Universidad de Granada

ESTUDIOS DE INGENIERÍA
DE TELECOMUNICACIÓN

PROYECTO FIN DE CARRERA

IMPLEMENTACIÓN EN MATLAB DE UNA HERRAMIENTA DE PLANIFICACIÓN WI-FI PARA ENTORNOS DE INTERIOR

CURSO 2013/2014

Daniel Escudero Brocal

El tribunal constituido para la evaluación del proyecto PFC titulado:

Implementación en MATLAB de una herramienta de planificación Wi-Fi para entornos de interior

Realizado por el alumno: **Daniel Escudero Brocal**
Y dirigido por el tutor: **Jorge Navarro Ortiz**

Ha resuelto asignarle la calificación de:

- ☐ SOBRESALIENTE (9 - 10 puntos)
- ☐ NOTABLE (7 - 8.9 puntos)
- ☐ APROBADO (5 - 6.9 puntos)
- ☐ SUSPENSO

Con la nota: puntos.

El Presidente:

El Secretario:

El Vocal:

Granada, a de de 2014

Universidad de Granada

ESTUDIOS DE INGENIERIA DE TELECOMUNICACIÓN

Implementación en MATLAB de una herramienta de planificación Wi-Fi para entornos de interior

REALIZADO POR:
Daniel Escudero Brocal

DIRIGIDO POR:
Jorge Navarro Ortiz

DEPARTAMENTO:
Teoría de la Señal, Telemática y Comunicaciones.

Granada, Septiembre de 2014.

IMPLEMENTACIÓN EN MATLAB DE UNA HERRAMIENTA DE PLANIFICACIÓN WI-FI PARA ENTORNOS DE INTERIOR

Daniel Escudero Brocal

PALABRAS CLAVE:

Planificación de redes, Modelos de propagación, Wi-Fi, Punto de Acceso, atenuación.

RESUMEN:

Encuestas recientes han revelado que alrededor del cincuenta por ciento de las redes Wi-Fi instaladas en empresas poseen más de diez puntos de acceso. Este aumento en la complejidad de las redes hace necesaria una planificación eficiente de las mismas.

Este proyecto propone el desarrollo e implementación de una herramienta de planificación con la que se pueda predecir el comportamiento de una red Wi-Fi antes de su implantación. La simulación del escenario tendrá en cuenta las características físicas del edificio y de los materiales que lo componen, así como la ubicación, orientación y configuración de los Puntos de Acceso que conformen la red. La herramienta proporcionará mapas y medidas de parámetros tales como nivel de potencia de señal recibida, nivel de interferencia o velocidad de transmisión de datos.

Para su desarrollo, se ha escogido el entorno de programación MATLAB debido a su gran potencia de cálculo y a la posibilidad de crear una herramienta totalmente gráfica que facilite su uso.

IMPLEMENTACIÓN EN MATLAB DE UNA HERRAMIENTA DE PLANIFICACIÓN WI-FI PARA ENTORNOS DE INTERIOR

Daniel Escudero Brocal

KEYWORDS:

Network planning, propagation models, Wi-Fi, Access Point, attenuation.

ABSTRACT:

Recent surveys have revealed that about fifty percent of the Wi-Fi networks deployed in businesses have more than ten access points. This increase in the network complexity makes necessary an efficient network planning.

This project proposes the development and implementation of a planning tool to predict the behavior of a Wi-Fi network before its implementation. The simulation scenario takes into account the physical characteristics of the building and its materials, and the location, orientation and configuration of the Access Points that constitute the network. The tool will provide maps and performance indicators such as power level of received signal, interference level or data rate.

For its development, we have chosen the MATLAB programming environment due to its high computational power and the ability to create a graphical tool that facilitates its use.

D. Jorge Navarro Ortiz, profesor del Departamento de Teoría de la Señal, Telemática y Comunicaciones de la Universidad de Granada, como director del Proyecto Fin de Carrera de D. Daniel Escudero Brocal

Informa:

que el presente trabajo, titulado:

Implementación en MATLAB de una herramienta de planificación Wi-Fi para entornos de interior

Ha sido realizado y redactado por el mencionado alumno bajo mí dirección, y con esta fecha se autoriza a su presentación.

Granada, a de de 2014

Fdo. Jorge Navarro Ortiz

Los abajo firmantes autorizan a que la presente copia de Proyecto Fin de Carrera se ubique en la Biblioteca del Centro y/o departamento para ser libremente consultada por las personas que lo deseen.

Granada, a de de 2014

Fdo. Jorge Navarro Ortiz

Fdo. Daniel Escudero Brocal

Agradecimientos

De la experiencia vivida en estos últimos meses he de rescatar una conclusión, quizás no se debería hablar de *proyecto fin de carrera*, sino de *proyecto inicio de maratón*, ya que es la antesala a una carrera aún más larga e importante: el desempeño de nuestra vida profesional.

Quiero agradecer enormemente a mi tutor, Jorge Navarro Ortiz, la paciencia y comprensión demostrada durante la realización del proyecto. Gracias por esperarme cuando lo necesitaba y por esprintar cuando más necesario era aún.

Muchas gracias a todas las personas que han sido, son y serán importantes en mi vida, porque sé que para ellos esto también es un orgullo. Gracias a mis padres, Reme y Antonio, a mis hermanas Alicia y Silvia, gracias a María y gracias a mis amigos con mayúsculas.

ÍNDICE GENERAL

Índice de figuras XIV
Índice de tablas XIX
Glosario XXI
1. Introducción 1
1.1 Contexto y motivación 1
1.2 Objetivos y alcance del proyecto 2
1.3 Estructura de la memoria 2
2. Estado del arte 3
2.1 WinProp 3
2.1.1 Modelado de escenarios indoor 4
2.1.2 Configuración de la simulación 5
2.1.3 Resultados y salidas 6
2.1.4 Requisitos software y hardware 10
2.1.5 Precio y licencias 10
2.2 AirMagnet Planner 11
2.2.1 Modelado de escenarios indoor 11
2.2.2 Configuración de la simulación 12
2.2.3 Resultados y salidas 12
2.2.4 Requisitos software y hardware 14
2.2.5 Precio y licencias 14
2.3 RF3D Wi-FiPlanner 14
2.3.1 Modelado de escenarios indoor 14
2.3.2 Configuración de la simulación 15
2.3.3 Resultados y salidas 16
2.3.4 Requisitos software y hardware 18
2.3.5 Precio y licencias 18
3. Modelos de propagación indoor 19
3.1 Modelos empíricos o Estadísticos 19
3.1.1 Modelo de propagación en el espacio libre 19
3.1.2 Modelo Modificado del Espacio Libre 20
3.1.3 Modelo COST 231 21

3.1.4 Modelo basado en el número de muros y suelos (simplificado) 22
3.1.5 Linear Path Atenuation Model 22
3.1.6 Dual Slope Model 23
3.1.7 Motley-Keenan Model 24
3.1.8 COST Multi Wall Model 25
3.1.9 Multi-Wall-and-Floor Model 26
3.2 Modelos de propagación deterministas 27
3.2.1 Modelos basados en técnicas de trazado de rayos 27
3.2.2 Modelo de trayecto dominante (Dominant Path) 28
3.2.3 Modelos FDTD 29
3.3 Modelos basados en Redes Neuronales (ANNs) 29
4. Estándar IEEE 802.11 31
4.1 Arquitectura del IEEE 802.11 31
4.2 Estándar 802.11a 32
4.3 Estándar 802.11b 33
4.4 Estándar 802.11g 33
4.4 Estándar 802.11n 34
5. Especificación de requisitos 37
5.1 Requisitos no funcionales 37
5.1.1 Requisitos de hardware 37
5.1.2 Requisitos de software 37
5.1.3 Requisitos de apariencia e interfaz externa 37
5.1.4 Requisitos de usabilidad 38
5.1.5 Requisitos de disponibilidad 38
5.2 Requisitos funcionales 38
5.2.1 Requisitos módulo Archivo 38
5.2.2 Requisitos módulo Materiales 39
5.2.3 Requisitos módulo Planta 39
5.2.4 Requisitos módulo Obstáculos 40
5.2.5 Requisitos módulo Access Point 41
5.2.6 Requisitos módulo Antenas 42
5.2.7 Requisitos módulo Simulación 42
5.2.8 Requisitos módulo Estadísticas 43
6. Planificación y estimación de costes 45

6.1 Fases de desarrollo 45
6.1.1 Revisión del estado del arte....45
6.1.2 Especificación de requisitos....45
6.1.3 Diseño 45
6.1.4 Implementación 45
6.1.5 Evaluación y validación 45
6.1.6 Documentación....45
6.2 Cronograma....46
6.3 Estimación de costes....46
6.3.1 Recursos humanos....46
6.3.2 Recursos materiales....47
6.4. Coste total del proyecto....48
7. Diseño 49
7.1 Entorno de programación....49
7.2 Estructura general de la herramienta 49
7.2.1 Caso de uso principal de la herramienta....50
7.2.2 Modularización de la herramienta....51
7.2.3 Interfaz principal 51
7.3 Diseño de los módulos 51
7.3.1 Módulo Archivo....52
7.3.2 Módulo Materiales 53
7.3.3 Módulo Planta 55
7.3.4 Módulo Obstáculos....56
7.3.5 Módulo Access Point 59
7.3.6 Módulo Antenas....60
7.3.7 Módulo Simulación 62
7.3.8 Módulo Estadísticas 67
7.3.9 Flujo de datos entre los diferentes módulos....69
8. Implementación 71
8.1 Implementación de funciones relevantes....71
8.1.1. Función simulación3D.m 71
8.1.2. Función cruces3D.m....75
8.1.3. Función patio.m....76
8.1.4. Función antdir.m....76

8.1.5. Función imagezoom.m 77
8.1.6. Función patrón.m 78
8.1.7. Función proximidad.m 78
8.1.8. Función para alinear planta 79
8.2 Interfaces principales 79
8.2.1. Módulo Archivo 79
8.2.2. Módulo Materiales 80
8.2.3. Módulo Planta 81
8.2.4. Módulo Obstáculos 82
8.2.5 Módulo Access Point 83
8.2.6 Módulo Antenas 83
8.2.7 Módulo Simulación 84
8.2.8 Módulo Estadísticas 86
9. Evaluación y validación 89
9.1 Configuración de los escenarios 89
9.2 Comparación de potencia de señal recibida 91
10. onclusiones 95
Anexo I. Base de datos de materiales 97
Anexo II. Base de datos de antenas 99
Anexo III. Tablas de conversión entre potencia de señal recibida y velocidad de datos 103
Referencias 105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Base de datos vectorial de WinProp 6

Figura 2.2 Plano de planta y simulación 7

Figura 2.3 Diagrama de radiación tridimensional de Aman 8

Figura 2.4 Mapa de asignación de celdas 9

Figura 2.5 Mapa de asignación de portadoras 10

Figura 2.6 Mapa de potencia máxima de señal recibida.....10

Figura 2.7 Mapa de SNIR 11

Figura 2.8 Simulación en 3D.....11

Figura 2.9 Mapa de un escenario de AirMagnet 13

Figura 2.10 Patrones de Antena de AirMagnet 14

Figura 2.11 Mapa de cobertura.....15

Figura 2.12 Superposición de Mapas de Potencia Recibida 15

Figura 2.13 Construcción de un escenario en RF3D.....17

Figura 2.14 Configuración de un Access Point en RF3D.....18

Figura 2.15 Mapa de potencia recibida 19

Figura 2.16 Mapa de velocidad de datos 19

Figura 2.17 Configuración de un reporte en RF3D 20

Figura 3.1 Principio del Modelo Motley-Keenan 27

Figura 3.2 Principio del Modelo Cost Multi-Wall 28

Figura 3.3 Principio del Modelo Multi-Wall and Floor 29

Figura 3.4 Principio de modelos de trazado de rayos.....30

Figura 3.5 Trayectos dominantes.....31

Figura 4.1 Organización celular de los canales en 802.11 33

Figura 4.2 Arquitectura 802.11 34

Figura 4.3 Chanel Bonding en 802.11n 37

Figura 6.1: Planificación temporal del proyecto 48

Figura 7.1 Diagrama de caso de uso principal 54

Figura 7.2 Solapamiento de canales a 2.4 GHz 69

Figura 7.3 Diagrama de flujo de datos 73

Figura 8.1 Menú Archivo 84

Figura 8.2 Interfaz módulo Materiales 84

Figura 8.3 Interfaz para añadir material 85

Figura 8.4 Paleta de selección de color 85

Figura 8.5 Interfaz módulo Planta 86

Figura 8.6 Interfaz módulo Obstáculos 86

Figura 8.7 Combo-box de materiales 87

Figura 8.8 Interfaz módulo Access Point 87

Figura 8.9 Interfaz módulo Antenas 88

Figura 8.10 Interfaz módulo Simulación 88

Figura 8.11 Mapas de potencia máxima de señal recibida 89

Figura 8.12 Mapas de interferencia 89

Figura 8.13 Mapas de Data Rate 90

Figura 8.14 Barra de progreso 90

Figura 8.15 Interfaz módulo Estadísticas 91

Figura 8.16 Interfaz para definir zonas 91

Figura 9.1 Escenario de simulación 93

Figura 9.2 Escenario dibujado en la herramienta 94

Figura 9.3 Potencia de señal recibida en WinProp 95

Figura 9.4 Potencia de señal recibida en nuestra herramienta 95

Figura 9.5 Estadísticas de simulación en WinProp 96

Figura 9.6 Estadísticas de simulación en nuestra herramienta 96

Figura 9.7 CDF de la herramienta WinProp 97

Figura 9.8 CDF de la herramienta WinProp 98

Figura 1 Anexo II Antena genérica omnidireccional a 2.4 GHz 103

Figura 2 Anexo II Antena genérica omnidireccional a 5 GHz 103

Figura 3 Anexo II Antena genérica direccional a 2.4 GHz y a 5 GHz 104

Figura 4 Anexo II Antena Yagi direccional a 2.4 GHz y a 5 GHz 104

Figura 5 Anexo II Antena Cushcraft direccional a 2.4 GHz 104

Figura 6 Anexo II Antena Cushcraft direccional a 5 GHz 105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Variable de pérdida de trayecto 23

Tabla 3.2 Índice de atenuación para diferentes tipos de edificios 23

Tabla 3.3 Pérdidas de propagación en diferentes materiales 28

Tabla 4.1 Velocidad para 802.11g 36

Tabla 4.2 Velocidad para 802.11n 37

Tabla 5.1 Requisitos módulo Archivo 41

Tabla 5.2 Requisitos módulo Materiales 41

Tabla 5.3 Requisitos módulo Planta 42

Tabla 5.4 Requisitos módulo Obstáculos 43

Tabla 5.5 Requisitos módulo Access Point 44

Tabla 5.6 Requisitos módulo Antenas 44

Tabla 5.7 Requisitos módulo Simulación 45

Tabla 5.8 Requisitos módulo Estadística 46

Tabla 6.1 Fechas de comienzo y fin de las tareas 48

Tabla 6.2 Coste en recursos humanos del proyecto 49

Tabla 6.3 Coste en recursos materiales del proyecto 50

Tabla 6.1 Presupuesto total del proyecto 50

Tabla 7.1 Requisitos módulo Archivo 56

Tabla 7.2 Requisitos módulo Materiales 57

Tabla 7.3 Requisitos módulo Planta 59

Tabla 7.4 Requisitos módulo Obstáculos 60

Tabla 7.5 Requisitos módulo Access Point 63

Tabla 7.6 Requisitos módulo Antenas 64

Tabla 7.7 Requisitos módulo Simulación 66

Tabla 7.8 Requisitos módulo Estadísticas 71

Tabla 9.1 Configuración del AP 94

Tabla 9.2 Comparación de estadísticas de potencia de señal recibida 97

Tabla 1 Anexo I Base de datos de materiales 102

Tabla 1 Anexo III Estándar 802.11 a 107

Tabla 2 Anexo III Estándar 802.11b 107

Tabla 3 Anexo III Estándar 802.11g 108

Tabla 4 Anexo III Estándar 802.11n 108

GLOSARIO

A

ANN *Artificial Neural Network,* red neuronal artificial

AP *Access Point,* o punto de acceso

B

BSS *Basic Service Sets* o conjunto de servicios básicos

C

CDF *Cumulative Distribution Function*, o función de distribución de probabilidad acumulada

CMWM *COST 231 Multi Wall Model*, o modelo de múltiples paredes basado en COST 231

COIT Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación.

CSMA *Carrier Sense Multiple Access*, protocolo de acceso múltiple por detección de portadora.

D

DP *Dominant Path* o trayecto dominante.

DSSS *Direct Sequence Spread Spectrum* o espectro ensanchado por secuencia directa.

E

ESS *Extended Service Set* o conjunto de servicios extendidos.

F

FDD *Frequency Division Duplex o* división por multiplexación en frecuencia.

FDTD *Finite-Difference Time-Domain o* diferencias finitas en el dominio del tiempo.

FHSS *Frequency Hopping Spread Spectrum o* espectro ensanchado por modulación en frecuencia

G

GSM *Global System for Mobile* o sistema global para comunicaciones móviles.

GPRS *General Packet Radio Service* o servicio general de paquetes vía radio

GUI *Grafical User Interface* o interfaz gráfica de usuario.

H

HSDPA *High Speed Downlink Packet Access,* o acceso de alta velocidad a descarga de paquetes

I

IEEE *Institute of Electrical and Electronics Engineers* o Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos. Asociación técnico-profesional mundial dedicada a la estandarización.

IP *Internet Protocol,* o protocolo de Internet.

IRT *Intelligent Ray Tracing,* o trazado de rayos inteligente.

L

LAN *Local Area Network,* o red de área local.

LOS *Line of Sight,* o línea de visión.

M

MATLAB *MATrix LABoratory*, es un lenguaje de alto nivel y un entorno interactivo para el cálculo numérico, la visualización y la programación

MCS *Modulation and Coding Scheme,* o esquema de modulación y codificación.

MIMO *Multiple-input Multiple-output,* o entrada múltiple y salida múltiple.

MKM *Motley Keenan Model,* o modelo de Motley Keenan

MWFM *Multi Wall and Floor Model,* o modelo de múltiples paredes y múltiples pisos.

MS *Mobile Station,* o estación móvil

N

NLOS *Non Line of Sight* , o sin línea de visión.

O

OFDM *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* o multiplexación por división de frecuencia ortogonal.

OSI *Open System Interconection* o sistemas de interconexión abiertos.

P

PDF *Probability Density Function* o función de densidad de probabilidad.

Q

QAM *Quadrature amplitude modulation* o modulación de amplitud en cuadratura.

QPSK *Quadrature Phase Shift Keying* o modulación por desplazamiento cuadrafásico.

S

SDM *Space Division Multiplexing* , o multiplexado por división espacial

SDMB *Satellite Digital Multimedia Broadcast,* o transimisión por satélite de contenido multimedia digital.

SNR *Signal to Noise Relation,* o relación señal a ruido

SRT *Standar Ray Tracing,* o trazado de rayos estándar

SINR *Signal to interferencia plus noise ratio* o relación señal a interferencia más ruido.

T

TDD *Frequency Division Duplex o* división por multiplexación temporal.

U

UMTS *Universal Mobile Telecommunications System,* o sistema universal de telecomunicaciones móviles.

W

WiMAX *Worldwide Interoperability for Microwave Access*, interoperabilidad mundial para acceso por microondas.

WLAN *Wireless Local Area Networks,* o redes de área local inalámbricas.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 CONTEXTO Y MOTIVACIÓN

En los últimos años se ha producido un incremento exponencial del número de redes inalámbricas desplegadas a nivel mundial. Las facilidades y grandes beneficios que su uso conlleva en cuanto a instalación, mantenimiento, y eficiencia hacen que estén presentes en casi todos los sectores de la sociedad. Su uso es tan generalizado que se pueden encontrar entre tres y diez redes en un mismo lugar.

Concretamente, la tecnología Wi-Fi, basada en el estándar IEEE 802.11 **[1]**, se ha convertido en el tipo de red inalámbrica más extendido. Se trata de una tecnología de acceso inalámbrico a redes de comunicación de área local. Además, con la aparición de las últimas versiones del protocolo, sobre todo 802.11n, sus velocidades de transmisión han permitido que Wi-Fi se establezca como la tecnología predominante en el acceso inalámbrico de banda ancha a Internet, desbordando el ámbito de las aplicaciones y servicios para las que fue inicialmente concebida.

Junto al aumento en la velocidad de transmisión, la mejora en los mecanismos de seguridad ha permitido su viabilidad para soportar de servicios avanzados como telefonía, gestión integrada de sistemas, transmisión de video para seguridad o sistemas de información multimedia.

Por todo ello, Wi-Fi se ha convertido en una alternativa viable a Ethernet, de modo que cada vez son más los centros de empresas, centros institucionales, instalaciones públicas o privadas que las implantan. La principal consecuencia es que está aumentando la complejidad de las redes. Hay encuestas que revelan que la mitad de las redes implantadas en este tipo de lugares están formadas por más de diez puntos de acceso.

Debido al aumento en la complejidad de las redes, se hace indispensable un diseño y planificación eficiente de las mismas. De lo contrario, pueden producirse problemas de interferencias, falta de cobertura, descenso de calidad de servicio o falta de seguridad en la red, lo que a la postre desembocaría en un encarecimiento del coste final de la red.

Pero el diseño de estas redes no es algo tan sencillo, ya que debe tener en cuenta varias cosas: el área en la que se desea prestar servicio, una estimación de la cantidad de usuarios que se conectaran a la red, los obstáculos presentes en el lugar de instalación que influyen con su forma, material, tamaño y localización, y la posición de los puntos de acceso que operan en la misma área.

Hay dos técnicas usadas para diseñar las redes inalámbricas, una es la medición y otro es la simulación. La medición requiere llevar varios equipos y modificar la posición del punto de acceso dentro del edificio para tomar un muestreo de la

cobertura. Mientras que la simulación requiere de planos del sitio y de la identificación de materiales en la estructura del edificio.

1.2 OBJETIVOS Y ALCANCE DEL PROYECTO

El principal objetivo del presente proyecto es diseñar e implementar una herramienta de planificación Wi-Fi en entornos de interior que permita conocer *a priori*, y sin necesidad de realizar ninguna medición en el escenario real, como será la propagación de las señales en dicho escenario. No se persigue realizar ningún tipo de estudio de las redes a nivel de capa enlace o capa de red.

La idea es conseguir, en la medida de lo posible, una herramienta gratuita que incorpore la mayoría de las funcionalidades que traen algunas de las principales herramientas de planificación (de pago) disponibles en el mercado.

Además, se pretende que la herramienta diseñada pueda ser utilizada por cualquier usuario, por muy básico que sea su conocimiento sobre MATLAB (el entorno en el que se desarrollará el proyecto). Por este motivo se persigue implementar un *software* totalmente interactivo.

En cuanto a la forma de realizar la simulación de los escenarios, el objetivo es tener en cuenta la mayor cantidad de variables o datos de entrada, siempre cuando sean datos que un usuario pueda obtener con la relativa facilidad. De nuevo, se persigue que la herramienta pueda ser utilizada de forma autónoma por el usuario.

En lo referente a los resultados o estimaciones que se pretenden obtener, el objetivo es que se describan mediante mapas de señal y mediante parámetros estadísticos algunas variables como el nivel de potencia de señal recibido, el nivel de interferencia entre canales o la velocidad de datos.

Por último, un objetivo que debe estar presente en cualquier proyecto *software* es el de realizar un diseño modular y escalable que permita *a posteriori* seguir completándolo o mejorándolo.

1.3 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

La presente memoria de proyecto está formada por diez capítulos, los cuales están constituidos por varios subapartados. A continuación se realiza una breve descripción de cada uno de ellos:

1) **Introducción**. En este capítulo se explican los motivos fundamentales que justifican la creación del proyecto.
2) **Estado del arte.** Se presentan algunas de las herramientas de planificación más relevantes del mercado.
3) **Modelos de propagación.** Se recoge información sobre los principales modelos de propagación de ondas electromagnéticas para entornos de interior descritos en la literatura.

4) **Estándares 802.11.** Se realiza una breve descripción del estándar 802.11 **[1]**, así como de todas sus variantes 802.11 a/b/g/n.
5) **Especificación de requisitos.** Se enumeran y describen todos y cada uno de los requisitos funcionales del *software* a implementar.
6) **Planificación y estimación de costes.** Contiene el presupuesto del proyecto y la evolución temporal estimada para su realización.
7) **Diseño.** Se expondrá el diseño general de la herramienta, y se explicará cómo se satisfacen cada uno de los requisitos de diseño especificados.
8) **Implementación.** Se hará hincapié en cómo se han implementado los algoritmos o ecuaciones más relevantes y se mostrarán mediante capturas de pantalla las principales interfaces desarrolladas.
9) **Evaluación y validación.** Se hará una comparación de los resultados obtenidos en la simulación de un mismo escenario entre la herramienta implementada y una de las herramientas del mercado descritas en el segundo capítulo.
10) **Conclusión.** Se expondrán las consideraciones finales y el trabajo futuro.

Además, al final del documento, se presentarán los siguientes anexos:

1) **Base de datos de materiales**
2) **Base de datos de antenas**
3) **Tabla de conversión entre potencia recibida y velocidad de datos**

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

En este primer capítulo se van a describir algunas de las herramientas de planificación Wi-Fi para entornos de interiores más destacadas del mercado. En concreto, el estudio se centrará fundamentalmente en tres de ellas:

1. WinProp de AWE Communications **[2].**
2. AirMagnet Planner de Fluke Networks **[3].**
3. RF3D WifiPlanner de Psiber Data Systems **[4].**

Se han elegido estas herramientas, por ser las más completas de las halladas durante el proceso de búsqueda de información (fundamentalmente a través de Internet). Además, estas tres herramientas permiten el acceso a diverso material (tablas, figuras, modelos, etcétera) que será útil para la realización del proyecto.

El objetivo de este capítulo es analizar las fortalezas y debilidades de dichas herramientas de planificación, de modo que ayude a realizar una especificación de requisitos, de la herramienta desarrollada en este proyecto, que permita enmarcarla correctamente en el contexto de los planificadores Wi-Fi.

2.1 WINPROP

La herramienta de planificación WinProp **[2]** ha sido desarrollada por la compañía alemana AWE Communications. Se trata de una herramienta de planificación que abarca cualquier tipo de propagación radioeléctrica. Incluye simuladores para diferentes escenarios de propagación tales como escenarios urbanos, escenarios rurales, escenarios *indoor*, escenarios con comunicaciones por satélite, escenarios de predicción en el interior de túneles o escenarios de predicción en vehículos. Además, permite la planificación de redes para cualquiera de los siguientes estándares:

• Difusión:

- SDMB (*Satellite Digital Multimedia Broadcast)*

• Redes de 2G y 2.5G

-GSM

- GPRS

• Redes de 3G y de B3G

- UMTS FDD (*Frequency Division Duplex)*

- UMTS TDD (*Time Division Duplex)*

- UMTS FDD incluido HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access)*
- redes OFDM

• LANs inalámbricas (WLAN)

- IEEE 802.11a
- IEEE 802.11b
- IEEE 802.11g
- HIPERLAN/2

• WiMAX

-IEEE 802.16

A partir de aquí, el análisis de la herramienta WinProp se centrará en escenarios *indoor* y redes WLAN.

2.1.1 MODELADO DE ESCENARIOS INDOOR

La herramienta WinProp, incorpora un módulo específico, denominado WallMan (Wall Manager), para la construcción de bases de datos *indoor* en 2D y 3D.

WallMan permite construir un modelo tridimensional realista de los edificios. Permite diseñar detalles como paredes, puertas, ventanas, escaleras, etc. Además, para cada elemento, permite especificaciones individuales de espesor, material, propiedades físicas, propiedades dieléctricas, etcétera.

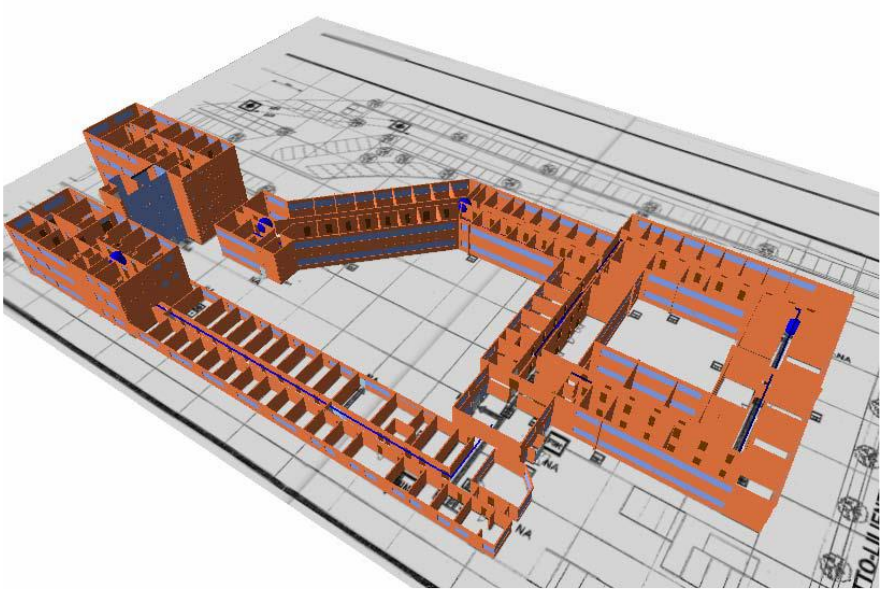

Figura 2.1 Base de datos vectorial de WinProp

Si no se dispone de bases de datos vectoriales de los edificios, WinProp permite una especificación más simple del escenario, cargando directamente los planos de las

plantas de los edificios y asignando propiedades materiales y dimensiones a los diferentes colores de los *bitmaps*. WinProp permite la exportación de bitmaps de diferentes formatos comerciales como AutoCAD, DXF, Nastran, MCS, etcétera.

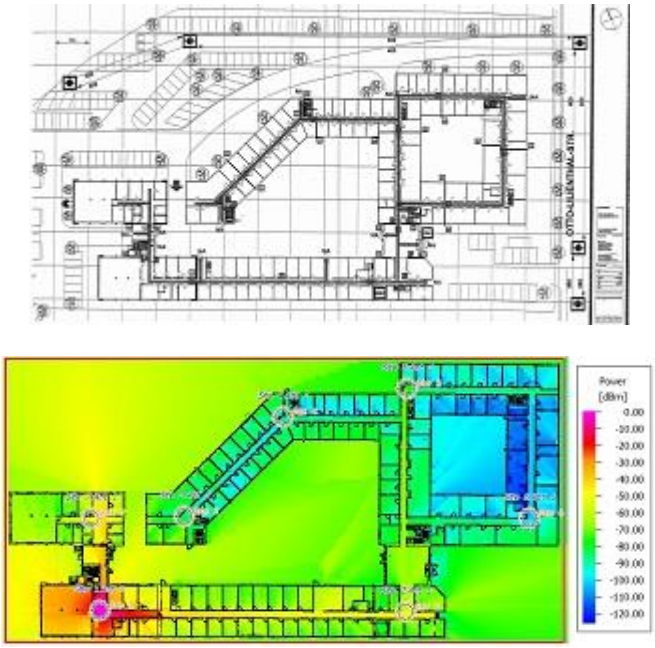

Figura 2.2 Plano de planta y simulación

2.1.2 CONFIGURACIÓN DE LA SIMULACIÓN

La herramienta WinProp permite especificar las características del proyecto a simular a través de un módulo denominado ProMan (Propagation Manager).

Permite establecer todas las características reales de una red: sistema de comunicaciones, potencia de transmisión, frecuencia de ondas, tipo de modulación, ganancia de las antenas, tráfico, etc.

Además, permite seleccionar el modelo de predicción. WinProp, incorpora los siguientes modelos de predicción para entornos de interior:

- ✓ Modelos empíricos
  - Modelo *One Slope*
  - Modelo Motley Keenan
  - Modelo COST 231 *Multi Wall*
- ✓ Modelos determinísticos
  - Modelo SRT (*Standar Ray Trace)*
  - Modelo IRT (*Intelligent Ray Trace*)

- Modelo DP (*Dominant Path*)

Aunque se abordará el estudio de cada uno de estos modelos en el apartado 3 del presente documento, cabe destacar que los modelos deterministas citados han sido desarrollados dentro de la propia compañía AWE Communications.

Otro elemento a considerar a la hora de configurar las simulaciones, son las antenas, para ello WinProp incorpora un módulo denominado AMan (*Antenna Manager*) que permite la generación y modificación de patrones de antenas. Para ello, se pueden definir patrones de radiación tanto en 2D como en 3D. AMan permite generar los patrones con un editor gráfico con el que se puede definir exactamente cada punto del diagrama de radiación. Además permite importar y exportar los patrones a formatos como .msi o .pln o ASCII.

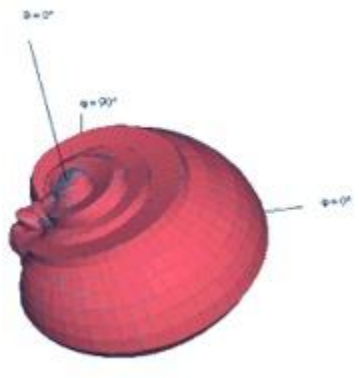

Figura 2.3 Diagrama de radiación tridimensional de AMan

2.1.3 RESULTADOS Y SALIDAS

La herramienta WinProp proporciona predicciones sobre una red WLAN en cuanto a asignación de celdas, asignación de portadoras, área de cobertura, rendimiento de *troughtput* máximo para todos los usuarios, capacidad máxima disponible para cada usuario, número de *streams* MIMO. Además, para cada sentido de transmisión (*downlink* , *uplink*) proporciona datos sobre máximo nivel de señal recibida, mínima potencia de transmisión requerida y probabilidad de recepción asumiendo un desvanecimiento de tipo *Rayleigh*.

