

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA



Proyecto Fin de Carrera

Estudio Teórico Experimental de un Sistema Distribuido MIMO en la Banda de Frecuencias de WIFI

AUTOR: José Antonio Martínez Cano
DIRECTOR: José María Molina García-Pardo

Diciembre / 2006



Autor	José Antonio Martínez Cano
E-mail del Autor	menchujamc@hotmail.com
Director(es)	José María Molina García-Pardo
E-mail del Director	josemaria.molina@upct.es
Título del PFC	Estudio Teórico Experimental de un Sistema Distribuido MIMO en la Banda de Frecuencias de WIFI
Descriptor(es)	MIMO Distribuido, Campaña de Medida, Frecuencias WIFI
<p>Resumen</p> <p>Con las agrupaciones de antenas Multiple Input Multiple Output, conocidas con el acrónimo MIMO, es posible extraer del espectro radioeléctrico disponible una capacidad varias veces superior a la que se consigue en los sistemas de comunicaciones móviles actuales. Este tipo de agrupaciones de antenas está siendo en los últimos años objeto de investigación por parte de numerosas entidades académicas e industriales.</p> <p>En este proyecto trataremos de analizar la caracterización del canal de radiocomunicaciones en la banda de frecuencias de WiFi para los sistemas MIMO, a priori de una forma teórica y a posteriori de una forma experimental. De esta manera, hemos realizado en este proyecto un programa software en primer lugar, con el que caracterizamos el canal radio de forma teórica en un entorno indoor para los sistemas MIMO tradicionales y distribuidos. En segundo lugar realizaremos una campaña de medidas para estos sistemas MIMO en el mismo entorno que hemos simulado con el programa anterior.</p> <p>Para concluir se realizará una comparación entre los resultados obtenidos tras el estudio teórico previo y los resultados obtenidos tras las campañas de medidas realizadas, que nos ayudará finalmente a elaborar una serie de conclusiones sobre el estudio de los sistemas MIMO.</p>	
Titulación	Ingeniería de Telecomunicación
Intensificación	Sistemas y Redes de Telecomunicación
Departamento	Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
Fecha de Presentación	Diciembre- 2006

Índice de Contenidos

Capítulo 1. Introducción.....	- 11 -
1.1 Introducción	- 11 -
1.2 Objetivos	- 13 -
1.3 Partes del Proyecto	- 14 -
Capítulo 2. Estado del Arte	- 15 -
2.1 Propagación Indoor	- 15 -
2.1.1 Pérdidas Espacio Libre.....	- 15 -
2.1.2 Reflexión	- 16 -
2.1.3 Dispersión.....	- 16 -
2.1.4 Difracción.....	- 16 -
2.1.5 Parámetros que afectan a la propagación	- 17 -
2.1.5.1 Atenuación por espacio libre.....	- 17 -
2.1.5.2 Atenuación por multi-trayectorias.....	- 17 -
2.1.5.3 Pérdidas de transmisión.....	- 18 -
2.1.6 Modelos de propagación	- 18 -
2.1.6.1 Modelo Modificado de Espacio Libre.....	- 19 -
2.1.6.2 Modelo Motley-Keenan	- 19 -
2.1.6.3 Modelo Ray Tracing.....	- 20 -
2.1.6.4 Modelo Cost-Multi-Wall.....	- 20 -
2.1.6.5 Modelo de Trayecto Dominante.....	- 21 -
2.2 MIMO.....	- 23 -
2.2.1 Introducción	- 23 -
2.2.2 ¿Qué es MIMO?.....	- 23 -
2.2.3 Transmisión Multicanal: la Matriz “H” de Transmisión.....	- 25 -
2.2.4 Principio de Funcionamiento de los Sistemas MIMO	- 27 -
2.2.4.1 Aumento de la ganancia en la transmisión multicanal.....	- 27 -
2.2.4.2 Capacidad de los canales MIMO	- 29 -
2.2.5 Los sistemas MIMO dentro del Enfoque Actual del Operador.....	- 31 -
2.2.6 Parámetros MIMO: estudio teórico.....	- 32 -
2.2.6.1 Capacidad MIMO.....	- 33 -
2.2.6.2 Correlación en el Transmisor y Receptor.....	- 35 -
2.2.6.3 Factor K.....	- 36 -

2.2.6.4 Respuesta Temporal	- 36 -
2.2.6.5 RMS Delay Spread: Retardo Medio y Dispersión del Retardo.....	- 36 -
2.2.6.6 Ancho de Banda de Coherencia	- 38 -
2.3 Sistemas Distribuidos	- 39 -
2.3.1 Introducción a los sistemas distribuidos.....	- 39 -
2.3.2 Ventajas de los sistemas distribuidos respecto de los centralizados	- 40 -
2.3.3 Ventajas de los sistemas distribuidos respecto de los PCs independientes....	- 40 -
2.3.4 Desventajas de los sistemas distribuidos.....	- 40 -
2.3.5 Aplicaciones	- 41 -
2.3.6 Sistemas MIMO Distribuidos.....	- 42 -
2.3.6.1 Ancho de banda y sistemas de modulación.....	- 44 -
2.3.6.2 Modelo del canal MIMO distribuido	- 45 -
2.3.6.3 Capacidad del Canal MIMO Distribuido	- 46 -
Capítulo 3. Trazador Indoor 3D	- 48 -
3.1 Trazado de rayos	- 48 -
3.2 Óptica Geométrica.....	- 52 -
3.2.1 Rayo Directo	- 52 -
3.2.2 Reflexión	- 52 -
3.2.2.1 Polarización Soft	- 53 -
3.2.2.2 Polarización Hard	- 54 -
3.2.2.3 Campo Eléctrico definido por un rayo reflejado	- 54 -
3.3 Programa Trazador Indoor 3D	- 55 -
3.4 Coordenadas de los dipolos imaginarios.....	- 60 -
Capítulo 4. Campaña de Medidas	- 68 -
4.1 Entorno de medidas	- 68 -
4.2 Configuraciones de Posiciones de las Antenas	- 69 -
4.3 Equipos de medidas.....	- 74 -
4.3.1 Analizador de Redes ENA E5071B y Ampliación Multipuerto E5091A.....	- 74 -
4.3.2 Antenas AIR-ANT2506	- 77 -
4.3.3 Conmutador 87406B y Controlador 11713A	- 78 -
4.3.4 Ordenador Portátil	- 79 -
4.3.5 Cables.....	- 80 -
4.4 Metodología	- 82 -
4.4.1 Calibración	- 82 -
4.4.2 Realización de una Campaña de Medidas.....	- 84 -

