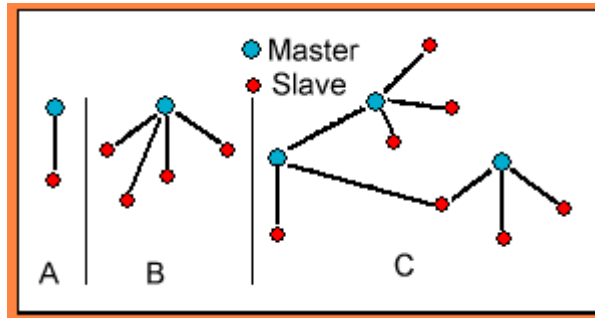


Figura 19 Configuraciones Bluetooth [32]

2.2. Aplicaciones con tecnología inalámbrica en el sector comercial

Como se ha comentado en la introducción de este trabajo los supermercados van adoptando medidas de innovación tecnológica, todas o casi todas ellas relacionadas con las comunicaciones inalámbricas, por ello surge la necesidad de enumerar e intentar realizar una recopilación con las diferentes posibilidades que están surgiendo en este ámbito.

2.2.1. Código EPC

El EPC (*Electronic Product Code*) es un sistema de identificación y seguimiento de productos en tiempo real, basado RFID.

EPC se divide en cuatro partes, Encabezado, Administrador, Clase del producto y número de serie del producto. Los rangos de memoria del código EPC van desde los 64 a los 256 bits.



Figura 20 Código EPC [33]

Encabezado (Header): El encabezado identifica la versión numérica del código por sí mismo.

Administrador EPC: Identifica a la empresa responsable de ese producto.

Clase del producto: Identifica el tipo de producto.

Número de serie: Identifica de manera única a ese producto. La entidad administradora es la responsable de la asignación unívoca de los números de serie.

Señalar que dentro de una etiqueta RFID no solamente va almacenado el código EPC sino que se puede añadir más información de cara al consumidor, como puede ser la composición de ese producto o recetas que se pueden realizar con él.

2.2.2. Caja autopago

Gracias a la tecnología RFID, no es preciso pasar uno a uno los productos para leer su código de barras, sino que como no se requiere de visión directa entre el tag y el lector es posible implementar un servicio en el cual el consumidor sea el que lea los productos pasando por un lector tipo arco y una vez leído el mismo con su tarjeta de crédito pague.



Figura 21 Cajas de Autopago [34]

2.2.3 Carro de compra inteligente:

Incorporar una pantalla táctil en el carro de la compra es otra de las innovaciones que se están desarrollando, lo llaman PSA (Asesor de Compras Personal) y se trata de un escáner capaz de leer la información de los productos o la información que ofrece el centro comercial. Además permite crear listas de compra, con la descripción de los productos e imágenes, información del precio y mapas con la ubicación de los mismos.



Figura 22 Carro de compra inteligente [20]

2.2.4. Tarjeta inteligente

Gracias a la tarjeta el cliente puede comenzar la compra antes de acudir a la tienda.

Mediante un número único de su tarjeta, el cliente puede seleccionar en la página Web los productos que luego quiere adquirir. La lista de la compra se vincula a su número de tarjeta de manera que cuando la pasa por el PSA montada en el carrito, la lista aparece en la pantalla.

2.2.5. Balanzas inteligentes

Reconocen automáticamente la fruta y la verdura por el color, el tamaño y la textura, la pesan e imprimen una etiqueta adhesiva con el precio y nombre del producto.



Figura 23 Balanza inteligente [20]

2.2.6. Estanterías inteligentes:

Existen muchas variantes de estanterías inteligentes, las más comunes son las que disponen de etiquetas electrónicas y gracias a un procesador central es capaz de cambiar todos los precios de estas automáticamente.

Otras variantes que están surgiendo, son las estanterías que combinan RFID con otra tecnología como ZigBee o Bluetooth, se trata de que los productos se comuniquen con un lector que existe en la estantería y esta a su vez mediante tecnología inalámbrica se comuniquen con otras estanterías o con el ordenador central. De esta manera se puede tener un control total y en tiempo real de todos los productos que están disponibles en las estanterías



Figura 24 Estanterías Inteligentes [20]

2.3. Experiencias pioneras

Como se ha visto en el punto anterior existen una gran variedad de posibles aplicaciones innovadoras en este sector. Hasta ahora el que mayor éxito ha tenido ha sido el de las cajas de autopago, no del mismo modo que se ha descrito en el punto 2.2.2 en el cual se exponía un uso de estas mediante tecnología inalámbrica, en la realidad todavía no se ha dado ese paso y es necesario pasar uno a uno los productos por un lector.

A continuación se van a mostrar las diferentes experiencias pioneras que se han introducido en los últimos años en el sector comercial.

2.3.1. Metrogroup

Metrogroup es una cadena alemana que hacia el 2003 abrió una tienda en la ciudad de Rheinberg en la cual el usuario podía realizar la lista de la compra desde el ordenador de su casa y enviarla vía internet a la tienda. Una vez en la tienda, el usuario a través de un carro de la compra provisto con una PSA (Asesor de Compras Personal), podía ver su lista de la compra, ver los precios con sólo pasar el código de barras, informar sobre ofertas o proporcionar recetas.

También incorporaba balanzas inteligentes que con ayuda de una cámara reconocen de que producto se trata y cajas de autopago.

Diferentes estudios han demostrado que los beneficios de implantar estas innovaciones han sido positivos.

2.3.2. Smarket

Smarket es una cadena de supermercados que en 2007 abrió un supermercado en el cual se hacían uso de una serie de aplicaciones innovadoras.

Su principal innovación es la aplicación del código del producto (EPC) en sus productos.

Los carros de la compra están provistos de un pequeño procesador unido a un lector capaz de leer la información de los productos.

Estos carros de la compra también tienen una pantalla informativa que le comunica al consumidor de los puntos que tiene, la lista de la compra, la ubicación de los productos que busca etc.

El sistema es capaz de registrar los productos que el usuario va echando al carro y mostrarle sugerencias como el precio, posibles usos que se pueden realizar con él, fechas de caducidad, composición etc.

A la hora de pagar no es necesario realizar ninguna cola de espera, desde cualquier punto del supermercado es posible enviar la compra que has realizado y pagar a la salida.

2.3.3. Wal-Mart

La cadena de supermercados Wal-Mart es una de las más importantes de EEUU y hacia el 2005 comenzó su implantación de sistemas EPC en sus supermercados. Actualmente tiene más de 600 proveedores que le suministran los productos con el código EPC y 1500 supermercados con esta tecnología.

2.3.4. Hellmann

La importante empresa Hellmann ofrece en algunos de los supermercados donde se pueden comprar sus productos una forma de comprar muy original e innovadora.

Hellmann ha instalado pantallas digitales en los carros de la compra con tecnología RFID, de manera que cuando un comprador pasa cerca de un producto la pantalla le muestra información y recetas que puede realizar con él, por ejemplo si el consumidor pasa por la sección de verduras, la pantalla le podría mostrar una receta o un video de una verdura con mayonesa (que es uno de los productos que ellos venden).



Figura 25 Ejemplo de aplicación de la empresa Hellmann [20]

De esta forma el consumidor puede interactuar con la pantalla para encontrar los ingredientes necesarios en la tienda o ver otros productos.

3. Análisis del Funcionamiento en un Entorno Comercial

Este proyecto se basa sobre todo en el estudio del comportamiento del sistema ZigBee en entornos comerciales. Se utilizarán dos métodos de análisis para comprobar el correcto funcionamiento de los sensores.

Mediante el método determinista de lanzamiento de rayos, se obtendrán unos valores que se contrastarán con los datos obtenidos con mediciones in situ. Si los resultados son satisfactorios se realizarán nuevas variantes de estudio.

3.1. Trazado de rayos

Está basado en las leyes físicas y en la geometría concreta del entorno. Requiere gran cantidad de datos relativos al escenario, tales como localización de objetos y las características físicas de los mismos, por ello, este método requiere de un mayor coste computacional, pero es mucho más exacto que los métodos analíticos.

Algunas de las características del trazado de rayos en tres dimensiones son:

1. Recreación de una propagación multirrayo realista.
2. Modelado en tres dimensiones de todo tipo de entornos complejos con habitaciones, múltiples plantas, múltiples edificios con diferentes formas y tamaños.
3. Caracterización y modelado de cualquier tipo de objeto mediante su forma tridimensional y su constante dieléctrica.
4. Caracterización de objetos o personas en movimiento.
5. Implementación de los fenómenos de la difracción, refracción, reflexión y scattering.
6. Cálculo de las interacciones entre los rayos y los objetos teniendo en cuenta la polarización de la onda.
7. Modelado de cualquier tipo de antena transmisora o receptora.
8. Duración de la simulación de un rayo determinado mediante número de rebotes, retardo máximo, magnitud de campo eléctrico mínimo, etc.

El procedimiento básico en un método de trazado de rayos es el algoritmo de lanzamiento de rayos.

En primer lugar, un rayo es lanzado desde la antena de transmisión, después, el rayo es trazado para ver si choca con algún objeto o con la antena receptora. Cuando el rayo es interceptado por un objeto, sucede alguno de los fenómenos de propagación como la reflexión, la transmisión, la difracción o el scattering, dependiendo de la geometría y las propiedades eléctricas del objeto.

La herramienta de simulación del lanzamiento de rayos en 3D permite ajustar diferentes parámetros. Los más significativos, además de las características de los materiales, son el diagrama de radiación de las antenas, la frecuencia de operación, la separación angular en los rayos lanzados, el número de reflexiones máximo permitido y la dimensión de los cuboides en los que se divide el escenario. Estos cuboides son los puntos en los que el software proporciona el valor de la potencia recibida, dependiendo del número y la potencia de los rayos que los atraviesan. En la siguiente tabla se muestra un resumen de los parámetros utilizados para la simulación.

TABLA I
PARÁMETROS ALGORITMO LANZADO DE RAYOS EN 3D

Frecuencia	2.4GHz
Potencia de transmisión	0 dBm
Resolución angular plano horizontal ($\Delta\Phi$)	1°
Resolución angular plano vertical ($\Delta\theta$)	1°
Reflexiones máx.	5
Tamaño de cuboides	10cm x 10cm x 10cm

3.2. Descripción del escenario

El escenario estudiado en este trabajo está situado dentro del supermercado E. Leclerc, localizado en Pamplona. Debido al gran tamaño que habitualmente tienen las grandes superficies comerciales, se ha acotado el estudio a un solo pasillo, cuyas características son similares a las que se pueden encontrar en cualquier otra superficie comercial de gran tamaño.

El escenario acotado creado para las simulaciones cuenta con unas dimensiones de 25.9 m x 11.7 m x 3 m, con dos estanterías de 19.5 m x 1.5 m x 2.2 m separadas entre sí una distancia de 2,9 m. Entre las dos estanterías se ha colocado un carro de la compra, con la antena transmisora.

En Figura. 26 y Figura 27 se muestra el escenario creado para las simulaciones con el algoritmo 3D de lanzamiento de rayos.

El carro de la compra está representado por el paralelepípedo marrón.

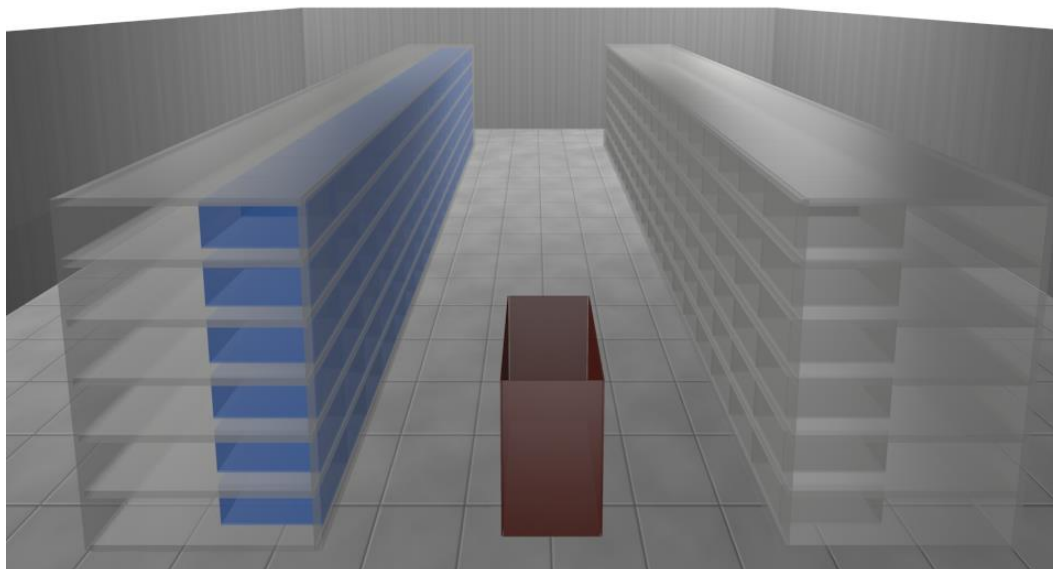


Figura 26 Escenario diseñado en 3D

En el escenario real en el que se tomaron medidas, la estantería de la parte izquierda del pasillo estaba ocupada principalmente por productos envasados en botes de cristal, mientras que la estantería derecha estaba ocupada por productos enlatados.