Las salidas que WinProp ofrece son:

- Mapas de predicción en 2D para cada altura y cada AP (*Access Point* o Punto de Acceso), mostrando potencia recibida, intensidad de campo, pérdidas por trayectoria o trayectos de propagación.
- Mapas de predicciones en 2D de la red completa para cada altura, mostrando probabilidad de cobertura, interferencia, asignación de celdas, número de portadoras disponibles en la localización de las MS (*Mobile Station*) o potencia de transmisión mínima requerida para los APs y las MS.
- Información estadística en forma de distribuciones PDF (*Probability Density Function)* o CDF(*Cumulative Distribution Function)* de todos los mapas en el total o en una parte de su área y valores medios y desviaciones estándar.

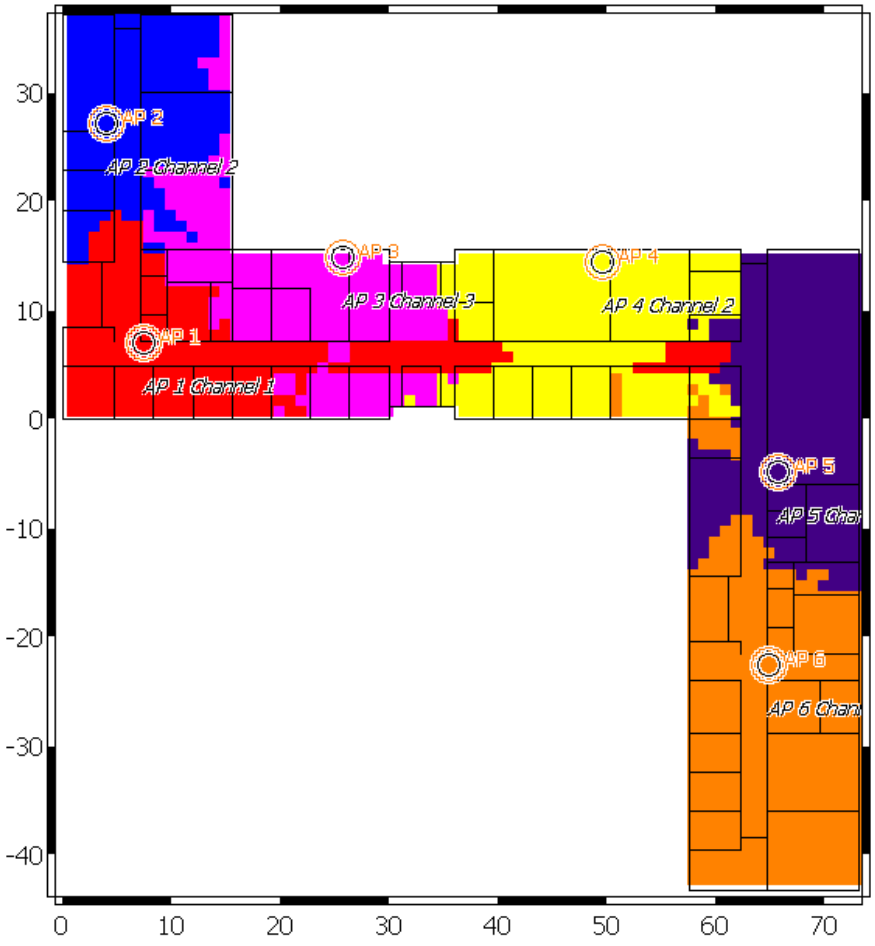

Figura 2.4 Mapa de asignación de celdas

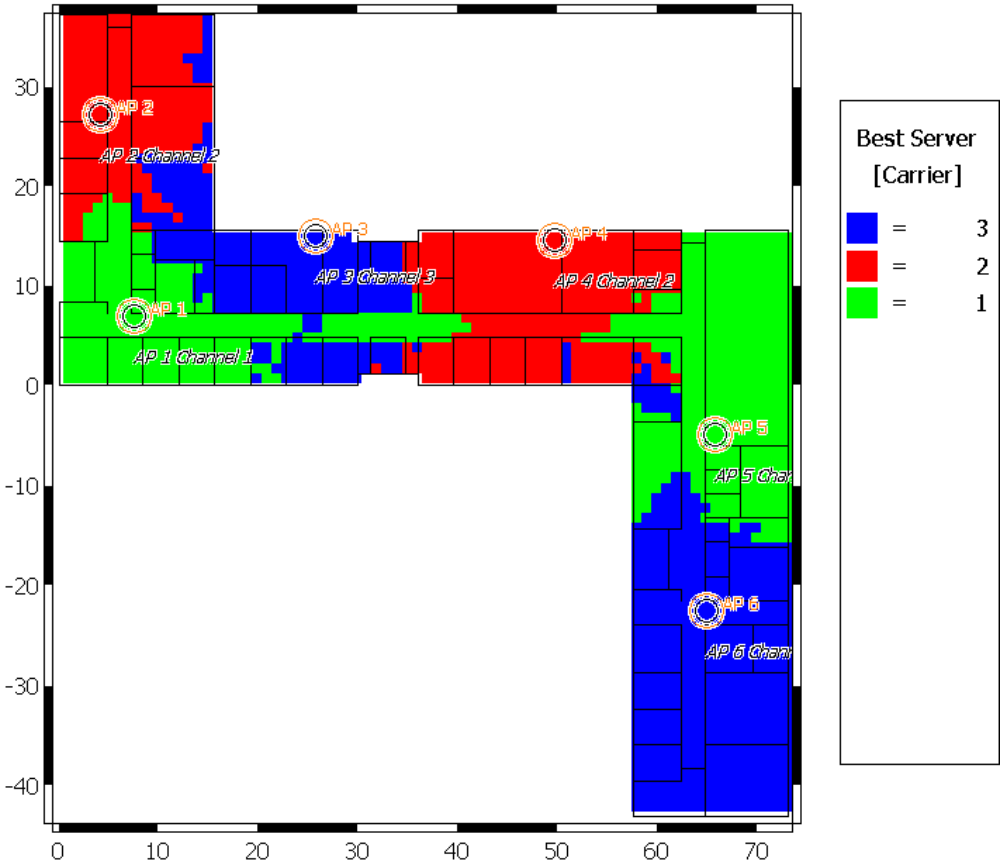

Figura 2.5 Mapa de asignación de portadoras

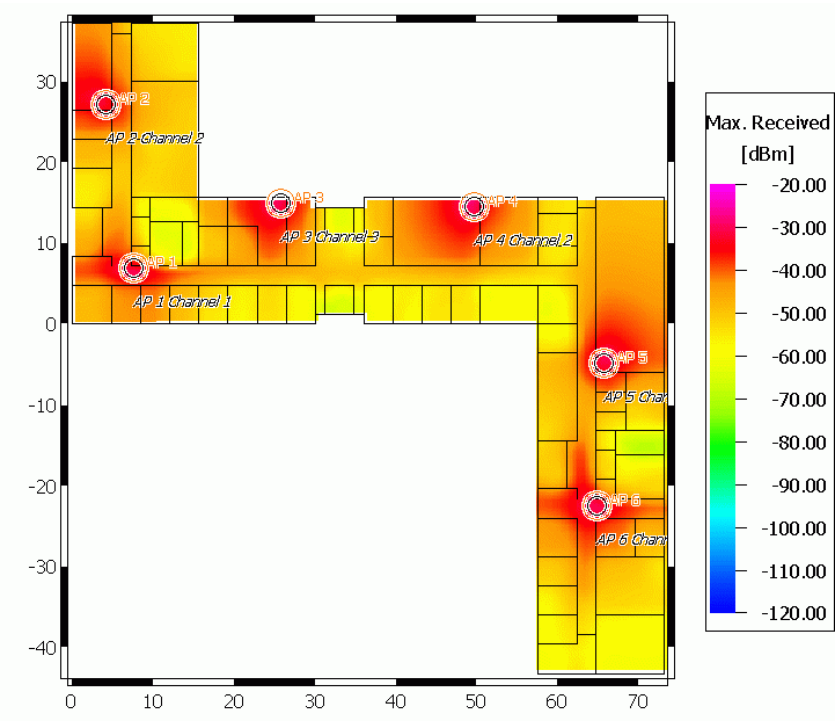

Figura 2.6 Mapa de potencia máxima de señal recibida

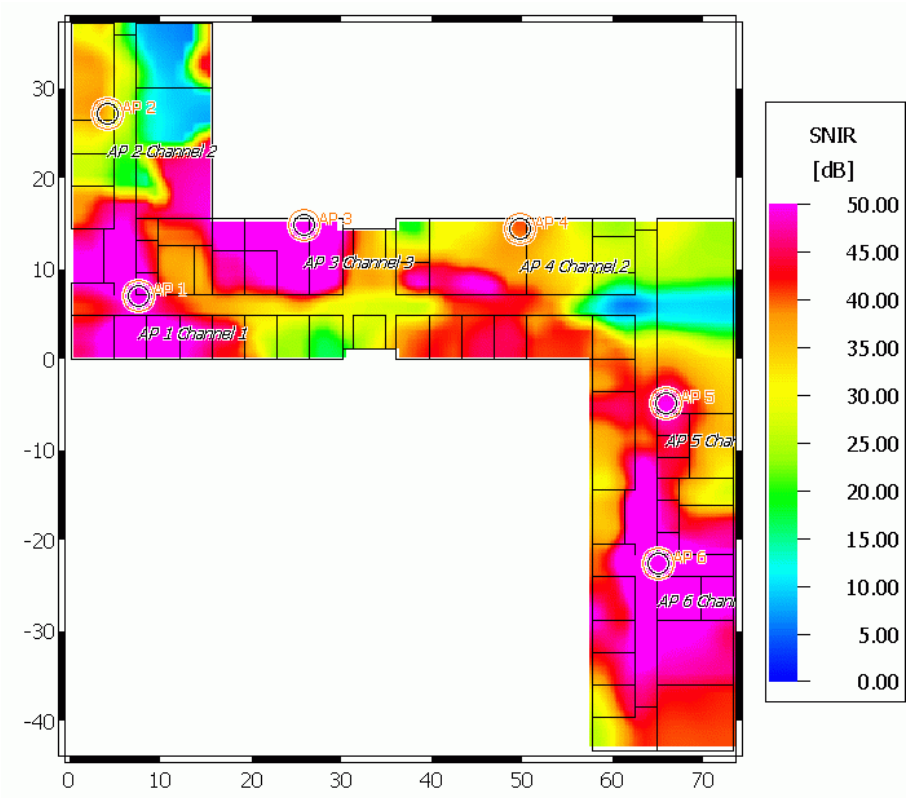

Figura 2.7 Mapa de SNIR

Además, para la simulación de edificios de varias plantas, WinProp es capaz de calcular predicciones a varias alturas simultáneamente y mostrar los resultados en una vista 3D.

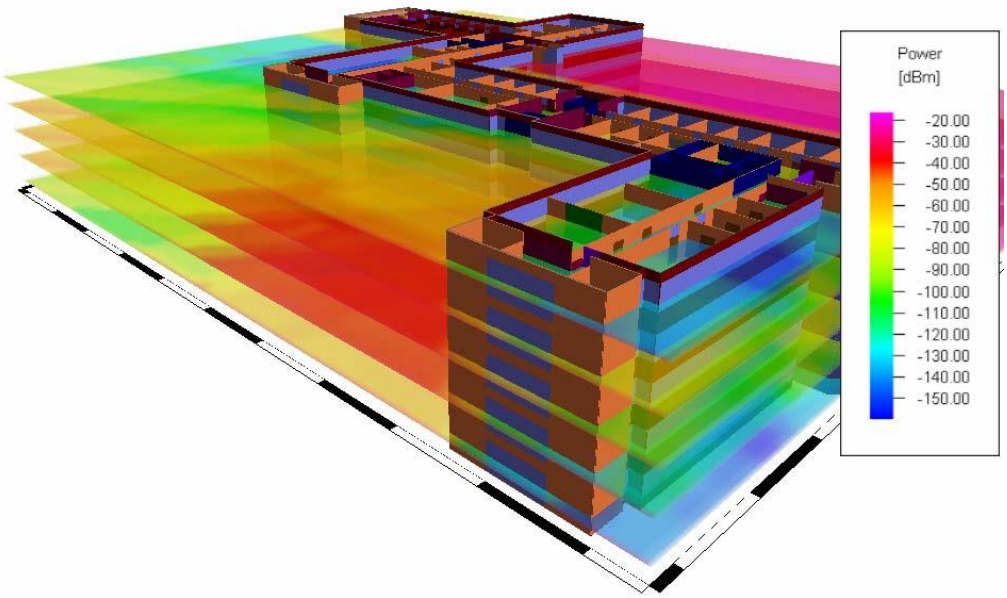

Figura 2.8 Simulación en 3D

Por último, WinProp incluye también un módulo de optimización automático para la corrección y el refinamiento de las configuraciones WLAN. El módulo es capaz de de ajustar las localizaciones de los APs automáticamente a las necesidades definidas, asignar automáticamente portadoras a los AP dependiendo del análisis del tráfico y de las interferencias o asignar niveles de prioridad diferentes para distintas partes de del mapa.

2.1.4 REQUISITOS SOFTWARE Y HARDWARE

Todas las interfaces gráficas de WinProp están diseñadas para las versiones de 32 y 64 bits de Windows™ (8, 7, Vista, XP). Además puede ejecutarse en cualquier emulador de Windows en cualquier entorno (Linux, UNIX, Solaris....). Además se necesita tener instalado DirectX9 y OpenGL.

Los requisitos hardware son los siguientes:

Procesador:

- Intel Pentium 1.5GHz. Configuración mínima.
- Intel Pentium 2.0GHz. Configuración recomendada.

Memoria RAM:

- 1 GB. Configuración mínima.
- 2GB. Configuración recomendada.

Disco duro:

- 2 GB. Configuración mínima.
- 4GB. Configuración recomendada.

Tarjeta gráfica:

- 1024x768 32 bits. Configuración mínima.
- Resolución Full HD 32 bits. Configuración recomendada.

2.1.5 PRECIO Y LICENCIAS

WinProp ofrece la posibilidad de elegir entre dos tipos de licencias: licencia anual o licencia perpetua. En ambos casos se pueden seleccionar sólo los módulos deseados, de forma que se puede personalizar el producto adquirido. Según la información recibida de un consultor de la empresa, un paquete con los módulos de comunicación en entornos *indoor* y la interfaz de comunicación WLAN tendría los siguientes precios:

- Licencia anual: 3900 € (Incluye soporte y mantenimiento)
- Licencia perpetua: 9750 € (No incluye mantenimiento, pero se puede contratar por un 10 % más)

2.2 AIRMAGNET PLANNER

La herramienta de planificación AirMagnet Planner **[3]** ha sido desarrollada por la compañía estadounidense Fluke Networks. Se trata de una herramienta de planificación para redes LAN inalámbricas 802.11 a/b/g/n. Además, Fluke Networks ofrece la posibilidad de combinar esta herramienta con otra denominada AirMagnet Survey con la cual se pueden realizar estudios de rendimiento en tiempo real de redes ya instaladas, permitiendo validar los resultados proporcionados por la herramienta AirMagnet Planner.

2.2.1 MODELADO DE ESCENARIOS INDOOR

La herramienta AirMagnet Planner, facilita la construcción de un modelo detallado de cualquier entorno inalámbrico. Para ello, permite cargar un mapa de la localización y utilizar una biblioteca incorporada de paredes, puertas y ventanas para simular exactamente las características del edificio. El escenario también se puede personalizar para que incluya cubículos, oficinas, ascensores y varias obstrucciones típicas. Además, se pueden crear materiales especiales desde cero.

Los mapas del escenario han de estar en alguno de los siguientes formatos admitidos: .bmp, .dib, .dwg, .dxf, .emf, .gif, vsd, .jpg, .wmf, .vdx o .png.

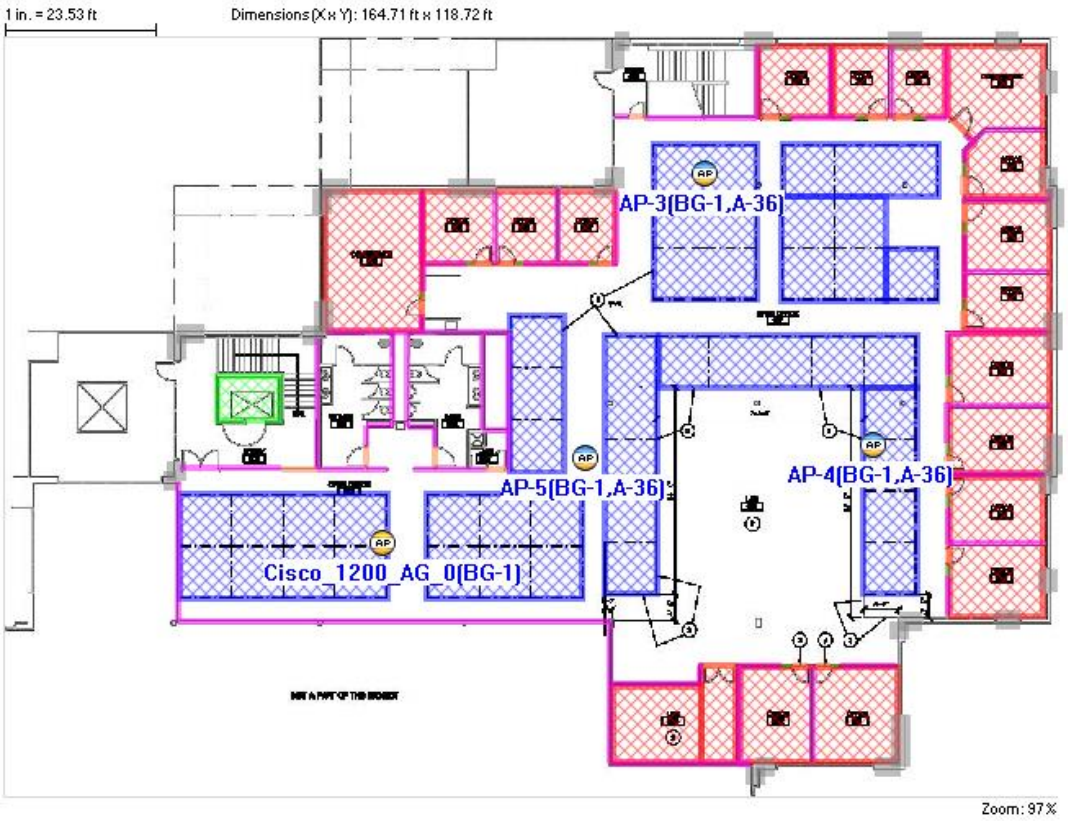

Figura 2.9 Mapa de un escenario de AirMagnet

2.2.2 CONFIGURACIÓN DE LA SIMULACIÓN

La herramienta AirMagnet Planner ofrece control completo sobre toda la configuración de los APs, con valores independientes para radios de 2,4 GHz y 5 GHz. Los usuarios pueden establecer el canal del AP, la dirección IP, la potencia de transmisión, el tipo de antena, la orientación, la altura y las especificaciones 802.11a/b/g/n. Los usuarios pueden añadir puntos de acceso a cualquier lugar y experimentar para encontrar la colocación ideal de los puntos de acceso en el entorno.

Además, los usuarios pueden personalizar las simulaciones especificando la cobertura mínima esperada de la señal, la potencia de transmisión, o marcando las áreas de la cobertura de Wi-Fi y las áreas donde no se pueden colocar los AP.

En cuanto a las antenas, AirMagnet Planner incluye más de 250 patrones de antena de los APs más populares, incluidos Cisco, Aruba, Ruckus Wireless, Meru Networks, HP, Symbol, 3Com, Bluesocket, Motorola, D-Link Systems, etcétera. AirMagnet Planner también incluye una herramienta para crear patrones personalizados de antenas.

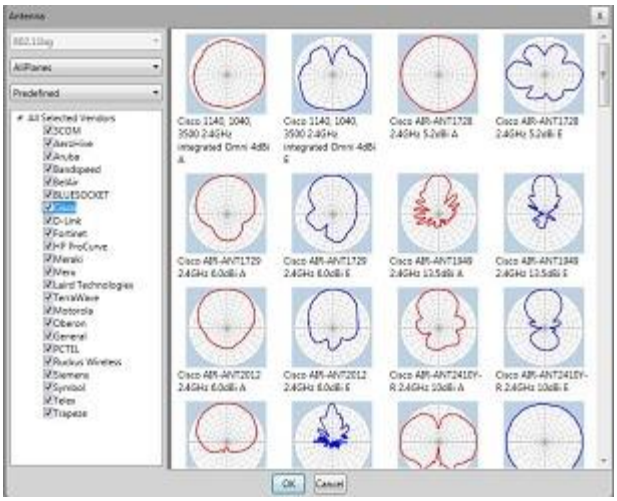

Figura 2.10 Patrones de Antena de AirMagnet

2.2.3 RESULTADOS Y SALIDAS

La herramienta AirMagnet Planner proporciona mapas de color en 2D y 3D que permiten la visualización de la cobertura, la fuerza de la señal, la velocidad de transmisión MCS (*Modulation and Coding Scheme)*, el ancho del canal, etc.

- Mapas en 2D considerando todos los APs para cada una de las plantas.
- Mapas en 2D para ver el comportamiento individual de cada AP.
- Mapas en 2D para ver el rendimiento por canal.
- Mapas en 3D para edificios de varias plantas.

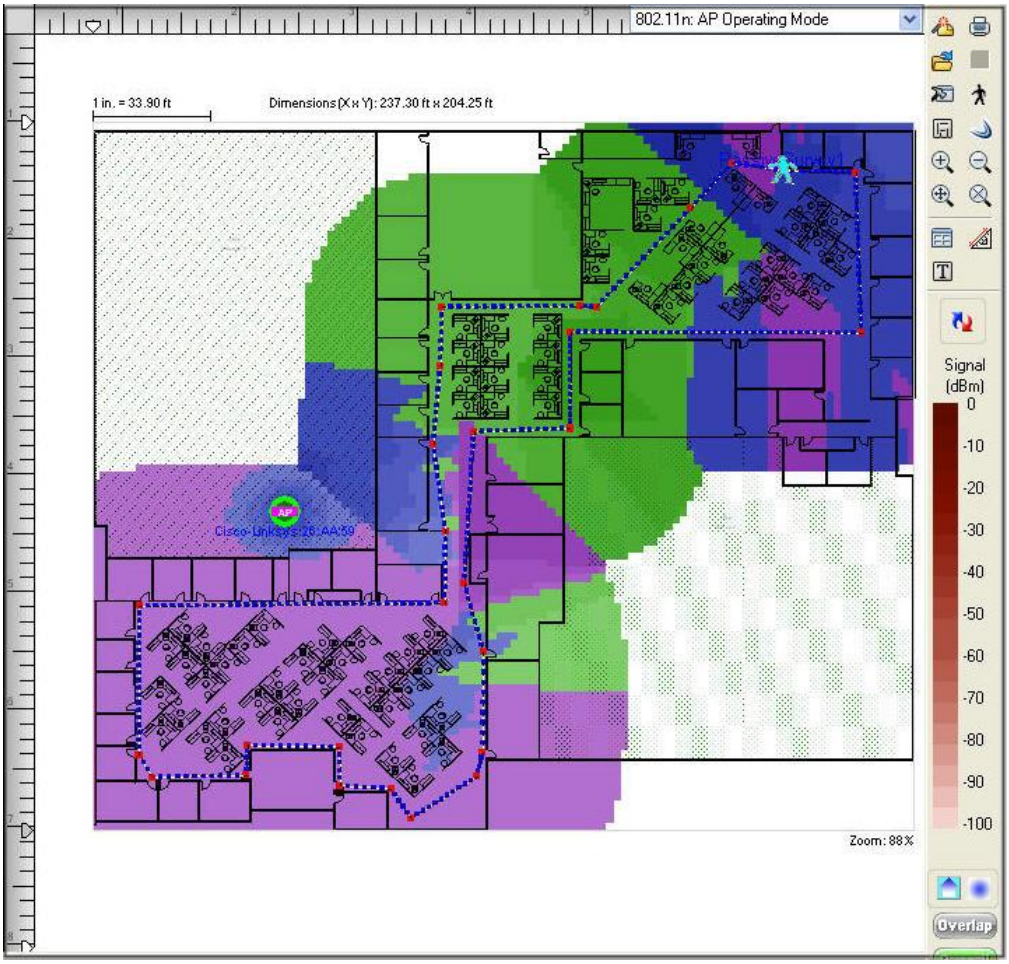

Figura 2.11 Mapa de cobertura

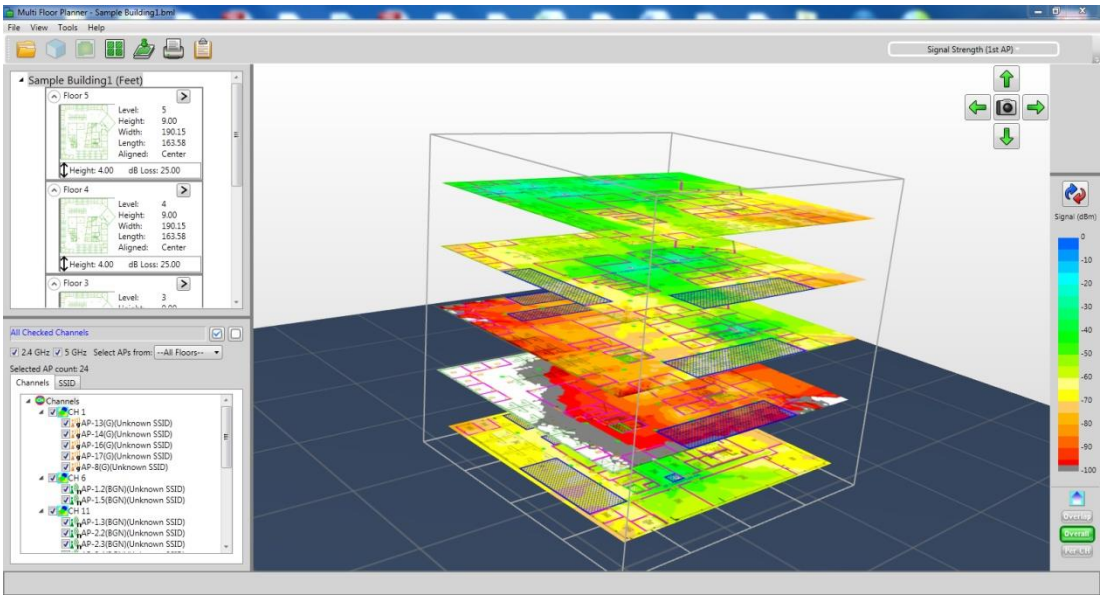

Figura 2.12 Superposición de Mapas de Potencia Recibida

AirMagnet Planner permite generar un informe profesional con una lista de materiales y componentes con toda la información que se necesita para instalar correctamente la red, incluyendo una lista completa de APs obligatorios, de su colocación ideal y de sus valores de configuración que aseguren cumplir con los requisitos sobre rendimiento o seguridad especificados por el usuario.

Adicionalmente, la herramienta posee un módulo automatizado que ayuda al usuario a realizar la migración de redes existentes 8012.11 a/b/g a redes 802.11 n.

2.2.4 REQUISITOS SOFTWARE Y HARDWARE

La herramienta AirMagnet Planner funciona para los siguientes sistemas operativos:

- Microsoft® Windows 8 Pro/Enterprise (32 bits y 64 bits)
- Microsoft® Windows 7 Enterprise/Business/Ultimate/Professional
- Microsoft® Windows Vista™ Business/Ultimate (SP1)
- Microsoft® Windows XP™ Professional (SP3)/Tablet PC Edition 2005 (SP3)
- MAC OS X Leopard™ (Apple® MacBook® Pro con Windows XP™ PRO con SP3 utilizando Boot Camp®).

Los requisitos hardware son los siguientes:

Procesador:

- Intel® Pentium® M 1,6 GHz (Para Intel® Core™ 2 Duo, se recomienda de 2,00 GHz o mayor).

Memoria RAM:

- 1GB para para Windows XP™ (aunque se recomiendan 2GB)
- 2GB para Windows Vista™ y Windows 7.

Espacio en disco:

- 800 MB

2.2.5 PRECIO Y LICENCIAS

AirMagnet se puede adquirir en dos modalidades diferentes:

- Como herramienta individual (*standalone*) por 1528 €
- Integrado en AirMagnet Survey por 2557 €

2.3 RF3D WI-FIPLANNER

La herramienta de planificación RF3D WifiPlanner **[4]** ha sido desarrollada por la compañía estadounidense Psiber Data Systems Inc. Se trata de una herramienta de planificación diseñada exclusivamente para redes LAN inalámbricas 802.11 a/b/g/h/n.

2.3.1 MODELADO DE ESCENARIOS INDOOR

La herramienta RF3D Wi-FiPlanner, permite construir el escenario a simular mediante la importación (en formato JPG, BMP o PNG) de los planos de cada una

de las plantas de un edificio. Además permite realizar un escalado y un alineamiento entre plantas, de modo que se pueden cargar planos independientemente de su orientación o resolución.

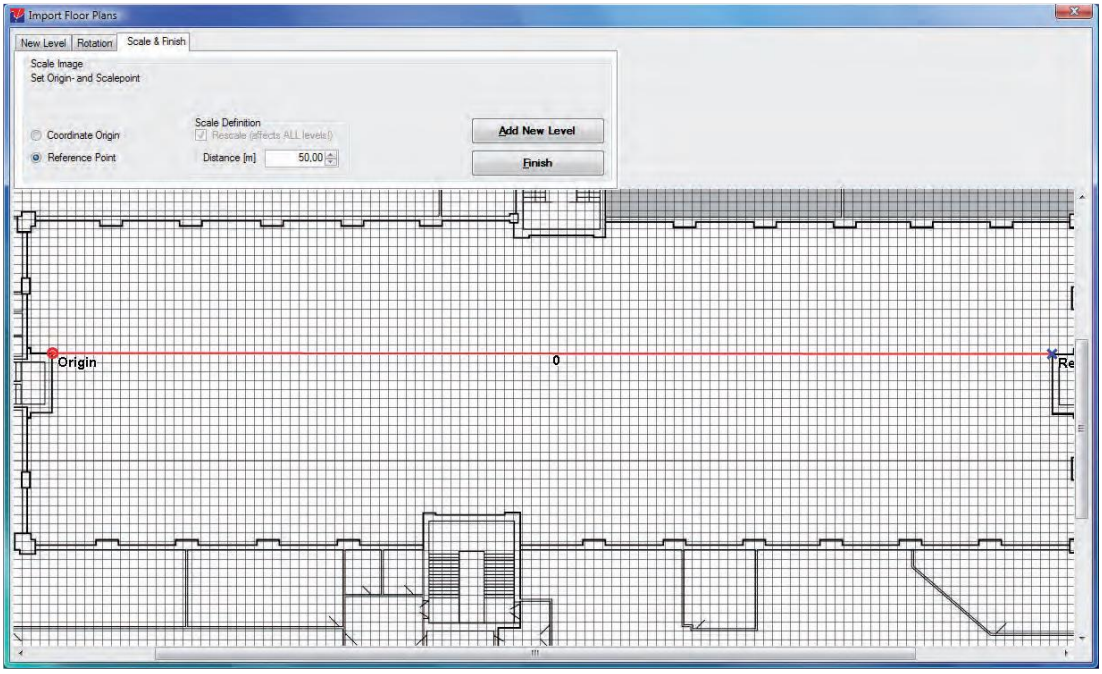

Figura 2.13 Construcción de un escenario en RF3D

A continuación, para describir el escenario, RF3D WifiPlanner posee unas librerías de materiales con las características de atenuación de diferentes tipos de muros y techos tanto a 2.4GHz como a 5GHz. Dichas librerías son editables y ampliables mediante la edición de un archivo XML. Además la herramienta permite especificar individualmente la altura de cada uno de los muros definidos.

2.3.2 CONFIGURACIÓN DE LA SIMULACIÓN

La herramienta RF3D WifiPlanner permite especificar completamente las características de los APs presentes. Se pueden especificar la posición, la altura, la frecuencia, el estándar, el canal y la potencia de transmisión. Además, en el caso de redes 802.11n se pueden especificar el número de *streams* espaciales o el intervalo de guarda.

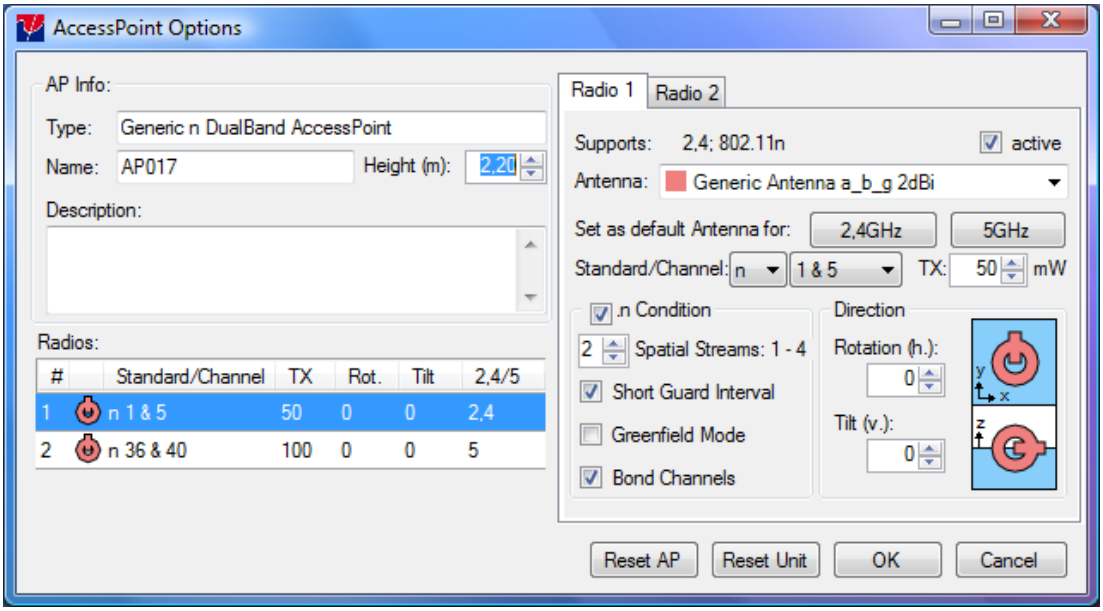

Figura 2.14 Configuración de un Access Point en RF3D

En cuanto a las antenas, RF3D WifiPlanner incluye una librería con los patrones de radiación horizontal y vertical de algunas de las antenas más comunes. Hay patrones tanto de antenas directivas como de antenas omnidireccionales. Además, al igual que las librerías de materiales, las librerías de antenas son editables y ampliables mediante la edición de ficheros XML. Para completar la configuración de un AP, la herramienta permite asignarle una antena, y además especificar el ángulo respecto a la horizontal y la inclinación respecto a la vertical que forma la antena con los ejes del escenario a simular.