Capítulo 5. Resultados.....	- 92 -
5.1 Resultados de las simulaciones del Trazador Indoor 3D	- 92 -
5.1.1 MIMO tradicional	- 94 -
5.1.1.1 Antenas separadas 2λ	- 94 -
5.1.1.2 Antenas separadas $3\lambda/2$	- 95 -
5.1.1.3 Antenas separadas λ	- 96 -
5.1.1.4 Antenas separadas $\lambda/2$	- 97 -
5.1.1.5 Antenas separadas $\lambda/4$	- 98 -
5.1.2 MIMO distribuido	- 99 -
5.1.2.1 Antenas en medio de las paredes laterales	- 99 -
5.1.2.2 Antenas en las esquinas.....	- 100 -
5.1.2.3 Antenas a una distancia del medio de las paredes.....	- 101 -
5.2 Resultados del procesado realizado sobre las campañas de medidas.....	- 108 -
5.2.1 Análisis de Potencia recibida	- 109 -
5.2.2 Análisis de la Capacidad	- 110 -
5.2.3 Análisis de la Correlación	- 114 -
5.2.4 Análisis del Factor K.....	- 115 -
5.2.5 Análisis del RMS Delay Spread.....	- 116 -
5.3 Comparación Resultados Teórico-Experimentales	- 121 -
Capítulo 6. Conclusiones.....	- 125 -
Anexo 1	- 128 -
Anexo 2	- 133 -
Bibliografía.....	- 146 -
Agradecimientos.....	- 147 -

Índice de Figuras

Figura 1: Reflexión [5].....	- 16 -
Figura 2: Difracción [5].....	- 17 -
Figura 3: Multi-trayectorias [1].....	- 18 -
Figura 4: Modelo Modificado de Espacio Libre [5]	- 19 -
Figura 5: Modelo Ray Tracing [5]	- 20 -
Figura 6: Modelo Cost-Multi-Wall [5].....	- 21 -
Figura 7: Modelo de Rayo Dominante [5]	- 21 -
Figura 8: Enrurador Inalámbrico provisto de 7 antenas inteligentes [2].....	- 23 -
Figura 9: Propagación entre Antenas [4].....	- 27 -
Figura 10: Procesado MIMO que da lugar a caminos de propagación diferentes [4].....	- 29 -
Figura 11: Ejemplos de tres casos de propagación [4].....	- 29 -
Figura 12: Transmisión paralela en MIMO [9].....	- 33 -
Figura 13: SISO [11].....	- 33 -
Figura 14: a) MISO b) SIMO [11]	- 34 -
Figura 15: MIMO [11]	- 35 -
Figura 16: Sistema MIMO Distribuido [4]	- 42 -
Figura 17: Ancho de banda por subportadora en OFDM a 10Mbit/s [4].....	- 45 -
Figura 18: Sistema MIMO Distribuido (M,N,L) [14].....	- 45 -
Figura 19: Contribuciones de Luz en el algoritmo Ray Tracing [15]	- 49 -
Figura 20: Rayos reflejados y transmitidos [15].....	- 49 -
Figura 21: Árbol binario asociado a cada rayo primario [15].....	- 50 -
Figura 22: Reflexión-Polarización Soft [11].....	- 53 -
Figura 23: Reflexión-Polarización Hard [11].....	- 54 -
Figura 24: Laboratorio SICOMO	- 56 -
Figura 25: Creación de dipolos imágenes	- 61 -
Figura 26: Laboratorio SICOMO con Antenas Tx y Rx para 0 reflexiones	- 62 -
Figura 27: Laboratorio SICOMO vista superior con Antenas Tx y Rx para 0 refl.....	- 63 -
Figura 28: Laboratorio SICOMO con Antenas Tx y Rx para 1 reflexión.....	- 63 -
Figura 29: Laboratorio SICOMO vista superior con Antenas Tx y Rx para 1 reflexión -	64 -
Figura 30: Laboratorio SICOMO con Antenas Tx y Rx para 2 reflexiones	- 65 -
Figura 31: Laboratorio SICOMO vista superior con Antenas Tx y Rx para 2 refl.....	- 66 -
Figura 32: Laboratorio SICOMO vista frontal con Antenas Tx y Rx para 2 refl.	- 66 -