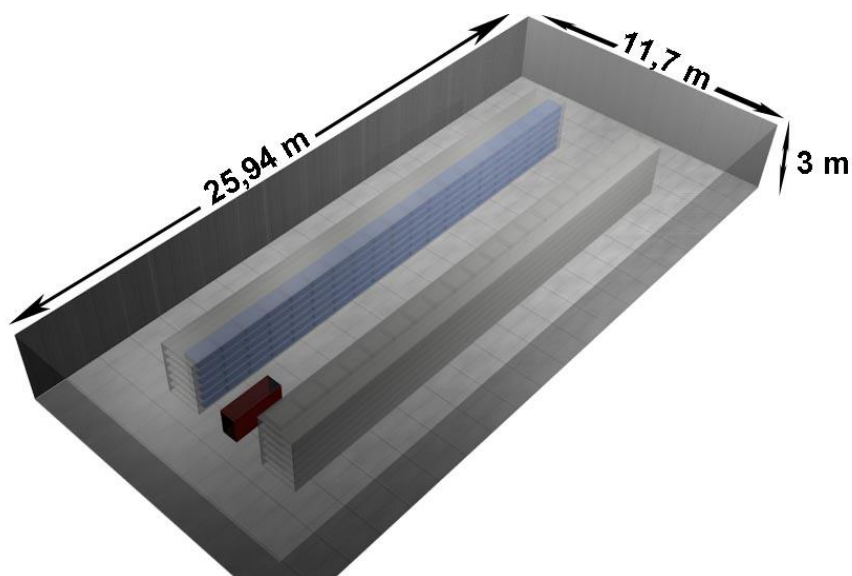


Figura 27 Escenario diseñado con cotas

Para obtener unos resultados de simulación lo más precisos posibles, además de los parámetros de suelo, paredes, carro de la compra y estanterías, dichas estanterías se rellenaron con elementos cuyo material es cristal (conductividad = 0.11 S/m y $\epsilon = 6.06$ F/m) y metal (conductividad = $37.8 \cdot 10^6$ y $\epsilon = 4.5$ F/m) respectivamente.

3.3. Resultados Obtenidos

Se realizaron dos tipos de estudios diferentes, uno tratando de simular una red de sensores WSN y el otro con el objetivo de estudiar la propagación radioeléctrica en un entorno comercial, situando la antena transmisora en un carro de la compra y los elementos receptores en las estanterías del pasillo del centro comercial.

3.3.1. Red Sensores WSN

El primero consistió en simular una red de sensores WSN en la estantería de un pasillo de un centro comercial, se establecieron dos configuraciones diferentes, la primera de ellas colocando los sensores en línea recta y la segunda colocando los sensores en Zigzag.

Se realizaron una serie de simulaciones teniendo en cuenta todas las características del escenario real, para conseguir unos resultados lo más reales posibles. Estos resultados obtenidos se contrastaron con las mediciones reales hechas in situ en el centro comercial.

Este tipo de sensores actúa como transmisores y receptores, es decir, la comunicación se realiza de un sensor a otro.

Estos sensores transmiten con una potencia de 0 dBm y las antenas tienen una ganancia de 5 dBi.

3.3.1.1. Configuración en línea recta

La primera configuración consistió en colocar los sensores en línea recta, es decir, uno detrás del otro, con un total de 8 sensores, todos ellos a la altura de 1.8 metros del suelo.

La estantería donde se colocaron los sensores contenía conservas metálicas envueltas en estuches de cartón.



Figura 28 Configuración de los sensores en línea recta

Con más detalle se aprecia en la siguiente figura la colocación de uno de los sensores:



Figura 29 Detalle de uno de los sensores

Con los resultados obtenidos en las simulaciones se crearon una serie de radiales de potencia, de manera que se pudiera contrastar de forma visual las similitudes o no de los resultados de las simulaciones con los de las medidas reales.

A continuación se muestra el escenario simulado:

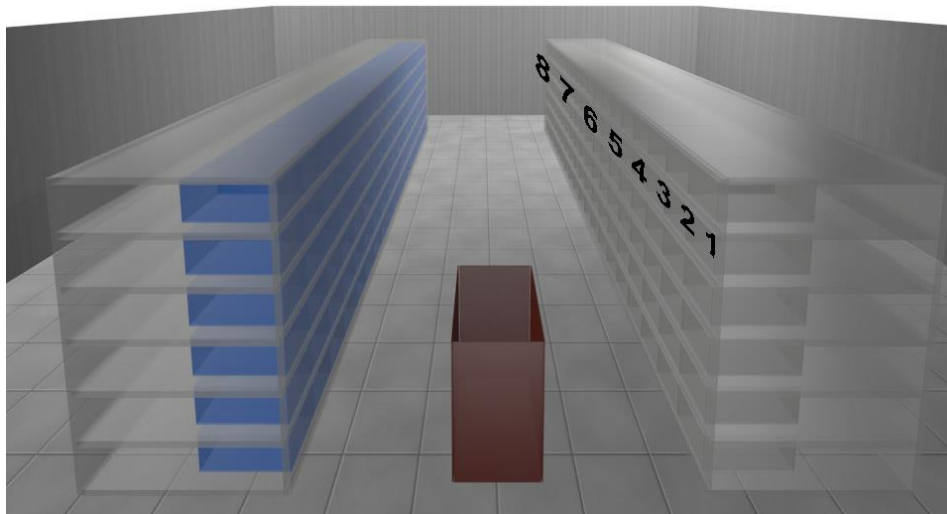


Figura 30 Escenario simulado con los sensores en línea recta

Los resultados obtenidos fueron:

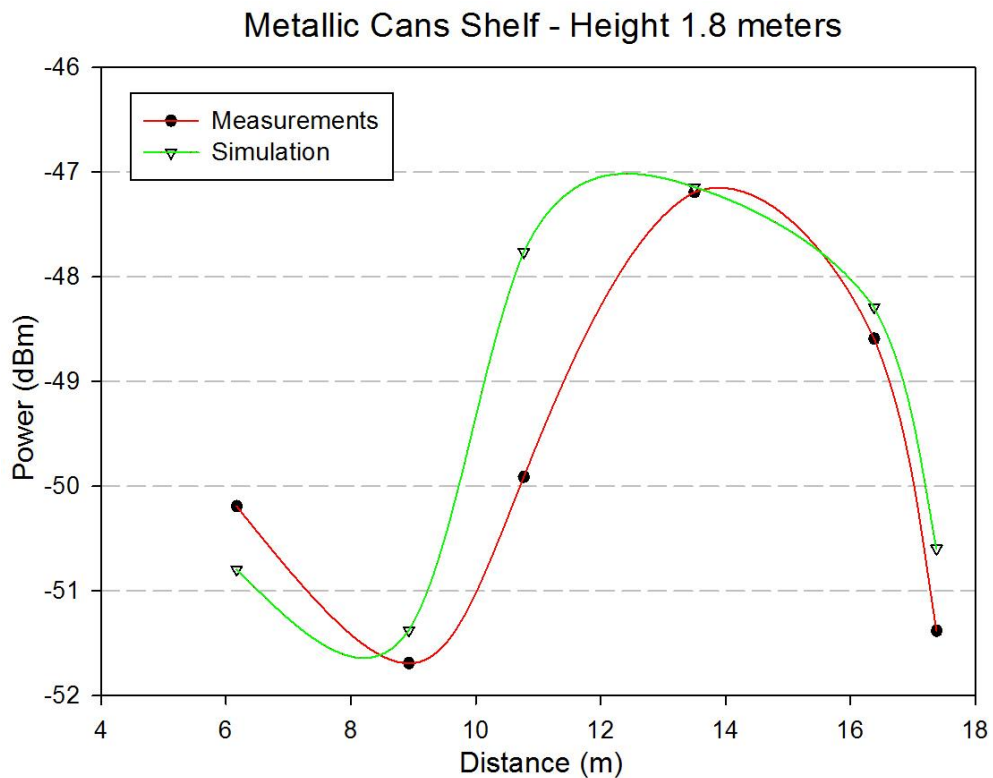


Figura 31 Comparación de los resultados obtenidos en la simulación con las mediciones reales

Se puede afirmar que la similitud es muy alta, ya que si nos fijamos en la escala de la potencia en dbm, la diferencia entre los datos reales y los simulados no dista nunca más de un 1dbm de potencia, lo cual confirma y corrobora que los resultados de las simulaciones son buenos, y que tanto el diseño del escenario como su composición es correcta.

3.1.1.2. Configuración en Zigzag

En la segunda variante de estudio, se optó por la colocación de los sensores en Zigzag, alternando de estantería como se muestra en la siguiente imagen:

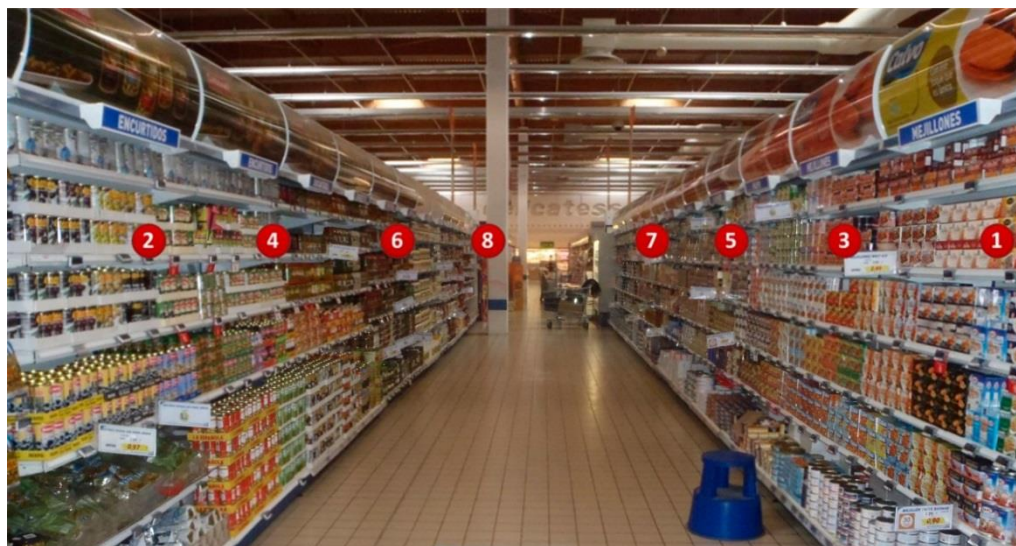


Figura 32 Configuración de los sensores en ZigZag

Las características de los sensores son idénticas al caso anterior. La otra estantería, que en el caso anterior no entraba en juego, ahora sí, estando está ocupada por botes de cristal.

Con esta nueva variante de estudio se consigue introducir nuevos elementos que afectan a la propagación radioeléctrica y, por lo tanto, permiten comprobar si el diseño del escenario y de los elementos que lo componen es el correcto.