Además de todo ello, a la hora de configurar la simulación, la herramienta permite incluir un parámetro de atenuación global del escenario, de modo que se puedan tener en cuenta objetos tales como muebles, estanterías e incluso personas que ,aunque en menor medida, afectan a la propagación de las señales. RF3D WifiPlanner permite seleccionar tres entornos de simulación diferentes:

- *Free Space*: Para escenarios con escasas pérdidas adicionales.
- *Factory/warehouse*: Para escenarios con mediana densidad de obstáculos adicionales.
- *Office*: Para escenarios con alta atenuación debido a la alta densidad de obstáculos adicionales o personas.

Otro aspecto que la herramienta permite configurar es la carga de la red, de modo que se pueden hacer simulaciones con diferente tráfico de red. RF3D WifiPlanner permite además, optimizar el número de APs en función de algún requerimiento de cobertura, interferencia o capacidad de datos.

2.3.3 RESULTADOS Y SALIDAS

La herramienta RF3D WifiPlanner realiza simulaciones tridimensionales de la distribución de señales en edificios y muestra los resultados mediante mapas en 2D que representan secciones horizontales de cada una de las plantas el edificio. Se pueden visualizar mapas que muestren la máxima potencia de señal recibida, la SNR, la interferencia co-canal, la velocidad de datos, o la redundancia.

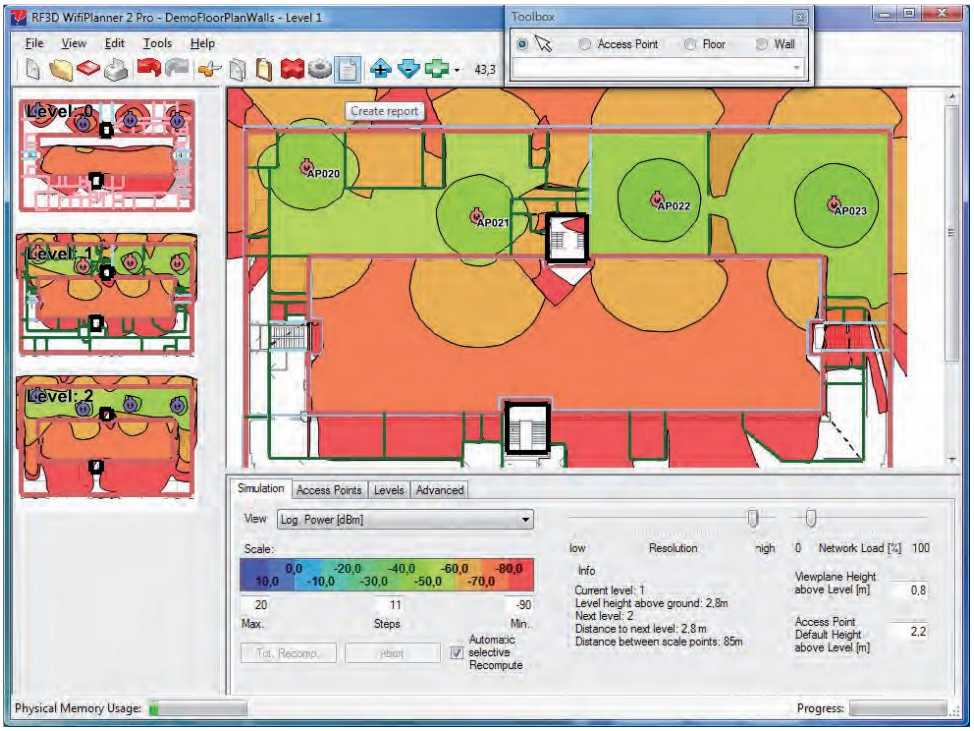

Figura 2.15 Mapa de potencia recibida

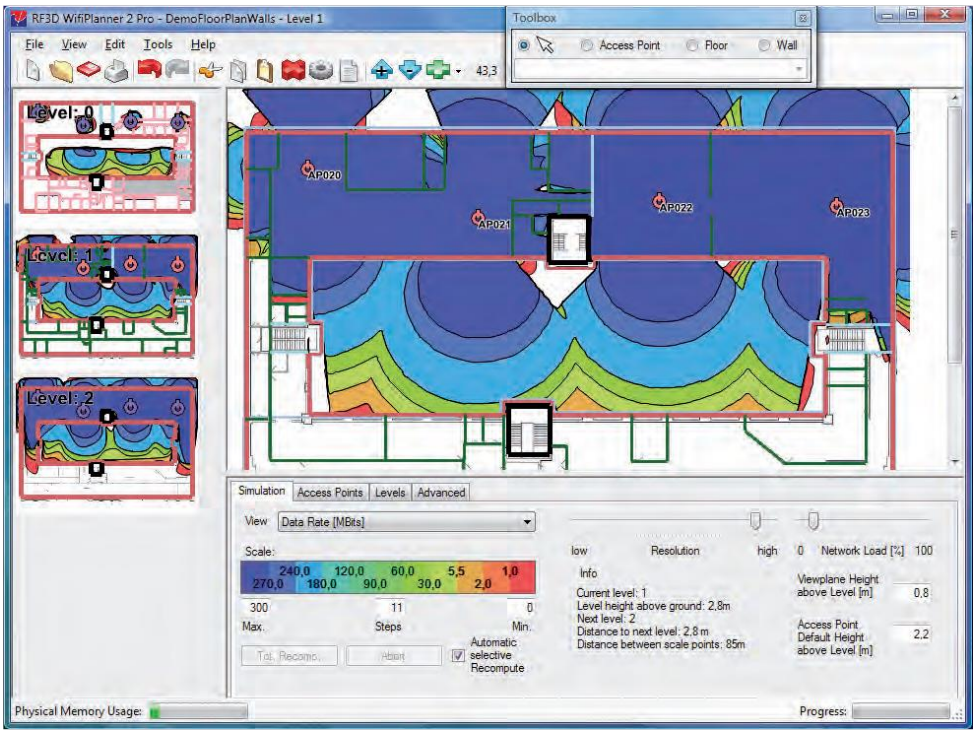

Figura 2.16 Mapa de velocidad de datos

RF3D WifiPlanner permite generar informes con los datos del proyecto simulado, permitiendo su exportación a formatos tan convencionales como PDF, RTF o HTML. Dichos informes son personalizables, pudiendo seleccionarse individualmente la información requerida para cada una de las plantas del edificio.

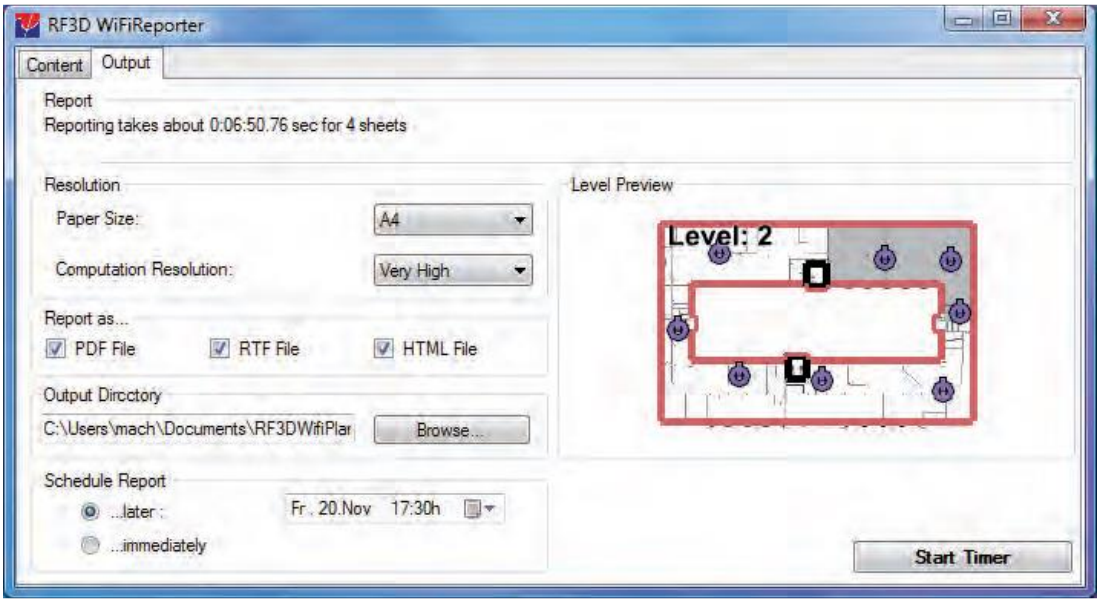

Figura 2.17 Configuración de un reporte en RF3D

2.3.4 REQUISITOS SOFTWARE Y HARDWARE

La herramienta RF3D WifiPlanner puede ser instalada en los sistemas operativos Windows 7, Windows Vista, Windows XP SP2 o Windows 2000 SP3. Además es necesario tener instalado Microsoft.Net Framework 4.0.

Los requisitos hardware son los siguientes:

Procesador:

- Intel Pentium 1.5GHz o mayor. Configuración mínima.
- Intel Pentium 2.0GHz o mayor. Configuración recomendada.

Memoria RAM:

- 1GB para redes de menos de 30 APs.
- 2GB para redes de tamaño mediano.
- Más de 2 GB para redes grandes o simulaciones de alta resolución.

Resolución de pantalla:

- 1024x768 o mayor. Configuración mínima.
- 1280x960 o mayor. Configuración recomendada.

2.3.5 PRECIO Y LICENCIAS

RF3D WifiPlanner se puede adquirir en dos versiones diferentes:

- Versión Lite por 345 € (El número de Access Point está limitado a 10, el número de plantas está limitado a 5 y el módulo de generación de informes no está activado).
- Versión Pro por 845 € (Sin las limitaciones de la versión Lite)

CAPÍTULO 3

MODELOS DE PROPAGACIÓN INDOOR

En el presente capítulo se estudiarán y clasificarán diferentes modelos existentes para la propagación de señales radioeléctricas en entornos de interior (*indoor*). Fundamentalmente se va a distinguir entre modelos empíricos o estadísticos y modelos deterministas.

3.1 MODELOS EMPÍRICOS O ESTADÍSTICOS

Los modelos empíricos o estadísticos se basan en la extrapolación estadística de resultados a partir de medidas realizadas sobre el terreno **[5]**. Las influencias propias del entorno son tenidas 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. Por el contrario, su precisión depende no solo de la precisión de las medidas sino de la similitud entre el entorno donde fueron llevadas a cabo las medidas y el entorno a analizar.

3.1.1 MODELO DE PROPAGACIÓN EN EL ESPACIO LIBRE

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 **[6]**:

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

Ecuación 3.1

Donde:

$P_r(d)$ es la potencia recibida

P_t es la potencia transmitida

G_t es la ganancia de antena transmisora

G_r es la ganancia de la antena receptora

λ es la longitud de onda en metros

d es la distancia de separación entre transmisor y emisor en metros

L son las pérdidas del sistema no achacables a la propagación

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:

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

Ecuación 3.2

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

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

Ecuación 3.3

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.

3.1.2 MODELO MODIFICADO DEL ESPACIO LIBRE

Este modelo **[7]** calcula las pérdidas de trayecto de forma similar a las pérdidas de espacio libre, agregando un exponente adaptable al entorno y una constante de calibración. De este modo, las pérdidas de trayecto son linealmente dependientes con la distancia para un índice de atenuación n específico.

$$l_{mf} = \mathrm{n} * 20\log\left(\frac{\lambda}{(4\pi d)}\right) + \mathrm{l_c}$$

Ecuación 3.4

Donde:
n es la variable de pérdida de trayecto que depende del tipo de entorno.

λ es la longitud de onda en metros

d es la distancia de separación entre transmisor y emisor en metros

l_c es la constante de calibración

Las siguientes tablas muestran valores típicos de n para diferentes entornos **[6]**.

Entorno	n
Edificios (condiciones de visión directa)	1.6 a 2
Edificios (sin visión directa)	2 a 4
Edificios (sin visión directa, separación de uno a tres pisos)	4 a 6

Tabla 3.1 Variable de pérdida de trayecto

Edificio	Frecuencia (MHz)	n	σ(dB)
Bodega grande	914	1,8	5,2
Bodega pequeña	914	2,2	8,7
Oficina, particiones duras	1500	3	7
Oficina, particiones suaves	900	2,4	9,6
Oficina, particiones suaves	1900	2,6	14,1
Fábricas con LOS			
Textil / química	1300	2	3
Textil / química	4000	2,1	7
Papel y cereales	1300	1,8	6
Metalúrgica	1300	1,6	5,8
Ambiente suburbano			
Corredor	900	3	7
Fábricas con NLOS			
Textil / química	4000	2,1	9,7
Metalúrgica	1300	3,3	6,8

Tabla 3.2 Índice de atenuación para diferentes tipos de edificios

3.1.3 MODELO COST 231

El modelo COST 231 **[8]** 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.

La ecuación de pérdidas del modelo es la siguiente:

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

Ecuación 3.5

L_{FS} es la pérdida en espacio libre entre transmisor y receptor

L_C es la constante de pérdidas

K_{wi} es el número de paredes de tipo i penetradas

n es el número de suelos penetrados

L_{wi} es la pérdida debida a muro de tipo i

L_f es la pérdida entre suelos

b es un parámetro empírico

3.1.4 MODELO BASADO EN EL NÚMERO DE MUROS Y SUELOS (SIMPLIFICADO)

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.

$$L = L_1 + 20\log(r) + n_f a_f + n_w a_w$$

Ecuación 3.6

Donde:

r es la distancia en metros en línea recta

L_1 es la perdida de referencia con r =1 metro

a_f es la atenuación por cada suelo que atraviesa

a_w es la atenuación por cada muro que atraviesa

n_f es el número de suelos que atraviesa

n_w es el número de muros que atraviesa

3.1.5 LINEAR PATH ATENUATION MODEL

Modelo propuesto por Andelman **[9]** para un transmisor y un receptor que se encuentran en la misma planta. La fórmula utilizada es la siguiente:

$$PL(d) = PL_{fs} + a * d$$

Ecuación 3.7

Donde:

$PL(d)$ es la pérdida en función de la distancia

PL_{fs} es la pérdida en el espacio libre

a es el coeficiente de atenuación lineal

d es la distancia entre emisor y receptor

Este modelo es susceptible de ser específico de un lugar, esto es debido a que el valor de a varía de un entorno a otro.

3.1.6 DUAL SLOPE MODEL

Este modelo fue desarrollado por Feuerstein y Beyer **[10]**. Ellos observaron que el *path loss* se comporta de diferentes maneras a distancias cercanas y a distancias largas. Para cuantificar este efecto este modelo trabaja con dos modelos *path loss*, uno para distancias cortas y otro para largas. El primero tiene un rango corto y tiene su propio índice de decaimiento. El segundo es función del primero. Para diferenciar la utilización de ambos modelos se introduce la distancia de ruptura. Las fórmulas utilizadas son las siguientes:

$$PL_{DS1}(d) = 10n_1 \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) - a_0$$

Ecuación 3.8

$$PL_{DS2}(d) = PL_{DS1} + 10n_2 \log\left(\frac{d}{d_{BR}}\right)$$

Ecuación 3.9

Donde:

d_{BR} es la distancia de ruptura

λ es la longitud de onda

n_1 es el exponente de pérdidas antes de la distancia de ruptura

n_2 es el exponente de pérdidas después de la distancia de ruptura

d es la distancia entre emisor y receptor

En las regiones cercanas, n_1 se suele establecer a 2; y para las regiones lejanas n_2 se suele poner un valor de 6 ó mayor. La distancia de ruptura d_{BR} juega un papel muy importante y debe ser un valor que se conozca lo mejor posible y que debe ser establecido en base a mediciones.

3.1.7 MOTLEY-KEENAN MODEL

El modelo Motley-Keenan (MKM) **[11]** tan solo tiene en cuenta el trayecto directo entre transmisor y receptor, para el cual asume, que las pérdidas de trayecto se producen debido a la suma de dos factores; uno las pérdidas de espacio libre, y otro las pérdidas debido a intersecciones con muros. Por ello, se debe tener información adicional respecto a la atenuación que inducen los muros, sobre una señal a una frecuencia determinada.

Claramemte, la atenuación inducida por dos muros con características aparentemente iguales, no es necesariamente la misma; sin embargo, el modelo considera que todas las atenuaciones de los muros son iguales. Por esto, lo más adecuado es medir la atenuación causada por cada muro, para obtener un valor promedio, que representa las pérdidas de potencia por penetración en cada muro. Este valor promedio, es el que se emplea en el modelo. De este modo, las pérdidas de propagación según el modelo Motley-Keenan se definen como:

$$l_{MKM} = l_{FS} + l_C + k_w l_w$$

Ecuación 3.10

Donde:

l_{MKM} son las pérdidas de trayecto

l_{FS} son las pérdidas de espacio libre

l_C es la constante de calibración

k_w es el número de muros interceptados por el trayecto directo

l_w son las pérdidas por penetración (iguales para todos los muros)

La exactitud de éste modelo depende de la variedad, tanto geométrica como dieléctrica, de las divisiones presentes en el área de prueba. Así, para un edificio cuyos muros estén hechos del mismo material y de igual espesor; el modelo tendrá una mayor exactitud que en un edificio con diferentes tipos de divisiones tales como: muros, madera, divisiones de oficina, vidrio, etc. ya que en éste último, el valor de atenuación *lw* (valor promedio) que se use, estará más alejado del valor real de atenuación de cada división.

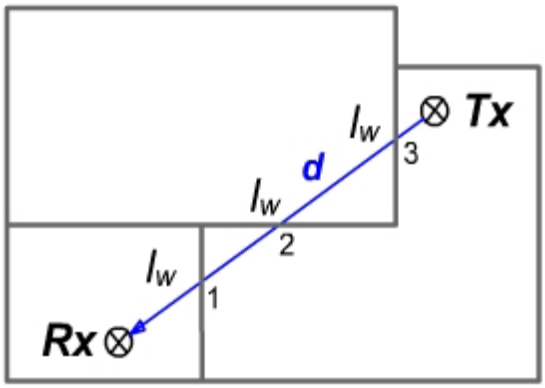

Figura 3.1 Principio del Modelo Motley-Keenan

3.1.8 COST MULTI WALL MODEL

El modelo Cost Multi-Wall (CMWM) **[12]** también se basa en el trayecto directo entre transmisor y receptor. De igual forma que el MKM, éste modelo tiene en cuenta las perdidas por penetración en muros. Sin embargo, en éste caso sí se tienen en cuenta los diferentes tipos de división y por consiguiente las diferentes atenuaciones que cada uno induce. Las pérdidas para el modelo Cost Multi-Wall se definen como:

$$l_{CMWM} = l_{FS} + l_C + \sum_{i}^{N} l_{wi}\, k_{wi}$$

Ecuación 3.11

Donde:

l_{CMWM} son las pérdidas de trayecto

l_{FS} son las pérdidas de espacio libre

l_C es la constante de calibración

k_{wi} es el número de muros de tipo i interceptados por el trayecto directo

l_{wi} son las pérdidas por penetración del muro de tipo i

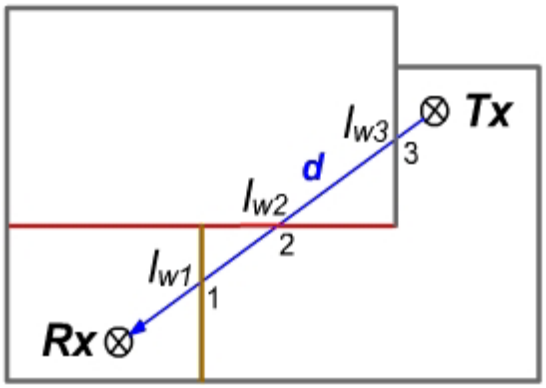

Figura 3.2 Principio del Modelo Cost Multi-Wall

Este modelo requiere una base de datos más detallada respecto a la ubicación de los muros y divisiones en general, y de las respectivas atenuaciones que inducen sobre la señal a una frecuencia de operación específica. Si bien en la literatura **[6]** se encuentran valores típicos de atenuación inducida por diferentes tipos de divisiones a diferentes frecuencias; se logra mayor precisión si dichos valores se obtienen directamente en el área de estudio.

Tipo de Material	Pérdidas (dB)	Frecuencia (MHz)
Metal	26	815
Muro de bloque	13	1300
Muro de concreto	8 a 15	1300
Muro de concreto (27 cm)	24	890
Muro de ladrillo (18 cm)	10,6	890
Muro de ladrillo (23 cm)	13,6	890

Tabla 3.3 Pérdidas de propagación en diferentes materiales

3.1.9 MULTI-WALL-AND-FLOOR MODEL

Los modelos *MKM* y *CMWM* tal y como se presentaron, son aplicables para predicciones en un solo piso, sin embargo, existe una modificación que incluye las pérdidas por penetración de pisos adyacentes **[13]**. Las pérdidas para el modelo Multi-Wall and Floor (MWFM) se definen como:

$$l_{MWF} = l_{FS} + l_C + \sum_{i}^{N} l_{wi}\, k_{wi} + \sum_{i}^{N} l_{fi}\, k_{fi}$$

Ecuación 3.12

Donde:

l_{MWF} son las pérdidas de trayecto

l_{FS} son las pérdidas de espacio libre

l_C es la constante de calibración

k_{wi} es el número de muros de tipo i interceptados por el trayecto directo

l_{wi} son las pérdidas por penetración del muro de tipo i

k_{fi} es el número de pisos o techos de tipo i penetrados

l_{fi} son las pérdidas por penetración de piso de tipo i

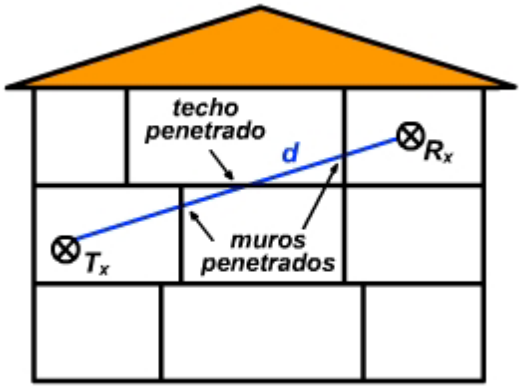

Figura 3.3 Principio del Modelo Multi-Wall and Floor

3.2 MODELOS DE PROPAGACIÓN DETERMINISTAS

Se basan en principios fundamentales de la física en cuanto a propagación de ondas de radio y los fenómenos que la rodean. Su implementación requiere enormes bases de datos de características relativas al entorno, las cuales son imposibles o inviables de obtener de manera práctica.

Los algoritmos usados por los modelos deterministas 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.

3.2.1 MODELOS BASADOS EN TÉCNICAS DE TRAZADO DE RAYOS

El algoritmo de trazado de rayos **[14]**, calcula todos los posibles caminos desde el transmisor al receptor. En los modelos básicos de trazado de rayos, la predicción se basa en cálculos de transmisión en espacio abierto complementados con el efecto de reflexión de las paredes, teniendo en cuenta una única reflexión. Los algoritmos

de trazado de rayos más complejos incluyen mecanismos de difracción, dispersión difusa y penetración a través de diversos materiales.

En conclusión, el nivel de señal en un punto determinado se obtiene mediante la suma de los componentes de todos los caminos posibles existentes entre transmisor y receptor.

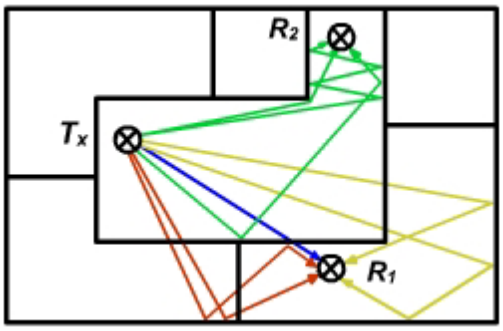

Figura 3.4 Principio de modelos de trazado de rayos

Requieren una representación muy detallada del área a analizar. La precisión del modelo depende en gran medida de la precisión y completitud/complejidad de la base de datos asociada a la representación. Por otro lado, el tiempo de computación depende en modo exponencial de estos detalles.

El modelo básico de los modelos *ray optical* es el modelo *Ray Tracing* **[15]**, el cual traza todos los rayos que llegan al receptor, por lo que presenta un mayor costo computacional, a veces innecesario debido a que no todos los rayos tienen una contribución significativa en la potencia recibida en el receptor. Por ello, se han desarrollado mejoras de éste **[16]**.

3.2.2 MODELO DE TRAYECTO DOMINANTE (DOMINANT PATH)

Este modelo **[17]** no toma en cuenta todos los trayectos posibles entre transmisor y receptor. En cambio, calcula diferentes trayectos que son representativos para ciertos grupos de rayos con características similares; y además, son independientes de las variaciones del canal (movimiento de personas u objetos).

Una vez definidos los trayectos dominantes, se calculan las pérdidas de trayecto aplicando el principio de cualquiera de los modelos empíricos descritos anteriormente, a lo que se añaden las pérdidas debido a cambios de dirección.

Una explicación más detallada de la forma en que se determinan los trayectos dominantes, y de cómo se calculan sus pérdidas; se presenta en **[17]** donde también se describe su implementación mediante redes neuronales.

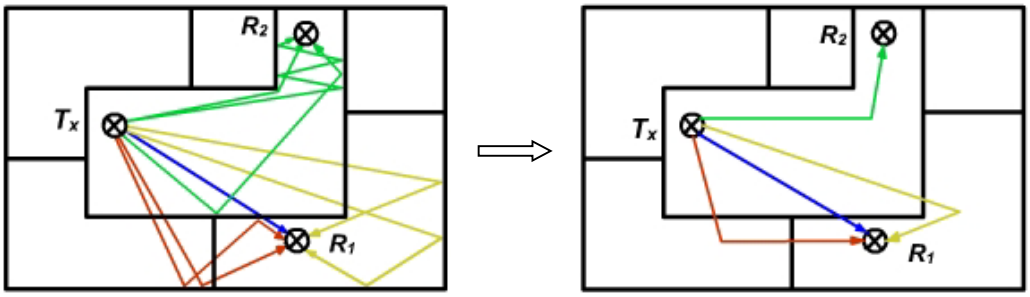

Figura 3.5 Trayectos dominantes

3.2.3 MODELOS FDTD

El método FDTD (*Finite-Difference Time-Domain*) **[18]** es probablemente el método más utilizado para la obtención de una solución numérica de las ecuaciones de Maxwell. En este método las ecuaciones de Maxwell se aproximan por medio de un conjunto finito de ecuaciones diferenciales. Antes de realizar los cálculos es necesario definir una cuadrícula específica (regular o irregular) sobre el área de interés. Una vez que estas condiciones iniciales han sido definidas, el algoritmo FDTD emplea las diferencias centrales para aproximar las derivadas tanto en el espacio como en el tiempo. En los nodos de la cuadrícula la solución se determina iterativamente, resolviéndose de este modo las ecuaciones de Maxwell directamente **[19]**.
Al igual que los modelos basados en trazado de rayos, los modelos FDTD son muy exigentes computacionalmente. El tiempo de computación depende proporcionalmente del tamaño del área a ser analizada, pero no significativamente de los detalles incluidos en su descripción. Sin embargo el número de nodos de la cuadrícula está exponencialmente relacionado al tamaño del área y la frecuencia de operación.

La precisión del modelo FDTD es comparable a la de los modelos basados en trazado de rayos, y la predicción es tan precisa como pueda serlo la base de datos de descripción del área.

3.3 MODELOS BASADOS EN REDES NEURONALES (ANNS)

Estos modelos están basados en redes neuronales de perceptrones multinivel. La implementación de los modelos ANNs **[19]** requiere una base de datos de la planta en el que todas las zonas son clasificadas en diferentes categorías, por ejemplo, muros, pasillos, ventanas, etcétera.

Al modelo hay que proporcionarle en primer lugar las categorías de objetos que existen en el entorno, la distancia normalizada entre emisor y receptor y finalmente información sobre el número y tipo de materiales que se va a encontrar de los diferentes tipos de las categorías. La salida del modelo es el nivel de campo

resultante. Para determinar los parámetros del modelo, hay que proporcionarle datos de medidas tomadas sobre el terreno (datos de entrenamiento).

El uso de Redes Neuronales ha mostrado muy buenos resultados en problemas con conjuntos de datos ruidosos con una leve no linealidad. Este caso se corresponde con el de predicción de niveles de campo, ya que los datos obtenidos de medidas siempre son ruidosos. Otra característica clave de las ANNs es el paralelismo que presentan, permitiendo la rápida evaluación de la solución.

Aunque los procesos de aprendizaje pueden tomar varias horas, el proceso posterior para la predicción de niveles es rápido. La precisión de cada modelo obtenido depende en gran medida de la complejidad de los nodos o neuronas de las que conste.

CAPÍTULO 4

ESTÁNDAR IEEE 802.11

En este capítulo se va a realizar una breve introducción al principal estándar de comunicación utilizado en redes inalámbricas. Se realizará una breve descripción del mismo, así como de las diferentes variantes que han ido surgiendo a partir de los diferentes grupos de trabajo del IEEE.

4.1 ARQUITECTURA DEL IEEE 802.11

En Junio de 1997 el IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) finalizó el estándar inicial para redes inalámbricas **[1]**, IEEE 802.11. Este estándar especifica una frecuencia de operación de 2.4 GHz con velocidades de transmisión de 1 y 2 Mbps.

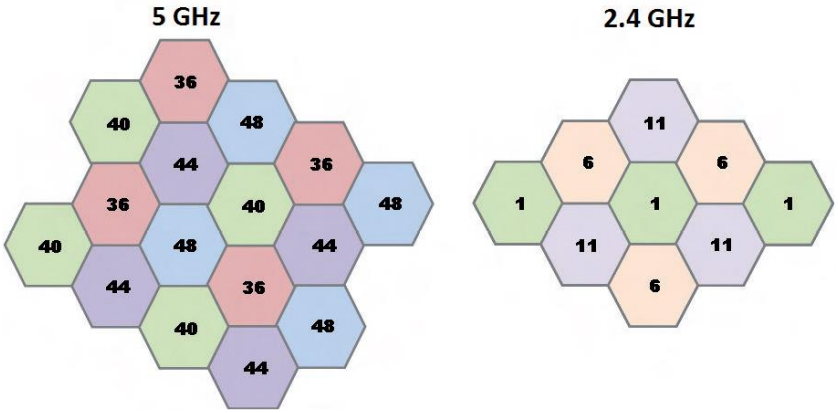

Figura 4.1 Organización celular de los canales en 802.11

El 802.11 está basado en una arquitectura celular donde el sistema se divide en celdas. Cada celda se denomina BSS *(Basic Service Set*) y está controlada por una estación base denominada AP (Access Point). La mayor parte de las instalaciones están compuestas por un conjunto de celdas formando una red con los APs conectados a un backbone. Este conjunto se denomina DS (*Distribution System*). El backbone de red puede ser una LAN cableada o incluso una WLAN. El conjunto completo de elementos descritos conforma una red única 802.11 para los niveles superiores del modelo de referencia OSI y se denomina ESS (*Extended Service Set*).

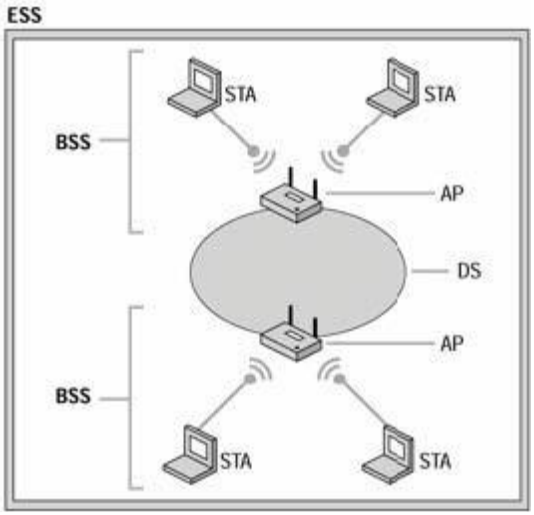

Figura 4.2 Arquitectura 802.11

4.2 ESTÁNDAR 802.11a

Este estándar fue aprobado en diciembre de 1999 como extensión de 802.11. Es capaz de conseguir tasas de hasta 54 Mbps, aunque también puede funcionar a 48, 36, 24, 18, 12 y 6 Mbps en la banda de 5 GHz. Usa modulación OFDM (multiplexación por división de frecuencias ortogonales), tecnología de espectro expandido. Esta técnica distribuye la información en pequeños paquetes que se transmiten simultáneamente en múltiples canales ortogonales, lo que permite recibirlos de forma independiente.

La aceptación de este estándar ha sido menor que la del 802.11b debido a su relativa complejidad y el elevado coste de sus equipos. Los estándares 802.11a y 802.11b son incompatibles entre ellos, dado que cada uno opera en un segmento diferente del espectro. Decir como curiosidad que el estándar 802.11b surgió antes que el 802.11a, aunque por su denominación pudiera parecer lo contrario.