Figura 33: Entorno de medidas-> Laboratorio SICOMO vista superior.....	- 68 -
Figura 34: Configuración Antenas Tx Distribuidas en medio de las paredes.....	- 70 -
Figura 35: Configuración Antenas Tx Distribuidas en las esquinas	- 70 -
Figura 36: Configuración Antenas Tx Distribuidas a una distancia del medio de las paredes	- 71 -
Figura 37: Configuración Antenas Tx en la misma pared	- 72 -
Figura 38: Posiciones de las Antenas receptoras en el laboratorio Sicomo	- 73 -
Figura 39: Sistema de Medidas	- 74 -
Figura 40: Analizador de redes ENA y Ampliación Multipuerto	- 75 -
Figura 41: Ventana Principal del ENA: Amplitud y Fase de las Señales	- 76 -
Figura 42: Antena.....	- 77 -
Figura 43: Conmutador de Señal.....	- 78 -
Figura 44: Esquema del conmutador de señal [10].....	- 79 -
Figura 45: Conmutador y Controlador del sistema de medidas	- 79 -
Figura 46: Ordenador Portátil	- 80 -
Figura 47: Tipos de Cables.....	- 80 -
Figura 48: Tipos de Conectores	- 81 -
Figura 49: Montaje de Calibración.....	- 82 -
Figura 50: Pantalla del analizador después de calibrar	- 84 -
Figura 51: Antenas en medio de los laterales en SICOMO (1).....	- 85 -
Figura 52: Antenas en medio de los laterales en SICOMO (2).....	- 86 -
Figura 53: Antenas Receptoras en SICOMO	- 86 -
Figura 54: Pantalla de Inicio del Software de Medidas	- 87 -
Figura 55: Pantalla Principal del Software de Medidas	- 87 -
Figura 56: Menú de Configuración del Software de Medidas	- 88 -
Figura 57: Contenido del Archivo creado en las medidas	- 89 -
Figura 58: Capacidad Simulada MIMO Tradicional: Antenas Tx separadas 2λ para a) 4 Antenas Rx b) 3 Antenas Rx c) 2 Antenas Rx	- 94 -
Figura 59: Capacidad Simulada MIMO Tradicional: Antenas Tx separadas $3\lambda/2$ para a) 4 Antenas Rx b) 3 Antenas Rx c) 2 Antenas Rx	- 95 -
Figura 60: Capacidad Simulada MIMO Tradicional: Antenas Tx separadas λ para a) 4 Antenas Rx b) 3 Antenas Rx c) 2 Antenas Rx	- 96 -
Figura 61: Capacidad Simulada MIMO Tradicional: Antenas Tx separadas $\lambda/2$ para a) 4 Antenas Rx b) 3 Antenas Rx c) 2 Antenas Rx	- 97 -
Figura 62: Capacidad Simulada MIMO Tradicional: Antenas Tx separadas $\lambda/4$ para a) 4 Antenas Rx b) 3 Antenas Rx c) 2 Antenas Rx	- 98 -

Figura 63: Capacidad Simulada MIMO Distribuido: Antenas Tx en medio de los laterales para a) 4 Antenas Rx b) 3 Antenas Rx c) 2 Antenas Rx	- 100 -
Figura 64: Capacidad Simulada MIMO Distribuido: Antenas Tx en las esquinas para a) 4 Antenas Rx b) 3 Antenas Rx c) 2 Antenas Rx	- 101 -
Figura 65: Capacidad Simulada MIMO Distribuido: Antenas Tx a una distancia del medio para a) 4 Antenas Rx b) 3 Antenas Rx c) 2 Antenas Rx	- 101 -
Figura 66: Capacidad Estadística MIMO Tradicional (1).....	- 103 -
Figura 67: Capacidad Estadística MIMO Tradicional (2).....	- 104 -
Figura 68: Capacidad Estadística MIMO Distribuido (1).....	- 104 -
Figura 69: Capacidad Estadística MIMO Distribuido (2).....	- 105 -
Figura 70: Capacidad Estadística Sistema MIMO 4x4	- 105 -
Figura 71: Capacidad Estadística MIMO Distribuido Antenas Tx a mitad de las paredes según el número de Antenas Rx	- 106 -
Figura 72: Capacidad Estadística MIMO Distribuido Antenas Tx en las esquinas según el número de Antenas Rx	- 106 -
Figura 73: Capacidad Estadística MIMO Tradicional Antenas Tx separadas 2λ según el número de Antenas Rx	- 107 -
Figura 74: Capacidad Estadística MIMO Tradicional Antenas Tx separadas λ según el número de Antenas Rx	- 107 -
Figura 75: Potencia Recibida Medida MIMO 4x4 Tradicional	- 109 -
Figura 76: Potencia Recibida Medida MIMO 4x4 Distribuido.....	- 110 -
Figura 77: Capacidad Medida MIMO 4x4 Tradicional	- 111 -
Figura 78: Capacidad Medida MIMO 4x4 Distribuido.....	- 112 -
Figura 79: Capacidad Medida MIMO 4x4	- 113 -
Figura 80: Capacidad Medida Estadística MIMO 4x4.....	- 113 -
Figura 81: Correlación Medida en Transmisión MIMO 4x4	- 114 -
Figura 82: Correlación Medida en Recepción MIMO 4x4	- 115 -
Figura 83: Factor K Medido MIMO 4x4	- 116 -
Figura 84: RMS Delay Spread Medido MIMO 4x4 (1).....	- 117 -
Figura 85: RMS Delay Spread Medido MIMO 4x4 (2).....	- 117 -
Figura 86: Capacidad Simulada Estadística MIMO 4x4.....	- 121 -
Figura 87: Capacidad Medida MIMO 4x4	- 122 -
Figura 88: Capacidad Medida Estadística MIMO 4x4.....	- 122 -
Figura 89: Capacidad Estadística para MIMO 4x4 Distribuido con Antenas Tx en medio de las paredes Medida y Simulada.....	- 123 -
Figura 90: Capacidad Estadística para MIMO 4x4 Tradicional con Antenas Tx separadas λ Medida y Simulada.....	- 123 -
Figura 91: Laboratorio SICOMO con antenas Tx y Rx para 0 reflexiones	- 128 -