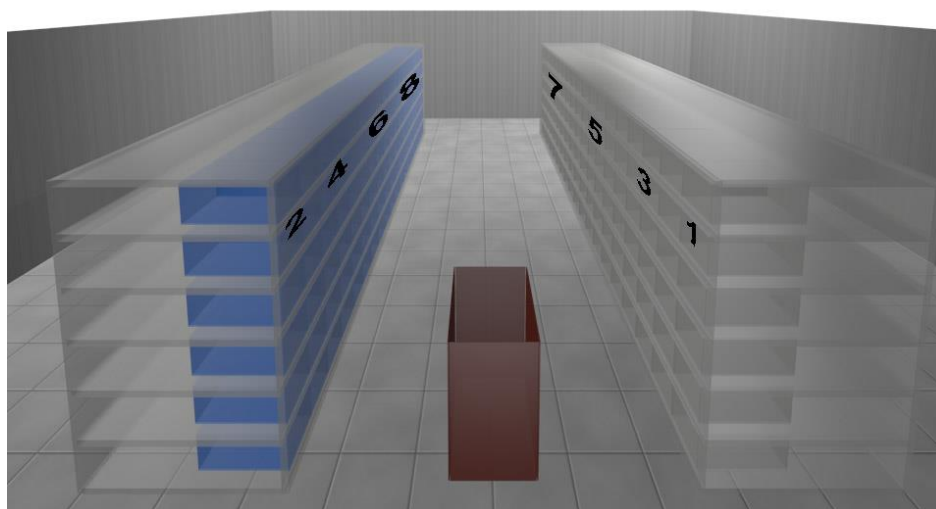


Figura 33 Escenario simulados con los sensores en configuración de Zigzag

Al igual que en el caso anterior, se optó por una representación en radiales de potencia y el resultado se muestra en la siguiente figura:

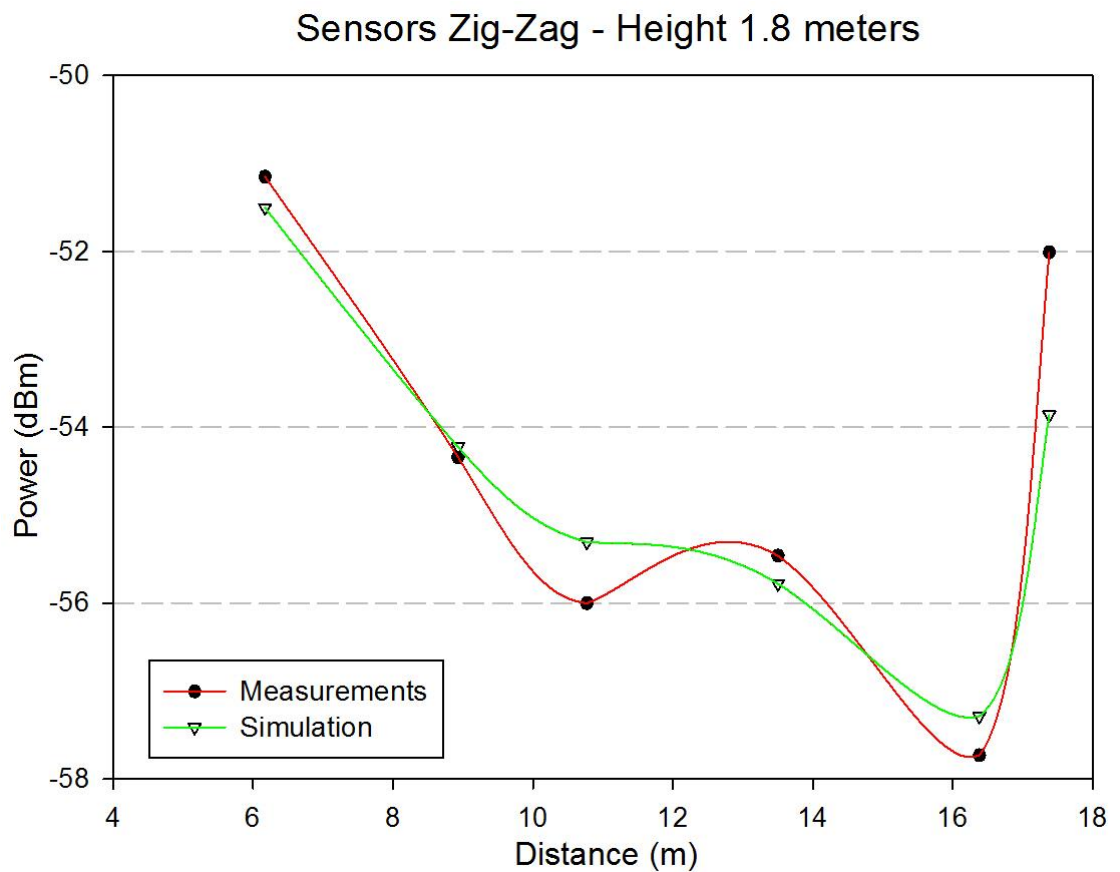


Figura 34 Comparación de los resultados obtenido en la simulación con los resultados de las medidas

Se observa también, en este caso, como las medidas reales corroboran los resultados obtenidos en las simulaciones con un alto nivel de exactitud. Lo cual reafirma el correcto diseño del escenario simulado.

3.3.2. Estudio de propagación radioeléctrico en un ambiente comercial

A continuación se presentan los resultados obtenidos mediante las simulaciones, contrastándolos con las medidas realizadas in situ.

Tanto para las simulaciones como para las medidas, la antena dispone de una ganancia de 5dBi y se coloca en el carro de la compra, a una altura de 0.4m.

Esta antena transmisora se alimenta con un generador de señal, configurado para transmitir una señal a 2.4 GHz con una potencia de -10dBm. Los valores de potencia recibida fueron medidos en los puntos rojos numerados que aparecen en la Figura 35. Estas medidas fueron tomadas a dos alturas diferentes (0.6m y 1.8m) con una antena igual a la transmisora. Todas las medidas fueron realizadas sin la presencia de personas.

Estas medidas serán las usadas para validar los resultados obtenidos mediante las simulaciones.

El escenario simulado (Figura 36) se diseñó teniendo en cuenta las dimensiones y las características del escenario real.

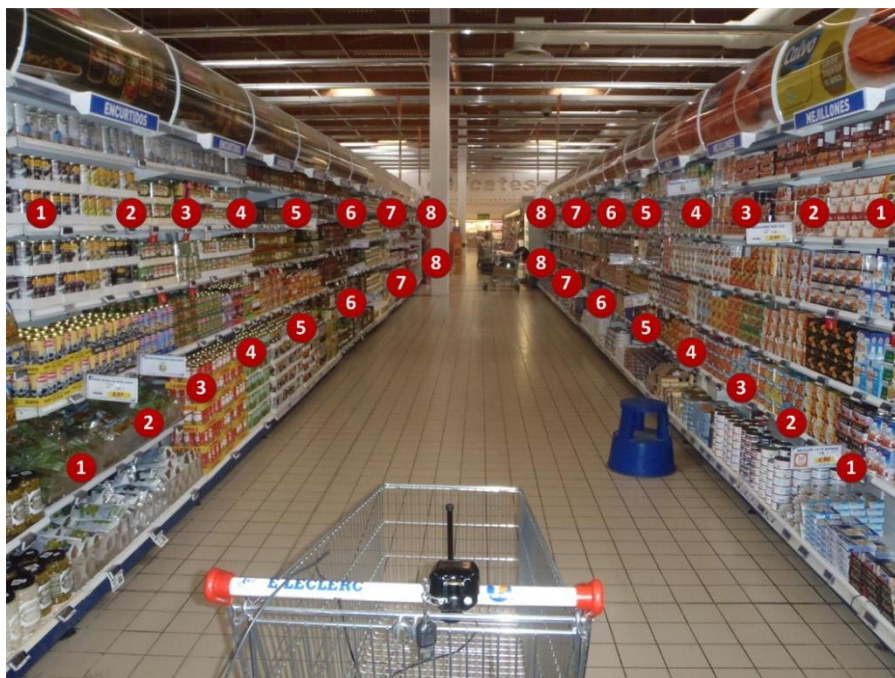


Figura 35. Colocación de los sensores para el estudio de propagación

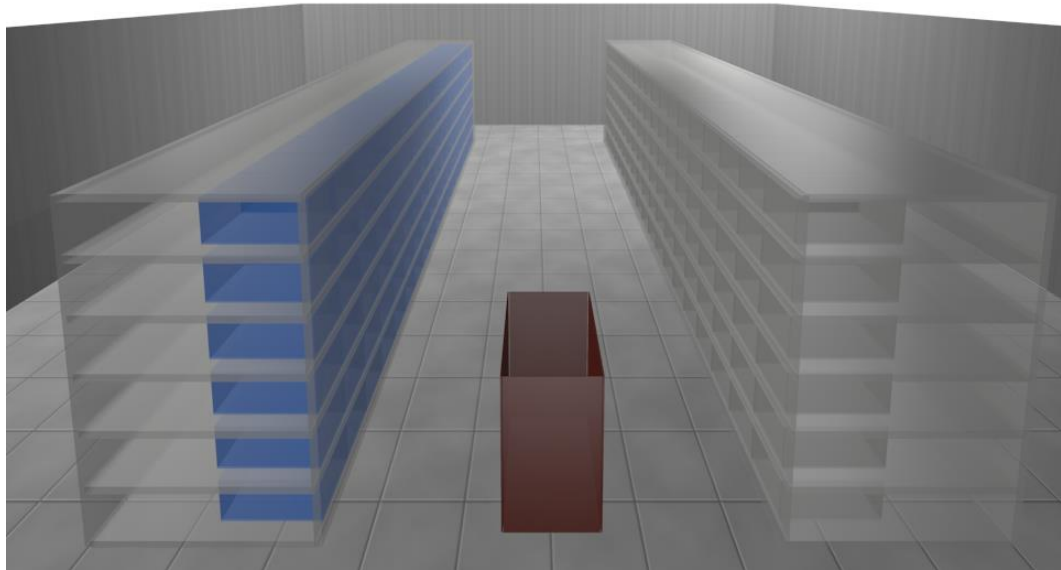


Figura 36 Escenario simulado

3.3.2.1. Planos de Potencia recibida

La primera fase de este estudio consistió en la creación de planos de potencia recibida a las alturas de 0.6 m y 1.8 m con los datos obtenidos en las simulaciones.

Estos planos de potencia recibida ofrecen información relevante de la propagación radioeléctrica en el escenario. También permiten identificar obstáculos que dificultan la propagación.