Esta norma pretendía aportar un tipo de redes en otra banda no licitada, 5 GHz, menos saturada que la de los 2.4 GHz, capaz de tasas de transmisión comparables a las de las redes cableadas. Pero el uso de frecuencias mayores implica mayores pérdidas de propagación. Por esto, la densidad de puntos de acceso debe ser mayor que la de una red 802.11b, en torno a una vez y media.

El estándar 802.11a no es directamente compatible con el estándar original 802.11 o su extensión 802.11b ó 802.11g. La principal razón es que operan en rangos de frecuencia diferentes, el primero lo hace a 5 GHz y los otros a 2.4 GHz. Otra razón es la técnica de codificación usada, OFDM frente a FHSS *Frequency Hopping Spread Spectrum)* o DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum)*, usada por los estándares 802.11 y 802.11b.
Sin embargo, usa la misma capa MAC (con *Carrier Sense Múltiple Access/Collision Avoidance,* CSMA/CA) que la especificada en 802.11.

4.3 ESTÁNDAR 802.11b

802.11b es una extensión de la 802.11. Nació como la necesidad de conseguir una tasa de transmisión mayor en la banda de los 2.4 GHz, "*Higher- Speed Physical Layer Extensión in the* 2.4 GHz Band", también se la conoce como 802.11 de alta tasa. Es capaz de operar a velocidades de hasta 11 Mbps, soportando también 5.5, 2 y 1 Mbps.

Fue fruto del grupo de trabajo b de 802.11 y fue aprobada en 1999. 802.11b recoge todos los aspectos incluidos en el estándar de la 802.11, permitiendo una funcionalidad comparable a Ethernet en una red inalámbrica. Este estándar utiliza exclusivamente la modulación DSSS con el sistema de codificación CCK *(Complementary Code Keying)* que sólo funciona con este tipo de modulación. Esto le permite ofrecer hasta 11 Mbps, mientras que su antecesora, 802.11, estaba limitada a 2 Mbps como máximo.

Al trabajar en la banda de los 2.4 GHz se encuentra con el problema de las interferencias con los otros muchos estándares que operan en esta banda y cada día se complica más.

Las estructuras según el estándar 802.11b son compatibles con las implementaciones por la 802.11, dado que la primera usa DSSS y esta modulación está recogida por la 802.11 como una de las dos modulaciones de radiofrecuencia que reconoce. Pero cuando usuarios 802.11b operen bajo redes 802.11, lo harán a una tasa menor de la que permitiría una red 802.11b.

4.4 ESTÁNDAR 802.11g

Este estándar vio la luz en el 2003, trabaja en la banda de los 2.4 GHz y es capaz de alcanzar velocidades de hasta 54 Mbps, aunque puede trabajar también a velocidades de 48, 36, 24, 18, 11, 5.5, 2 y 1 Mbps. Este se diferencia del 802.11b en que puede opcionalmente usar OFDM, en lugar de DSSS (la norma 802.11g establece que se debe usar OFDM para velocidades por encima de 11 Mbps).

La aportación más importante de este estándar es el conseguir una mayor velocidad en la banda de 2.4 GHz, así como incorporar OFDM, lo que le hace ser más eficiente que el resto de los estándares de la 802.11 en esta banda.

El que el 802.11g pueda obtenerse como una evolución del 802.11b, lo hace muy apetecible en entornos en los que ya existe una WLAN 802.11b. Al ser compatible permite que ambas coexistan en la misma red, lo que puede posibilitar una actualización paulatina de sus usuarios de la red 802.11b a la red 802.11g.

Las empresas proveedoras de acceso a Internet inalámbrico tienen en esta la posibilidad de dar acceso de muy alta velocidad a sus usuarios, compatible con otro acceso de menos velocidad (802.11b) con la misma infraestructura.

De nuevo, el problema que tendrá este estándar será el operar en una banda sujeta a muchas fuentes de interferencias y cada vez más poblada.

Como 802.11g es compatible hacia atrás con 802.11b y éste es con 802.11, ambas son compatibles. Para usarla en las dos últimas, la codificación que deberemos usar será DSSS y la velocidad vendrá limitada a como máximo 2 Mbps.

Data Rate for 802.11 g								
SNR dB) / RSSI (dBm)	4	5	6	7	8	9	10	11
-94	1	1	1	1	1	1	1	1
-91	1	1	2	2	2	2	2	2
-87	1	1	2	2	5,5	5,5	5,5	5,5
-86	1	1	2	2	6	9	9	18
-84	1	1	2	2	6	9	9	18
-82	1	1	2	2	6	9	11	24
-80	1	1	2	2	6	9	11	36
-75	1	1	2	2	6	9	11	48
-71	1	1	2	2	6	9	11	54

Tabla 4.1 Velocidad para 802.11g

4.4 ESTÁNDAR 802.11n

El estándar 802.11n fue ratificado por la organización IEEE el 11 de septiembre de 2009.

Está construido basándose en estándares previos de la familia 802.11, agregando antenas *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO) y unión de interfaces de red (*Channel Bonding*), además de agregar tramas en la capa MAC.

MIMO es una tecnología que usa múltiples antenas transmisoras y receptoras para mejorar el desempeño del sistema, permitiendo manejar más información (cuidando la coherencia) que al utilizar una sola antena. Dos beneficios importantes que proporciona 802.11n, son la diversidad de antenas y el multiplexado espacial.

La tecnología MIMO depende de señales multi-ruta. Las señales multi-ruta son señales reflejadas que llegan al receptor un tiempo después de que la señal de línea de visión (*line of sight*, LOS) ha sido recibida. En una red no basada en MIMO, como son las redes 802.11a/b/g, las señales multi-ruta son percibidas como interferencia que degradan la habilidad del receptor de recobrar el mensaje en la señal. MIMO utiliza la diversidad de las señales multi-rutas para incrementar la habilidad de un receptor de recobrar los mensajes de la señal.

Otra habilidad que proporciona MIMO es el Multiplexado de División Espacial (SDM). SDM multiplexa espacialmente múltiples flujos de datos independientes, transferidos simultáneamente en un mismo canal. SDM puede incrementar significativamente el rendimiento de la transmisión al aumentar el número de flujos espaciales. Cada flujo espacial requiere una antena discreta tanto en el transmisor como el receptor. Además, la tecnología MIMO requiere una cadena de radio frecuencia separada y un

convertidor de analógico a digital para cada antena MIMO lo que incrementa el costo de implantación comparado con sistemas sin MIMO.

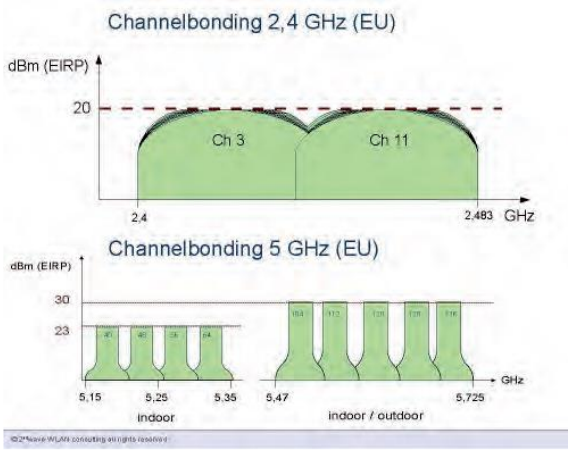

Figura 4.3 Chanel Bonding en 802.11n

Channel Bonding, también conocido como 40 MHz o unión de interfaces de red, es la segunda tecnología incorporada al estándar 802.11n. Ésta permite utilizar dos canales no solapados para transmitir datos simultáneamente, aumentando así la cantidad de datos que pueden ser transmitidos. Se utilizan dos bandas adyacentes de 20 MHz cada una, de ahí el nombre de 40 MHz, permitiendo así doblar la velocidad de la capa física disponible en un solo canal de 20 MHz.

Modulation	RSSI (dBm)	SNR (dB)	Data Rate for 802.11 n			
			20 MHz channel		40 MHz channel	
			800ns GI	400ns GI	800ns GI	400ns GI
BPSK	-86	9	6.50	7.20	13.50	15.00
QPSK	-82	10	13.00	14.40	27.00	30.00
QPSK	-86	11	19.50	21.70	40.50	45.00
16-QAM	-84	11	26.00	28.90	54.00	60.00
16-QAM	-80	11	39.00	43.30	81.00	90.00
64-QAM	-75	11	52.00	57.80	108.00	120.00
64-QAM	-71	11	58.50	65.00	121.50	135.00
64-QAM	-69	11	65.00	72.20	135.00	150.00

Tabla 4.2 Velocidad para 802.11

CAPÍTULO 5

ESPECIFICACIÓN DE REQUISITOS

En este capítulo se realizará una especificación de los requisitos del sistema. Para ello se realizará una breve descripción de los requisitos funcionales y no funcionales del sistema. En los capítulos posteriores de diseño e implementación se realizará una descripción más exhaustiva de dichos requisitos.

5.1 REQUISITOS NO FUNCIONALES

En esta sección expondremos los requisitos no funcionales que ha de cumplir el *software* de planificación Wi-Fi que se va a desarrollar.

5.1.1 REQUISITOS DE HARDWARE

El *software* se desarrollará, implementará y validará en un ordenador personal portátil cuyas características técnicas principales son:

- Procesador AMD E-350 a 1.6 Ghz
- Memoria RAM instalada de 4GB (3,49 GB utilizables)

De forma que las características técnicas del ordenador del usuario que haga uso del *software* deberán ser similares o superiores a las citadas anteriormente si se quieren obtener tiempos de simulación relativamente razonables (en función siempre de la complejidad del escenario a simular).

5.1.2 REQUISITOS DE SOFTWARE

El *software* se desarrollará, implementará y validará usando el entorno de desarrollo MATLAB en su versión R2009a. De forma que, para asegurar su correcto funcionamiento, el ordenador personal en el que se quiera ejecutar el *software*, deberá tener instalada dicha versión de MATLAB o una posterior.

Además, la herramienta desarrollada será totalmente independiente, de forma que no será necesario disponer de ningún otro programa o *software* (aparte de MATLAB) para hacer uso de ella.

5.1.3 REQUISITOS DE APARIENCIA E INTERFAZ EXTERNA

El *software* se desarrollará haciendo uso de la interfaz gráfica GUI de MATLAB. Se debe conseguir una herramienta que funcione completamente como un programa independiente, sin necesidad de usar en ningún momento la línea de comandos de MATLAB.

5.1.4 REQUISITOS DE USABILIDAD

El *software* debe estar implementado de forma que el nivel de conocimiento mínimo exigido a los usuarios, sobre el entorno de programación MATLAB, sea lo más básico posible.

5.1.5 REQUISITOS DE DISPONIBILIDAD

El *software* se ejecutará de forma local, de modo que no existirá ningún requerimiento a cerca de las conexiones de red del ordenador personal donde se ejecuta.

5.2 REQUISITOS FUNCIONALES

En esta sección, enumeraremos y describiremos brevemente los requisitos funcionales de nuestro sistema. Para ello utilizaremos una enumeración de los mismos siguiendo el siguiente formato *RF_HPWxx* donde *RF* es el acrónimo de Requisito Funcional, *HPW* es el acrónimo de Herramienta de Planificación Wi-Fi y *xx* es el número o índice del requisito. Cada requisito tendrá un título y una descripción.

Se realizado una división de los requisitos generales del sistema en función del módulo al que pertenecen cada uno de ellos. Tal y como se explica más detalladamente en capítulos posteriores, el sistema se ha dividido en ocho módulos fundamentales: archivo, materiales, planta, obstáculos, *access point*, antenas, simulación y estadística.

A continuación se presentan las tablas de requisitos con el formato especificado anteriormente.

5.2.1 REQUISITOS MÓDULO ARCHIVO

Aquí se especifican los requisitos que hacen referencia a la gestión de los proyectos y el almacenamiento de información.

RF_HPW01	CrearProyecto
El sistema permitirá crear un nuevo proyecto.	
RF_HPW02	GuardarProyecto
El sistema permitirá guardar el estado actual de un proyecto, sobrescribiendo el estado anterior del mismo.	
RF_HPW03	GuardarProyectoComo
El sistema permitirá guardar el estado actual de un proyecto, asignándole un nombre diferente al actual, de forma que no se sobrescriba el estado anterior del mismo.	
RF_HPW04	CargarProyecto

El sistema permitirá cargar un proyecto previamennte guardado.	
RF_HPW05	GuardarImagen
El sistema permitirá guardar imágenes de planos o simulaciones en un formato estándar de imágen (JPG, BMP, PNG, etc)	

Tabla 5.1 Requisitos módulo Archivo

5.2.2 REQUISITOS MÓDULO MATERIALES

Aquí se especifican los requisitos que hacen referencia a la base de datos de materiales usados en los edificios (hormigón, ladrillo, madera, cristal, etcétera)

RF_HPW06	CrearBaseDatosMateriales
El sistema permitirá crear una base de datos con los materiales, su descripción, su atenuación a 2.4 GHz y a 5 GHz, y su color asociado.	
RF_HPW07	ModificarBaseDatorMateriales
El sistema permitirá modificar cualquier característica de cualquier material de la base de datos de materiales	
RF_HPW08	EliminarMaterial
El sistema permitirá eliminar cualquier material de la base de datos de materiales.	
RF_HPW09	AñadirMaterial
El sistema permitirá añadir un nuevo material a la base de datos	
RF_HPW10	ExportarMateriales
El sistema permitirá exportar la base de datos de materiales a un archivo de Excel	
RF_HPW11	ImportarMateriales
El sistema permitirá importar la base de datos de materiales desde un archivo de Excel	
RF_HPW12	CopiarMateriales
El sistema permitirá copiar la base de datos de materiales utilizada en otro proyecto	

Tabla 5.2 Requisitos módulo Materiales

5.2.3 REQUISITOS MÓDULO PLANTA

Aquí se especifican los requisitos que hacen referencia a la composición de los planos de planta de un edificio.

RF_HPW13	CargarPlanta
El sistema permitirá cargar una imagen bidimensional, en algún formato de imagen estándar (JPG, BMP, PNG, etcétera), del plano de planta de un edificio.	
RF_HPW14	AñadirPlanta
El sistema permitirá añadir más de un plano de planta en cada proyecto (para poder simular conjuntamente edificios de varias plantas).	
RF_HPW15	AlinearPlanta
El sistema permitirá realizar el alineamiento vertical entre dos planos de planta del mismo edificio	
RF_HPW16	EstablecerEscala
El sistema permitirá introducir la escala de los planos de planta cargado. (Una sola escala para todos los planos de un proyecto)	
RF_HPW17	AlturaPlanta
El sistema permitirá establecer la altura de cada una de las plantas del edificio.	
RF_HPW18	EliminarPlanta
El sistema permitirá eliminar cualquier planta.	

Tabla 5.3 Requisitos módulo Planta

5.2.4 REQUISITOS MÓDULO OBSTÁCULOS

Aquí se especifican los requisitos que hacen referencia a la descripción y localización de los obstáculos (paredes, techos, puertas, ventanas, patios, etcétera) presentes en el plano de planta de un edificio.

RF_HPW19	AñadirObstáculo
El sistema permitirá establecer la ubicación de un obstáculo (muro, pared, mueble, puerta, ventana, etc) sobre un plano planta. Además, a cada obstáculo se le asignará individualmente una altura y un material (ladrillo, hormigón, madera, etcétera)	
RF_HPW20	EliminarObstáculo
El sistema permitirá la eliminación de cualquier obstáculo previamente añadido.	
RF_HPW21	ModificarObstáculo
El sistema permitirá modificar cualquier característica de un obstáculo (posición en el plano, material o altura).	
RF_HPW22	EstablecerTecho

El sistema permitirá asignar el material del suelo o techo de separación entre cada una de las plantas del proyecto.	
RF_HPW23	AñadirPatio
El sistema permitirá introducir la localización de zonas que supongan aperturas en los techos de las plantas, tales como patios, etc	
RF_HPW24	EliminarPatio
El sistema permitirá la eliminación de un patio.	
RF_HPW25	ExportarObstáculos
El sistema permitirá exportar los datos de los obstáculos presentes en el plano de planta a un archivo de Excel	
RF_HPW26	ImportarObstáculos
El sistema permitirá importar los datos de los obstáculos presentes en el plano de planta dese un archivo de Excel.	

Tabla 5.4 Requisitos módulo Obstáculos

5.2.5 REQUISITOS MÓDULO ACCESS POINT

Aquí se especifican los requisitos que hacen referencia a la descripción, en cuanto a localización, orientación, y parámetros de emisión, de los puntos de acceso presentes en los planos de planta del edificio.

RF_HPW27	AñadirAP
El sistema permitirá añadir un *Acces Point* en la ubicación especificada por el usuario.	
RF_HPW28	ConfigurarParámetrosAP
El sistema permitirá establecer la configuración de un *Access Point*, se podrán configurar la frecuencia y canal de operaciónla potencia de transmisión y el tipo de antena	
RF_HPW29	ConfigurarPosiciónAP
El sistema permitirá establecer la altura a la que sitúa el *Access Point*, así como la orientación vertical y horizontal de la antena del mismo.	
RF_HPW30	EliminarAP
El sistema permitirá eliminar un *Access Point*	
RF_HPW31	ModificarAP

El sistema permitirá modificar cualquier parámetro de un *Acess Point*, ya sea un parámetro de ubicación, orientación, antena o emisión.

Tabla 5.5 Requisitos módulo Access Point

5.2.6 REQUISITOS MÓDULO ANTENAS

Aquí se especifican los requisitos que hacen referencia a la base de datos de antenas disponibles para la configuración de los puntos de acceso.

RF_HPW32	VisualizarAntena
El sistema permitirá visualizar los diagramas de radiación vertical y horizontal de las antenas tanto a 2.4 GHz como a 5 GHz	
RF_HPW33	AñadirAntena
El sistema permitirá añadir una nueva antena a la base de datos de antenas	
RF_HPW34	EliminarAntena
El sistema permitirá eliminar cualquier antena de la base de datos de antenas.	
RF_HPW35	ModificarAntena
El sistema permitirá modificar el valor de cualquier punto del diagrama de radiación de una antena.	

Tabla 5.6 Requisitos módulo Antenas

5.2.7 REQUISITOS MÓDULO SIMULACIÓN

Aquí se especifican los requisitos que hacen referencia a la configuración y ejecución de las simulaciones, así como de la visualización de las mismas.

RF_HPW36	EstablecerPlanoSimulación
El sistema permitirá establecer la altura del plano horizontal en el que se realice la simulación.	
RF_HPW37	EstablecerResolucion
El sistema permitirá establecer diferentes resoluciones (en puntos por imagen) para la simulación.	
RF_HPW38	SimularPotenciaRecibida
El sistema permitirá calcular la potencia de señal recibida en cada punto del plano,	
RF_HPW39	SimularCobertura

El sistema permitirá determinar el *AccessPoint* del que se recibe mayor potencia de señal en cada punto del plano	
RF_HPW40	SimularInterferencia
El sistema permitirá calcular la relación señal a interferencia SNIR en cada punto del plano	
RF_HPW41	SimularDataRate
El sistema permitirá calcular la velocidad de datos en cada punto del plano	
RF_HPW42	MostrarMapaPotencia
El sistema permitirá mostrar una imagen a color con la potencia de señal recibida en cada punto, superpuesta a la imagen del plano de planta.	
RF_HPW43	MostrarMapaCobertura
El sistema permitirá mostrar una imagen a color indicando el *Access Point* que proporciona mayor potencia de señal recibida a cada punto, superpuesta a la imagen del plano de planta.	
RF_HPW44	MostrarMapaInterferencia
El sistema permitirá mostrar una imagen a color con el valor de la SNIR en cada punto, superpuesta a la imagen del plano de planta.	
RF_HPW45	MostrarMapaDataRate
El sistema permitirá mostrar una imagen a color con la velocidad de datos en cada punto, superpuesta a la imagen del plano de planta.	
RF_HPW46	VisualizarPrMin
El sistema permitirá visualizar un mapa que indique si los puntos del plano superan o no un nivel de potencia de señal recibida (establecido previamente por el usuario).	
RF_HPW47	EstimarIteraciones
El sistema permitirá estimar el número de iteraciones de una simulación	

Tabla 5.7 Requisitos módulo Simulación

5.2.8 REQUISITOS MÓDULO ESTADÍSTICAS

Aquí se especifican los requisitos que hacen referencia al cálculo y visualización de estadísticas referentes a los datos obtenidos en las simulaciones.

RF_HPW48	EstadísticaCDF
El sistema permitirá calcular la CDF (*Cumulative Distribution Function*) de los valores de potencia recibida, de interferencia y de velocidad de datos.	

RF_HPW49	EstadísticaPDF
El sistema permitirá calcular la PDF (*Probability Density Function*) de los valores de potencia recibida, de interferencia y de velocidad de datos.	
RF_HPW50	ParámetrosEstadísticos
El sistema permitirá calcular parámetros estadísticos como la media o la varianza de los valores de potencia recibida, de interferencia y de velocidad de datos.	
RF_HPW51	EstadísticaCobertura
El sistema permitirá calcular el porcentaje de cobertura asignada a cada Access Point	
RF_HPW52	DefinirZonaInterés
El sistema permitirá seleccionar una zona de interés del plano de planta. Podrán calcularse estadísticas específicas para los puntos pertenecientes a dicha zona.	

Tabla 5.8 Requisitos módulo Estadística

CAPÍTULO 6

PLANIFICACIÓN Y ESTIMACIÓN DE COSTES

En este capítulo se muestra una planificación orientativa de la ejecución del proyecto, basada en el cómputo de horas estimadas para realización de cada una de las tareas. Se mostrará la evolución temporal o cronograma con todas las actividades o tareas que se planificaron para el desarrollo y confección del proyecto.

Además, se describen los costes asociados a la realización del presente proyecto, principalmente se desglosan en dos tipos de gastos: recursos humanos y recursos materiales.

6.1 FASES DE DESARROLLO

A continuación se van a describir brevemente las fases de desarrollo del proyecto y las tareas a realizar en cada una de ellas.

6.1.1 REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

Se hace un análisis de las posibles soluciones, totales o parciales, del problema a resolver, de modo que pueda servir como justificación para la realización del proyecto.

6.1.2 ESPECIFICACIÓN DE REQUISITOS

Se lleva a cabo un exhaustivo análisis de los requisitos funcionales y no funcionales impuestos por las características de la solución que se quiere implementar.

6.1.3 DISEÑO

Se hace un diseño de cómo se van a cumplir los requisitos especificados anteriormente, justificándose pertinentemente cada una de las decisiones adoptadas.

6.1.4 IMPLEMENTACIÓN

Se realiza la implementación, en un lenguaje de programación justificadamente escogido, de la solución diseñada anteriormente.

6.1.5 EVALUACIÓN Y VALIDACIÓN

Se realiza un testeo de todas las funciones o requisitos implementados. Además se intenta demostrar cómo se ha conseguido resolver el problema en cuestión. Para la validación suele ser habitual comparar los resultados obtenidos con los proporcionados por otra solución similar ya existente.

6.1.6 DOCUMENTACIÓN

Consiste en la redacción del presente documento.

6.2 CRONOGRAMA

La estimación del cronograma de ejecución del proyecto se ha llevado a cabo considerando una jornada laboral aproximada de 4 horas, excluyendo los fines de semana y festivos. La siguiente figura muestra el diagrama de Gantt resultante. Los días que aparecen son el total de días laborables empleados en cada tarea.

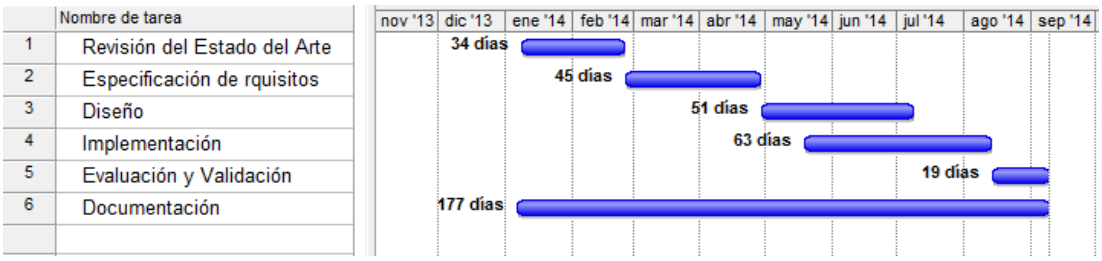

Figura 6.1 Planificación temporal del proyecto

En la siguiente tabla se muestran las fechas de inicio y fin de cada tarea.

Tarea	Duración	Comienzo	Fin
Revisión del Estado del Arte	34 días	08/01/2014	24/02/2014
Especificación de requisitos	45 días	25/02/2014	28/04/2014
Diseño	51 días	29/04/2014	08/07/2014
Implementación	63 días	19/05/2014	13/08/2014
Evaluación y Validación	19 días	14/08/2014	09/09/2014
Documentación	177 días	06/01/2014	09/09/2014

Tabla 6.1: Fechas de comienzo y fin de las tareas

6.3 ESTIMACIÓN DE COSTES

Aquí se realizará una estimación de los costes del proyecto, para ello se tendrán en cuenta los recursos humanos y materiales empleados en el mismo.

6.3.1 RECURSOS HUMANOS

Han participado en el proyecto:

- D. Jorge Navarro Ortiz, profesor del Departamento de Teoría de la Señal, Telemática y Comunicaciones de la Universidad de Granada, en calidad de tutor del proyecto.
- D. Daniel Escudero Brocal, alumno de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática de Telecomunicación de la Universidad Granada, autor del proyecto.

Para la estimación de los honorarios de las personas involucradas en el proyecto, podemos tener en cuenta lo siguiente: antaño, la Junta General del Colegio Oficial

de Ingenieros de Telecomunicación (COIT) ofrecía una cantidad a modo de ejemplo para que los profesionales libres ejercientes pudieran disponer de una referencia con la que estimar sus honorarios. Sin embargo, el Ministerio de Economía y Hacienda remitió a todos los colegios profesionales una nota **[15]**, siguiendo directivas europeas, con la que se informó que no se debe, ni siquiera, publicar un baremo con los honorarios, ya que éstos son libres y responden al libre acuerdo entre el profesional y el cliente. Por lo tanto, podríamos fijar los honorarios en 20€/hora para D. Daniel Escudero Brocal y 50€/hora para D. Jorge Navarro Ortiz.

Se observa en el diagrama de Gantt (Figura 6.1) que la duración total del proyecto es de 177 días, por lo que el número de horas proyectando sería de 177 x 4 = 708.

Por otra parte, durante el periodo de ejecución del proyecto, se estiman un total de 10 tutorías de una hora de duración aproximada.

Con estos datos, la siguiente tabla refleja los costes totales por recursos humanos del proyecto.

Concepto	Coste/tiempo	Cantidad	Total
Trabajo proyectando	20€/hora	708 horas	14.160€
Tutorías	50€/hora	10 horas	500€
		Total:	14.660€

Tabla 6.2 Coste en recursos humanos del proyecto

6.3.2 RECURSOS MATERIALES

Los recursos materiales (software o hardware) necesarios para la ejecución del proyecto son los siguientes:

- Ordenador personal.
- MATLAB. Entorno de desarrollo interactivo con lenguaje de programación propio.
- Microsoft Office. Paquete de ofimática para procesamiento de textos, gráficos, etc.

Para estimar su coste se ha empleado el método de estimación directa simplificada publicado por Agencia Tributaria del Gobierno de España **[16]**.

De modo que haciendo uso del baremo de amortizaciones vigentes para el presente año, se ha tomado un coeficiente de amortización del 25% para los equipos de tratamiento de la información y sistemas y programas informáticos, durante un periodo de 4 años.

La siguiente tabla refleja los costes totales por recursos materiales del proyecto.

Concepto	Coste unitario (I.V.A incluido)	Amortización	Tiempo	Total
Ordenador personal	800 €	25%	8 meses	200€
Microsoft Office	569€	25%	8 meses	142,25€
MATLAB	2000€	25%	8 meses	500€
			Total	842,25€

Tabla 6.3 Coste en recursos materiales del proyecto

6.4. COSTE TOTAL DEL PROYECTO

El coste total del proyecto, sumando con los costes por recursos humanos y materiales, queda reflejado en la siguiente tabla:

Concepto	Cantidad (I.V.A incluido)
Recursos Humanos	14.660€
Recursos Materiales	842,25€
Total	15.502,25€

Tabla 6.1 Presupuesto total del proyecto

El coste total del proyecto asciende a 15.502,25€, QUINCE MIL QUINIENTOS DOS CON VEINTICINCO EUROS.

CAPÍTULO 7

DISEÑO

En este capítulo se abordará el diseño de la herramienta de planificación Wi-Fi, que es lo objetivo final de este proyecto. Para ello, habrá que satisfacer todos los requisitos funcionales y no funcionales descritos en el capítulo cinco. Además, se hará una justificación de las decisiones tomadas, apoyándonos en toda la información recogida en capítulos anteriores.

Además, se presentarán diagramas de funcionamiento de los principales casos de uso de la herramienta.

7.1 ENTORNO DE PROGRAMACIÓN

La primera decisión a tomar es elegir un entorno de programación y un lenguaje de programación para el desarrollo del proyecto.

Atendiendo a los requisitos no funcionales de nuestro proyecto, podemos citar algunas de las características principales que posee la herramienta y que nos va a determinar el lenguaje de programación a usar.

- Se requiere que la herramienta sea totalmente gráfica, es decir, se trabaje con un entorno gráfico y no con línea de comandos.
- Se requiere que la herramienta trabaje con procesado imágenes.
- Se requiere que la herramienta trabaje con matrices de grandes dimensiones
- Se requiere que la herramienta funcione en un entorno local, no son necesarias funciones de red.

Teniendo en cuenta todas estas características, el entorno de programación escogido ha sido MATLAB, por las siguientes razones:

- Posee un lenguaje de programación de alto nivel propio.
- Posee una interfaz gráfica de usuario GUI.
- Tiene implementadas funcionalidades para el procesado de imágenes.
- Tiene una alta capacidad para el cálculo matricial.

7.2 ESTRUCTURA GENERAL DE LA HERRAMIENTA

Para poder realizar el diseño completo de la herramienta, lo primero es tener claro, por un lado, el caso de uso principal de la misma, y por otro lado, su interfaz o vista principal.

7.2.1 CASO DE USO PRINCIPAL DE LA HERRAMIENTA

El objetivo final de una herramienta de planificación Wi-Fi es el de simular un determinado escenario y poder extraer información de dicha simulación. Por lo tanto, el caso de uso genérico sería el siguiente:

- Se introducen los planos de planta del edifico a simular.
- Se configuran parámetros referentes a los planos de planta (alturas, escala, etcétera).
- Se añaden o dibujan sobre los planos de planta los obstáculos presentes en los mismos (paredes, puertas, ventanas, patios, muebles, etcétera)
- Se sitúan los *Access Point* presentes en el edificio.
- Se configuran dichos Access Point (banda, canal, potencia, diagrama de radiación, altura, etcétera)
- Se configuran parámetros propios de la simulación (altura de plano de simulación, resolución, etcétera)
- Se realiza la simulación.
- Se muestran los resultados obtenidos mediantes dos formas:
    - Imágenes en 2D superpuestas al plano de planta (potencia recibida, cobertura, interferencia, *data rate*, etcétera)
    - Funciones estadísticas y parámetros estadísticos

La siguiente figura muestra el diagrama de ejecución del caso de uso principal de la herramienta:

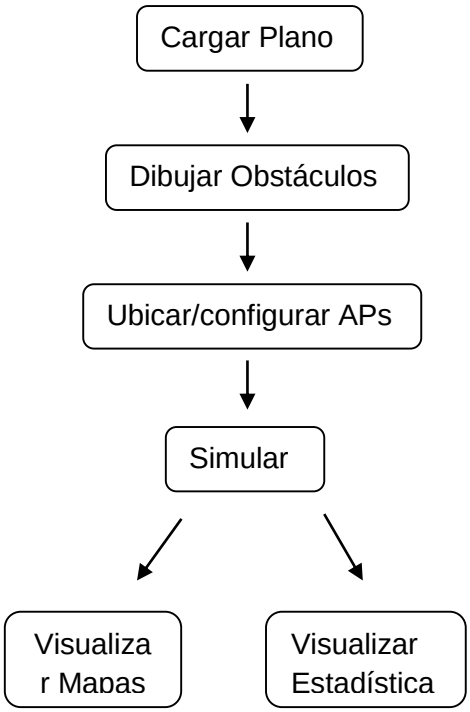

Figura 7.1 Diagrama de caso de uso principal

7.2.2 MODULARIZACIÓN DE LA HERRAMIENTA

Para facilitar la tarea del diseño, es conveniente descomponer el diseño en varias partes, de forma que se resuelvan tareas más pequeñas. Por lo tanto, se realizará una modularización de la herramienta.

En el caso de uso principal descrito anteriormente se observan algunos de los módulos en los que se dividirá la herramienta. Será necesario un módulo denominado *Planta* en el que se realicen las tareas relacionadas con los planos de planta de los edificios. Otro módulo denominado *Obstáculos* en el que se pueda dibujar o describir el interior de los edificios. Será necesario un módulo denominado *Access Point* en el que se puedan localizar y configurar los mismos. Además, existirá un modulo denominado *Simulación* en el que se configurarán y ejecutarán las simulaciones y se visualizarán sus resultados. Por último, es necesario un módulo denominado *Estadística* en el que se muestren y funciones y parámetros estadísticos de los resultados de las simulaciones.

Además de los módulos citados anteriormente, serán necesarios algunos más. Existirá un módulo denominado *Archivo* para realizar todas las tareas de gestión de los proyectos. Como la herramienta precisa de una base de datos de materiales, será necesario un módulo denominado *Materiales* en el que se realice cualquier gestión o modificación de esa base de datos. En último lugar, ya que la herramienta también necesita de una base de datos de antenas, se creará un módulo denominado *Antenas* en el que se gestione dicha base de datos y se visualicen los diagramas de radiación de las antenas.