Figura 92: Creación de los dipolos imágenes.....	- 129 -
Figura 93: Laboratorio SICOMO con Antenas Tx y Rx para 1 reflexión.....	- 130 -
Figura 94: Laboratorio SICOMO vista superior con Antenas Tx y Rx para 1 refl.....	- 130 -
Figura 95: Laboratorio SICOMO con Antenas Tx y Rx para 2 reflexiones	- 131 -
Figura 96: Laboratorio SICOMO vista superior con Antenas Tx y Rx para 2 refl.....	- 131 -
Figura 97: Capacidad Simulada MIMO Tradicional Antenas Tx separadas 2λ para a) 4 Antenas Rx b) 3 Antenas Rx c) 2 Antenas Rx	- 133 -
Figura 98: Potencia Recibida Simulada MIMO Tradicional Antenas Tx separadas 2λ para a) 4 Antenas Rx b) 3 Antenas Rx c) 2 Antenas Rx	- 134 -
Figura 99: Capacidad Simulada MIMO Tradicional Antenas Tx separadas $3\lambda/2$ para a) 4 Antenas Rx b) 3 Antenas Rx c) 2 Antenas Rx	- 135 -
Figura 100: Capacidad Simulada MIMO Tradicional Antenas Tx separadas λ para a) 4 Antenas Rx b) 3 Antenas Rx c) 2 Antenas Rx	- 136 -
Figura 101: Capacidad Simulada MIMO Tradicional Antenas Tx separadas $\lambda/2$ para a) 4 Antenas Rx b) 3 Antenas Rx c) 2 Antenas Rx	- 137 -
Figura 102: Capacidad Simulada MIMO Distribuido Antenas Tx en medio de las paredes para a) 4 Antenas Rx b) 3 Antenas Rx c) 2 Antenas Rx	- 138 -
Figura 103: Potencia Recibida Simulada MIMO Distribuido Antenas Tx en medio de las paredes para a) 4 Antenas Rx b) 3 Antenas Rx c) 2 Antenas Rx	- 139 -
Figura 104: Capacidad Simulada MIMO Distribuido Antenas Tx en las esquinas para a) 4 Antenas Rx b) 3 Antenas Rx c) 2 Antenas Rx	- 140 -
Figura 105: Potencia Recibida Simulada MIMO Distribuido Antenas Tx en las esquinas para a) 4 Antenas Rx b) 3 Antenas Rx c) 2 Antenas Rx	- 141 -
Figura 106: Capacidad Simulada MIMO Distribuido Antenas Tx a una distancia del medio para a) 4 Antenas Rx b) 3 Antenas Rx c) 2 Antenas Rx	- 142 -
Figura 107: Potencia Recibida Simulada MIMO Distribuido Antenas Tx a una distancia del medio para a) 4 Antenas Rx b) 3 Antenas Rx c) 2 Antenas Rx	- 143 -
Figura 108: Capacidad Simulada Estadística MIMO 4x4 Tradicional	- 144 -
Figura 109: Capacidad Simulada Estadística MIMO 4x4 Distribuido	- 145 -
Figura 110: Capacidad Medida Estadística MIMO 4x4.....	- 145 -

Índice de Tablas

Tabla 1: Estándares de la WLAN.....	- 24 -
Tabla 2: Campo Eléctrico vs Número de Reflexiones	- 56 -
Tabla 3: Características de las Antenas.....	- 78 -
Tabla 4: Resumen Capacidades Simuladas MIMO Tradicional en bits/seg/Hz	- 99 -
Tabla 5: Resumen Capacidades Simuladas MIMO Distribuido en bits/seg/Hz.....	- 102 -
Tabla 6: Resumen Capacidad Medida vs Posición para las distintas configuraciones MIMO	- 118 -
Tabla 7: RMS Delay Spread Medido para las distintas configuraciones MIMO.....	- 119 -
Tabla 8: Factor K Medido para las distintas configuraciones MIMO.....	- 120 -
Tabla 9: Valores de Capacidad medios simulados y medidos para las distintas configuraciones	- 124 -
Tabla 10: Tiempos de simulación según el sistema MIMO y el núm. de reflexiones ..	- 125 -
Tabla 11: Capacidad medias simuladas y medidas según sistema MIMO	- 126 -
Tabla 12: Capacidad de las distintas configuraciones según el número de antenas receptoras	- 127 -
Tabla 13: Resumen Correlación Medida según el sistema MIMO	- 127 -
Tabla 14: Factor K medio según el sistema MIMO	- 127 -



Capítulo 1. Introducción

1.1 Introducción

La implementación de redes de área local inalámbricas (WLAN) es una de las tecnologías de acceso de Internet de mayor auge durante los últimos años. Según estudios recientes, en la Unión Europea, el mercado de la tecnología inalámbrica se ha multiplicado por quince entre el año 2003 y 2007, logrando incrementos en el mercado de más del 200% [1]. Según el estudio, los años 2005 y 2006 han sido los años de consolidación de esta tecnología, con unos volúmenes de negocio de 1.464 y 1.914 millones de euros, respectivamente. No obstante, en términos porcentuales el mayor crecimiento se produjo en el año 2004, en el que el valor del mercado se situó en 475 millones de euros, un 212 por ciento más que el año precedente.

Los dos aspectos relevantes en la consolidación de la tecnología son básicamente la solución que dan las redes inalámbricas en cuanto a infraestructura y movilidad, en comparación con las redes cableadas. En una red cableada los puntos de acceso se encuentran en una disposición predeterminada, lo cual limita el ingreso a la red por parte de los usuarios y los obliga a permanecer en un solo sitio. Pero para un usuario móvil la disponibilidad de ingreso a la red depende del área en la que está trabajando. Estos dos problemas lo solucionan las redes inalámbricas.

Por lo tanto, los usuarios están siendo testigos de sus innumerables beneficios, pero también están siendo testigos de las desventajas de este tipo de redes [2]. Los principales inconvenientes radican principalmente en la pobre capacidad de ancho de banda y la limitada cobertura de la señal. El cambio repentino del nivel de fuerza de la señal es un problema común que ocurre en los clientes de WLAN. Si uno mueve el dispositivo unos cuantos centímetros, la fuerza de la señal que se recibe del punto de acceso (access point) fluctúa del máximo al mínimo, o viceversa (efecto multicamino). Ocasionando, en la mayoría de las veces, que el enlace se corte entre el punto de acceso y el dispositivo cliente.

Una tecnología cada vez en mayor estudio es la tecnología MIMO (Multiple Input Multiple Output) que permite multiplicar la capacidad del canal en función del número de antenas utilizadas (aumentamos la eficiencia espectral de una forma lineal con el número de antenas). Las agrupaciones de antenas MIMO constituyen el principal avance tecnológico conocido para aumentar la capacidad de los sistemas de comunicaciones móviles actuales, y son objeto de estudio en los foros internacionales de estandarización IEEE y 3GPP [3].

El uso de varias antenas para mejora la capacidad de un sistema radio no es nuevo, ya que si ponemos a modo de ejemplo familiar, y ya antigua, antena de televisión que se en los tejados, la antena Yagi, ésta es de hecho una agrupación muy sencilla de antenas de varilla. Con ellas llega el televisor una potencia de señal radioeléctrica más de diez veces superior a la que se obtendría con una única varilla.