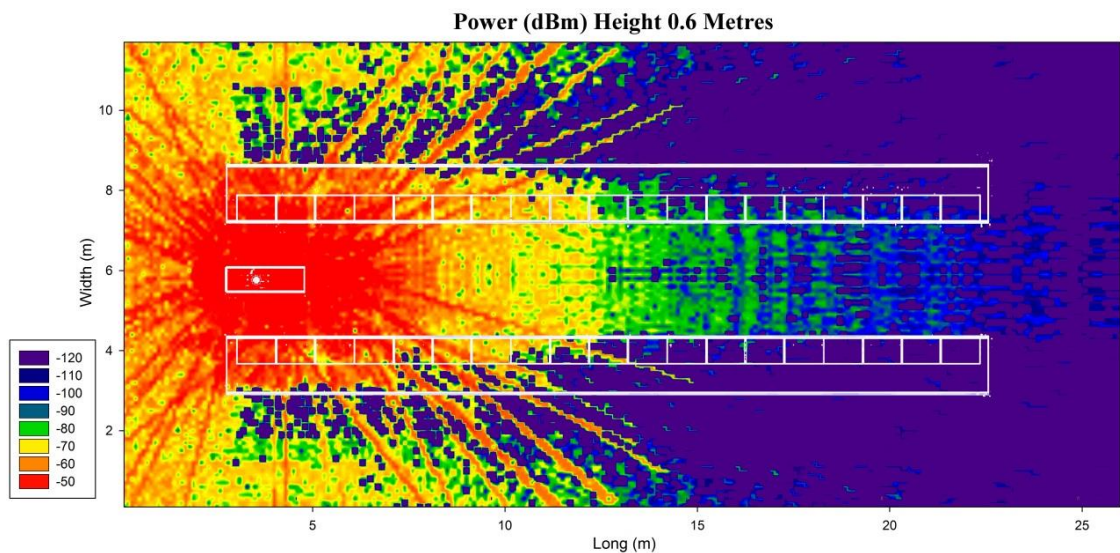


Figura 37 Plano de potencia recibida a 0.6 metros

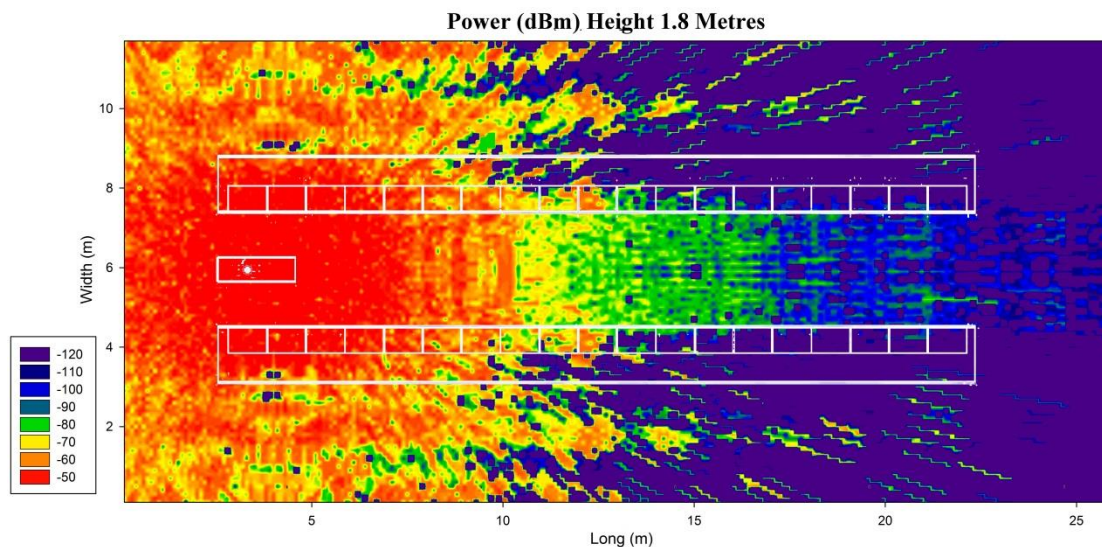


Figura 38 Plano de potencia recibida a 1.8 metros

En la Figura 37 y en la Figura 38, se muestran los resultados estimados de potencia recibida para el plano a la altura 0.6 m y 1.8m respectivamente.

Se observa, cómo las estanterías afectan a la propagación, recibándose menor potencia detrás de ellas. Por otro lado, la potencia recibida a medida que aumenta la distancia con respecto a la antena transmisora, también es menor.

Como se ha dicho anteriormente estos planos ofrecen una información muy visual, permitiendo contemplar la caída del nivel de señal de potencia de forma sencilla. Pero, ya que, el objetivo es contrastar las simulaciones con las mediciones reales, y estos planos no nos permiten realizar tal comprobación, se confecciono una serie de radiales que si lo permiten.

3.3.2.2. Radiales de potencia

El pasillo está formado por dos estanterías separadas, las cuales contienen productos diferentes. El estudio consistió en analizar la potencia recibida en cada una de ellas a diferentes alturas (0.6 m y 1.8 m), por ello los resultados que se van a mostrar están identificados por estantería y por altura.

Se puede observar en la siguiente figura tal identificación:



Figura 39 Estantería de botes de cristal y estantería de latas metálicas

Para dichas simulaciones se tomaron diferentes tamaños de cuboides, el tamaño del cuboide tiene relación con la resolución del escenario. Cuanto más pequeño es el tamaño de este cubo mayor resolución tenemos, y por tanto, mayor nivel de precisión.

A continuación se muestra los resultados de las simulaciones:

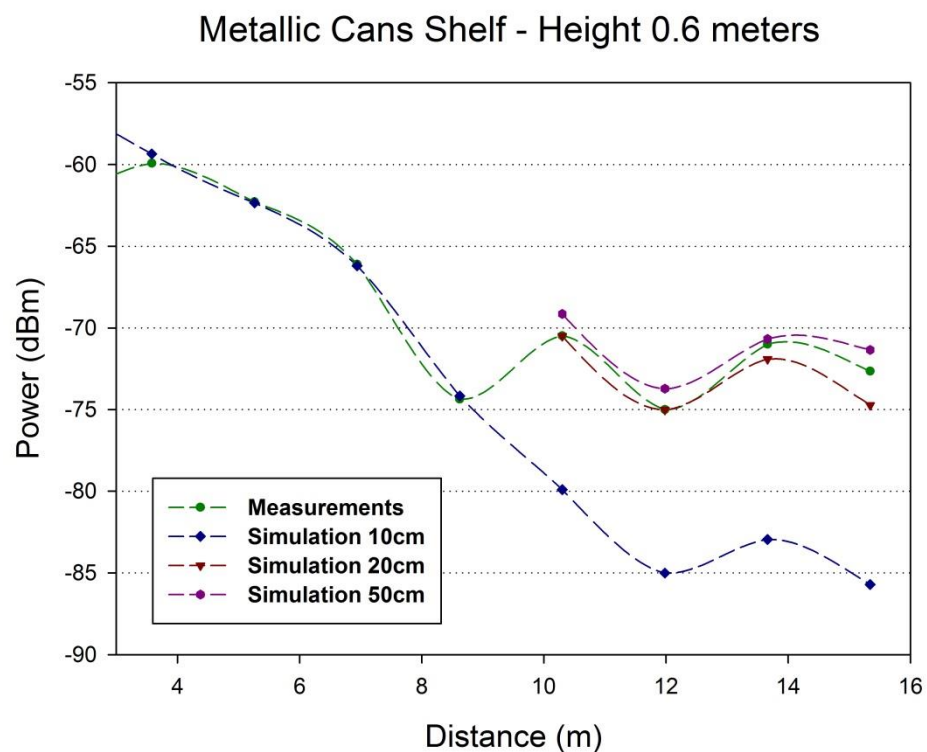


Figura 40 Resultados obtenidos en las simulaciones con tamaños de cuboides de 10cm, 20cm y 50 cm a una altura de 0.6 metros en la estantería que contiene latas de metal

Esta primera figura, hace referencia al nivel de potencia recibido a 0.6 metros en la estantería que contiene latas metálicas. Contiene los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas con cuboides de 10 cm, 20 cm y 50 cm, además, de los resultados de las mediciones.

Metallic Cans Shelf - Height 1.8 meters

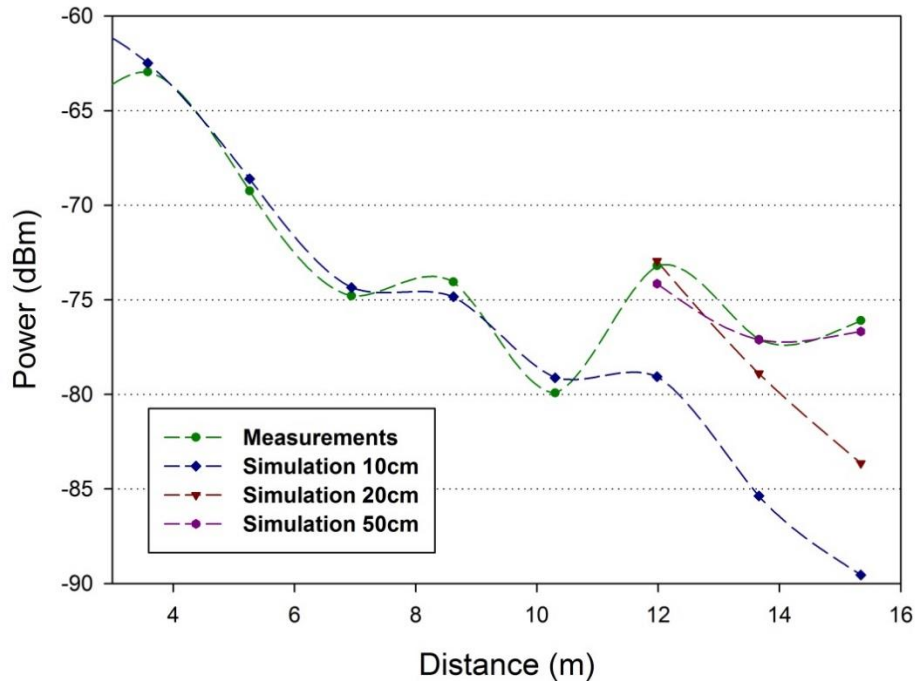


Figura 41 Resultados obtenidos en las simulaciones con tamaños de cuboides de 10cm, 20cm y 50 cm a una altura de 1.8 metros en la estantería que contiene latas de metal

Esta figura hace referencia al nivel de potencia recibido a 1.8 metros en la estantería que contiene latas metálicas

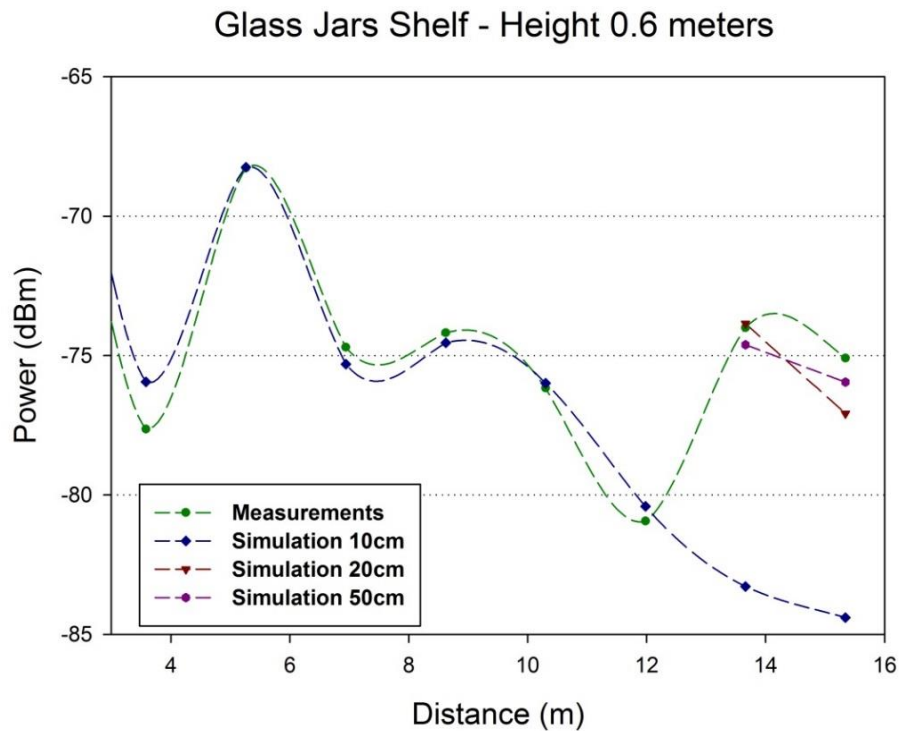


Figura 42 Resultados obtenidos en las simulaciones con tamaños de cuboides de 10cm, 20cm y 50 cm a una altura de 0.6 metros en la estantería que contiene botes de cristal

Esta figura hace referencia al nivel de potencia recibido a 0.6 metros en la estantería que contiene botes de cristal

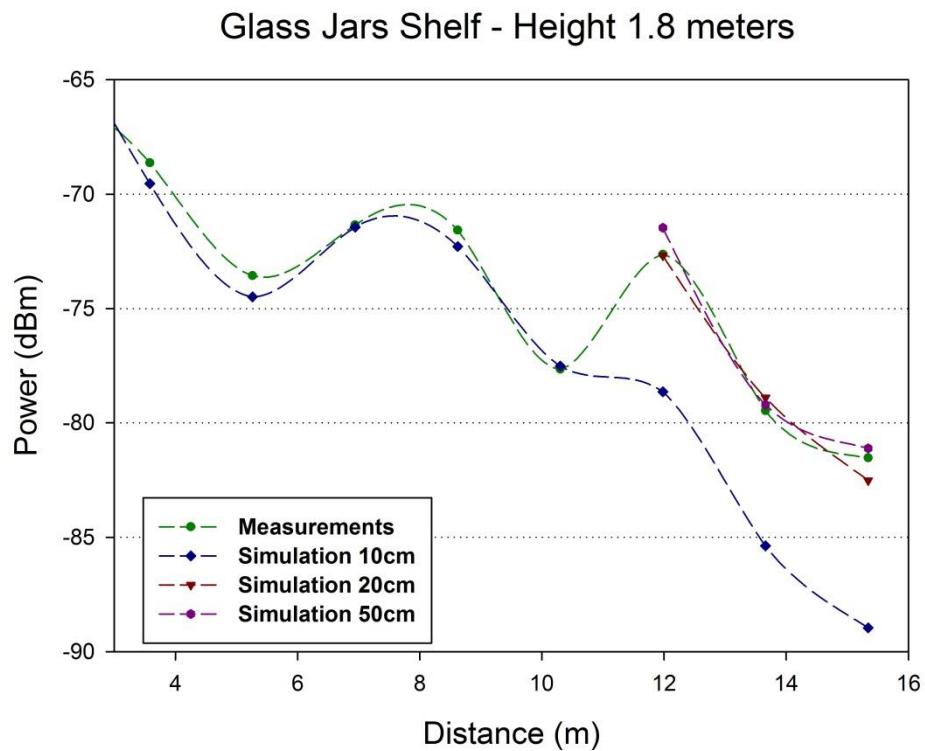


Figura 43 Resultados obtenidos en las simulaciones con tamaños de cuboides de 10cm, 20cm y 50 cm a una altura de 1.8 metros en la estantería que contiene botes de cristal

Esta figura hace referencia al nivel de potencia recibido a 1.8 metros en la estantería que contiene botes de cristal.