7.2.3 INTERFAZ PRINCIPAL

La siguiente tarea es el diseño de la interfaz principal de la herramienta. La idea es poder acceder rápidamente a cualquier módulo de la herramienta, de modo que solución adoptada es la de diseñar una interfaz propia para cada uno de los módulos y situar un menú, que estará siempre fijo, en la parte superior de la pantalla, de modo que se pueda alternar siempre entre cualquier módulo.

El diseño de la herramienta se hará de forma que sea lo más dinámica posible, así que no se requerirán confirmaciones al pasar de un módulo a otro, sino que el estado de cada uno de los módulos (los valores que contengan los campos, botones o imágenes presentes en ellos) se irá guardando automáticamente con cada acción que realice el usuario.

7.3 DISEÑO DE LOS MÓDULOS

Uno de los principales objetivos del proyecto es que la herramienta final sea fácil de usar, de modo que todo el diseño se hará de forma que un usuario sin conocimiento o uso anterior de MATLAB pueda utilizarla. No se realizará ninguna configuración de

archivos, ni se ejecutará nada por línea de comandos, sino que todo se hará a través de la interfaz gráfica. Dicha premisa está presente en el en el diseño de todos los módulos que se describe a continuación.

7.3.1 MÓDULO ARCHIVO

La especificación de requisitos para este módulo se muestra en la siguiente tabla:

Número	Referencia	Nombre
1	RF_HPW01	CrearProyecto
2	RF_HPW02	GuardarProyecto
3	RF_HPW03	GuardarProyectoComo
4	RF_HPW04	CargarProyecto
5	RF_HPW05	GuardarImagen

Tabla 7.1 Requisitos módulo Archivo

El diseño de la interfaz gráfica para este módulo es sencillo, simplemente se desplegará un menú vertical con cada una de las opciones disponibles (Nuevo Proyecto, Cargar Proyecto, Guardar Proyecto y Guardar Imagen),

El requisito número 01 consiste en poder crear un nuevo proyecto. Para ello, al seleccionar dicha opción deberán ir apareciendo ventanas de diálogo emergentes en las que poder ir introduciendo datos. Se deberá introducir en primer lugar el nombre del proyecto y el número de plantas del edificio a simular. A continuación, se irán cargando uno a uno los planos de planta (requisito *cargarPlanta* que se explicará posteriormente en el módulo *Planta*). Además, por cada plano insertado, deberá aparecer la opción de alinear planta (requisito *alinearPlanta* que se explicará posteriormente en el módulo *Planta*). Por último, se deberá poder establecer la escala de los planos del edificio (requisito *alinearPlanta* que se explicará posteriormente en el módulo *Planta*).

Una vez terminado este proceso, se guardará automáticamente un archivo denominado *nombre.mat* donde nombre hace referencia al nombre impuesto al sistema. Dicho archivo consiste en una estructura de datos de MATLAB en la que se guardan los valores de todas las variables, vectores o matrices que se deseen. Se irán indicando, para cada uno de los módulos, las variables que aportan a dicha estructura.

El requisito número 02 consiste en poder guardar el estado actual del proyecto sobrescribiendo el estado anterior. Esta tarea se realizará de forma automática, es decir, cada vez que se realice un cambio en algún dato del proyecto, se guardará automáticamente, de forma que se sobrescribirá el archivo *nombre.mat* con los valores actuales del sistema.

El requisito número 03 consiste en poder guardar el estado actual del proyecto creando un proyecto igual al actual pero con un nombre diferente. Para ello, al seleccionar dicha opción aparecerá una ventana para elegir el nuevo nombre que queremos dar al proyecto, entonces, se creará otro archivo .mat con los valores actuales del sistema. De esta forma, se podrán guardar todas las simulaciones de un proyecto que se deseen.

El requisito número 04 consiste en poder cargar un proyecto. Para ello, al seleccionar dicha opción aparecerá una ventana para elegir el archivo .mat del proyecto que se desea cargar. Se actualizarán los valores de todas las variables del proyecto con los del archivo .mat seleccionado.

El requisito número 05 consiste en poder guardar cualquier imagen de un plano de planta en un formato de imagen estándar (JPG, BMP, PNG, etcétera). Para ello, al seleccionar dicha opción aparecerá una ventana para elegir el nombre con el que queremos guardar la imagen. La imagen que se guardará será la que haya en dicho momento en la pantalla del programa.

7.3.2 MÓDULO MATERIALES

La especificación de requisitos para este módulo se muestra en la siguiente tabla:

Número	Referencia	Nombre
6	RF_HPW06	CrearBaseDatosMateriales
7	RF_HPW07	ModificarBaseDatorMateriales
8	RF_HPW08	EliminarMaterial
9	RF_HPW09	AñadirMaterial
10	RF_HPW10	ExportarMateriales
11	RF_HPW11	ImportarMateriales
12	RF_HPW12	CopiarMateriales

Tabla 7.2 Requisitos módulo Materiales

El requisito 06 hace referencia a la necesidad de que la herramienta funcione con una base de datos de materiales. Cuando se realiza la descripción de los obstáculos presentes en un edificio (paredes, techos, puertas, etcétera), es necesario indicar para cada uno de ellos el valor de su atenuación tanto a 2.4 GHz como a 5 GHz. Obviamente, si se quisiese hacer un modelado exacto del edificio, habría que medir experimentalmente, para cada obstáculo, el valor concreto de su atenuación, ya que dicha atenuación depende tanto del tipo de material como del grosor del mismo. La solución es, por tanto, es tener una base de datos con los tipos de materiales más comunes y con los grosores más típicos.

Para almacenar dicha base de datos, se usará una estructura .mat que contendrá los siguientes datos:

- Vector con el nombre de datos de cada material.
- Vector con la atenuación a 2.4 GHz de cada material.
- Vector con la atenuación a 5 GHz de cada material.
- Vector con la descripción de cada material.
- Vector con el código RGB del color asociado a cada material.

La interfaz gráfica para este módulo consistirá en un una tabla en la que se muestren las características de cada material. Dicha tabla ocupará la mayor parte de la pantalla, y a su alrededor se colocarán los botones que invocarán a las funciones de gestión y modificación de dicha base de datos.

Es importante reseñar, que la base de datos puede ser diferente para cada proyecto. Por lo tanto, se guardará un archivo llamado *BD_nombre.mat* donde nombre es el *nombre* del proyecto en cuestión, para cada proyecto. Existirá una base de datos por defecto llamada *BD_default.mat* de modo que al crear un nuevo proyecto, la base de datos asociada sea una copia de la base de datos por defecto. A partir de ahí, cualquier modificación se realizará sobre la base de datos propia del proyecto. Además, las modificaciones se irán guardando automáticamente.

La base de datos por defecto usada para nuestra herramienta la hemos extraído de la documentación de una de las herramientas de planificación Wi-Fi descritas en el capítulo dos, concretamente de la herramienta RF3D Wi-Fi Planner **[4]**. Puede consultarse en el Anexo I del presente documento.

El requisito número 07 consiste en poder modificar cualquier valor de la base de datos. Para ello simplemente hacemos que la tabla mostrada sea editable.

El requisito número 08 consiste en poder eliminar materiales de la base de datos. Para ello colocamos un botón que elimine los materiales seleccionados en la tabla mostrada.

El requisito número 09 consiste en poder insertar un nuevo material. Para ello al pulsar el botón correspondiente aparecerá una ventana de diálogo en la que el usuario introducirá todos los datos del material que desea añadir.

El requisito número 10 requiere la exportación de la base de datos a un archivo Excel. De forma que al pulsar el botón correspondiente nos aparecerá un cuadro de diálogo para indicar el nombre del archivo Excel que vamos a generar.

El requisito número 11 requiere la importación de la base de datos desde un archivo Excel. De forma que al pulsar el botón correspondiente nos aparecerá un cuadro de diálogo para seleccionar el archivo Excel deseado. Esta función es muy útil, ya que permite introducir bases de datos de materiales de forma muy rápida y cómoda.

El requisito número 12 consiste en poder importar la base de datos de materiales de otro proyecto. De forma que al pulsar el botón correspondiente nos aparecerá un

cuadro de diálogo para seleccionar el archivo *DB_xxx.mat* deseado. Se realizará una copia de dicha base de datos, con el nombre del proyecto actual.

7.3.3 MÓDULO PLANTA

La especificación de requisitos para este módulo se muestra en la siguiente tabla:

Número	Referencia	Nombre
13	RF_HPW013	CargarPlanta
14	RF_HPW14	AñadirPlanta
15	RF_HPW015	AlinearPlanta
16	RF_HPW016	EstablecerEscala
17	RF_HPW017	AlturaPlanta
18	RF_HPW018	EliminarPlanta

Tabla 7.3 Requisitos módulo Planta

La interfaz gráfica para este módulo contendrá los siguientes elementos:

- Una imagen central con el plano de planta.
- Un combo-box desplegable para seleccionar la planta del edificio a mostrar.
- Una tabla editable con los datos de cada planta (nombre, altura).
- Un cuadro de texto editable con el valor de la escala del edifico.
- Botones para invocar a las funciones que cumplimenten los requisitos.

El requisito número 13 hace referencia a la necesidad de que la herramienta permita cargar un plano de planta. De modo que al pulsar el botón correspondiente, aparecerá una ventana de diálogo para seleccionar la imagen (en un formato estándar, JPG, BMP, etcétera) del plano que se desea cargar. El hecho de trabajar con planos en formato imagen, hace que la herramienta funcione con planos creados con cualquier programa de edición de planos (por ejemplo, AutoCad). Además, permite usar como plano de planta cualquier plano real escaneado.

El requisito número 14 permite añadir una nueva planta al edificio. Al pulsar el botón correspondiente nos aparecerá una ventana de diálogo en la que se requerirá el nombre y la altura de la planta, después aparecerá otra ventana para seleccionar el plano de planta a cargar.

El requisito número 15 consiste en poder alinear dos plantas entre sí. Esta función es totalmente necesaria, ya que podría darse el caso en que las imágenes de las diferentes plantas de un edificio no tuviesen todas ellas exactamente la misma orientación. Para solucionar este problema, se rota el plano de planta a alinear respecto del plano de planta de referencia en un determinado ángulo. Para calcular dicho ángulo, se pide al usuario que marque dos puntos en el plano a alinear y otros dos puntos (equivalentes a los anteriores, es decir, que estén situados justo en sus verticales) en el plano de referencia. A continuación se obtiene el ángulo de rotación

calculando el ángulo entre las dos rectas que formas los puntos marcados. Cuanto mayor sea la distancia entre los puntos marcados, más precisa será la alineación.

El requisito número 16 permite establecer la escala del edificio. Para ello, al pulsar el botón correspondiente, se pedirá al usuario que marque dos puntos en el plano de planta e introduzca su distancia real. De éste modo podemos establecer la escala conociendo la medida de alguna parte del edificio. Además, también se podrá modificar el valor de la escala a través del campo de texto editable en el que se muestra la misma.

El requisito número 17 permite establecer la altura de cada planta. Para ello, se podrá establecer la altura de cualquier planta a través de la tabla editable en la que se muestran.

EL requisito número 18 permite eliminar una planta. Para ello, al pulsar el botón correspondiente, se eliminará la planta seleccionada.

Los datos del módulo *Planta* que se almacenan en la estructura .mat del proyecto son los siguientes:

- Número de plantas del edificio.
- Vector con los nombres de cada planta.
- Vector con las alturas de cada planta.
- Escala del edificio.
- *Array* de matrices con valores RGB de cada pixel de las imágenes de los planos de planta.

7.3.4 MÓDULO OBSTÁCULOS

La especificación de requisitos para este módulo se muestra en la siguiente tabla:

Número	Referencia	Nombre
19	RF_HPW19	AñadirObstáculo
20	RF_HPW20	EliminarObstáculo
21	RF_HPW21	ModificarObstáculo
22	RF_HPW22	EstablecerTecho
23	RF_HPW23	AñadirPatio
24	RF_HPW24	EliminarPatio
25	RF_HPW25	ExportarObstáculos
26	RF_HPW26	ImportarObstáculos

Tabla 7.4 Requisitos módulo Obstáculos

En este módulo es donde se realiza la descripción de los elementos (paredes, techos, puertas, etcétera) presentes en el interior de los edificios. El objetivo principal aquí es ofrecer la posibilidad de realizar dicha descripción de la forma más precisa y completa. Para realizar esta tarea, la solución óptima, pero fuera de los alcances de este proyecto, consistiría en construir una base de datos vectorial tridimensional del edificio. Esta solución la implementa WinProp **[2]**, herramienta de planificación descrita en el capítulo dos. Así que, aquí se optará por una solución intermedia mucho más sencilla, pero que permitirá una descripción individualizada de cada elemento u obstáculo presente en el edificio. Además, dicha solución permitirá al usuario describir el entorno con el grado de precisión que desee, de forma que dependiendo del tiempo que se desee emplear e la tarea, se puedan describir solo aquellos obstáculos que se consideren más importantes o bien describir también elementos más pequeños.

La solución ideada consiste en que el usuario marque sobre el plano de planta la ubicación de los obstáculos, de modo que se almacenen las coordenadas en las que se ubica cada obstáculo. Por defecto, la altura de cada obstáculo será la de la planta en la que se encuentre, pero podrá cambiarse si se desea. De este modo se podrán describir mejor muchos de los elementos del mobiliario de los edificios. Además, se asignará un material a cada obstáculo, de forma que los valores de atenuación de ese obstáculo coincidan con los del material asignado. Para facilitar esta tarea, existirá una especie de “pincel” que fijará el tipo de material de los obstáculos marcados por el usuario. El “pincel” se seleccionará de entre todos los elementos de la base de datos de materiales asociada al proyecto.

La interfaz gráfica para este módulo contendrá los siguientes elementos:

- Una imagen central con el plano de planta.
- Un *combo-box* desplegable para seleccionar la planta del edificio a mostrar.
- Un *combo-box* desplegable para seleccionar el material de los obstáculos.
- Una tabla editable con los datos de cada obstáculo añadido (posición, altura y atenuación).
- Una tabla editable con la información de la atenuación de los techos.
- Una tabla editable con información sobre zonas especiales (patios).
- Botones para invocar a las funciones que cumplimenten los requisitos.

El requisito número 19 consiste en añadir obstáculos. Para ello, al pulsar el botón correspondiente, se podrá ir haciendo clic en el plano de planta de modo que se vayan dibujando los obstáculos entre dos clics consecutivos. Los obstáculos se dibujarán con el color del “pincel” o material seleccionado.

El requisito número 20 consiste en eliminar obstáculos. Para ello, al pulsar el botón correspondiente, se podrá ir haciendo clic en el plano y se irá eliminando el obstáculo sobre el que se hizo clic. También se podrán eliminar obstáculos, seleccionándolos en la tabla y pulsando el botón correspondiente.

El requisito número 21 consiste en modificar obstáculos. De nuevo habrá dos formas de hacerlo. La primera, pulsando el botón correspondiente a la característica que se quiere modificar y seleccionando por clic sobre el plano el botón a eliminar, y la segunda, modificando las características sobre la tabla editable.

El requisito número 22 consiste en poder establecer la atenuación de los techos de cada una de las plantas del edificio. La primera forma de realizarlo consiste en que al pulsar el botón correspondiente, se asignará, a los techos de las plantas que se desee, la atenuación correspondiente al material seleccionado. Otra opción sería hacerlo directamente sobre la tabla editable correspondiente.

El requisito número 23 hace alusión a la necesidad de describir zonas especiales que podemos encontrarnos en los edificios. En concreto, se quiere poder describir zonas abiertas que no estén cubiertas totalmente por un techo, como por ejemplo, un patio. Para ello, al pulsar el botón correspondiente, el usuario podrá dibujar sobre el plano de planta, un polígono con la forma de la zona en cuestión. Además, se podrá indicar si la zona desprovista de techo corresponde al interior o al exterior del polígono dibujado. Para cada zona se podrán elegir los techos a los que afecta.

El requisito número 24 consiste en eliminar zonas especiales descritas anteriormente. Para ello, al pulsar el botón correspondiente, se permite al usuario hacer clic en la zona que se desea eliminar.

El requisito número 25 consiste en poder exportar la tabla de obstáculos a un archivo de Excel. Para ello, al pulsar el botón correspondiente, aparecerá un botón de diálogo para escoger el nombre para el archivo Excel creado.

El requisito número 26 consiste en poder importar la tabla de obstáculos a un archivo de Excel. Para ello, al pulsar el botón correspondiente, aparecerá un botón de diálogo para seleccionar el archivo Excel deseado.

Los datos del módulo *Obstáculos* que se almacenan en la estructura .mat del proyecto son los siguientes:

- Vector con la coordenada x del punto origen de cada obstáculo.
- Vector con la coordenada y del punto origen de cada obstáculo.
- Vector con la coordenada x del punto final de cada obstáculo.
- Vector con la coordenada y del punto final de cada obstáculo.
- Vector con la atenuación a 2.4 GHz de cada obstáculo.
- Vector con la atenuación a 5 GHz de cada obstáculo.
- Vector con el color RGB de cada obstáculo.
- Vector con la altura de cada obstáculo.
- *Array* de vectores de coordenadas x del polígono que describe cada obstáculo especial tipo patio.
- *Array* de vectores de coordenadas y del polígono que describe cada obstáculo especial tipo patio.

- *Array* de vectores que indican si un techo es afectado o no por cada uno de los obstáculos especiales tipo patio.
- Vector con la atenuación a 2.4 GHz de cada techo del edificio.
- Vector con la atenuación a 5 GHz de cada techo del edificio.
- Vector con el número de planta al que pertenece cada obstáculo.

7.3.5 MÓDULO ACCESS POINT

La especificación de requisitos para este módulo se muestra en la siguiente tabla:

Número	Referencia	Nombre
27	RF_HPW027	AñadirAP
28	RF_HPW28	ConfigurarParámetrosAP
29	RF_HPW029	ConfigurarPosiciónAP
30	RF_HPW030	EliminarAP
31	RF_HPW031	ConfigurarAP

Tabla 7.5 Requisitos módulo Access Point

La interfaz gráfica para este módulo contendrá los siguientes elementos:

- Una imagen central con el plano de planta.
- Un *combo-box* desplegable para seleccionar la planta del edificio a mostrar.
- Un *combo-box* desplegable para seleccionar el *Access Point*.
- Una tabla editable con características de emisión de cada *Access Point* (nombre, banda, canal, potencia y antena).
- Una tabla editable con la información de ubicación de cada *Access Point* (posición, altura, planta y orientación).
- Una imagen del diagrama de radiación horizontal y vertical de la antena del *Access Point* seleccionado.
- Botones para invocar a las funciones que cumplimenten los requisitos.

El requisito número 27 consiste en añadir un *Access Point*. Para ello, al pulsar el botón correspondiente, se podrá hacer clic en el lugar del plano de planta en el que se desea situar el AP. Después, requisito número 28, aparecerá un cuadro de diálogo en el que se podrán rellenar el nombre del AP, el valor de la potencia de emisión, el canal de emisión, la banda de funcionamiento y la altura a la que se sitúa. A continuación, se podrá escoger una antena de las presentes en la base de datos de antenas. Por último, requisito número 29, se especificará la orientación de la antena, para ello se introducirán, en grados, los ángulos que forman los lóbulos principales de su diagrama de radiación vertical y horizontal respecto del eje z y del eje x positivo respectivamente.

El requisito número 30 consiste en eliminar un *Access Point*. Para ello, al pulsar el botón correspondiente, se eliminará el AP seleccionado.

El requisito número 31 consiste en modificar un *Access Point*. Se podrá modificar cualquier característica del AP directamente sobre las tablas editables de características de emisión y ubicación. Además, pulsando el botón correspondiente, se podrá seleccionar una nueva antena para el AP.

Los datos del módulo *AccesPoint* que se almacenan en la estructura .mat del proyecto son los siguientes:

- Vector con la coordenada x de los APs
- Vector con la coordenada y de los APs.
- Vector con la potencia de emisión de los APs.
- Vector con la banda de funcionamiento de los APs.
- Vector con el canal de los APs.
- Vector con la altura sobre el suelo a la que están situados de los APs.
- Vector con el número de planta al que pertenecen los APs.
- Vector con los valores del diagrama de radiación horizontal de la antena de cada AP en la banda de emisión escogida.
- Vector con los valores del diagrama de radiación vertical de la antena de cada AP en la banda de emisión escogida.
- Vector con los valores de orientación horizontal de la antena de cada AP.
- Vector con los valores de orientación vertical de la antena de cada AP.
- Vector con los nombres de cada AP.

7.3.6 MÓDULO ANTENAS

La especificación de requisitos para este módulo se muestra en la siguiente tabla:

Número	Referencia	Nombre
32	RF_HPW032	VisualizarAntena
33	RF_HPW33	AñadirAntena
34	RF_HPW034	EliminarAntena
35	RF_HPW035	ModificarAntena

Tabla 7.6 Requisitos módulo Antenas

Para poder simular el comportamiento de los *Access Point* necesitamos especificar el diagrama de radiación de sus antenas. Por lo tanto, nuestra herramienta precisará de una base de datos de antenas con algunas de las antenas más comunes.

Para almacenar dicha base de datos, se usará una estructura .mat que contendrá los siguientes datos:

- Vector con el nombre de las antenas.

- Vector con los valores de atenuación a 2.4 GHz del diagrama de radiación horizontal de las antenas.
- Vector con los valores de atenuación a 2.4 GHz del diagrama de radiación vertical de las antenas.
- Vector con los valores de atenuación a 5 GHz del diagrama de radiación horizontal de las antenas.
- Vector con los valores de atenuación a 5 GHz del diagrama de radiación horizontal de las antenas.

La base de datos se denominará BD_antenas.mat y será siempre a misma para todos los proyectos. De modo que cualquier modificación realizada sobre la misma se guardará automáticamente.

La interfaz gráfica para este módulo contendrá los siguientes elementos:

- Dos imágenes centrales con cada uno de los diagramas de radiación (horizontal y vertical).
- Un *combo-box* desplegable para seleccionar la antena a mostrar.
- Un combo-box desplegable para seleccionar la banda de funcionamiento (2.4Ghz o 5 GHz).
- Una tabla editable con los 360 valores (uno para grado) de los valores de los diagramas de radiación tanto vertical como horizontal.
- Un botón para añadir antena y otro para eliminar antena.

Por lo tanto, la interfaz diseñada satisface el requisito número 32.

El requisito número 33 consiste en poder añadir una antena a la base de datos, para ello al pulsar el botón correspondiente se nos abre una ventana en la que se puede seleccionar un archivo Excel. Dicho archivo de Excel se puede construir con extrema facilidad, creando diagramas personalizados, o copiando los valores de cualquier base de datos de antenas de la que se disponga. Además, la herramienta está preparada para importar archivos con cualquier número de valores de atenuación. De forma que si en lugar de existir un valor para cada uno de los 360 grados del diagrama de radiación, se tienen, por ejemplo, solamente 20 valores, se realizará una interpolación del resto de los valores. De forma, que siempre se almacenen en base de datos 360 valores.

El requisito número 34 consiste en poder eliminar una antena. Para ello, simplemente pulsando el botón correspondiente se elimina la antena que en ese instante esté seleccionada.

El requisito número 35 requiere la modificación de los valores de la base de datos de antenas. Dicha tarea puede realizarse cambiando directamente los valores deseados en la tabla editable que muestra los valores de los diagramas de radiación horizontal y vertical de la antena seleccionada.

7.3.7 MÓDULO SIMULACIÓN

La especificación de requisitos para este módulo se muestra en la siguiente tabla:

Número	Referencia	Nombre
36	RF_HPW036	EstablecerPlanoSimulación
37	RF_HPW37	EstablecerResolucion
38	RF_HPW038	SimularPotenciaRecibida
39	RF_HPW039	SimularCobertura
40	RF_HPW040	SimularInterferencia
41	RF_HPW041	SimularDataRate
42	RF_HPW042	MostrarMapaPotencia
43	RF_HPW043	MostrarMapaCobertura
44	RF_HPW044	MostrarMapaInterferencia
45	RF_HPW045	MostrarMapaDataRate
46	RF_HPW046	VisualizarPrMin
47	RF_HPW047	EstimarIteraciones

Tabla 7.7 Requisitos módulo Simulación

Sin duda alguna, este es el módulo más importante de la herramienta, ya que digamos que es el núcleo de la misma. El módulo simulación se nutre de los datos proporcionados por el resto de módulos para llevar a cabo la simulación de los escenarios descritos.

La interfaz gráfica para este módulo contendrá los siguientes elementos:

- Una imagen central con el plano de planta.
- Dos imágenes más pequeñas que la imagen central con los planos de las plantas adyacentes a la planta mostrada en la imagen central.
- Un combo-box desplegable para seleccionar la planta del edificio a mostrar.
- Un combo-box desplegable para seleccionar el tipo de mapa a mostrar (potencia recibida, cobertura, interferencia, etcétera).
- Una tabla editable con la altura del plano de simulación y la información de las plantas a simular.
- Un campo de texto editable con la resolución de la simulación.
- Una campo de texto con el número de iteraciones de la simulación.
- Un campo de texto editable para introducir un valor de potencia mínima recibida.
- Un botón para iniciar la simulación.

El requisito número 36 consiste en definir la altura del plano de simulación. Para ello, simplemente usamos la tabla editable correspondiente. La posibilidad de elección de este parámetro implica que aunque el resultado de una simulación sea un plano de

2D, al poder elegir cualquier altura para dicho plano, podemos conocer los valores de señal en cualquier punto del edificio.

El requisito número 37 consiste definir la resolución usada para la simulación. Para ello, simplemente usamos el campo de texto editable correspondiente. Si el valor de la resolución es uno, significa que se calculará un valor de señal para cada pixel de la imagen del plano de planta. Si el valor de la resolución es *n*, significa que se calculará un valor de señal para cada *n x n* píxeles. El resto de valores se calculan por interpolación. El hecho de poder seleccionar la resolución de la simulación dota a la herramienta de una gran versatilidad, ya que se pueden obtener resultados aproximados para escenarios de simulación complejos (edificios con muchos obstáculos definidos) en poco tiempo; y una vez que se tiene claro el escenario definitivo, se pueden refinar los resultandos (aumentando la resolución).

El requisito número 38 consiste en calcular la potencia de señal máxima recibida. Para calcular la potencia de señal recibida en un punto del plano (procedente de la señal emitida por un *Access Point*), es necesario calcular las pérdidas de trayecto que se producen entre transmisor y emisor. Por la tanto, es el momento de escoger uno de los modelos de propagación presentados en el capítulo tres. El objetivo es escoger el modelo de propagación que mejor se adecue a la información que se dispone del escenario a simular. Por lo tanto, en este punto se han de descartar los modelos de trazado de rayos por dos causas fundamentales, la primera y principal, no disponemos de la información necesaria para usar ese modelo, ya que no disponemos de información sobre las características de reflexión, de refracción, o de difracción de los diferentes materiales empleados en el escenario. La segunda razón es el alto coste computacional que tendría ejecutar ese tipo de modelos de propagación. Ahora deberemos escoger entre uno de los modelos empíricos, el más completo de ellos es el *MuIti-wall-and-Floor Model* **[9]**, ya que es el único que contempla la transmisión de señal entre diferentes pisos de un edificio. Con este modelo aprovechamos al máximo la información disponible de un escenario, ya que nos permite asignar una atenuación específica para cada muro, ventana, puerta, suelo, etcétera del edificio a simular.

La ecuación del MWFM descrita en el capítulo 3 es la siguiente:

$$l_{MWF} = l_{FS} + l_C + \sum_{i}^{N} l_{wi}\, k_{wi} + \sum_{i}^{N} l_{fi}\, k_{fi}$$

Ecuación 3.11

Para el cálculo de las pérdidas por transmisión en el espacio libre l_{FS} simplemente se aplicará la ecuación de Friis **[6]** donde la distancia entre emisor y receptor estará representa por la distancia en el espacio entre el punto a simular y el *Access Point*. Así que, aunque la información se describa y se muestre es planos 2D, la simulación se realiza considerando un modelo tridimensional del edificio.

Para el cálculo de las pérdidas debidas a los obstáculos atravesados $\sum_i^N l_{wi}\, k_{wi}$ la solución será determinar (mediante el uso de fórmulas matemáticas básicas de geometría analítica **[17]** en tres dimensiones) qué obstáculos se encuentran entre el trayecto directo de la señal entre emisor y receptor. Siguiendo el mismo procedimiento se determinarán las pérdidas debidas a los suelos o techos atravesados $\sum_i^N l_{fi}\, k_{fi}$.

Una vez calculadas las pérdidas por trayectoria, solo quedaría calcular la potencia transmitida en la dirección de la recta que une a emisor y receptor. Si se utilizasen antenas con radiación isotrópica, no sería necesario hacer este cálculo. Sin embargo, en la práctica las antenas de los *Access Point* no poseen diagramas de radiación totalmente uniformes. Por lo tanto, la solución será calcular otro factor de pérdidas, en este caso, las pérdidas debido al no alineamiento entre la recta que une emisor y receptor y la dirección de máxima radiación de la antena. Como no disponemos de los patrones de radiación de las antenas en 3D, sino que únicamente disponemos de los diagramas de radiación en los planos horizontal y vertical, podemos realizar la aproximación de que la ganancia de una antena es igual a la suma de sus ganancias en el eje vertical y en el eje horizontal **[18]**.

Por lo tanto, la ecuación que con la que calcularemos la potencia recibida en un punto del plano será la siguiente:

$$P_{r=}\, P_t \; - 10\log\left(\frac{\lambda^2}{(4\pi d)^2}\right) - \; \mathrm{L_{radHor}} - \mathrm{L_{radVer}} - \sum \mathrm{l_{muros}} - \sum \mathrm{l_{techos}}$$

Ecuación 7.1

Donde:

P_t es la potencia de emisión seleccionada para el *Access Point*

λ es la longitud de onda en la banda de trabajo seleccionada

d es la distancia entre la ubicación del AP y el punto a simular

$\mathrm{L_{radHor}}$ es el valor del diagrama de radiación horizontal de la antena del AP correspondiente al ángulo formado por la dirección de radiación horizontal máxima y la dirección de la recta que uno el AP y el punto a simular.

$\mathrm{L_{radVer}}$ es el valor del diagrama de radiación vertical de la antena del AP correspondiente al ángulo formado por la dirección de radiación vertical máxima y la dirección de la recta que uno el AP y el punto a simular.

$\sum \mathrm{l_{muros}}$ es la suma de las pérdidas que se producen cuando la señal atraviesa cada uno de los muros u obstáculos situadas en el segmento de unión entre el punto de ubicación del AP y el punto a simular.

$\sum l_{techos}$es la suma de las pérdidas que se producen cuando la señal atraviesa cada uno de los techos o suelos situados en el segmento de unión entre el punto de ubicación del AP y el punto a simular.

Una vez definida la forma de obtener la potencia de señal recibida en un punto del plano debido a la emisión de un AP, el requisito 38, cálculo de la potencia de señal máxima recibida para cada punto del plano, se realizará asignando a cada punto del plano el valor máximo de entre los valores de potencia recibida obtenidos para cada uno de los *Acess Point* presentes en el edificio.

El requisito 39, cálculo del mapa de cobertura del edificio, se resuelve asignando a cada punto del plano, el AP que le proporcione un mayor nivel de potencia de señal recibida.

El requisito 40, cálculo del mapa de interferencia del edificio, se resuelve realizando en cada punto del plano, la resta entre el nivel de potencia de señal máximo recibido y la sumatoria de los niveles de señal recibidos procedentes de APs cuyo canal de emisión se solape con los del canal del AP que proporciona el mayor nivel de potencia recibida. Para ello se tendrá en cuenta el porcentaje de solapamiento entre los canales.

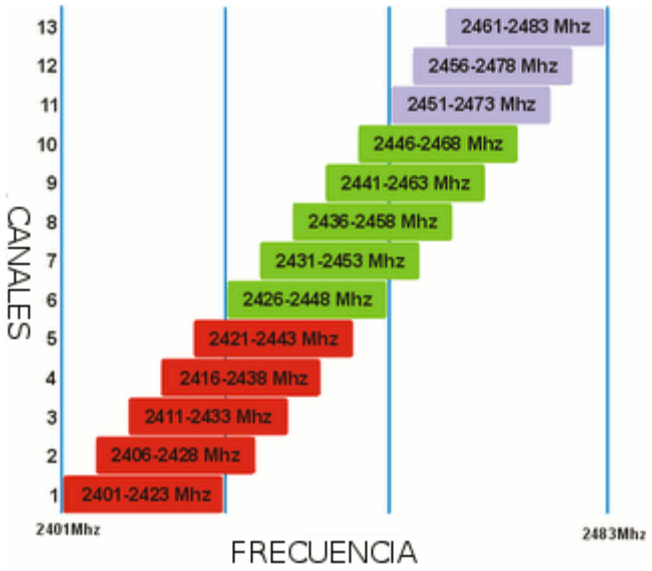

Figura 7.2 Solapamiento de canales a 2.4 GHz

Para la banda de 2.4 GHz, se asumirá un modelo de solapamiento rectangular, de forma que el porcentaje de solapamiento entre dos canales consecutivos, por ejemplo el 1 el 2, será de 4/5, entre los canales con uno de separación, por ejemplo el 1 y el 3, será de 3/5, y así sucesivamente. Entre canales con separados por más de 4 canales, no existirá solapamiento. Para la banda de 5 GHz no existe solapamiento entre ningún canal.

Por tanto, la interferencia se obtendrá con la siguiente ecuación:

$$I = P_{rec_maxima} - \sum \mathrm{s} * \mathrm{P}_{\mathrm{rec}_{\mathrm{AP}}}$$

Ecuación 7.2

Donde:

P_{rec_maxima} es la potencia de señal máxima recibida.

$\mathrm{P}_{\mathrm{rec}_{\mathrm{AP}}}$ es la potencia recibida procedente de un AP.

s es el factor de solapamiento entre canales.