Generalizando este ejemplo tan simple, conectando adecuadamente entre sí varias antenas iguales se obtiene una antena combinada que en una dirección determinada presenta una ganancia varias veces superior a la de una única antena.



Los sistemas MIMO, al contrario que las disposiciones de antenas, no intercambian ganancia por directividad; basan su funcionamiento en un aprovechamiento de la diversidad de caminos de propagación entre diferentes antenas.

Una vez descrito el principio básico de los sistemas MIMO, aunque haya sido realizado de forma sucinta, la consideración siguiente es su aplicabilidad. O lo que es lo mismo: en qué entornos se pueden aplicar sistemas de múltiples antenas con caminos de propagación incorrelados [4]. No parece especialmente difícil instalar varias antenas en una estación base lo suficientemente separadas entre sí (por ejemplo varios metros) para que en un entorno metropolitano las señales que lleguen a ellas estén incorreladas. Sin embargo, sí parece poco probable que se fabriquen terminales de mano con varias antenas (incluso en un ordenador personal, en el que sí se pueden instalar unas pocas antenas diferentes, quizás hasta cuatro, los pocos centímetros de distancia entre las antenas no garantizan decorrelaciones elevadas entre sus caminos de propagación).

La respuesta a la interrogante anterior es el uso de sistemas MIMO distribuidos, que sí se considera muy práctico. Por ejemplo de sistema MIMO, en el cual la estación base tiene varias antenas y los terminales sólo una (ésto sería un sistema MISO), tal como ocurre en la actualidad. Sin embargo, el sistema MIMO no está compuesto por la estación base y un terminal, sino por la estación base y varios terminales diferentes, de forma que n terminales de un mismo sector de una estación base constituyen n antenas diferentes.

La decorrelación entre los caminos de propagación de los n terminales está casi garantizada en un entorno metropolitano; de hecho, para que los n terminales “viesen” a la estación base de la misma forma hay que colocarlos a propósito unos muy cerca de otros. Los n terminales podrían transmitir de forma simultánea a la misma frecuencia y con el mismo código, sin interferirse, pues en la estación base se podrían implementar los algoritmos de procesamiento de señal necesarios para que las diferentes propagaciones multitrayecto se tradujesen en diferentes señales radio a la salida de las diferentes antenas.

Este caso no es exactamente el que nosotros vamos a estudiar, ya que en el modelo con el que vamos a realizar simulaciones y campañas de medidas a lo largo de este proyecto, nuestro receptor es único y contiene 4 antenas receptoras separadas entre ellas una distancia igual a $\lambda/2$.



1.2 Objetivos

Existen tres objetivos principales en el desarrollo de este proyecto, que son:

En primer lugar, la realización de un trazador de rayos en 3 dimensiones para caracterizar el canal radio indoor de una forma teórica. Este trazador será realizado con la herramienta matemática MatLab. De esta manera, obtendremos un programa que nos calcule los diferentes rayos transmitidos y reflejados entre antenas transmisoras y receptoras, tanto para sistemas MIMO tradicionales como para los sistemas MIMO distribuidos en un escenario indoor, obteniendo de una forma teórica los diferentes parámetros más relevantes.

En segundo lugar, la realización de varias campañas de medidas dentro del laboratorio SICOMO ubicado en el sótano del cuartel de Antiguones (sede de la Escuela Superior de Ingenieros de Telecomunicación), por lo tanto estaremos trabajando en un escenario indoor, en las que realizaremos un estudio paramétrico para diversas posiciones de las antenas transmisoras, cuando trabajemos con un sistema MIMO distribuido; la separación de las antenas transmisoras, cuando trabajemos con MIMO tradicional; cambiaremos también las diferentes posiciones de las antenas receptoras dentro del laboratorio; y la distancia entre las antenas transmisoras y las receptoras, es decir, para una misma posición tomaremos diferentes medidas para así tener el mayor número de datos posibles y poder caracterizar de una forma más rigurosa el canal radio.

Y por último, el tercer objetivo del proyecto consiste en analizar todos estos datos obtenidos de las medidas y compararlos con los datos obtenidos del estudio teórico del primer objetivo, y por último, observar las mejoras que ofrecen los sistemas MIMO distribuidos frente a los sistemas MIMO tradicionales. Para llegar a completar este objetivo, haremos uso de unos programas desarrollados en Matlab que nos permitirán obtener diversos resultados como la capacidad del canal, la relación señal a ruido (SNR), la correlación entre antenas, el RMS Delay Spread, el factor K, etc.

En definitiva, en este proyecto vamos a estudiar el canal radio para sistemas MIMO tradicionales y sistemas MIMO distribuidos en el rango de frecuencias que comprende desde 2.35GHz hasta 2.55Ghz en un entorno de propagación indoor (laboratorio SICOMO), en primer lugar de una forma teórica con el trazador de rayos 3D y posteriormente de una manera práctica con la campaña de medidas realizada. Una vez terminadas las campañas de medidas se va a analizar los parámetros más importantes para la caracterización realizando comparaciones entre las diferentes alternativas estudiadas y verificando los resultados teóricos obtenidos en el primer objetivo de este proyecto.



1.3 Partes del Proyecto

Este proyecto titulado *Estudio Teórico Experimental de un Sistema Distribuido MIMO en la Banda de Frecuencias de WIFI* esta dividido en diferentes capítulos que tratarán cada uno de los objetivos explicados anteriormente.

En primer lugar, nos encontramos el Capítulo 1, capítulo de *Introducción* al proyecto en el que nos encontramos, donde se hará una pequeña introducción a los temas a tratar, se establecen los objetivos de este proyecto, sus partes y fases mas importantes.

En el segundo capítulo, denominado *Estado del Arte*, desarrollamos los diferentes temas a tratar de modo teórico, como es la propagación indoor, descripción del sistema MIMO tradicional y distribuido, sistemas distribuidos, etc...