Se ha podido observar, en todas las figuras, como la simulación implementada con cuboides de 10 cm representaba con exactitud los valores de las mediciones reales, hasta una distancia de unos 10-12 metros. A partir de dicha distancia, los resultados obtenidos con esta simulación son totalmente dispares al resto de las simulaciones y de las mediciones reales. Este fenómeno se conoce como divergencia de código.

Hablamos de divergencia de código, cuando se utiliza la aproximación por lanzamiento de rayos en escenarios grandes, como es el que se presenta en este trabajo. Este fenómeno está relacionado con la resolución angular con la que se lanzan los rayos y con la resolución del escenario, es decir, con el tamaño de los cuboides en los que se ha dividido el volumen del escenario. Cuando el tamaño de los cuboides es pequeño y la distancia suficientemente grande, aparecen errores debido a que no se reciben rayos (debido a que los rayos se lanzan con una resolución angular fijada previamente). En este escenario en particular, existe divergencia a partir de, aproximadamente, 11 metros.

Por lo tanto se ha optado por realizar las simulaciones con un tamaño de cuboide de 10 cm x 10 cm x 10 cm, hasta una distancia de 10-12 metros y a partir de esta distancia, realizar una nueva simulación, con un tamaño de cuboide de 50cm x 50cm x 50cm.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

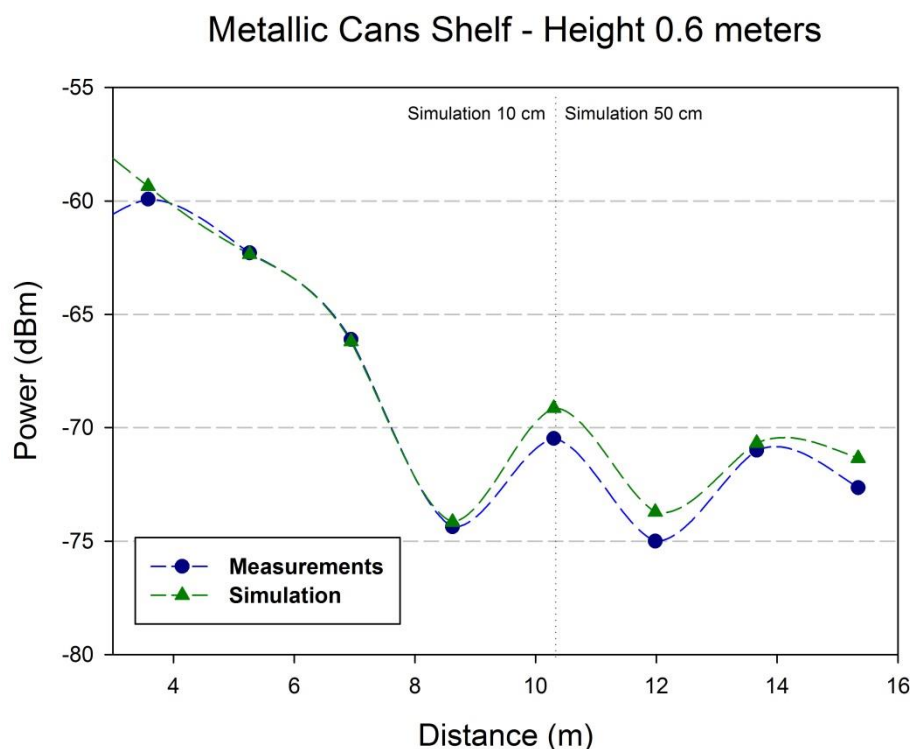


Figura 44 Resultado obtenido en la simulación contrastado con las mediciones reales, a una altura de 0.6 metros en la estantería que contiene latas metálicas

Se puede observar que para la altura de 0.6 m en la estantería formada por latas metálicas los resultados de las simulaciones son análogos a los obtenidos en las mediciones reales.

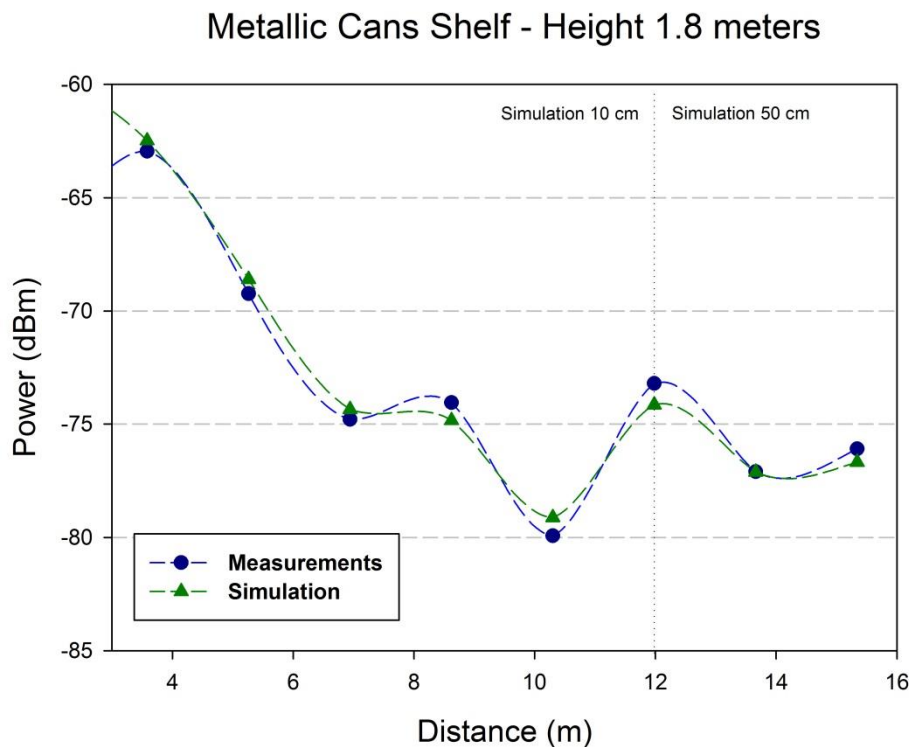


Figura 45 Resultado obtenido en la simulación contrastado con las mediciones reales, a una altura de 1.8 metros en la estantería que contiene latas metálicas

Se puede observar también, que para la altura de 1.8 m, en la estantería formada por latas metálicas, los resultados de las simulaciones son similares a los obtenidos en las mediciones reales. Además, se puede observar que la potencia es levemente inferior a la obtenida para 0.6 metros.

Glass Jars Shelf - Height 0.6 meters

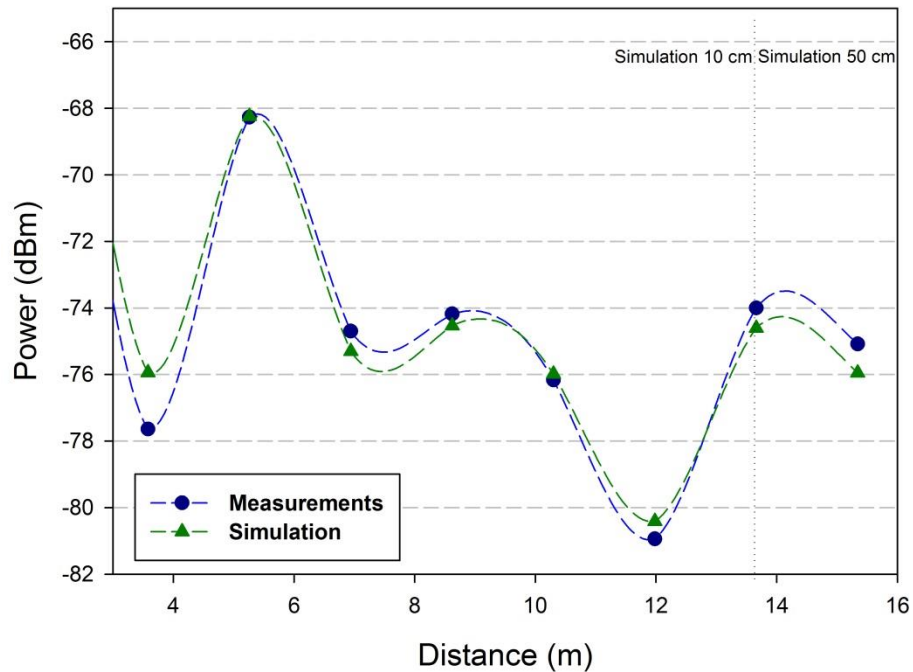


Figura 46 Resultado obtenido en la simulación contrastado con las mediciones reales, a una altura de 0.6 metros en la estantería que contiene latas metálicas

En este caso en la estantería de botes de cristal a 0.6 metros de altura, se observa que existe también gran similitud entre los datos obtenidos mediante las simulaciones y las medidas reales.

Glass Jars Shelf - Height 1.8 meters

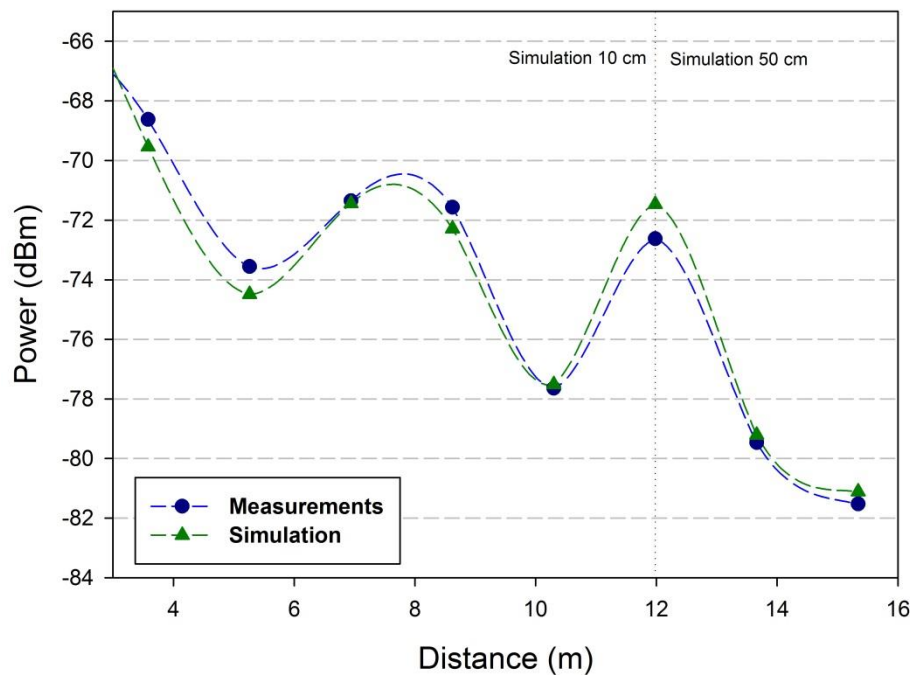


Figura 47 Resultado obtenido en la simulación contrastado con las mediciones reales, a una altura de 1.8 metros en la estantería que contiene botes de cristal

Se puede observar que para la altura de 1.8 m, en la estantería formada por botes de cristal, los resultados de las simulaciones son análogos a los obtenidos en las mediciones reales.