El requisito 41 consiste en el cálculo de la capacidad o *data rate* experimentado en cada punto del plano, para su cálculo se hará uso de las tablas (presentes en el Anexo 3) de conversión entre potencia de señal recibida y *data rate*.

El requisito número 42 consiste en mostrar el mapa de potencia recibida máxima. Para ello, al seleccionar la opción correspondiente en el *combo-box* de la interfaz, se superpondrá a las imágenes de los planos de plantas mostrados la imagen del mapa de potencia máxima de señal recibida, asignando un color diferente a cada punto del mapa en función de dicho valor.

El requisito número 43 consiste en mostrar el mapa de cobertura. Para ello, al seleccionar la opción correspondiente en el *combo-box* de la interfaz, se superpondrá a las imágenes de los planos de plantas mostrados la imagen del mapa de cobertura, asignando un color diferente a cada punto del mapa en función del AP del que recibe un mayor nivel de señal.

El requisito número 44 consiste en mostrar el mapa de interferencia. Para ello, al seleccionar la opción correspondiente en el *combo-box* de la interfaz, se superpondrá a las imágenes de los planos de plantas mostrados la imagen del mapa de interferencia, asignando un color diferente a cada punto del mapa en función de dicho valor.

El requisito número 45 consiste en mostrar el mapa de capacidad o *data rate*. Para ello, al seleccionar la opción correspondiente en el *combo-box* de la interfaz, se superpondrá a las imágenes de los planos de plantas mostrados la imagen del mapa de capacidad o *data rate*, asignando un color diferente a cada punto del mapa en función de dicho valor.

El requisito número 46 consiste en mostrar si cada punto del plano cumple o no una condición de potencia de señal recibida mínima. Para ello, se introduce dicho valor en el campo de texto editable correspondiente, y se muestran de un color los puntos cuyo nivel de potencia recibida sea mayor que dicho valor, y de otro color los que no lo sea.

El requisito número 47 consiste en estimar el número de iteraciones de la simulación. Dicho valor puede ser muy útil para poder conocer de antemano el tiempo de simulación aproximado. Para ello, una vez esté el código en MATLAB implementado, se calcularan las iteraciones del bucle principal de simulación.

Los datos del módulo *Simulación* que se almacenan en la estructura .mat del proyecto son los siguientes:

- Valor de la altura del plano de simulación.
- Vector del número de iteraciones de la simulación.
- Matriz con valores de la potencia máxima de señal recibida en cada punto del plano.
- Matriz con el índice del AP que proporciona la máxima potencia de señal recibida para cada punto del plano.
- Matriz con valores de interferencia para cada punto del plano.
- Matriz con valores de *data rate* para cada punto del plano.

7.3.8 MÓDULO ESTADÍSTICAS

La especificación de requisitos para este módulo se muestra en la siguiente tabla:

Número	Referencia	Nombre
48	RF_HPW048	EstadísticaCDF
49	RF_HPW49	EstadísticaPDF
50	RF_HPW050	ParámetrosEstadísticos
51	RF_HPW051	EstadísticaCobertura
52	RF_HPW052	ConfigurarAP

Tabla 7.8 Requisitos módulo Estadísticas

El objetivo de este módulo es que el usuario pueda extraer información útil de los resultados de las simulaciones. Para proporcionar una mayor utilidad a la herramienta, se ha diseñado una interfaz en la que el usuario pueda seleccionar una o varias áreas de interés de los planos de planta del edificio, de modo que las estadísticas mostradas se obtengan exclusivamente con los valores de los puntos correspondientes a dichas áreas. Además, para agilizar el uso de la herramienta, se podrá seleccionar la resolución con la que se quieran obtener dichas estadísticas.

La interfaz gráfica para este módulo contendrá los siguientes elementos:

- Dos imágenes centrales para representar la PDF (*probability density function*) y la CDF (*cumulative density function*).
- Una tabla para representar el porcentaje de cobertura proporcionado por cada *Access Point*.

- Un tabla para mostrar parámetros estadísticos como la media, la varianza, el máximo o el mínimo de los valores de las señales de potencia recibida, interferencia y *data rate*.
- Un campo de texto editable para introducir el valor de la resolución con la que queremos obtener las estadísticas.
- Un *combo-box* para seleccionar la estadística de la queremos mostrar su PDF y CDF (potencia de señal, interferencia o *data rate*).
- Botones para invocar a las funciones de calcular estadística y de definir zonas de interés.

El requisito número 48 consiste en mostrar la CDF de los datos obtenidos en la simulación. Para ello, se mostrará una gráfica con los valores obtenidos al aplicar la CDF a los datos de la señal seleccionada en el *combo-box* correspondiente. Se usarán únicamente los datos correspondientes a los puntos del plano pertenecientes a las zonas de interés definidas por el usuario.

El requisito número 49 consiste en mostrar la PDF de los datos obtenidos en la simulación. Para ello, se mostrará una gráfica de barras con los valores obtenidos al aplicar la PDF a los datos de la señal seleccionada en el *combo-box* correspondiente. Se usarán únicamente los datos correspondientes a los puntos del plano pertenecientes a las zonas de interés definidas por el usuario.

El requisito número 50 consiste en mostrar la distribución del porcentaje de cobertura de cada AP. Para ello, en la tabla correspondiente se mostrarán, para cada AP, los valores (en tanto por ciento respecto del total de puntos) de la suma de todos los puntos del plano (pertenecientes a la zona de interés seleccionada) cuyo valor de potencia recibida máxima esté proporcionado por dicho AP.

El requisito número 51 consiste en mostrar parámetros estadísticos de los datos obtenidos en la simulación. Para ello se hará el cálculo de la media, varianza, máximo y mínimo de los datos de la señal seleccionada en el *combo-box* correspondiente, se usarán únicamente los datos correspondientes a los puntos del plano pertenecientes a las zonas de interés definidas por el usuario.

El requisito número 52 consiste permitir definir áreas de interés para el usuario. Para ello, pulsando el botón correspondiente, aparecerá una interfaz en la que se mostrará el plano de planta en el que se podrán dibujar la zona o zonas de interés. Mediante un *combo-box*, se podrá alterar entre las diferentes plantas del edificio.

Los datos del módulo *Estadística* que se almacenan en la estructura .mat del proyecto son los siguientes:

- *Array* con los puntos del plano que conforman el polígono que define cada zona o área de interés seleccionada.

7.3.9 FLUJO DE DATOS ENTRE LOS DIFERENTES MÓDULOS

Una vez realizado el diseño individual de cada módulo, para tener una visión más global de la estructura de la herramienta, se presenta a continuación una tabla con el flujo de datos que se produce entre los diferentes módulos de la herramienta.

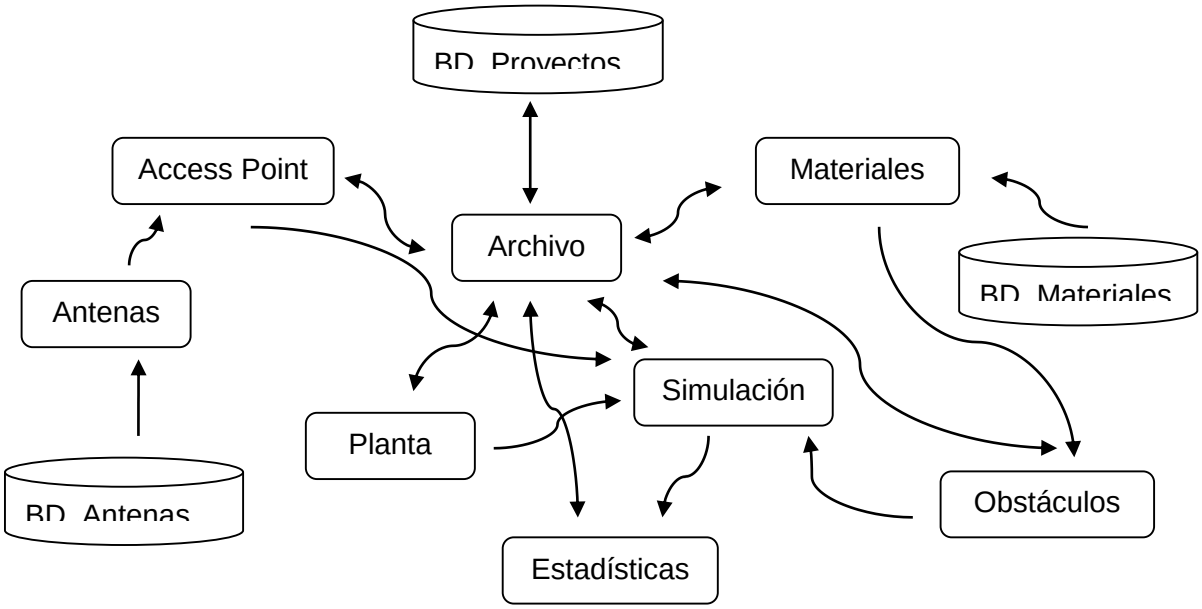

Figura 7.3 Diagrama de flujo de datos

CAPÍTULO 8

IMPLEMENTACIÓN

En este capítulo se incluirán los códigos fuente comentados de las funciones o algoritmos más relevantes. En lo que respecta a cómo realizar la implementación de las interfaces gráficas, las figuras, los menús, las tablas, los botones, los *combo-box*, las ventanas, etcétera, se puede encontrar toda la información en la propia ayuda/documentación del *software* MATLAB o bien en la página web de MathWorks en **[19].**

Además se mostrarán capturas de pantalla de las principales interfaces del programa.

8.1 IMPLEMENTACIÓN DE FUNCIONES RELEVANTES

Se incluye aquí el código fuente de algunas funciones relevantes, principalmente de aquellas que tienen que ver con la simulación del modelo de propagación usado para las simulaciones.

8.1.1. FUNCIÓN SIMULACIÓN3D.M

Esta función es la más importante del programa. Es la función que recibe como argumentos todos los datos (procedentes de los diferentes módulos del sistema) que permiten la descripción del escenario a simular y devuelve como salida las matrices con los valores de potencia de señal recibida, cobertura, interferencia y *data rate* del escenario simulado.

La función va realizando las siguientes tareas:

- Se convierten las unidades de píxeles a metros (usando la escala).
- Se calculan los valores de solapamiento entre canales.
- Se calcula el factor de pérdidas en el espacio libre.

A continuación, en doble bucle, para cada punto del plano y cada AP, se realizan las siguientes tareas:

- Se determinan los obstáculos atravesados.
- Se determinan los techos atravesados.
- Se calcula la potencia recibida debida a cada AP.
- Se corrige el resultado en función de los patios atravesados.
- Se actualiza la barra de progreso.
- Se obtienen valores para las matrices de potencia máxima de señal, cobertura e interferencia.

Al finalizar el doble bucle:

- Se interpolan dichas matrices para obtener un valor por pixel.

El código fuente de dicha función se presenta a continuación:

```
%función principal que realiza la simulación del escenario en un plano
%las salidas que devuelve la función son las siguientes
%y: mapa de intensidad en el plano de simulación
%w: mapa de cobertura en el plano de simulación
%q: mapa de interferencia en el plano de simulación
%los parámetros de entrada son los siguientes
%imagen: matriz que contiene la imagen de la planta a simular
%ax: vector de coordenadas x del extremo izquierdo de los muros
%ay: vector de coordenadas y del extremo superior de los muros
%bx: vector de coordenadas x del extremo derecha de los muros
%by: vector de coordenadas y del extremo inferior de los muros
%att: vector de atenuaciones de los muros
%pm: vector que contiene la planta en la que se situa cada obstáculo
%x: vector de coordenadas x de los APs del escenario
%y: vector de coordenadas y de los APs del escenario
%z: vector que contiene la altura sobre su planta de cada AP
%pAP: vector que contiene la planta en la que se situa cada AP
%Pt: vecor de potencias de transmisión en dBm de los APs del escenario
%ch: vector de números de canal de los APs del escenario
%escala: escala de la imagen de planta en relación con su tamaño real
%res: resolución para la simulación. Simular 1 de cada n pixels.Con n = res
%h: altura del plano de simulación (sobre su planta) en metros
%alturas: vector que contiene las alturas de las plantas en metros
%p: número de planta a simular
%n: número total de plantas del escenario
%atech: vector de atenuaciones de los techos del escenario
function
[y,w,q,paso,P,C,I]=simulacion3D(wb,iteraciones,paso,imagen,ax,bx,ay,by,att2,att5,band
a,pm,altres,x,y,z,pAP,Pt,ch,escala,res,h,alturas,p,n,atech2,atech5,radHor,radVer,phi,
theta,zonax,zonay,zonaz)
%barra para indicar el progreso de la simulación
%inicio de crono para controlar el tiempo de simulación
%amin: vector de coordenada z mínima de las plantas normalizada
amin(1)=0;
%amax: vector de coordenada z máxima de las plantas normalizada
amax(1)=alturas(1)/escala;
%hmin: vector de coordenada z mínima de los obstáculos normalizada
hmin=[];
%hmax: vector de coordenada z máxima de los obstáculos normalizada
hmax=[];
for i=2:n
amin(i)=(amin(i-1)+alturas(i-1))/escala;
amax(i)=(amax(i-1)+alturas(i))/escala;
end
for i=1:length(ax)
hmin(i)=amin(pm(i));
hmax(i)=amax(pm(i))-altres(i);
end
%h: coordenada z del plano de simulación
h=(sum(alturas(1:p))-alturas(p)+h)/escala;
%z: vector de coordenada z de los APs normalizada
for i=1:length(pAP)
z(i)=(sum(alturas(1:pAP(i)))-alturas(pAP(i))+z(i))/escala;
end
%A,B,D operaciones con las coordenadas de los obstáculos que solo es
%necesario hacerlas una vez (para no repetirlas en cada iteración)
A=ay-by;
B=bx-ax;
D=ax.*by-ay.*bx;
%d: dimensiones de la imágen
d=size(imagen);
%c: velocidad de la luz
c=3e8;
%bucle para determinar el vector de factor de interferencia entre canales
%inter: toma valores entre 0 y 1 dependiendo del solapamiento de canales
```

```
for i=1:length(ch)
    for j=1:length(ch)
        if banda(i)==1||banda(j)==1
            inter(i,j)=0;
        else
       aux=abs(ch(i)-ch(j));
    if(aux>4)
        inter(i,j)=0;
    else
        inter(i,j)=1-5*aux/22;
    end
    end
    end
end
%f: vector de frecuencia en Hertzios de los APs del escenario
for i=1:length(ch)
f2=2.412*1e9+5*ch*1e6;
f5=5*1e9+5*ch*1e6;
end
%const: operaciones con los parámetros que afectan a la potencia recibida
%que es necesario hacerlas una vez (para no repetirlas en cada iteración)
for i=1:length(ch)
const2(i)=20*log10(c/(4*pi*f2(i)*escala));
const5(i)=20*log10(c/(4*pi*f5(i)*escala));
end

if (iteraciones/78240)<1
    intervalo=5*1304;
else if (iteraciones/78240<3)
    intervalo=10*1304;
    else if (iteraciones/78240<10)
            intervalo=10*1304;
        else
            intervalo=60*1304;
        end
    end
end
%bucle principal de la función que recorre la imagen y calcula la potencia
%recibida en cada punto procedente de cada uno de los APs del escenario.
%El intervalo de pixeles depende de la resolución


    for i=1:res:d(1)
        for j=1:res:d(2)
            for k=1:length(x)

                att=att2;
 atech=atech2;
 const=const2;
if banda(k)==1;
  att=att5;
  atech=atech5;
  const=const5;
end


          %muros: vector que indica los obstáculos atravesados en cada
          %trayectoria entre el AP y el punto de la imagen
          muros=cruces3D(ax,bx,ay,by,hmin,hmax,i,j,h,x(k),y(k),z(k),A,B,D);
          %techos: vector que indica los techos atravesados en cada
          %trayectoria entre el AP y el punto de la imagen
          techos=zeros(1,n);
          for l=1:n
          %condición para determinar si un techo es atravesado
          if (amax(l)<h&&amax(l)>z(k))||(amax(l)>h&&amax(l)<z(k))
              techos(l)=1;
          end
          end
          %fórmula para el cálculo de la potencia recibida
          %Pr = Pt - Atenuación según ecuación de Friis - suma de las
          %atenuaciones los obstáculos atravesados - atenuación por
          %diagrama de directividad
```

```
          Pr(k)=Pt(k)+const(k)-10*log10((x(k)-i)^2+(y(k)-j)^2+(z(k)-h)^2)-
sum(muros.*att)-
sum(techos.*atech)+antDir(x(k),y(k),z(k),i,j,h,phi(k),theta(k),radHor(k,:),radVer(k,:
));
          for q=1:1:length(zonax)

Pr(k)=Pr(k)+patio(atech,amax,techos,zonax{q},zonay{q},zonaz{q},x(k),y(k),z(k),i,j,h);
          end
           paso=paso+1;
          if rem(paso,intervalo)==0;
              faltan=round((iteraciones-paso)/78240);
              mensaje=['Simulación en curso, faltan ' num2str(faltan) ' min aprox.'];
          waitbar(paso/iteraciones,wb,mensaje);
          end
            end


          %a: valor máximo de Pr de entre todos los APs
          %b: valor del AP que proporciona una Pr máxima
          [a,b]=max(Pr);
          %P: matriz de intensidad máxima para cada punto
          P((i+res-1)/res,(j+res-1)/res)=a;
          %C: matriz de cobertura para cada punto
          C((i+res-1)/res,(j+res-1)/res)=b;
          %I: matriz de interferencia para cada punto
          I((i+res-1)/res,(j+res-1)/res)=2*a-sum(Pr.*inter(b,:));

          end
    end

 %Interpolamos las matrices P, C, I para tener un valor por cada pixel
 if res>1
 P=imagezoom(P,res);
 C=imagezoom(C,res);
 I=imagezoom(I,res);
 end
 R=zeros(d(1),d(2))-120;
 S=zeros(d(1),d(2));
 T=zeros(d(1),d(2))-120;
 %convertimos la imagen a escala de grises
 im=rgb2gray(imagen);
 %combinamos la imagen con las matrices P,C, I
 for i=1:d(1)
    for j=1:d(2)
    if(im(i,j)>235)
         R(i,j)=P(i,j);
         S(i,j)=C(i,j);
         T(i,j)=I(i,j);
    end
    end
 end

y=R;
w=S;
q=T;
%paramos el cronometro de tiempo de simulación
```

8.1.2. FUNCIÓN CRUCES3D.M

Esta función es la que se encarga de determinar cuándo un obstáculo o muro se encuentra en la trayectoria que un punto del plano (destino) con el punto de ubicación de un AP (origen). Por la forma que hemos utilizado para describir los obstáculos presentes en el edificio, se trata de comprobar si el segmento formado por el trozo de recta que va desde al punto origen al punto destino, corta al plano perpendicular al eje XY y que contiene a la recta que une el punto inicial y el punto final de cada obstáculo o muro. Para ello, el procedimiento es calcular el punto en el que se cortarían recta y plano, y a continuación, determinar si ese punto cumple las siguientes propiedades: pertenece al segmento de recta que une origen con destino, pertenece al segmento que une el punto inicial con el punto final del obstáculo y su coordenada z está comprendida entre los valores del eje z del obstáculo (altura del plano de planta donde se encuentra y altura del obstáculo).

El código de la función es el siguiente:

```
%función encargada de determinar los obstáculos atravesados por el segmento
%que une dos puntos. Devuelve un vector de unos y zeros en los que el uno
%significa que el obstáculo i sí es atravesado y zero que no.
%tiene los siguientes argumentos de entrada
%ax: vector de coordenadas x del extremo izquierdo de los muros
%ay: vector de coordenadas y del extremo superior de los muros
%bx: vector de coordenadas x del extremo derecha de los muros
%by: vector de coordenadas y del extremo inferior de los muros
%hmin: vector de coordenada z mínima de los muros
%hmax: vector de coordenada z máxima de los muros
%qx: coordenada x del punto final
%qy: coordenada y del punto final
%qz: coordenada z del punto final
%px: coordenada x del AP (origen)
%py: coordenada y del AP (origen)
%pz: coordenada z del AP (origen)
%A,B,D expresiones fijas que relacionan ax,bx,ay,by
function muros=cruces3D(ax,bx,ay,by,hmin,hmax,qx,qy,qz,px,py,pz,A,B,D)
muros=ones(1,length(ax));
for i=1:length(ax)
  if (A(i)==0&&qy==py)||(B(i)==0&&qx==px)
      cx=ax;
      cy=ay;
      cz=pz+(qz-pz)*(ax-px)/(qx-px);

  else
%ecuación que determina el punto de corte entre la recta que une el punto
%origen y el punto final y la recta a a que pertenece cada obstáculo
%cx, cy,cz coordenadas del punto intersección
t=(-D(i)-A(i)*px-B(i)*py)/(A(i)*(qx-px)+B(i)*(qy-py));
cx=px+t*(qx-px);
cy=py+t*(qy-py);
cz=pz+t*(qz-pz);
  end
%condición que comprueba si el punto de corte hallado pertenece al segmento
%que representa el muro y a su vez al segmento que une punto origen y final
%también comprueba que esté entre la altura máxima y mínima del obstáculo
if (cx-0.0001>max(ax(i),bx(i))||cx+0.0001<min(ax(i),bx(i))||cy-
0.0001>max(ay(i),by(i))||cy+0.0001<min(ay(i),by(i))||cx-
0.0001>max(px,qx)||cx+0.0001<min(px,qx)||cy-
0.0001>max(py,qy)||cy+0.0001<min(py,qy)||cz+0.0001<hmin(i)||cz-0.0001>hmax(i))
        muros(i)=0;
    end
end
```

8.1.3. FUNCIÓN PATIO.M

Esta función se encarga de determinar si la intersección de la recta que une el punto del plano a simular (destino) y el punto de localización de un AP, con el plano formado por cada uno de los suelos o techos del edificio se produce justo en una donde se ha definido una zona especial o patio en la que existe un "hueco" o zona sin techo, y que por lo tanto implica que realmente el techo no está siendo atravesado y no habría que contabilizarlo en el cómputo de las pérdidas por trayecto.

El código de la función es el siguiente:

```
%Función que devuelve el valor en decibelios en el que habría que corregir
%la potencia de señal recibida en un punto, dado que realmente no esté
%atravesando un techo, sino que la trayectoria pase justo por un hueco o
%patio
%tiee los siguintes argumentos de entrada
%amax: vector de coordenada z máxima de las plantas normalizada
%atech: vector de atenuaciones de los techos del escenario
%techos: vector que indica los techos atravesados en cada
%trayectoria entre el AP y el punto de la imagen
%zonax: coordenada x del polígono que define la forma del patio
%zonaz: coordenada y del poligono que define la forma del patio
%zonaz: indica sie l patio es exterior o interior al poligono
%qx: coordenada x del punto final
%qy: coordenada y del punto final
%qz: coordenada z del punto final
%px: coordenada x del AP (origen)
%py: coordenada y del AP (origen)
%pz: coordenada z del AP (origen)

function att =patio(atech,amax,techos,zonax,zonay,zonaz,Px,Py,Pz,Qx,Qy,Qz);
att=0;
for i=1:length(techos)
    if (techos(i)&&zonaz(i+1))
        x=(amax(i)-Pz)*(Px-Qx)/(Pz-Qz)+Px;
        y=(amax(i)-Pz)*(Py-Qy)/(Pz-Qz)+Py;
        z=inpolygon(y,x,zonay,zonax);
        if (zonaz(1)==z)
            att=att+atech(i);
        end
    end
end
```

Además, la sección de código que devuelve el vector de unos y ceros indicando si un techo es atravesado o no, es el siguiente:

```
%techos: vector que indica los techos atravesados en cada
%trayectoria entre el AP y el punto de la imagen
techos=zeros(1,n);
for l=1:n
%condición para determinar si un techo es atravesado
if (amax(l)<h&&amax(l)>z(k))||(amax(l)>h&&amax(l)<z(k))
    techos(l)=1;
end
end
```

8.1.4. FUNCIÓN ANTDIR.M

Esta función es la encargada de calcular el ángulo que forma la recta que une el punto del plano a simular y el punto de localización del AP con respecto a la dirección del máximo del diagrama de radiación de la antena. Como se dispone de diagramas

de radiación horizontal y vertical, se tendrán que calcular los ángulos de azimut y elevación de dicha recta.

El código es el siguiente:

```
%función que devuelve la suma de las pérdidas por desalineamiento con los
%maximos de los diagramas de radiacion horizontal y vertical
%recibe los sigueintes parámetros como entrada
%qx: coordenada x del punto final
%qy: coordenada y del punto final
%qz: coordenada z del punto final
%px: coordenada x del AP (origen)
%py: coordenada y del AP (origen)
%pz: coordenada z del AP (origen)
%orx: angulo de azimut del maximo del diagrama de radiación horizontal
%del AP
%inc: angulo de elevación del maximo del diagrama de radiación vertical
%del AP
%h: vector de 360 posiciones que representa el diagrama de radiación
%horizontal del AP
%v: vector de 360 posiciones que representa el diagrama de radiación
%vertical del AP
function g=antDir(qx,qy,qz,px,py,pz,orx,inc,h,v)
y=px-qx;
x=py-qy;
z=pz-qz;
%calculamos el angulo de azimut
if (x>0)&&(y>0)
    a=atan(y/x);end
if (x>0)&&(y<0)
    a=atan(y/x)+2*pi;end
if (x<0)
    a=atan(y/x)+pi;end
if (x==0)
    a=pi/2*sign(y);end
%calculamos el angulo de elevacion
if (z>0)
    t=atan(sqrt(x^2+y^2)/z);end
if (z<0)
    t=atan(sqrt(x^2+y^2)/z)+pi;end
if (z==0)
    t=pi/2;end
% los comparamos con los angulo de radiación máxima
a=a*360/2/pi-orx;
if(a<0)
    a=360+a;
end
t=t*360/2/pi-inc;
if(t<0)
    t=180+t;
end
gh=h(ceil(a));
gv=v(ceil(t)+1);
% devolvemos la suma de los valores correspondientes de los diagramas de
%radiacion vertical y horizontal
g=gh+gv;
```

8.1.5. FUNCIÓN IMAGEZOOM.M

Esta función es la encargada de realizar la interpolación de valores en las matrices de potencia de señal recibida, cobertura, interferencia o data rate cuando la resolución seleccionada es distinta a uno, y por tanto, no obtenemos un valor para cada pixel, sino un valor para cada cuadrado de n pixeles, donde n es la resolución seleccionada.

El código es el siguiente:

```
%función encargada de interpolar una matriz, recibe como argumentos la
%matriz y el factor de interpolación. Devuelve la matriz interpolada
%el factor de interpolación, coincide con el valor de nuestra variable
%resolucion
function [ ret ] = imagezoom (I, factor)
[ width, height, c ] = size(I);
newwidth = width * factor;
newheight = height * factor;
ret = zeros([newwidth, newheight, c]);
[XX, YY] = meshgrid(linspace(1,width,newwidth),linspace(1,height,newheight));
XX = round(XX);
YY = round(YY);
for i = 1:newwidth
        for j = 1:newheight
        ret(i,j,:) = I(XX(j,i),YY(j,i),:);
        end
end
```

8.1.6. FUNCIÓN PATRÓN.M

Esta función se utiliza para generar el diagrama de radiación de una antena con una resolución de un grado. Es necesaria, ya que podría ocurrir que el vector de radiación no tenga el tamaño de 360, sino que sea menor. Por tanto esta función se encarga de interpolar dicho vector de forma que su tamaño final sea 360.

El código de la función es el siguiente:

```
%la funcion devuelve un vector de 360 elementos
%la fucnion recibie un vector x de dimension cualquiera divisor de 360
function y = patron(x)
n = 360/length(x);
if length(x)==1
    y=ones(1,360)*x(1);
else
for j=1:length(x)
for i=1:n
    if j<length(x)
    y(i+n*(j-1))=x(j+1)*i/n+x(j)*(1-i/n);
    else
     y(i+n*(j-1))=x(1)*i/n+x(j)*(1-i/n);
    end
end
end
end
```

8.1.7. FUNCIÓN PROXIMIDAD.M

Esta función es útil para determinada el obstáculo o muro seleccionado por el usuario. En el módulo obstáculos, cuando el usuario quiere eliminar o modificar un obstáculo, previamente ha de hacer clic sobre él. Al hacer clic obtenemos las coordenadas del punto en el que se hizo clic, la función proximidad se encarga de determinar cuál es el obstáculo más cercano de los que se encuentran en el plano de planta del edificio.

El código de la función es el siguiente:

```
%función que devuelve el indice del obstaculo mas cercano a pun punto dado
%ax: vector de coordenadas x del extremo izquierdo de los muros
%ay: vector de coordenadas y del extremo superior de los muros
%bx: vector de coordenadas x del extremo derecha de los muros
%by: vector de coordenadas y del extremo inferior de los muros
%x:coordenado x del punto sleccionado
%y:coodenada y del punto seleccionado
%m: planta a la que pertenece el punto seleccionado
%altmuro: vector que contiene la planta en la que se situa cada obstáculo
```

```
function p=proximidad(ax,bx,ay,by,x,y,m,altmuro)

A=by-ay;
B=ax-bx;
C=ay.*bx-ax.*by;
cc=ones(1,length(ax))*10e20;
for i=1:length(ax)
    if m==altmuro(i)
       if A(i)==0&&B(i)==0
        cc(i)=sqrt((ax(i)-x)^2+(ay(i)-y)^2);
       else

        cc(i)=abs(A(i)*x+B(i)*y+C(i))/sqrt(A(i)^2+B(i)^2);
       end
    end
end
 [r,p]=min(cc);
```

8.1.8. FUNCIÓN PARA ALINEAR PLANTA

Para alinear dos plantas, es necesario calcular el ángulo entre dos rectas formadas por dos puntos que deberían ser equivalentes entre dos plantas (solo se diferencian en su coordenada z). Una vez calculado el número de grados de desajuste, se realiza la rotación del plano de una de las plantas, de modo que ambas plantas queden superpuestas.

El fragmento de código en el que se realiza esta operación es el siguiente:

```
[y,x]=ginput(2);
q = menu('Elija planta de referencia',nPlanta);
%se muestra el plano con el que se quiere alinear
imshow(planos{q});
%se marcan dos puntos equivalntes a los anteriores
[yr,xr]=ginput(2);
%se calcula el angulo formado por ambas rectas
ang=acosd(((y(1)-y(2))*(yr(1)-yr(2))+(x(1)-x(2))*(x(1)-x(2)))/(sqrt((y(1)-
y(2))^2+(x(1)-x(2))^2)*sqrt((yr(1)-yr(2))^2+(xr(1)-xr(2))^2)));
%se rota el plano
planos{m}= imrotate(planos{q},ang,'crop');
```

8.2 INTERFACES PRINCIPALES

A continuación, se mostrarán las interfaces gráficas principales de cada uno de los módulos.

8.2.1. MÓDULO ARCHIVO

Este es el único módulo que no posee una interfaz gráfica como tal, sino que es simplemente un menú desplegable en el que se selecciona la opción deseada.

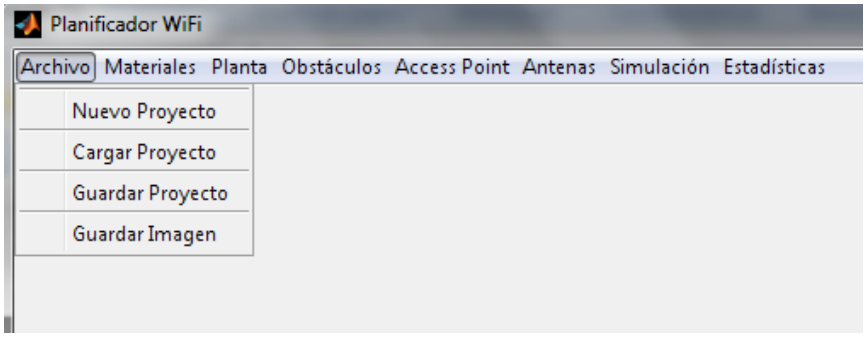

Figura 8.1 Menú Archivo

8.2.2. MÓDULO MATERIALES

La siguiente imagen muestra la interfaz del módulo Materiales.

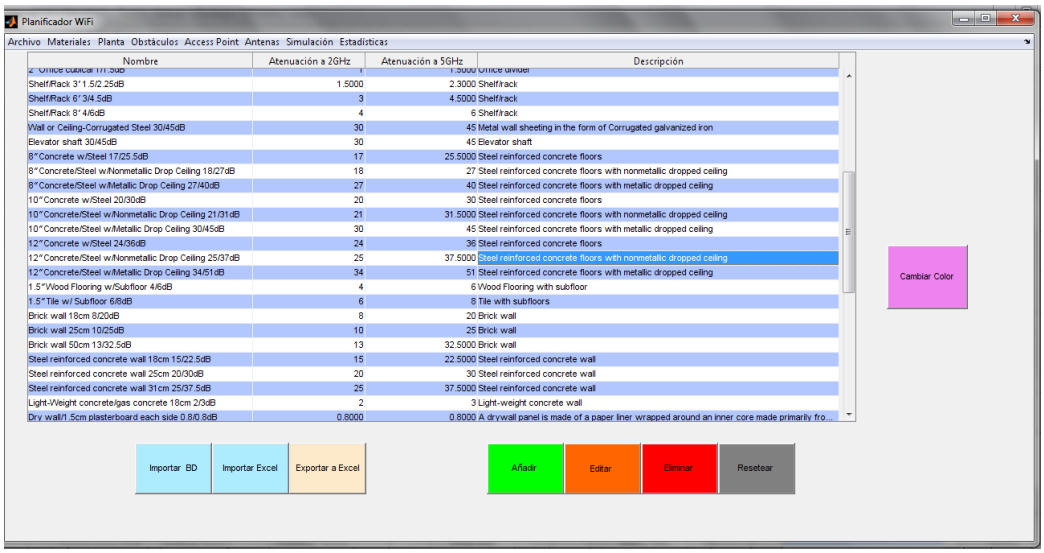

Figura 8.2 Interfaz módulo Materiales

Al pulsar el botón de añadir material, se abre el siguiente cuadro de diálogo para introducir los datos.