En el Capítulo 3 entramos ya en materia de objetivo y se va a explicar la realización del *Trazador Indoor en 3 dimensiones*, con el que realizaremos un estudio teórico mediante el trazado de rayos de la caracterización del canal radio en la banda de frecuencias WIFI (2.45Ghz) para sistemas MIMO tanto tradicional como distribuido. Utilizaremos el software matemático MatLab, con el que obtendremos los valores de los parámetros más relevantes del estudio realizado.

En el Capítulo 4 nos encontramos con la *Campaña de Medidas*, que como ya hemos introducido en el apartado de objetivos, realizamos en un escenario indoor, ya que son realizadas dentro del laboratorio SICOMO. Como en el caso teórico, trabajaremos en la banda de frecuencias de WIFI (está vez en banda ancha, en la parte teórica lo hacemos a 2,45GHz) de 2.35Ghz a 2.55Ghz, también para sistemas MIMO tradicionales y distribuidos. De esta forma realizamos de manera experimental lo que en el capítulo anterior hacemos de manera teórica. Dispondremos las antenas transmisoras en diferentes configuraciones, con distintas separaciones, a la vez que las antenas receptoras también estarán dispuestas en diferentes posiciones del laboratorio para poder caracterizar de una manera más fiable el canal radio en estudio.

A continuación nos encontramos el capítulo denominado *Resultados*(Capítulo 5), en el que se compararán los resultados tanto teórico como experimental de los trabajos realizados en los dos capítulos anteriores, en forma de gráficas, en las que se podrán apreciar los valores y curvas más características de los parámetros que se van a caracterizar. En el último apartado de este capítulo se realizará una comparación entre los resultados del estudio teórico y los de la campaña de medidas, en los que podremos comprobar la coherencia de los resultados obtenidos de las medidas con los modelos teóricos realizados con el trazador de rayos indoor.

El último capítulo de este proyecto, *Conclusiones*, se enunciarán una serie de reflexiones y conclusiones sobre el trabajo realizado en este proyecto, destacando los resultados más importantes obtenidos del estudio de los sistemas MIMO tradicionales y distribuidos en entornos indoor para la banda de frecuencias WIFI.



Capítulo 2. Estado del Arte

2.1 Propagación Indoor

Para el estudio y la planificación de la propagación en escenarios indoor existen actualmente dos tipos de técnicas bien diferenciadas [8].

Una de ellas consiste en la utilización de herramientas deterministas, se refiere al denominado modelo de trazado de rayos (ray tracing), con el fin de predecir, no solamente la potencia recibida, sino un conocimiento mucho más completo del canal, incluyendo el perfil de retardo de potencias (“power delay profile”) en cada localización. Estas técnicas están basadas en aproximaciones de alta frecuencia y fundamentalmente en la óptica geométrica (GO) completada con la teoría uniforme de la difracción (UTD), y utilizan diferentes algoritmos de trazado y lanzamiento de rayos. Si bien estas técnicas están tomando cada vez mayor importancia, debido fundamentalmente a la mayor velocidad y capacidad de los ordenadores y al desarrollo de algoritmos de ejecución más rápidos y eficientes, todavía quedan por resolver problemas, relacionados con la precisión y la caracterización electromagnética para estructuras de edificación y materiales reales, incluido el mobiliario.

referencias.

Por otro lado se han venido considerando técnicas empírico estadísticas, basadas en un elevado número de medidas y mediante una clasificación de diferentes tipos de edificios, y utilizando sencillos modelos de regresión donde se incluyen la atenuación producida por suelos y paredes, así como por otros materiales y estructuras. Es necesario indicar que esta atenuación es simplemente una caracterización estadística y no electromagnética. La principal ventaja de estas técnicas es su rapidez y simplicidad lo que permite una rápida y eficiente planificación de coberturas e interferencias en interiores pero su principal desventaja es que estas técnicas poseen una precisión limitada.

En entornos indoor, generalmente, la trayectoria entre transmisor y receptor no se encuentra en línea de vista LOS. Los sistemas que allí operan están en medio de una serie de obstáculos, de características diferentes, que dan origen a diversos mecanismos de propagación. Además de las pérdidas en espacio libre, los fenómenos más importantes son: reflexión, dispersión y difracción [1][5].

2.1.1 Pérdidas Espacio Libre

Es el más simple mecanismo de propagación. Considera línea de vista entre las antenas, y asume que la separación entre antenas es tal, que ninguna está en el campo cercano de la otra. De este modo la potencia recibida puede calcularse directamente en función de la distancia entre antenas; si se conoce la potencia transmitida. La potencia recibida por una antena a una distancia d es dada por la ecuación de Friss para espacio libre:



$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad 2.1$$

2.1.2 Reflexión

Cuando una onda electromagnética choca contra un objeto cuyas dimensiones son mucho mayores que la longitud de onda de la señal RF, parte de la señal es reflejada desde la superficie y otra parte penetra a través de la superficie (refracción). El ángulo de la señal reflejada es el mismo de la señal incidente. Para que haya reflexión, la superficie tiene que ser “lisa”, y debe de cumplir la condición de rugosidad. Las pérdidas por reflexión dependen de las propiedades eléctricas del medio a ambos lados de la superficie reflectante, la frecuencia de la señal, el ángulo de incidencia, y la polarización de la onda electromagnética.

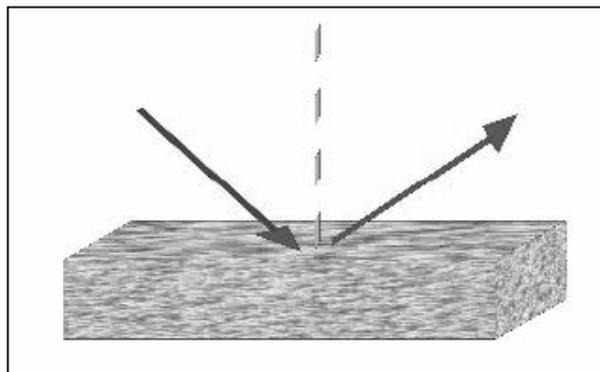


Figura 1: Reflexión [5]

2.1.3 Dispersión

Se produce cuando la onda propagada viaja a través de obstáculos cuyas dimensiones son menores que la longitud de onda de la señal, y cuando el número de obstáculos por unidad de volumen es muy grande. Se produce dispersión por rugosidades en las superficies, pequeños objetos, o por otras irregularidades en el canal en las cuales se retransmite la señal en varias direcciones dando origen a la dispersión.