Con estos resultados obtenidos se ha demostrado la viabilidad del uso del método de simulación para este tipo de escenarios sin la presencia de personas. Pero debido a que lo habitual será que exista una cantidad variable de personas en el escenario, a continuación, se presentan resultados de simulación incluyendo personas. Aunque no se dispone de medidas realizadas con presencia de personas, el método de lanzamiento de rayos 3D, presentado en este trabajo, ya ha sido validado previamente en escenarios en los que es necesario tener en cuenta la interacción entre la señal radiada y el cuerpo humano [11]

3.3.2.3. Escenario con personas

En la siguiente figura se muestra el esquema del escenario de simulación con 10 personas adultas, distribuidas aleatoriamente en el pasillo, y una persona más junto al carro, emulando estar empujándolo. Los parámetros de la simulación son los mismos utilizados previamente y que se muestran en la Tabla I.

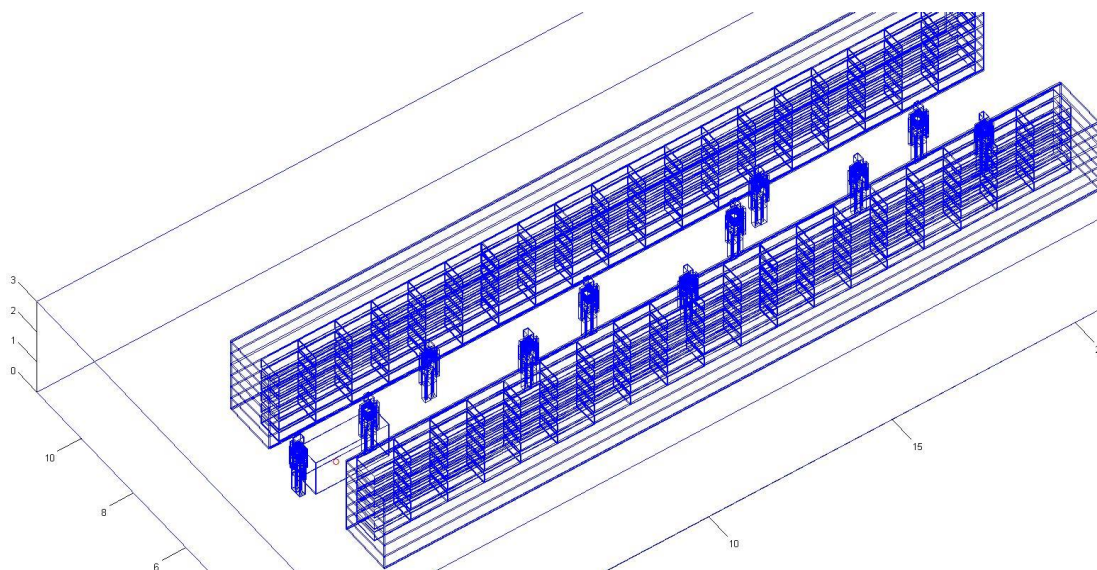


Figura 48 Escenario diseñado con personas

A continuación, se muestran los resultados de las simulaciones con personas junto a los resultados de las anteriores simulaciones, y a las mediciones reales.

Metallic Jars Shelf - Height 0.6 meters

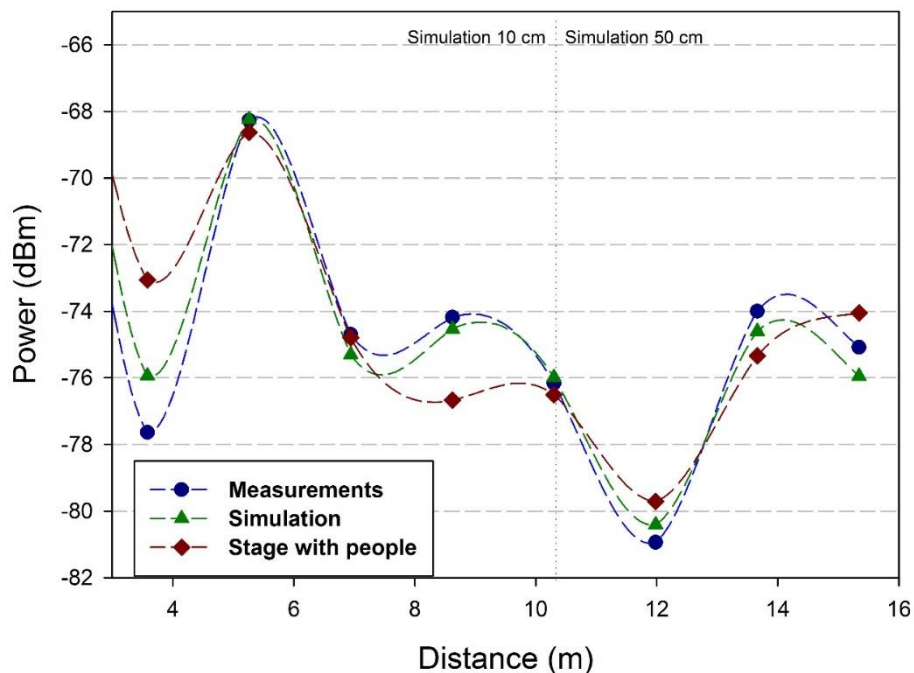


Figura 49 Resultados obtenidos en la simulación con y sin personas a la altura de 0.6 metros en la estantería que contiene latas metálicas

Metallic Cans Shelf - Height 1.8 meters

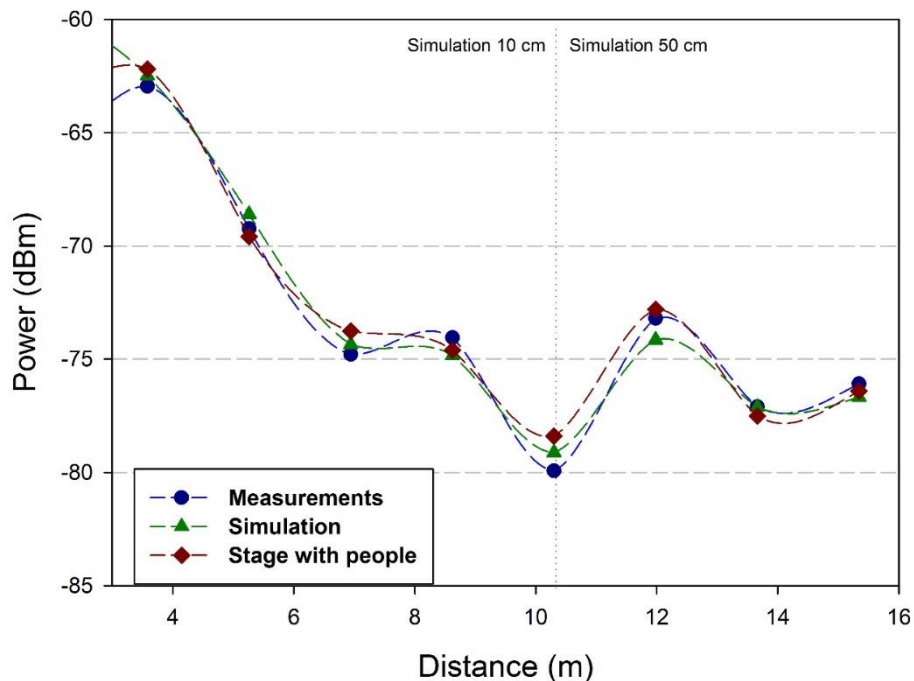


Figura 50 Resultados obtenidos en la simulación con y sin personas a la altura de 1.8 metros en la estantería que contiene latas metálicas

Metallic Cans Shelf - Height 0.6 meters

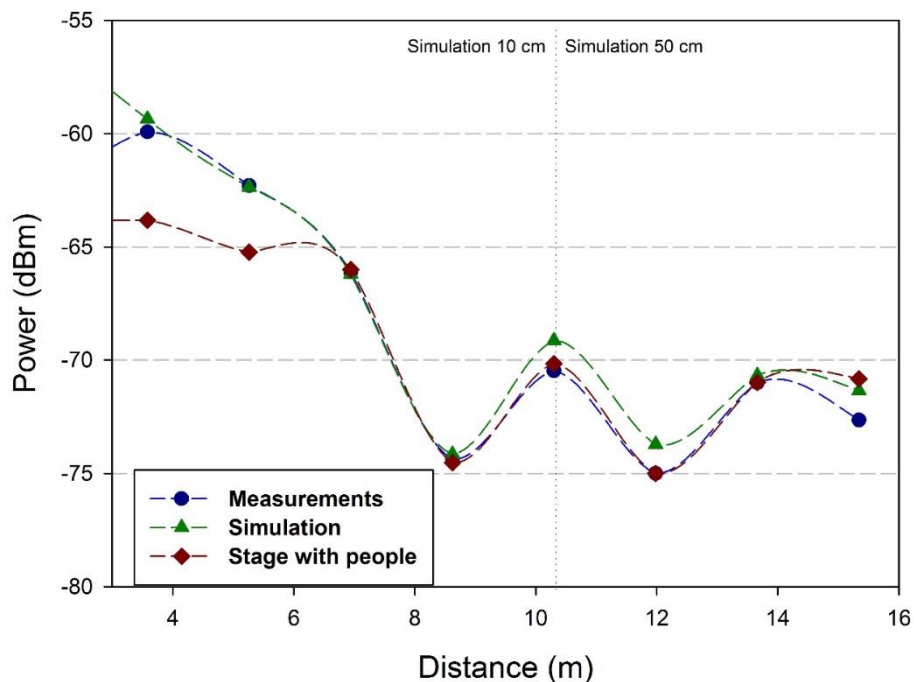


Figura 51 Resultados obtenidos en la simulación con y sin personas a la altura de 0.6 metros en la estantería que contiene botes de cristal

Metallic Jars Shelf - Height 1.8 meters

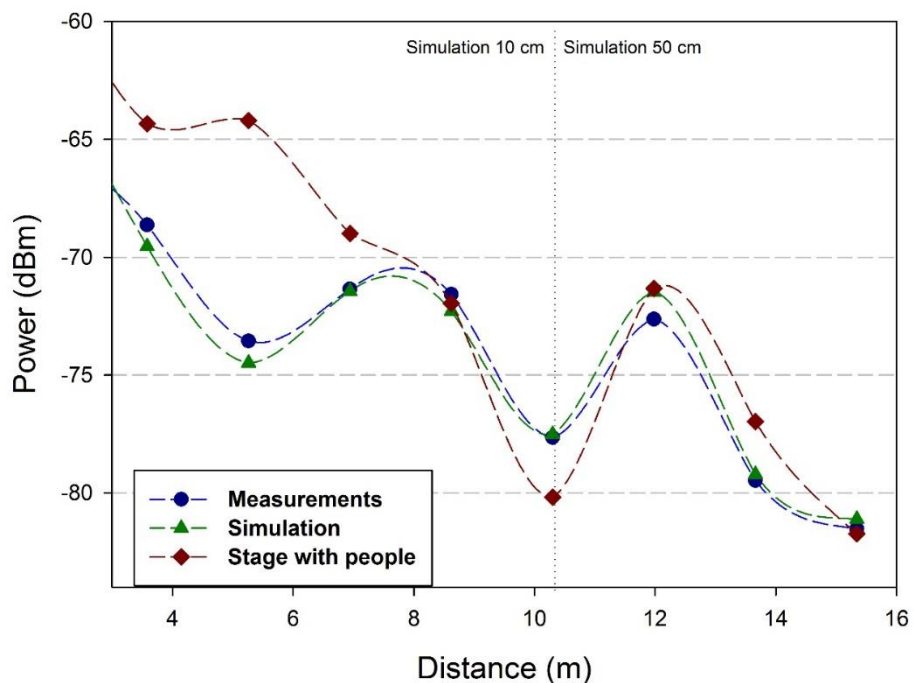


Figura 52 Resultados obtenidos en la simulación con y sin personas a la altura de 1.8 metros en la estantería que contiene botes de cristal

Los resultados representados, tanto de las simulaciones con personas como sin personas, muestran que la presencia de personas afecta a la propagación de la señal en el escenario, como era esperable

Este impacto a simple vista no es muy significativo. Para una mejor percepción del mismo, en la Figura 53, se muestran los resultados en los puntos de medida previamente definidos, para la estantería con botes de cristal a 0.6 m de altura.