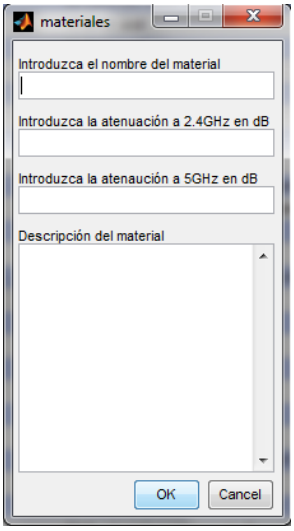

Figura 8.3 Interfaz para añadir material

El botón de cambiar color, presenta el color del material que está seleccionado en la tabla. Si se pulsa dicho botón se despliega una paleta de colores para elegir un nuevo color para el material.

Figura 8.4 Paleta de selección de color

8.2.3. MÓDULO PLANTA

La siguiente imagen muestra la interfaz del módulo Planta.

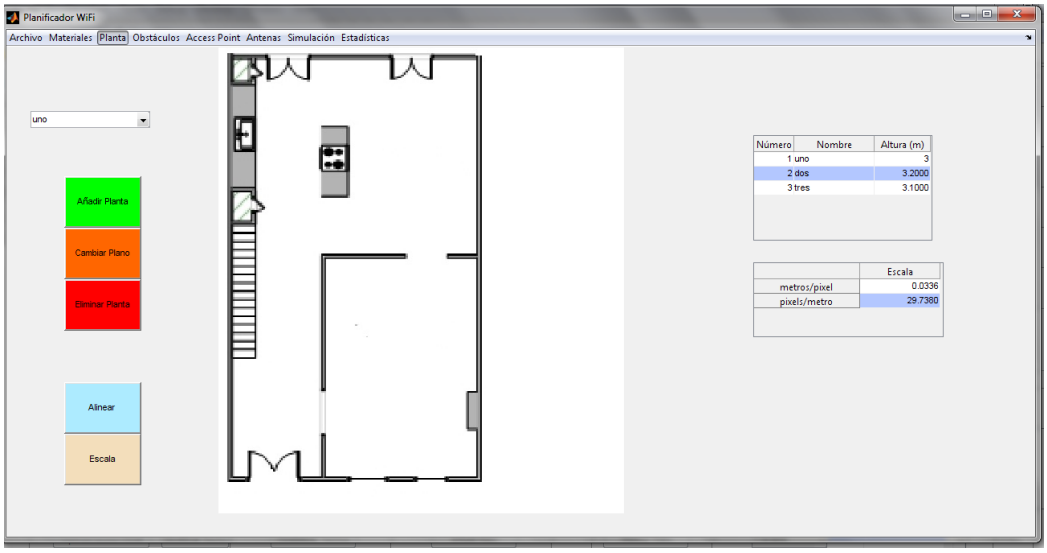

Figura 8.5 Interfaz módulo Planta

8.2.4. MÓDULO OBSTÁCULOS

La siguiente imagen muestra la interfaz del módulo Obstáculos.

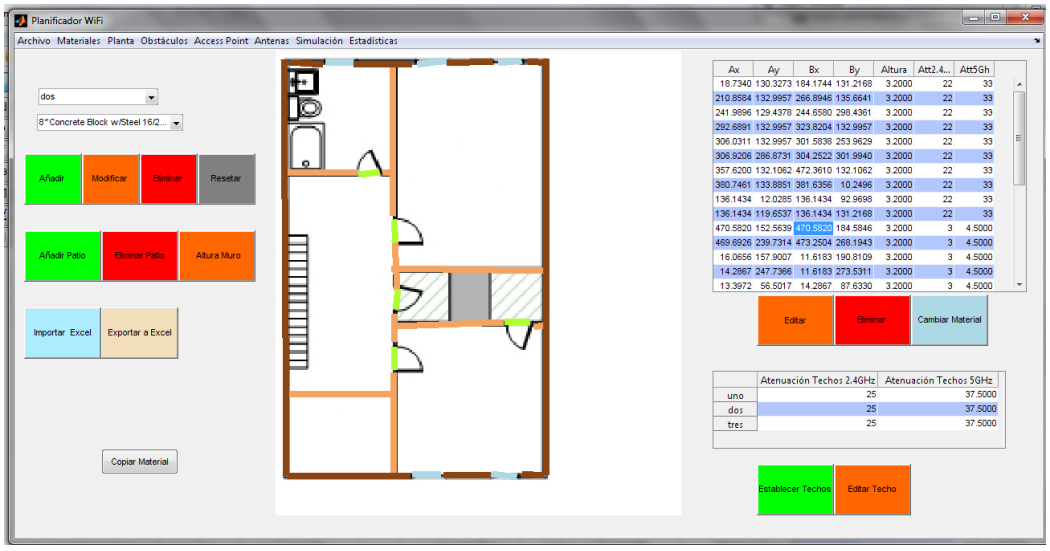

Figura 8.6 Interfaz módulo Obstáculos

Al pulsar el botón del combo-box de los materiales, se despliega la lista completa de los materiales presentes en la base de datos.

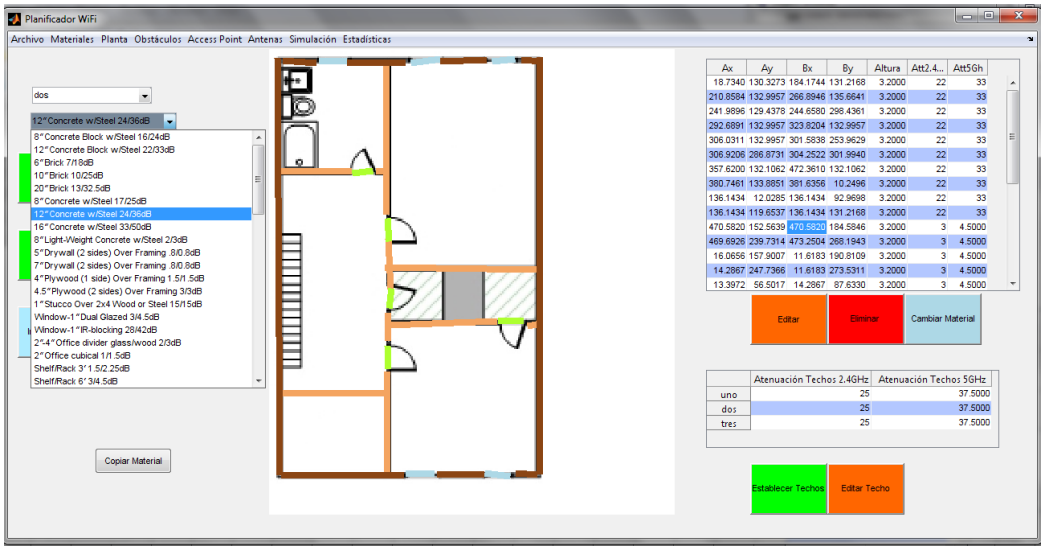

Figura 8.7 Combo-box de materiales

8.2.5 MÓDULO ACCESS POINT

La siguiente imagen muestra la interfaz del módulo Access Point.

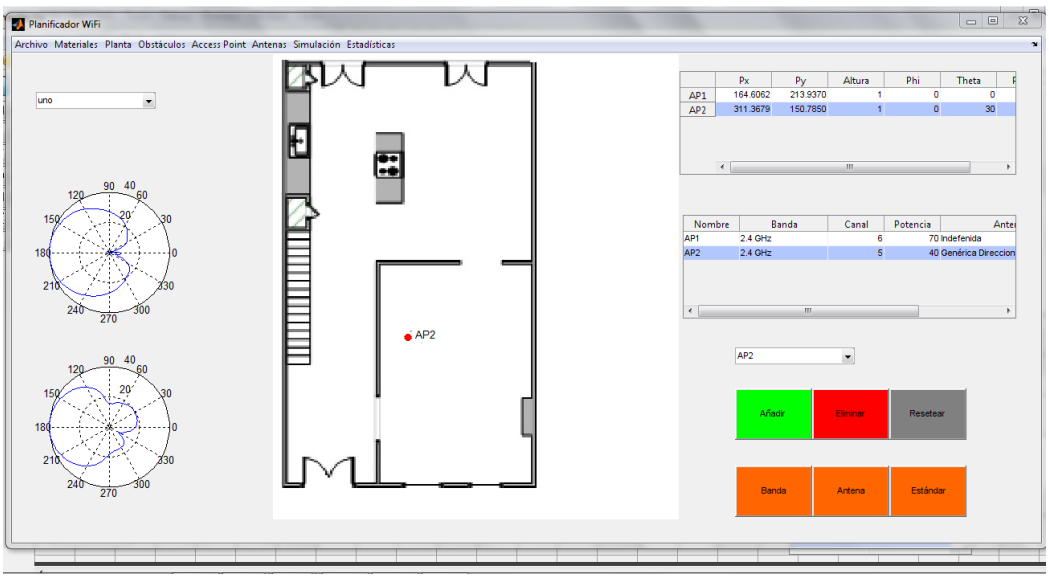

Figura 8.8 Interfaz módulo Access Point

8.2.6 MÓDULO ANTENAS

La siguiente imagen muestra la interfaz del módulo Antenas.

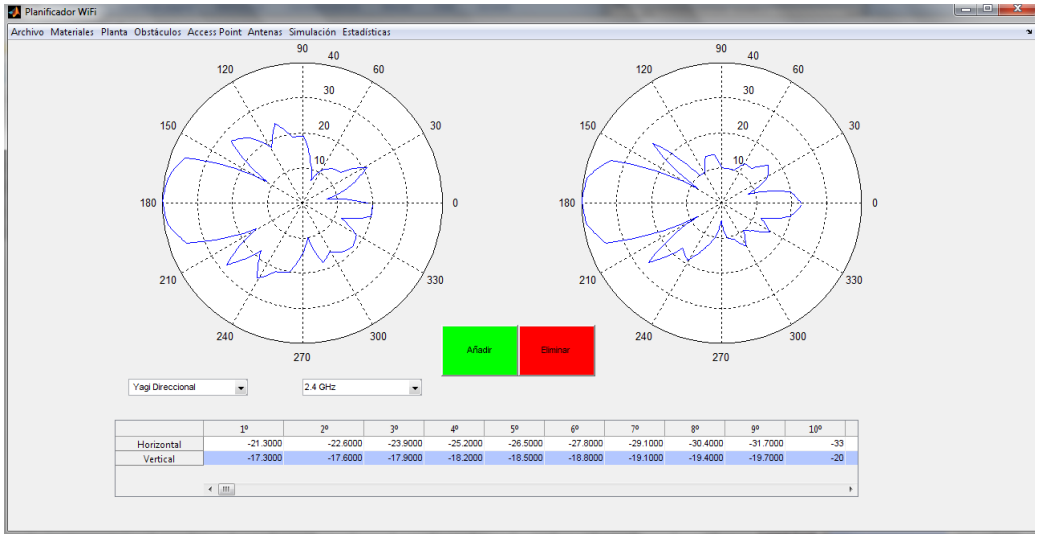

Figura 8.9 Interfaz módulo Antenas

8.2.7 MÓDULO SIMULACIÓN

La siguiente imagen muestra la interfaz del módulo Simulación, cuando está seleccionada la opción mapa. Se muestran los planos de planta juntos con los obstáculos definidos.

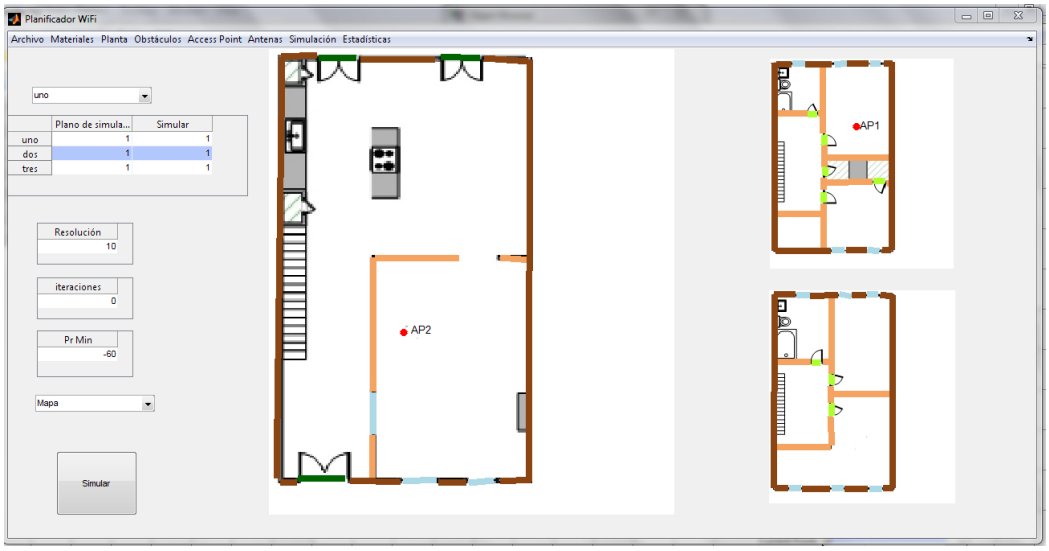

Figura 8.10 Interfaz módulo Simulación

Al seleccionar la opción Intensidad, se muestran los siguientes mapas, que incluyen una barra de color en la que los colores cálidos representan valores de alta potencia de señal recibida.

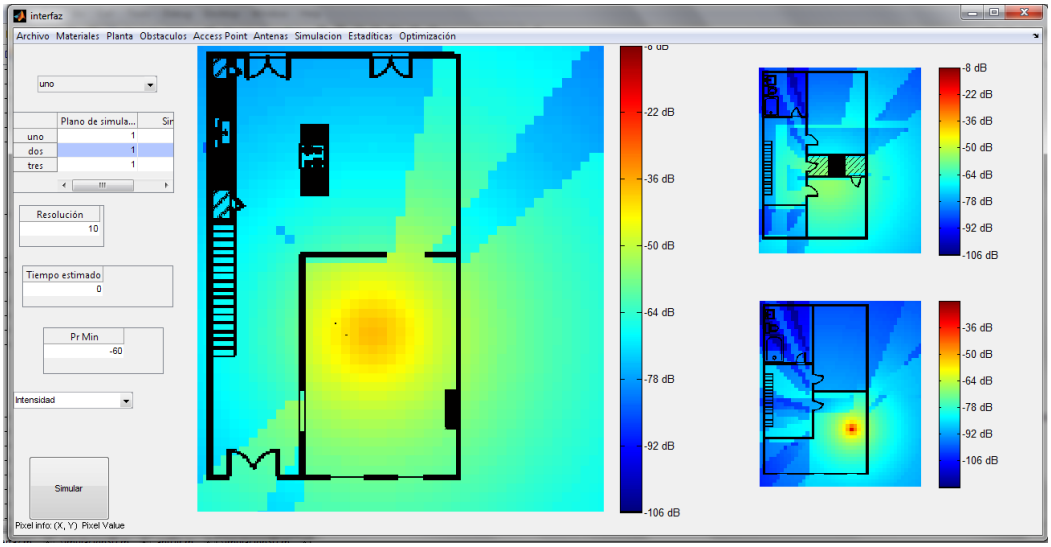

Figura 8.11 Mapas de potencia máxima de señal recibida

Al seleccionar la opción Cobertura, se muestran los siguientes mapas, en los que cada color hace referencia a un Access Point.

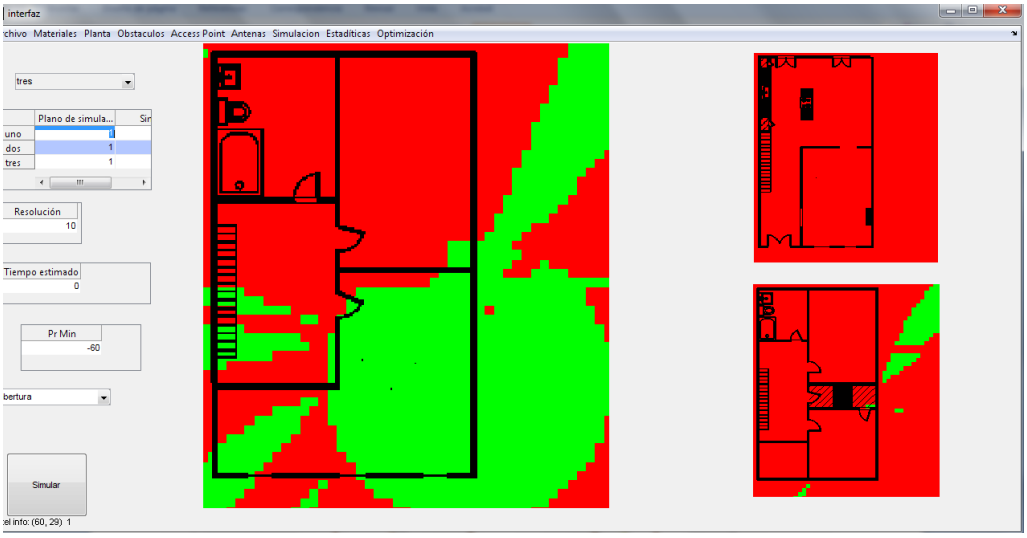

Figura 8.12 Mapas de cobertura

Al seleccionar la opción Interferencia, se muestran los mapas de interferencia entre canales.

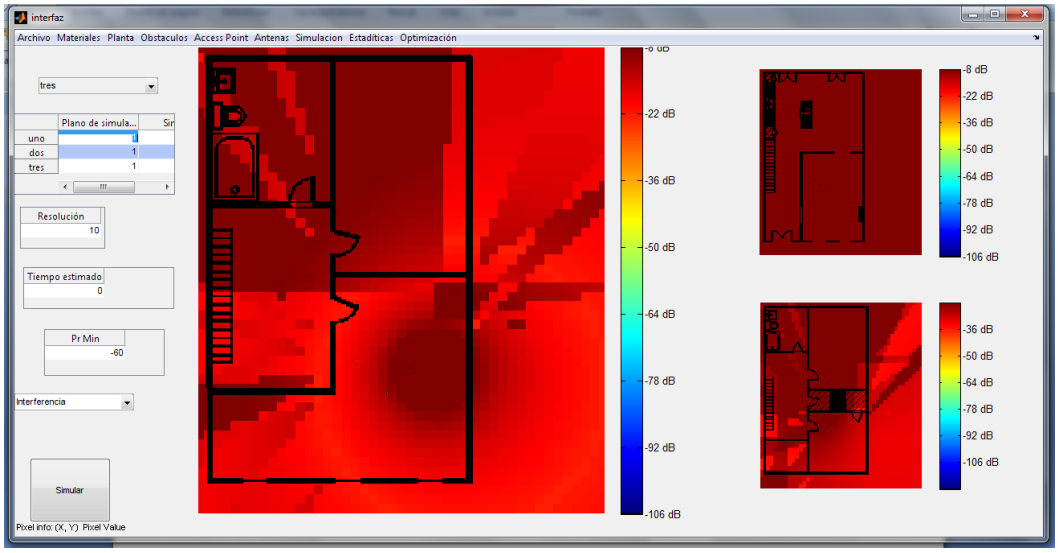

Figura 8.13 Mapas de Interferencia

Se ha implementado una barra de progreso, que muestra de forma aproximada, el porcentaje de simulación completado y el tiempo de simulación empleado hasta el momento.

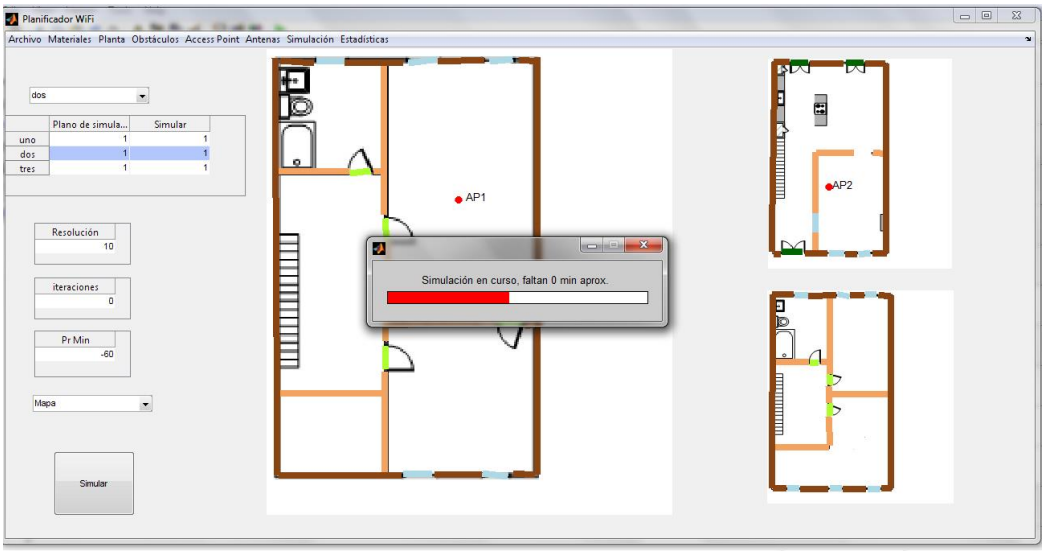

Figura 8.14 Barra de progreso

8.2.8 MÓDULO ESTADÍSTICAS

La siguiente imagen muestra la interfaz del módulo Estadísticas.

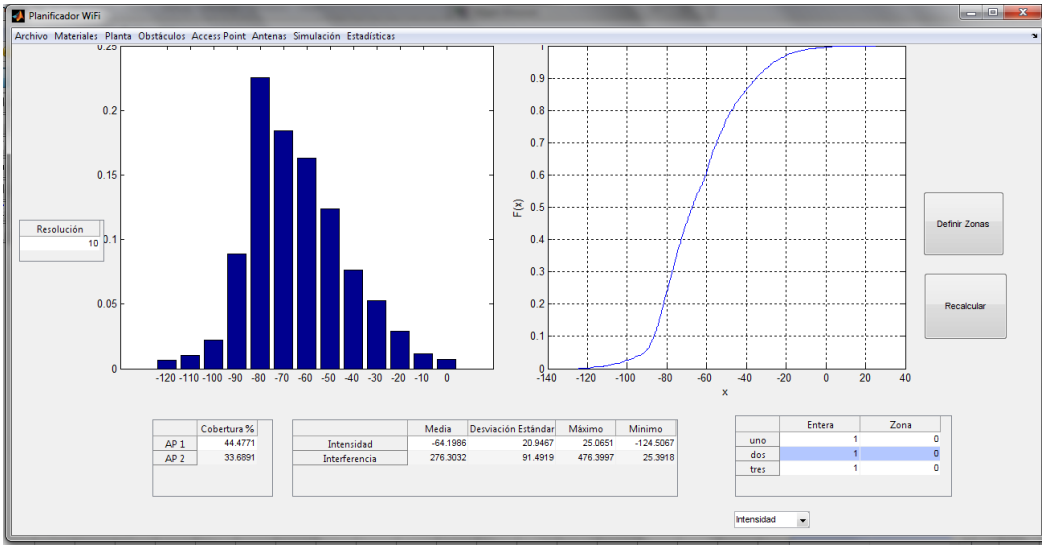

Figura 8.15 Interfaz módulo Estadísticas

Al hacer clic sobre el botón Definir Zonas, se nos abre otra interfaz en la que podemos seleccionar una o varias áreas del plano de planta deseado.

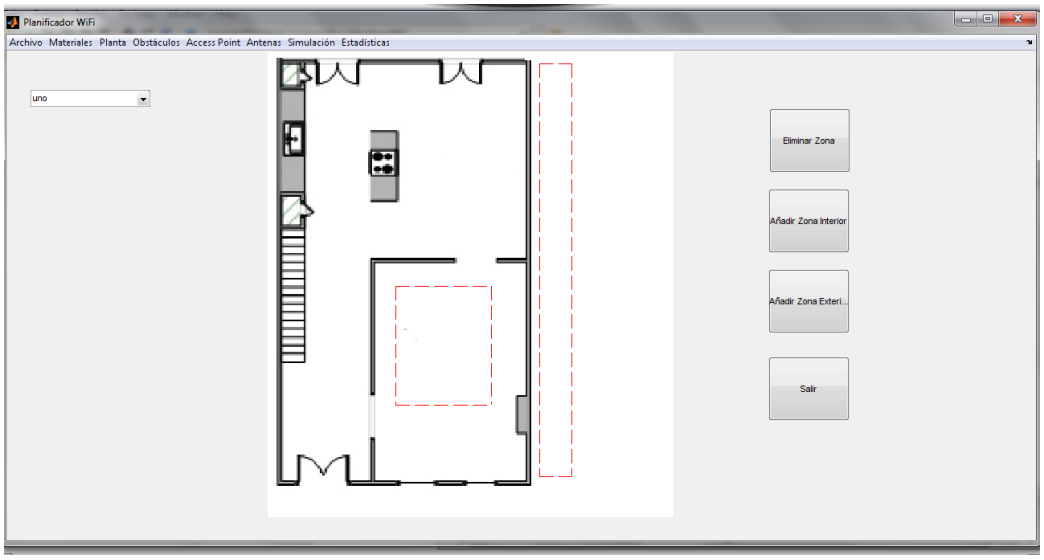

Figura 8.16 Interfaz para definir zona

CAPÍTULO 9

EVALUACIÓN Y VALIDACIÓN

En ese capítulo se realizará la validación de la herramienta. El objetivo es demostrar que los resultados de las simulaciones son correctos y que se ha realizado una correcta implementación de los modelos de propagación.

La validación consistirá en la comparación de los resultados obtenidos por nuestra herramienta y los obtenidos por una de las herramientas de planificación del mercado. En concreto, se solicitó una licencia de prueba gratuita a la compañía AWE Communications para poder utilizar su herramienta de planificación WinProp **[2].** Se eligió WinProp por ser la herramienta más completa, la que más modelos incluye y la más cara de las estudiadas, y por tanto, la que *a priori* en teoría ofrecerá resultados más precisos.

9.1 CONFIGURACIÓN DE LOS ESCENARIOS

El primer paso, es seleccionar el escenario a utilizar para la simulación. La versión de prueba de WinProp no ofrece la posibilidad de insertar planos propios, así que escogimos uno de los que vienen en un ejemplo de proyecto. En la siguiente imagen se muestra el escenario a simular.

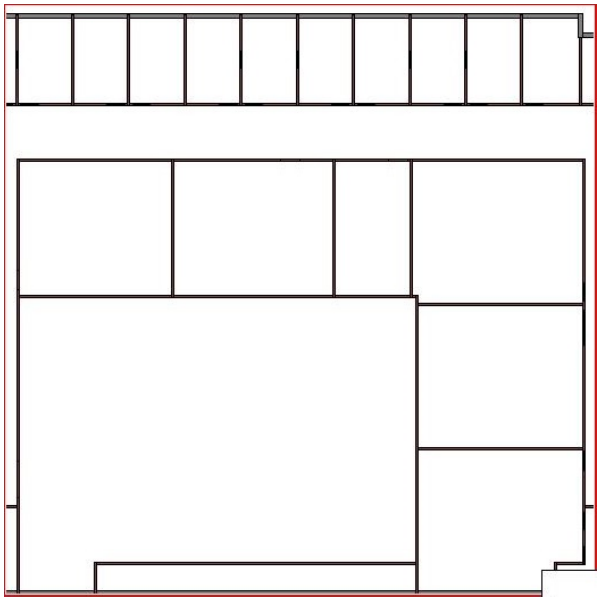

Figura 9.1 Escenario de simulación

El siguiente paso es crear un nuevo proyecto con nuestra en nuestra herramienta, asignarle el plano de planta aquí mostrado y dibujar sobre él los obstáculos presentes. En este caso, los únicos obstáculos serán las paredes interiores y

exteriores. A continuación, buscamos en el proyecto de WinProp la información sobre la atenuación a 5 GHz (el proyecto escogido es de 802.11a) correspondiente a los materiales de las paredes. Asignamos dicho valor a las paredes del escenario de nuestro proyecto.

En la siguiente imagen se muestra el escenario dibujado:

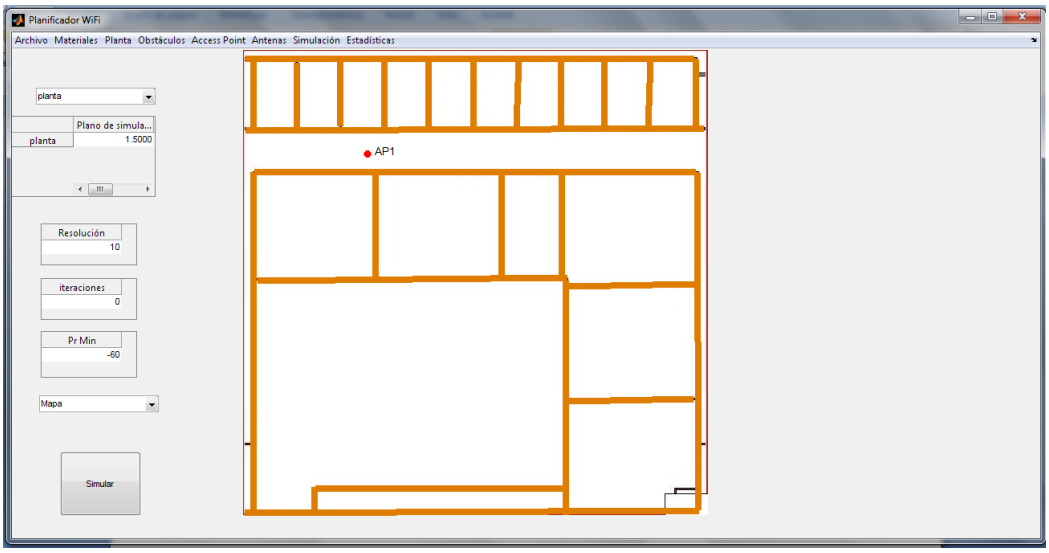

Figura 9.2 Escenario dibujado en la herramienta

El siguiente paso es configurar los escenarios para que sean lo más parecidos. Lo primero es asegurarnos que tengan la misma dimensión. Para ello, usamos la opción de establecer escala de nuestra herramienta. Medimos la distancia (usando el cursos disponible para ello) entre dos puntos del escenario en WinProp, seleccionamos los puntos equivalentes en nuestro escenario e introducimos la distancia entre ellos. La escala obtenida es **0.0592** metros/pixel.

Lo último que nos queda, es configurar un *Access Point*, para ello, de nuevo buscamos las características del AP en WinProp y las trasladamos a nuestra herramienta. La siguiente tabla muestra como queda configurado el AP.

Banda	**5 GHz**
Estándar	**802.11 a**
Canal	**40**
Antena	**Omnidireccional**
Potencia	**40 dB**
Altura	**1.5 m**

Tabla 9.1 Configuración del AP

9.2 COMPARACIÓN DE POTENCIA DE SEÑAL RECIBIDA

Realizamos la simulación de los escenarios, a la mayor resolución posible, en cada una de las herramientas. Seleccionamos el modelo de propagación *COST 231 Multi Wall Model* **[12]** en la herramienta WinProp, ya que al ser la simulación de una sola planta, no se producen pérdidas por atravesar ningún techo, y el modelo es equivalente al *Multi Wall and Floor Model* **[13]** simulado en nuestra herramienta.

Mostramos los mapas de potencia de señal recibida para cada herramienta.

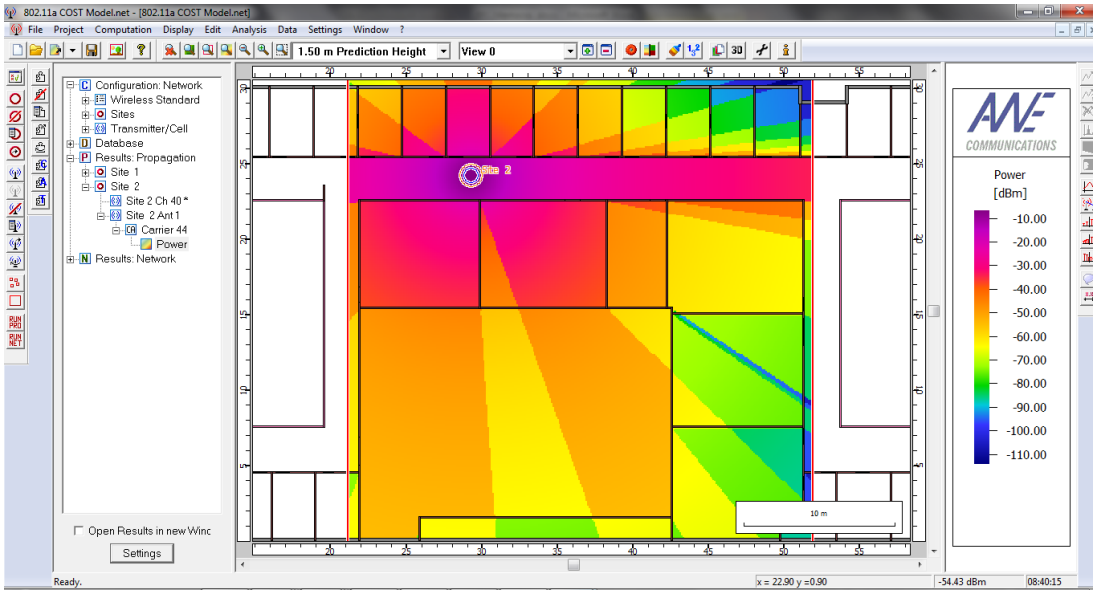

Figura 9.3 Potencia de señal recibida en WinProp

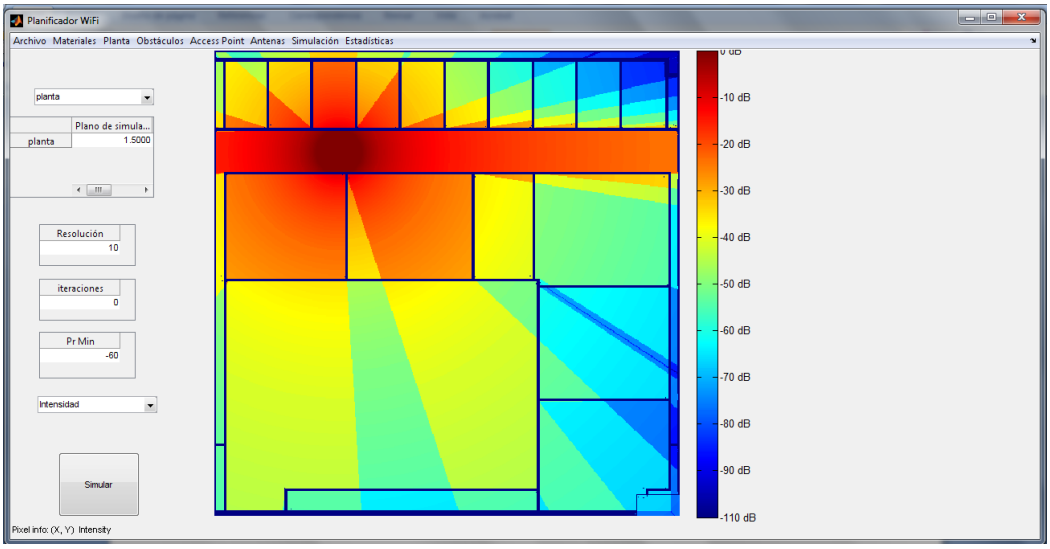

Figura 9.4 Potencia de señal recibida en nuestra herramienta

A primera vista, comparando ambas imágenes de manera cualitativa, se observa una radiación similar de la potencia de señal. La única diferencia aparente es la escala de colores usados. Además, comprando con los cursores los valores de algunos puntos, vemos son bastante similares.