2.1.4 Difracción

Ocurre cuando el trayecto de propagación entre transmisor y receptor se ve obstruido por objetos que poseen esquinas o bordes marcados. Las ondas doblan en dicho borde del obstáculo, incluso cuando no hay línea de vista entre transmisor y receptor.

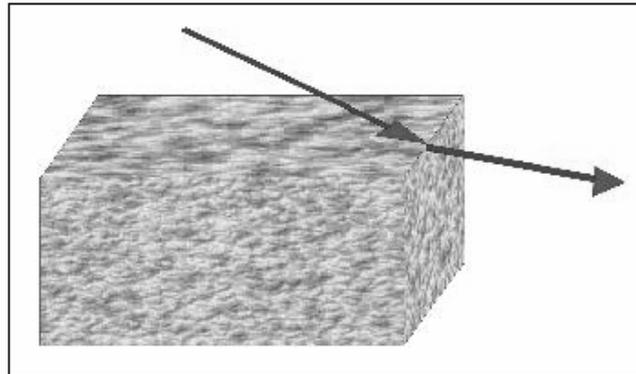


Figura 2: Difracción [5]

2.1.5 Parámetros que afectan a la propagación

2.1.5.1 Atenuación por espacio libre

También denominado Free Space Loss [1], representa la diferencia en dB de la intensidad de señal entre el transmisor y el receptor, cuando entre ellos existe una clara línea de vista, en función de la longitud de onda de la señal λ y la distancia, d , que los separa. Estas pérdidas están dadas por:

$$PL_{fs}(d)[dB] = 20 \log_{10} \frac{4\pi d}{\lambda} \quad 2.2$$

2.1.5.2 Atenuación por multi-trayectorias

Representa la pérdida por multi-trayectos que puede seguir una onda para llegar a su destino debido a fenómenos de propagación como reflexión, refracción y dispersión, generándose ya sea un incremento o atenuación en la señal al intersecarse las múltiples ondas.

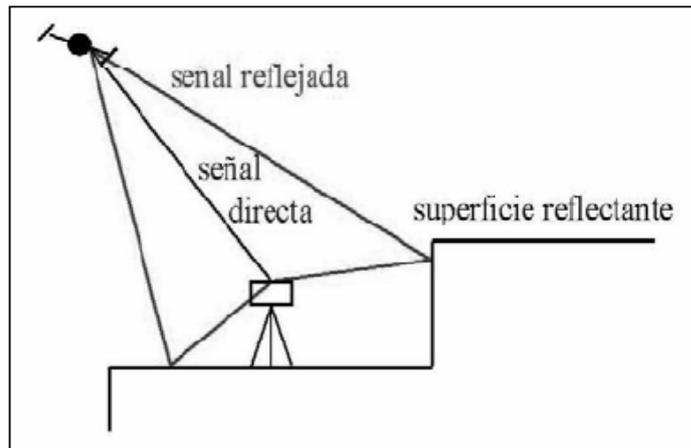


Figura 3: Multi-trayectorias [1]

2.1.5.3 Pérdidas de transmisión

Representan la pérdida de señal causada por los obstáculos que atraviesan los rayos que se propagan. Si el camino interfecta con n obstáculos de transmisión individual (L_i) las pérdidas totales estarán dadas por:

$$L_T = \sum_{i=1}^n L_i \quad 2.3$$

En este caso, según [6] sólo se tiene en cuenta el camino dominante, es decir, la trayectoria de menor pérdida en potencia que seguirían las ondas electromagnéticas hasta el destino.

2.1.6 Modelos de propagación

Ampliando la clasificación realizada al principio del apartado, los modelos de propagación indoor se pueden clasificar en dos grupos [5]: modelos empíricos y los modelos deterministas. Dentro de los modelos empíricos podemos diferenciar entre modelos empíricos de banda estrecha y modelos empíricos de banda ancha.

Los modelos empíricos de banda estrecha se expresan como una ecuación matemática simple, mediante la cual se obtienen las pérdidas de trayecto. Los modelos empíricos de banda ancha (Trayecto Dominante) permiten también predecir las características del ancho de banda del canal (i.e. delay spread).

Los modelos deterministas son métodos de cálculo que simulan físicamente la propagación de ondas de radio. Estos modelos brindan información tanto en banda ancha como en banda estrecha del canal dentro del edificio.



Todos los modelos requieren de una base de datos que describa el ambiente de propagación. Cada elemento debe ser clasificado en diferentes categorías (i.e. muros, piso, puerta, ventana...) y se deben conocer sus coordenadas así como las propiedades de sus materiales (i.e. espesor, conductividad, permitividad).

2.1.6.1 Modelo Modificado de Espacio Libre

Este modelo [5] no considera específicamente la posición ni las pérdidas individuales de cada obstáculo dentro del edificio; sino que calcula las pérdidas de trayecto de forma similar a las pérdidas de espacio libre Fig. 1, agregando un exponente adaptable y un *offset*. De este modo las pérdidas de trayecto son linealmente dependientes con la distancia, para un índice de atenuación específico n como se muestra en la ecuación 2.4.

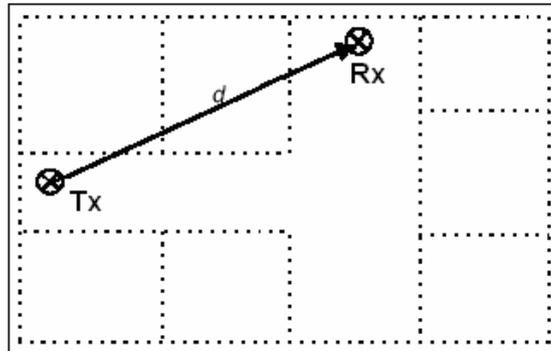


Figura 4: Modelo Modificado de Espacio Libre [5]

$$l_{MF} = n * 20 \log \frac{4\pi d}{\lambda} + l_c \quad 2.4$$

Donde l_c es el *offset* o constante de calibración del modelo.