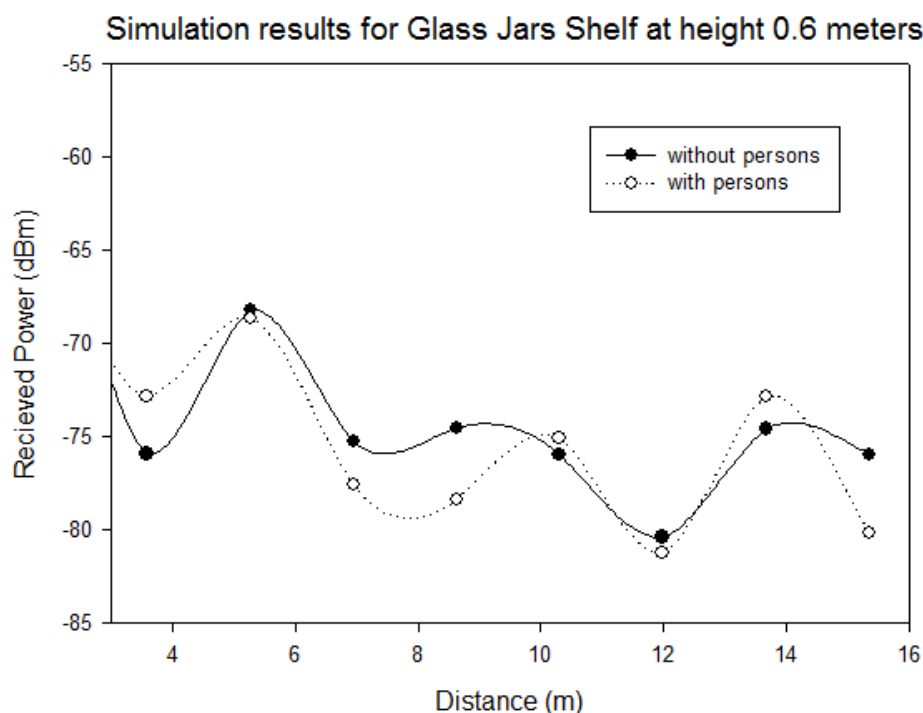


Figura 53 Diferencia entre los resultados obtenidos con y sin personas a la altura de 0.6 metros para la estantería que contiene botes de cristal

Como puede observarse, la diferencia con y sin personas no es muy significativa, pero es suficientemente como para tenerla en cuenta a la hora de planificar el despliegue de una red inalámbrica en el escenario.

Para poder observar el impacto de la presencia de personas en el escenario, en las Figuras 54 y 55, se muestran los planos a una altura de 1.2 m, sin personas y con personas respectivamente.

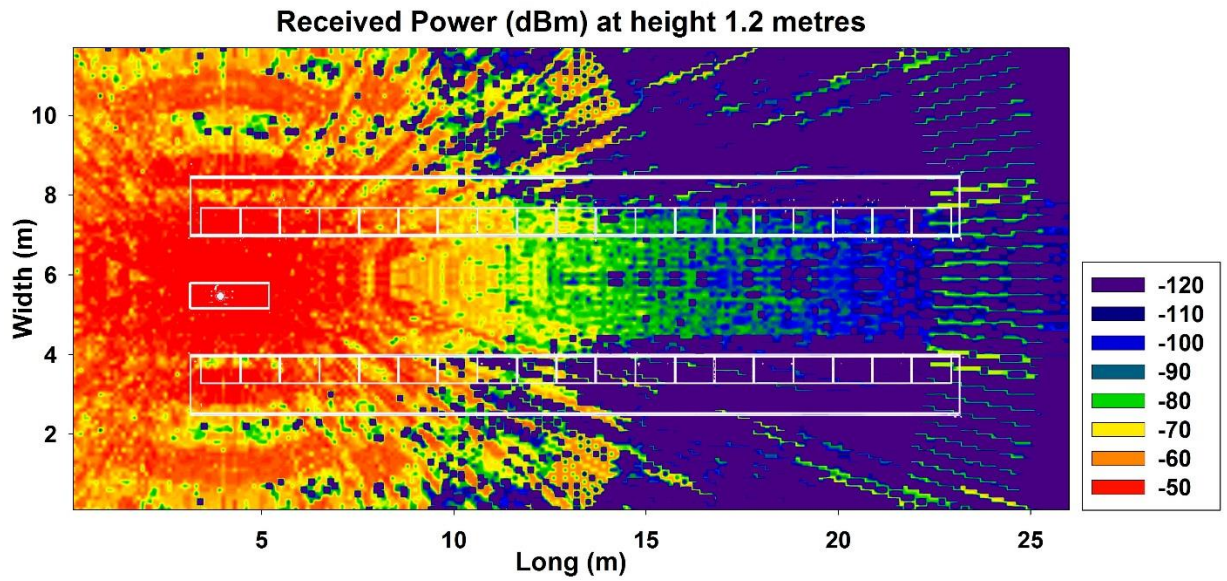


Figura 54 Plano de potencia recibida a 1.2 metros de suelo sin personas

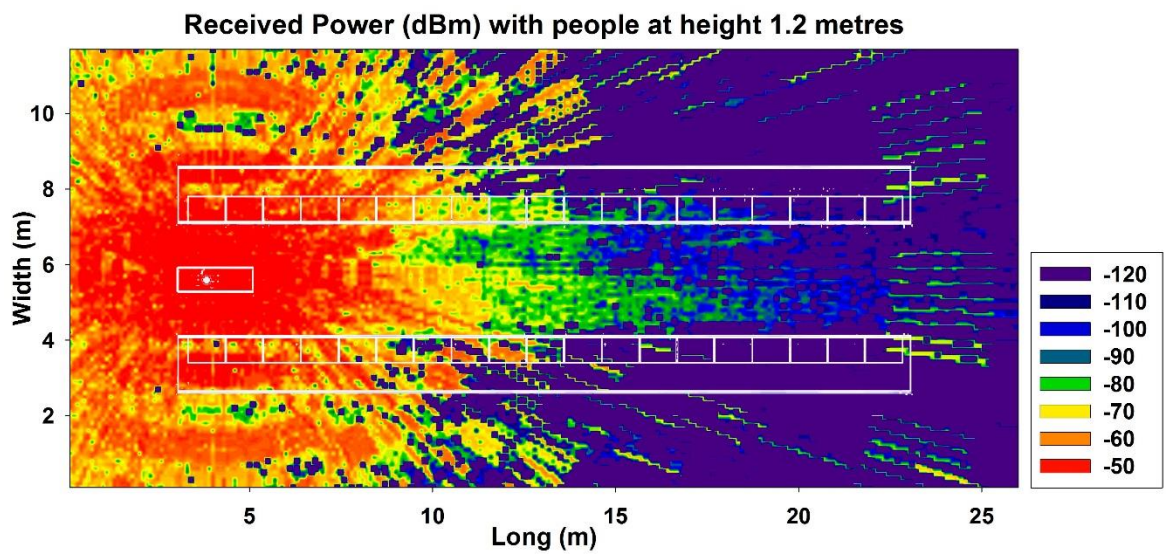


Figura 55 Plano de potencia recibida a 1.2 metros de suelo con personas

4. Conclusiones

En este trabajo se ha realizado la caracterización radioeléctrica de un pasillo convencional de una gran superficie comercial para la banda frecuencial ISM de 2.4 GHz, con el objetivo de estudiar la posibilidad de implantación de una red inalámbrica basada en el estándar IEEE 802.15.4.

Esta caracterización se ha llevado a cabo tanto de forma teórico mediante simulaciones, como de forma práctica mediante la realización de medidas en un escenario real.

Los resultados de simulación han sido obtenidos por medio de un software de lanzado de rayos 3D implementado en la Universidad Pública de Navarra, el cual proporciona estimaciones precisas de potencia recibida en cualquier punto del escenario, como se ha podido observar al comparar los resultados de simulación con medidas experimentales (error medio 0.13dB).

Los resultados de este estudio muestran también la fuerte dependencia de la radiopropagación a 2.4 GHz con respecto a la morfología, tamaño y características de este tipo de escenarios, donde la propagación multitrayecto es el fenómeno más significativo.

Por tanto, el método aquí presentado proporciona una valiosa herramienta para optimizar el despliegue de redes de dispositivos inalámbricos en superficies comerciales, con la reducción de coste que ello conlleva.

5. Líneas futuras

- Sería interesante poder contrastar los resultados obtenidos en las simulaciones con personas con mediciones reales en un entorno comercial.
- Sería interesante estudiar una posible comunicación entre estanterías contiguas, de manera que las propias estanterías hicieran de repetidores y desde un punto cualquiera se podría tener información de todo el recinto comercial
- Suponiendo que todos los productos estén identificados por una etiqueta de radio frecuencia, con un simple arco de lectura por radiofrecuencia se podría obtener toda la información de los productos que llevamos en el carro sin tener que depositar uno a uno los productos sobre una cinta.
- Sería conveniente analizar el efecto de interferencia en un entorno con múltiples sistemas en funcionamiento (por ejemplo, la interacción con sistemas WLAN/WPAN en el entorno).
- Considerar el efecto del movimiento del carro, así como la posible interacción con el usuario.

6. Bibliografía

- [1] Z. Zhang, Z. Pang, J. Chen, Q. Chen, H. Tenhunen, L. Zheng "Two-Layered Wireless Sensor Networks for Warehouses and Supermarkets"
- [2] R. Chen, L. Peng, Y. Qin "Supermarket Shopping Guide System based on Internet of things"
- [3] L. Zhengshan, W. Hongchao "Research on intelligent supermarket architecture based on The Internet of Things technology"
- [4] W. Ningyuan, Z. Zengwei, C. Jianping, C. Yuanyi, L. Jin "Advertisement and Shopping Guide System for Large Supermarkets Based on Wireless Sensor Network"
- [5] M. Mathankumar, N. Sugandhi "A Low Cost Smart Shopping Facilitator for Visually Impaired"
- [6] Yang Xiao, Yi Pan, "Emerging Wireless LAN's, Wireless PAN's, and Wireless MAN's. IEEE 802.11, IEEE 802.15, IEEE 802.16, Wireless Standard Family," John Wiley & Sons, 2009.
- [7] H. H. Chen, M. Guizani, "Next Generation Wireless Systems and Networks," John Wiley, 2006.
- [8] S. Farahani, "ZigBee Wireless Networks and Transceivers," Newnes Publications, 2008.
- [9] J. A. Nazábal, P. L. Iturri, L. Azpilicueta, F. Falcone, C. Fernández-Valdivielso, "Performance Analysis of IEEE 802.15.4 Compliant Wireless Devices for Heterogeneous Indoor Home Automation Environments," International Journal of Antennas and Propagation, Hindawi Publishing Corporation, Article ID 176383, 2012.
- [10] E. Aguirre, P. L. Iturri, L. Azpilicueta, J. Arpón, F. Falcone, "Characterization and Consideration of Topological Impact of Wireless Propagation in a Commercial Aircraft Environment," to be published in IEEE Antennas and Propagation Magazine.
- [11] E. Aguirre, J. Arpón, L. Azpilicueta, S. de Miguel, V. Ramos, F. Falcone, "Evaluation of Electromagnetic Dosimetry of Wireless Systems in Complex Indoor Scenarios with Human Body Interaction," Progress In Electromagnetics Research B, vol. 43, pp. 189-209, 2012.
- [12] José María Hernando Rábanos, Transmisión por radio, Editorial Universitaria Ramos Areces, 2008
- [13] Curt Levis, Joel T. Johnson, Fernando L. Teixeira, Radiowave Propagation: Physics And Applications, Editorial John Wiley 2010
- [14] Jie Wei, Stephen C.H. Leung, S.C. Lee, Bee Kwok, Simulation of RFID-enabled Loading Strategy for Outbound Logistic: A Case Study in Hong Kong, Computer & Industrial Engineering, 2009
- [15] <http://news.bbc.co.uk/2/hi/8399963.stm>