Ahora vamos a realizar una comparación cuantitativa, para ello abrimos la ventana de estadísticas de cada una de las herramientas.

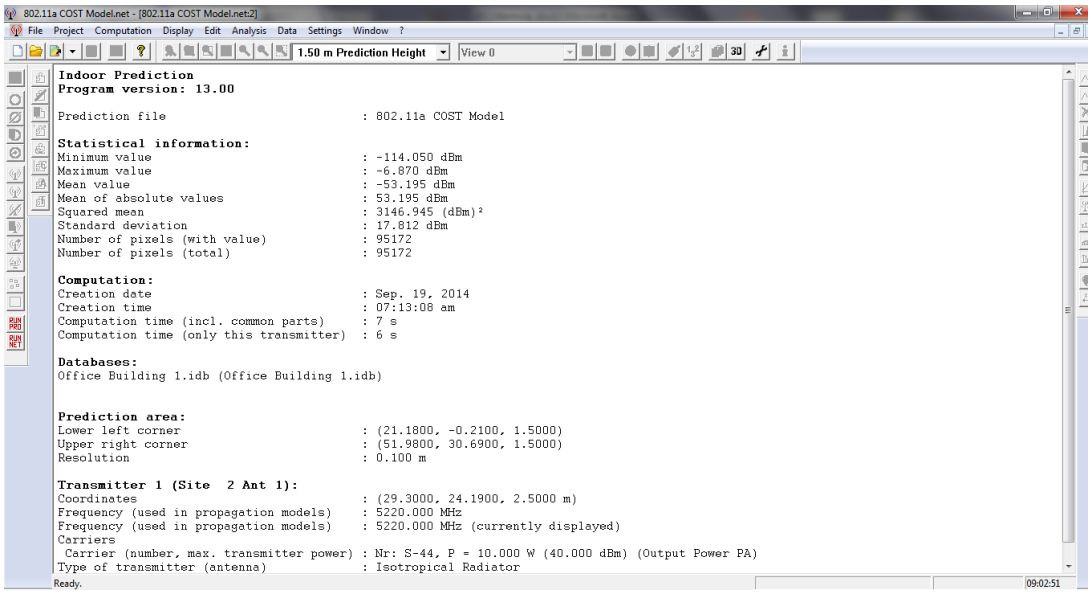

Figura 9.5 Estadísticas de simulación en WinProp

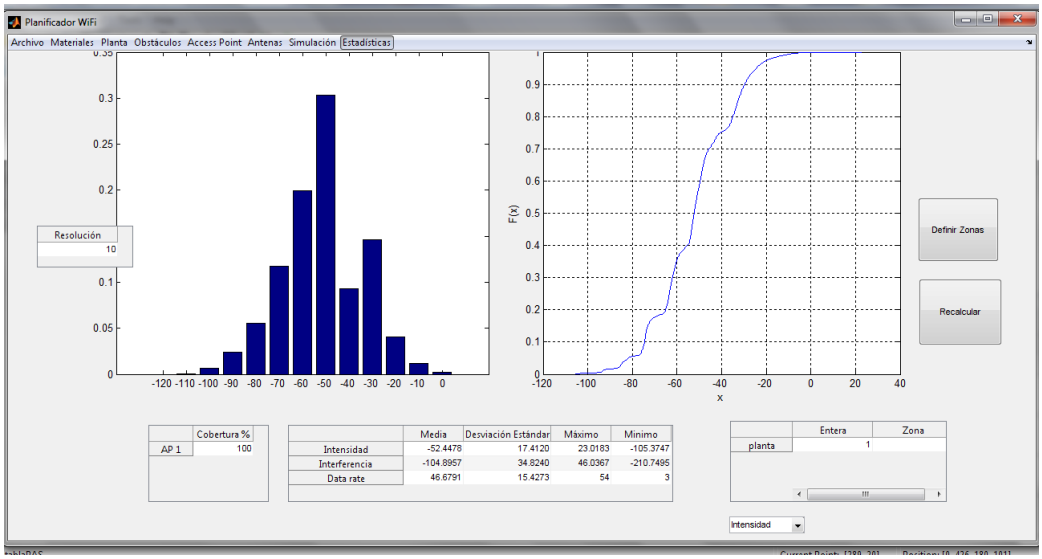

Figura 9.6 Estadísticas de simulación en nuestra herramienta

La siguiente tabla contiene los resultados mostrados en las imágenes anteriores.

RSSI	Herramienta WinProp	Herramienta Matlab
Media	-53.195	-52.4478
Varianza	17.812	17.4120
Máximo	-9.87	23.0183
Mínimo	-114.05	-105.3747

Tabla 9.2 Comparación de estadísticas de potencia de señal recibida

Los resultados obtenidos son demuestran la validez de la herramienta desarrollada.

El error relativo en la media es del 0.14% y en la varianza es del 0.13%.

La diferencia en la potencia máxima se debe a que en nuestra herramienta no hemos considerado que cuando estamos muy próximos a la antena, dentro de la región de Fresnel **[23],** la propagación es diferente a la del espacio libre. Pero el número de pixeles afectados por este error es insignificante y no altera las estadísticas globales.

Por último, vamos a comparar las PDFs y CDFs de ambas herramientas, las siguientes figuras ilustran los resultados obtenidos para WinProp. Los resultados para nuestra herramienta se mostraron anteriormente en la figura 9.5

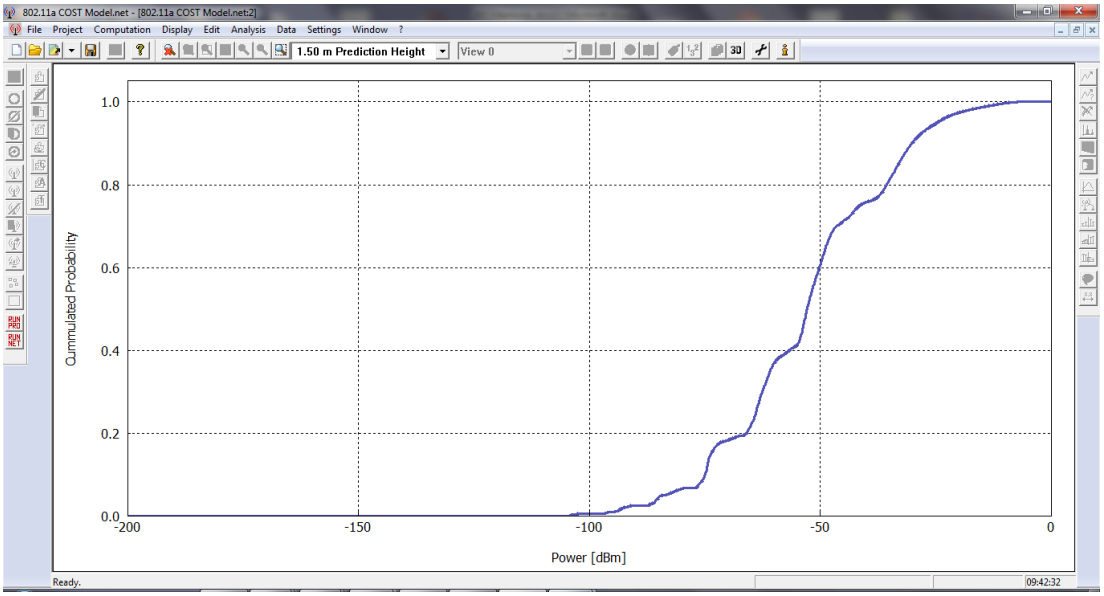

Figura 9.7 CDF de la herramienta WinProp

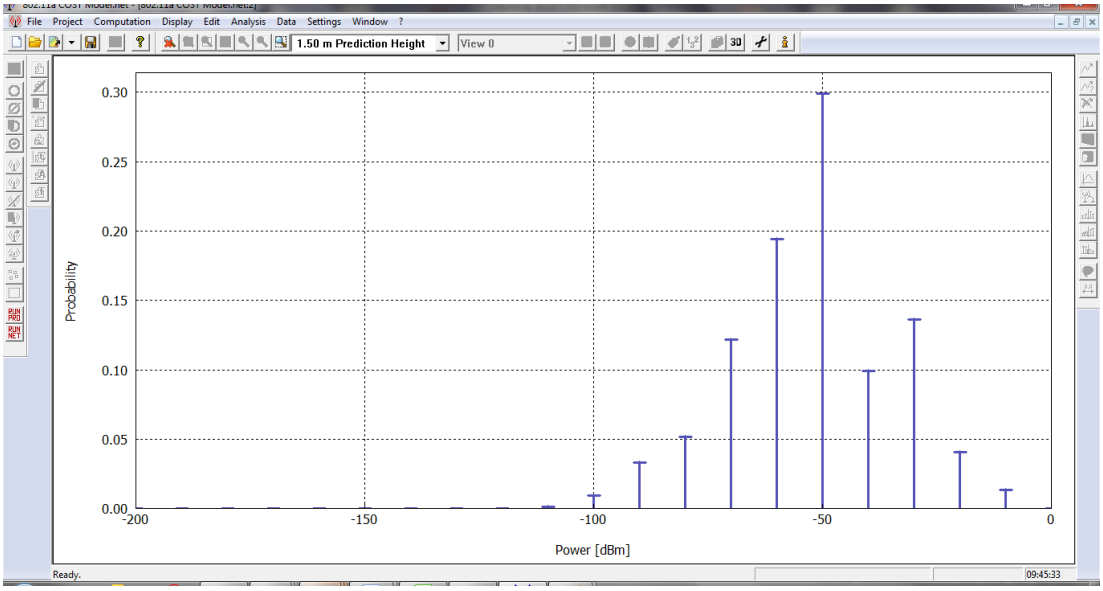

Figura 9.8 CDF de la herramienta WinProp

Comparando cualitativa y cuantitativamente las figuras de las PDFs y CDFs (figuras 9.6, 9.7 y 9.8) de ambas herramientas, se observa que son prácticamente idénticas, lo que confirma una vez más la validez de la herramienta desarrollada.

CAPÍTULO 10

CONCLUSIONES

Finalmente, se ha conseguido desarrollar una herramienta de planificación Wi-Fi para entornos de interior totalmente gráfica y fácil de usar.

Se ha utilizado para la simulación de los escenarios el modelo de propagación *Multi-Floor-and-Wall Model* **[9]**.

Se ha conseguido que la herramienta muestre mapas de máxima potencia de señal recibida, de interferencia entre canales, de velocidad de datos y de cobertura. Además la herramienta es capaz de proporcionar información estadística (CDF, PDF, media, varianza, etcétera), sobre estas mismas variables, en las localizaciones del escenario que se deseen.

Se ha logrado que la descripción del escenario pueda realizarse simplemente conociendo los planos de planta y los materiales del edificio a simular.

Otro de los aspectos más importantes es que se ha logrado validar el modelo de simulación.

De esta forma, se han logrado cumplir los objetivos iniciales del proyecto, obteniéndose una herramienta sencilla, dinámica, vistosa, independiente, intuitiva, escalable y eficaz.

El hecho de haber realizado un diseño modular de la herramienta, permite vislumbrar principalmente dos líneas de trabajo futuro.

- En primer lugar, sería de gran utilidad la implementación de un módulo de Optimización, que permitiría que además de predecir resultados, la herramienta fuese capaz de optimizar la disposición o configuración de los elementos del escenario en pro de satisfacer u optimizar algún valor o valores para cualquier característica (potencia recibida, interferencia, cobertura, etcétera).

- En segundo lugar, otra posible línea de trabajo futuro, sería la de implementar algún otro modelo de propagación.

El logro de estos dos futuribles objetivos supondría igualar nuestra herramienta aún más a las existentes en el mercado. Si bien, lo conseguido en este proyecto es más que suficiente para satisfacer la mayoría de las necesidades de un usuario que esté dispuesto a pagar el precio de alguna de las herramientas de planificación del mercado.

ANEXO I

BASE DE DATOS DE MATERIALES

La siguiente tabla muestra los materiales disponible en la base de datos de materiales de la herramienta *BD_Default.mat.* Los datos han sido tomados de la documentación de RF3D WifiPlanner **[4] (**una de las herramientas de planificación estudiadas en el segundo capítulo).

Floor/ Wall	Att. 2.4 GHz [dB]	Att. 5 GHz [dB]	(Mean) Thickness cm	Material	Comment
Wall	8	20	18	Brick wall 18cm 8/20dB	Brick wall
Wall	10	25	25	Brick wall 25cm 10/25dB	Brick wall
Wall	13	32,5	50	Brick wall 50cm 13/32.5dB	Brick wall
Wall	15	22,5	18	Steel reinforced concrete wall 18cm 15/22.5dB	Steel reinforced concrete wall
Wall	20	30	25	Steel reinforced concrete wall 25cm 20/30dB	Steel reinforced concrete wall
Wall	25	37,5	31	Steel reinforced concrete wall 31cm 25/37.5dB	Steel reinforced concrete wall
Wall	2	3	18	Light-Weight concrete/gas concrete 18cm 2/3dB	Light-weight concrete wall
Wall	0,8	0,8	N/A	Dry wall/1.5cm plasterboard each side 0.8/0.8dB	Drywall, also commonly known as gypsum board, plasterboard. A drywall panel is made of a paper liner wrapped around an inner core made primarily from gypsum plaster.
Wall	1,6	1,6	N/A	Dry wall/3.0 cm plasterboard at each side 1.6/1.6dB	Drywall, also commonly known as gypsum board, plasterboard. A drywall panel is made of a paper liner wrapped around an inner core made primarily from gypsum plaster.
Wall	4	6	3,8	Wood Wall 3.8cm 4/6dB	One layer wood wall
Wall	8	12	N/A	Wood Wall/3.8cm each side 8/12dB	Two layer wood wall
Wall	15	15	2,6	Stucco wall 2.6cm 15/15dB	Modern Stucco usually consists of 1 layer of wire lath and 2 layers of portland cement-based plaster
Wall	3	4,5	3	Double Glazed Window 3cm 3/4.5dB	Glass window
Wall	28	42	3	IR-blocking Window 3cm 28/42dB	Infrared blocking window
Wall	2	3	N/A	Office divider glass/wood 5-10cm 2/3dB	Office divider
Wall	1	1,5	5	Office cubical 5cm 1/1.5dB	Office divider
Wall	1,6	2,4	100	High rise rack 100cm 1.6/2.4dB	High rise rack approx 1m thick
Wall	30	45	N/A	Profiled sheeting 30/45dB	Metal wall sheeting in the form of Corrugated galvanized iron
Wall	30	45	N/A	Elevator shaft 30/45dB	Elevator shaft
Floor	15	22,5	18	Steel reinforced concrete floor 18cm 15/22.5dB	Steel reinforced concrete floors
Floor	16	24	18	Srcf with nonmetallic dropped ceiling 18cm 16/24dB	Steel reinforced concrete floors with nonmetallic dropped ceiling
Floor	25	37,5	18	Srcf with metallic dropped ceiling 18cm 25/37.5dB	Steel reinforced concrete floors with metallic dropped ceiling

Floor	20	30	25	Steel reinforced concrete floor 25cm 20/30dB	Steel reinforced concrete floors
Floor	21	31,5	25	Srcf with nonmetallic dropped ceiling 25cm 21/31.5dB	Steel reinforced concrete floors with nonmetallic dropped ceiling
Floor	30	45	25	Srcf with metallic dropped ceiling 25cm 30/45dB	Steel reinforced concrete floors with metallic dropped ceiling
Floor	25	37,5	31	Steel reinforced concrete floor 31cm 25/37.5dB	Steel reinforced concrete floors
Floor	26	39	31	Srcf with nonmetallic dropped ceiling 31cm 26/39dB	Steel reinforced concrete floors with nonmetallic dropped ceiling
Floor	35	52,5	31	Srcf with metallic dropped ceiling 31cm 35/52.5dB	Steel reinforced concrete floors with metallic dropped ceiling
Floor	4	6	3,8	Wood floor (w/ or w/o carpet) 3.8cm 4/6dB	Wood Flooring with carpet
Floor	6	8	4,5	Wood floor with tiles 4.5cm 6/8dB	Wood Flooring with tiles

Tabla 1 Anexo I Base de datos de materiales

ANEXO II

BASE DE DATOS DE ANTENAS

A continuación se muestran los diagramas de radiación horizontal y vertical de las antenas disponibles en la base de datos de antenas de la herramienta *BD_Antenas.mat* . A la izquierda se muestra siempre el diagrama de radiación horizontal, y a la derecha, el vertical.

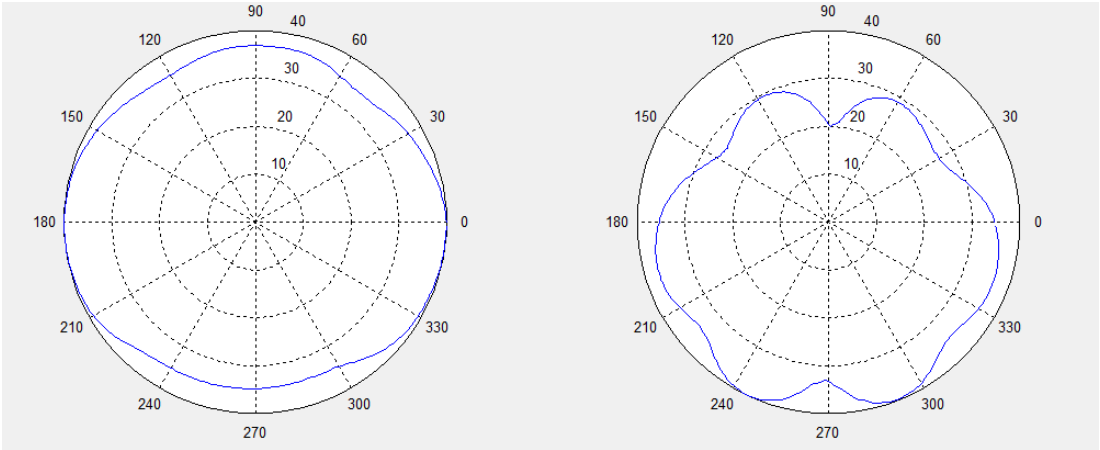

Figura 1 Anexo II Antena genérica omnidireccional a 2.4 GHz

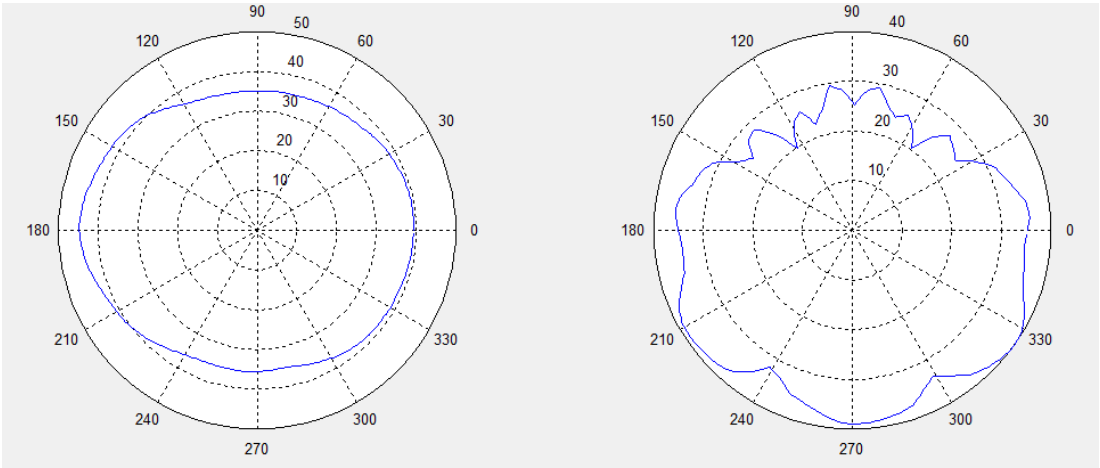

Figura 2 Anexo II Antena genérica omnidireccional a 5 GHz

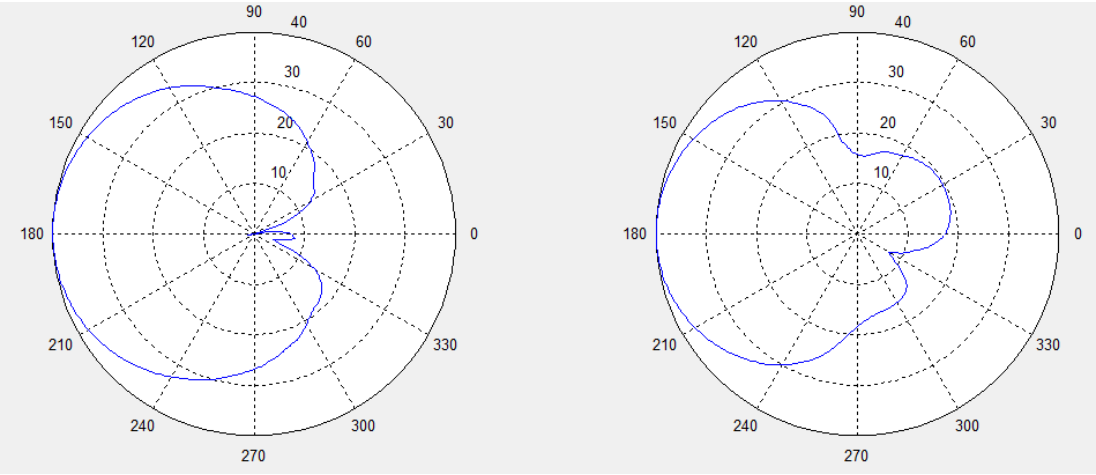

Figura 3 Anexo II Antena genérica direccional a 2.4 GHz y a 5 GHz

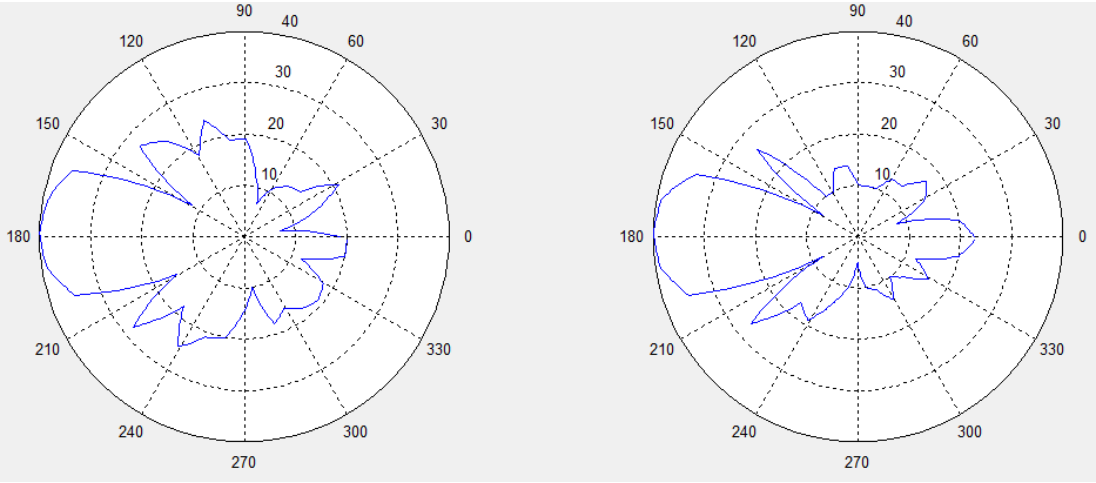

Figura 4 Anexo II Antena Yagi direccional a 2.4 GHz y a 5 GHz

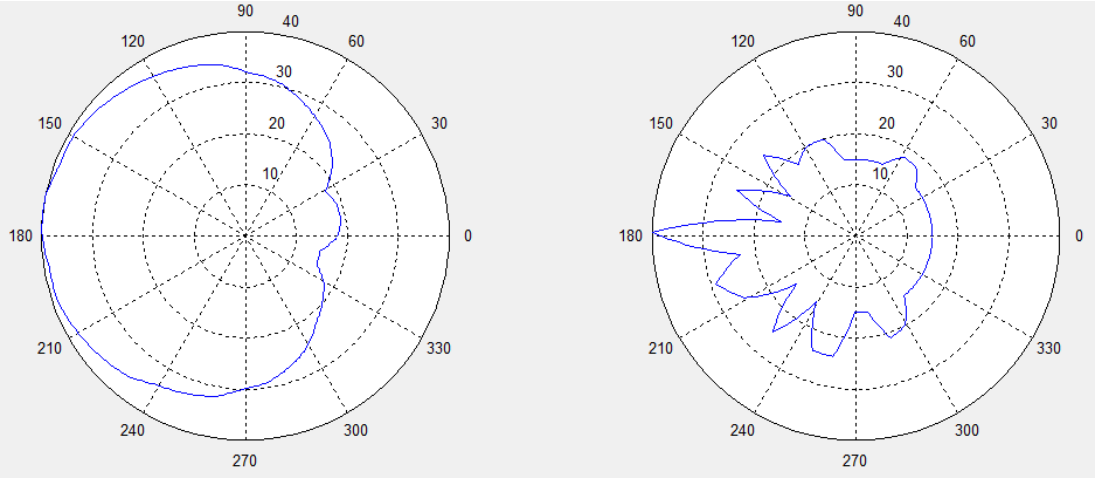

Figura 5 Anexo II Antena Cushcraft direccional a 2.4 GHz

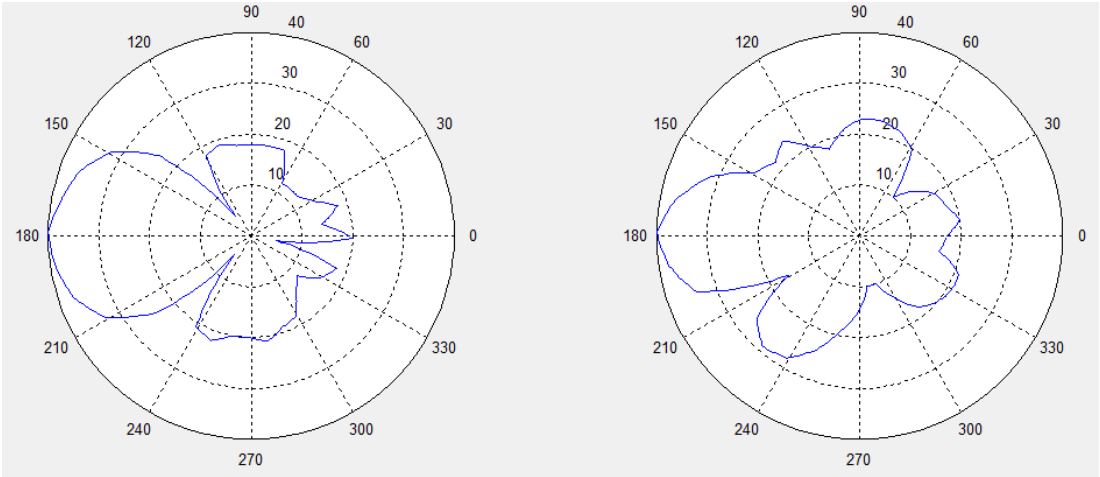

Figura 6 Anexo II Antena Cushcraft direccional a 5 GHz

ANEXO III

TABLAS DE CONVERSIÓN ENTRE POTENCIA DE SEÑAL Y VELOCIDAD DE DATOS

Las siguientes tablas representan las condiciones mínimas de potencia de señal recibida y de SNR para alcanzar cada valor de velocidad de datos. Los valores dentro de una misma tabla no tienen porqué obtenerse con la misma modulación.

En el caso de 802.11n, los valores mostrados son cuando se usa un solo canal de 20 MHz y se configura un intervalo de guarda de 800 ns.

Data Rate	RSSI	SNR
6	-82	3
12	-79	4
18	-77	6
24	-74	6
48	-66	10
54	-65	11

Tabla 1 Anexo III Estándar 802.11a

Data Rate	RSSI	SNR
1	-93	7.8
2	-90	5.6
5,5	-87	4.6
11	-84	2.6

Tabla 2 Anexo III Estándar 802.11b

Data Rate	RSSI	SNR
1	-94	4
2	-91	6
5.5	-87	8
18	-84	11
24	-82	11
36	-80	11
48	-75	11
54	-71	11

Tabla 3 Anexo III Estándar 802.11g

Data Rate	RSSI	SNR
6.5	-85	2
13	-82	5
19.5	-79	7
26	-75	11.5
39	-72	14
52	-69	18
58.5	-66	21
65	-63	21.5

Tabla 4 Anexo III Estándar 802.11n

REFERENCIAS

[1] IEEE 802.11 Grupo de Trabajo (Working Group) en http://www.ieee802.org/11/

[2] WinProp en http://www.awe-communications.com/

[3] AirMagnt Planner en http://www.flukenetworks.com/

[4] RF3D Wi-FiPlanner2 en http://www.psiber.com/

[5] Stig Erik Arnesen y Kjell Age Haland, Tesis Doctoral “Modelling of coverage in WLAN”. Agder University College, 2001.

[6] T. Rappaport, “Wireless Communications”, Ed. Prentice Hall, 1996.

[7] E. Castellanos, J. Tolero, J. de J. Rugeles, “Análisis de propagación electromagnética en espacios cerrados”. Marzo 2006.

[8] E. Damosso, editor, “*Digital Mobile Radio: Towards Future Generation Systems*”. European Commission, Final Report of the COST 231 Project. Chapter 4. 1998.

[9] WLAN Indoor Coverage Range: Truths and MisconceptionsDr. Dov Andelman, CTO Envara Inc. Merkaz Sherona12 Derech Hasharon Kfar Saba 44269, Israel

[10] J. Beyer, R. Jacoby: 'Two semi-empirical and fast prediction models for urban microcells compared with measurements at 919 and 1873 MHz' The second european personal mobile communications conference, October 1997,

[11] Motley, A.J., and Keenan, J.M.P., “Personal Radio Communication Coverage

in Buildings at 900 MHz and 1700 MHz”, Electronics Letters, Vol. 24, No. 12,

pp. 763-764, Sept. 6, 1988

[12] Cost Multi Wall Model E. Damosso, “Digital Mobile Radio: Towards Future Generation Systems,” European Commission, Final Report of the COST 231 Project. 1998.

[13] Matthias Lott, Ingo Forkel, “A multi wall and floor model for indoor radio propagation”

[14] Harry R. Anderson, “Building corner diffraction measurements and predictions using UTD”, IEEE, Transaction on antennas and propagation, vol. 46, No 2, Febrero 1998.

[15] David I. Laurenson, “Indoor Radio Channel Propagation Modelling by Ray Tracing Techniques”, The University of Edinburgh, 1994

[16] Zhong Ji, Bin-Hong Li, Hao-Xing Wang Hsing-Yi Chen, Tapan K. Sarkar, “Efficient Ray-Tracing Methods for Propagation Prediction for Indoor Wireless

[17] G. W¨olfle, F. M. Landstorfer, “Dominant paths for the field strength prediction”,Institut für Hochfrequenztechnik, University of Stuttgart.Communications”

[18] Tapan K, Sarkar; Zhong, Ji; Kyungjung, Kim; Abdellatif, Medouri; Magdalena Salazar Palma. “A Survey of Various Propagation Models for Mobile Communication”. IEEE Antenas and Propagation Magazine, 2003.

[19] K.S. Yee, ‘Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell’s equations in isotropic media’. IEEE Trans. Microw. Theory Techniques, vol MTT-35, pp 117-123, 1987

[20] Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación. Comunicado honorarios profesionales. Disponible en: http://www.coit.es

[21] AgenciaTributaria. Cuadro general de amortizaciones. Gobierno de España. Disponible en: http://www.agenciatributaria.es/AEAT.internet/Inicio_es_ES/-_Segmentos_/Empresas_y_profesionales/-Empresarios_individuales_y_profesionales/-Rendimientos_de_actividades_economicas_en_el_IRPF/-Regimenes_para_determinar_el_rendimiento_de_las_actividades_economicas/-Estimacion_Directa_Simplificada.shtml

[22] Charles H.Lehmann “Geometría Analítica.” Ed. Limusa

[23] Constantine A. Balanis “Antenna Theory. Analysis and design.” Ed. Wiley

[24] Documentación de MATLAB disponible en http://www.mathworks.es