- [16] <https://docs.google.com/file/d/0ByVakr7F0B3rZGFkZWnkMTYtYmU4YS00ZWViLWI3YTAfYTZlYmM5Y2JiZTQ0/edit?num=50&sort=name&layout=list&pli=1>
- [17] F. Javier Vicente Prieto” Aceptación de Formatos Comerciales Altamente Innovadores”
- [18] <https://lawrencemz.wordpress.com/tag/rfid-supermercados/>
- [19] <http://blog.pucp.edu.pe/item/102486/servicio-de-abastecimiento-en-supermercados>
- [20] <http://www.rfidpoint.com/>
- [21] <http://www.webpicking.com/ps/news.php?n=6307>
- [22] <http://staff.ustc.edu.cn/~ustcsse/papers/SR10.ZigBee.pdf>
- [23] <https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/4987/1/memoria.pdf>
- [24] El Estándar Inalámbrico de ZigBee Universidad Nacional de Trujillo
- [25] http://commons.wikimedia.org/wiki/File:ZigBee_protocol_stack.png
- [26] http://wireless.arcada.fi/MOBWI/material/PAN_5_2.html
- [27] <http://virtual-labs.ac.in/cse28/ant/ant/10/theory/>
- [28] <http://www.whiteboardmedia.com.ar/que-es-rfid-y-para-que-sirve/>
- [29] <http://tecnologiadospuntocero.wordpress.com/2011/04/30/ips-indoor-positioning-system/>
- [30] <http://www.magics-notebook.com/blurtoothforkids.html>
- [31] <http://conserver.cybermirror.org/consoles/BlueConsole/BLTandWLAN.html>
- [32] <http://www.swedetrack.com/images/bluet09.htm>
- [33] <http://www.rfidpoint.com/fundamentos/el-estandar-epc/>
- [34] http://www.advantech.eu/eplatform/applications.aspx?doc_id={DF7A74E4-B09C-4290-B6A9-A6A323FC2BA

Índice de figuras

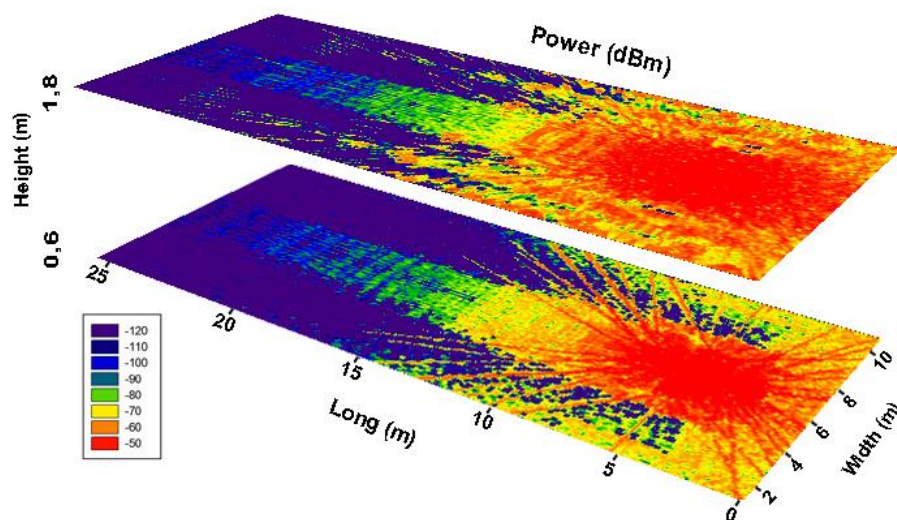
<i>Figura 1</i>	<i>Futuro de los supermercados</i>	7
<i>Figura 2</i>	<i>Ejemplo de aplicación de la tecnologías inalámbricas en un Supermercado</i>	7
<i>Figura 3</i>	<i>Lenovo ThinkStation D20</i>	10
<i>Figura 4</i>	<i>Acer travelmate 5720G</i>	11
<i>Figura 5</i>	<i>Matlab 2009b</i>	12
<i>Figura 6</i>	<i>SigmaPlot 11</i>	12
<i>Figura 7</i>	<i>Pila de protocolos ZigBee [25]</i>	15
<i>Figura 8</i>	<i>Capas que componen el sistema ZigBee [24]</i>	17
<i>Figura 9</i>	<i>Campos de los cuatro tipos de paquetes básicos de ZigBee. [24]</i>	19
<i>Figura 10</i>	<i>Diferentes topologías de red disponibles en ZigBee. [26]</i>	21
<i>Figura 11</i>	<i>Topología en estrella [27]</i>	21
<i>Figura 12</i>	<i>Topología en árbol [27]</i>	23
<i>Figura 13</i>	<i>Topología Peer to Peer [27]</i>	23
<i>Figura 14</i>	<i>Topología en Malla [24]</i>	24
<i>Figura 15</i>	<i>Esquema básico de un sistema RFID [28]</i>	25
<i>Figura 16</i>	<i>Tag RFID [29]</i>	25
<i>Figura 17</i>	<i>Clases Bluetooth [30]</i>	26
<i>Figura 18</i>	<i>Arquitectura Bluetooth [31]</i>	26
<i>Figura 19</i>	<i>Configuraciones Bluetooth [32]</i>	27
<i>Figura 20</i>	<i>Código EPC [33]</i>	28
<i>Figura 21</i>	<i>Cajas de Autopago [34]</i>	29
<i>Figura 22</i>	<i>Carro de compra inteligente [20]</i>	29
<i>Figura 23</i>	<i>Balanza inteligente [20]</i>	30
<i>Figura 24</i>	<i>Estanterías Inteligentes [20]</i>	31
<i>Figura 25</i>	<i>Ejemplo de aplicación de la empresa Hellmann [20]</i>	33
<i>Figura 26</i>	<i>Escenario diseñado en 3D</i>	36
<i>Figura 27</i>	<i>Escenario diseñado con cotas</i>	37
<i>Figura 28</i>	<i>Configuración de los sensores en línea recta</i>	39
<i>Figura 29</i>	<i>Detalle de uno de los sensores</i>	39
<i>Figura 30</i>	<i>Escenario simulado con los sensores en línea recta</i>	40
<i>Figura 31</i>	<i>Comparación de los resultados obtenidos en la simulación con las mediciones reales</i>	40
<hr/>		
<i>Figura 32</i>	<i>Configuración de los sensores en ZigZag</i>	41
<i>Figura 33</i>	<i>Escenario simulados con los sensores en configuración de Zigzag</i>	41
<i>Figura 34</i>	<i>Comparación de los resultados obtenido en la simulación con los resultados de las mediciones</i>	42
<i>Figura 35</i>	<i>Colocación de los sensores para el estudio de propagación</i>	43
<i>Figura 36</i>	<i>Escenario simulado</i>	44
<i>Figura 37</i>	<i>Plano de potencia recibida a 0.6 metros</i>	44
<i>Figura 38</i>	<i>Plano de potencia recibida a 1.8 metros</i>	45
<i>Figura 39</i>	<i>Estantería de botes de cristal y estantería de latas metálicas</i>	46
<i>Figura 40</i>	<i>Resultados obtenidos en las simulaciones con tamaños de cuboides de 10cm, 20cm y 50 cm a una altura de 0.6 metros en la estantería que contiene latas de metal</i>	46
<i>Figura 41</i>	<i>Resultados obtenidos en las simulaciones con tamaños de cuboides de 10cm, 20cm y 50 cm a una altura de 1.8 metros en la estantería que contiene latas de metal</i>	47
<i>Figura 42</i>	<i>Resultados obtenidos en las simulaciones con tamaños de cuboides de 10cm, 20cm y 50 cm a una altura de 0.6 metros en la estantería que contiene botes de cristal</i>	48
<i>Figura 43</i>	<i>Resultados obtenidos en las simulaciones con tamaños de cuboides de 10cm, 20cm y 50 cm a una altura de 1.8 metros en la estantería que contiene botes de cristal</i>	48
<i>Figura 44</i>	<i>Resultado obtenido en la simulación contrastado con las mediciones reales, a una altura de 0.6 metros en la estantería que contiene latas metálicas</i>	49
<i>Figura 45</i>	<i>Resultado obtenido en la simulación contrastado con las mediciones reales, a una altura de 1.8 metros en la estantería que contiene latas metálicas</i>	50

<i>Figura 46 Resultado obtenido en la simulación contrastado con las mediciones reales, a una altura de 0.6 metros en la estantería que contiene latas metálicas.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 47 Resultado obtenido en la simulación contrastado con las mediciones reales, a una altura de 1.8 metros en la estantería que contiene botes de cristal.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 48 Escenario diseñado con personas</i>	<i>52</i>
<i>Figura 49 Resultados obtenidos en la simulación con y sin personas a la altura de 0.6 metros en la estantería que contiene latas metálicas.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 50 Resultados obtenidos en la simulación con y sin personas a la altura de 1.8 metros en la estantería que contiene latas metálicas.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 51 Resultados obtenidos en la simulación con y sin personas a la altura de 0.6 metros en la estantería que contiene botes de cristal</i>	<i>54</i>
<i>Figura 52 Resultados obtenidos en la simulación con y sin personas a la altura de 1.8 metros en la estantería que contiene botes de cristal.....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 53 Diferencia entre los resultados obtenidos con y sin personas a la altura de 0.6 metros para la estantería que contiene botes de cristal</i>	<i>55</i>
<i>Figura 54 Plano de potencia recibida a 1.2 metros de suelo sin personas.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 55 Plano de potencia recibida a 1.2 metros de suelo con personas.....</i>	<i>56</i>

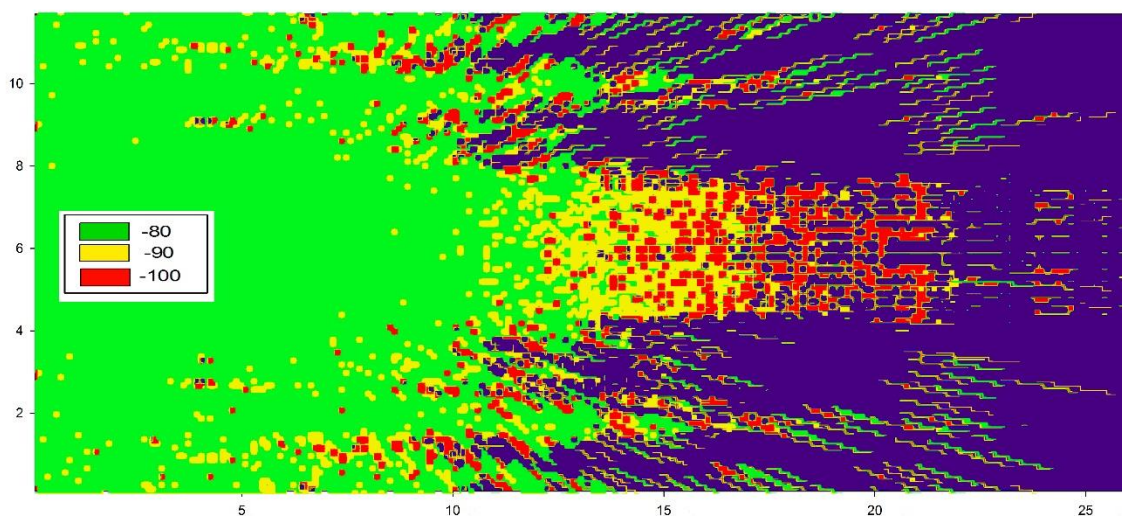
ANEXO 1

Resultados complementarios

A.1.1.Plano de potencia Bidimensional



A.1.2. Plano de Cobertura



ANEXO 2

APS

Los anexos de este documento se han eliminado debido a que contienen información confidencial para satisfacer la ley de protección de datos (LPD). Si desea obtener más información, puede ponerse en contacto con el autor o el tutor de este documento.

CONFIDENCIAL

ANEXO 3

URSI

Los anexos de este documento se han eliminado debido a que contienen información confidencial para satisfacer la ley de protección de datos (LPD). Si desea obtener más información, puede ponerse en contacto con el autor o el tutor de este documento.

CONFIDENCIAL