Ya que no se consideran los muros del edificio, no se requiere una base de datos; sin embargo, es necesario realizar campañas de medida de potencia, con las cuales se calcula el índice de atenuación n mediante regresión lineal.

2.1.6.2 Modelo Motley-Keenan

Este modelo calcula las pérdidas de trayecto basándose en el trayecto directo entre transmisor y receptor. A diferencia del modelo modificado de espacio libre, éste modelo considera la ubicación exacta de los muros.



$$l_{MK} = l_{FS} + l_c + k_w l_w \quad 2.5$$

En la fórmula anterior, k_w indica el número de muros interceptados por el trayecto directo entre transmisor y receptor; l_w representa las pérdidas por transmisión las cuales se consideran iguales para todos los muros, y LFS representa las pérdidas de espacio libre.

2.1.6.3 Modelo Ray Tracing

Ya que éste modelo [5] simula físicamente la propagación de las ondas de radio, los mecanismos de propagación son tenidos en cuenta con mayor exactitud. Otra ventaja de los modelos deterministas es que permiten predecir otros parámetros de propagación.

Debido a que se consideran señales con pequeñas longitudes de onda, éstas pueden estudiarse igual que la propagación de la luz; se asume que las ondas se propagan como una línea directa, cuyo estudio se basa en conceptos de geometría óptica (GO).

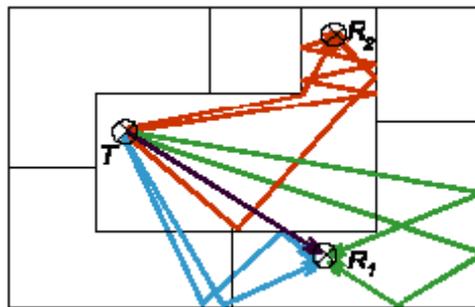


Figura 5: Modelo Ray Tracing [5]

En cualquiera de sus dos modalidades, 2D o 3D, el modelo ray tracing considera cada uno de los trayectos de propagación lo cual lleva a un gran nivel de exactitud, pero también implica un alto costo computacional, por lo que se han desarrollado mejoras al modelo ray tracing básico.

Los modelos deterministas, en general, utilizan las ecuaciones de Fresnel para calcular las pérdidas por reflexión y transmisión, y se basan en la GTD (Geometric Theory of Diffraction) / UTD (Uniform Theory of diffraction) para determinar las pérdidas por difracción. Requieren de bases de datos muy detalladas, que además de la precisa ubicación de todos los muros, debe contener sus parámetros físicos (i.e. permitividad, permeabilidad y conductividad).

2.1.6.4 Modelo Cost-Multi-Wall

Este modelo calcula las pérdidas de trayecto de forma similar que el modelo Motley-Keenan, pero a diferencia de éste, considera las pérdidas de penetración individuales de cada muro y cada piso, dependiendo del tipo de material que los constituye.



$$l_{MW} = l_{FS} + l_C + \sum_{i=1}^N k_{W_i} l_{W_i} + k_f l_f \quad 2.6$$

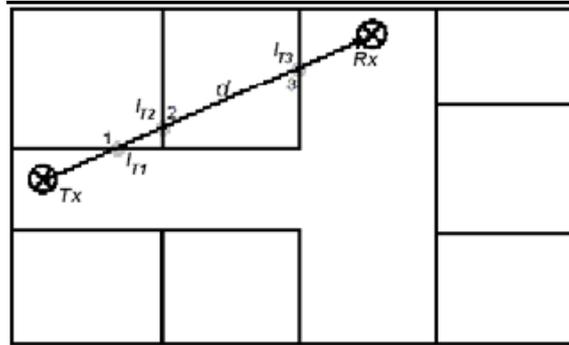


Figura 6: Modelo Cost-Multi-Wall [5]

La ecuación [7] representa las pérdidas de trayecto; donde k_{wi} es el número de muros penetrados de tipo i , k_f el número de pisos penetrados, l_{wi} pérdidas del muro de tipo i , l_f pérdidas entre pisos adyacentes, y N el número de tipo de muros.

2.1.6.5 Modelo de Trayecto Dominante

Puesto que el canal inalámbrico no es invariante en el tiempo, debido tanto al movimiento de personas dentro del edificio, como a modificaciones del edificio en sí (i.e. apertura de puertas, ventanas, movimiento de muebles), se ha desarrollado el modelo de trayecto dominante, el cual, solo calcula los trayectos que son relevantes y que son independientes de la exactitud de la base de datos y de los efectos variantes en el tiempo.

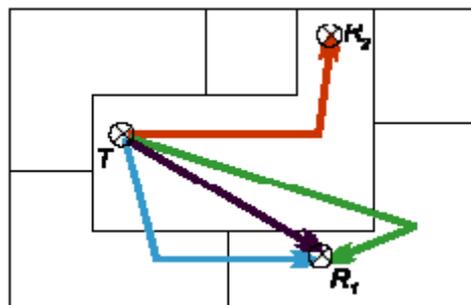


Figura 7: Modelo de Rayo Dominante [5]

En la figura, los rayos del mismo color presentan características similares, es por esto que pueden ser agrupados y representados por un único rayo llamado trayecto dominante. Estos grupos de rayos se definen teniendo en cuenta los siguientes criterios:



Capítulo 2. Estado del Arte



- Secuencias similares de salones atravesados.
- Transmisiones a través del mismo muro.



2.2 MIMO

2.2.1 Introducción

Las redes inalámbricas WLAN (Wireless Local Area Network) ya son parte de nuestro entorno dentro de las empresas y organizaciones. Los usuarios están siendo testigos de sus innumerables beneficios, pero también están siendo testigos de las desventajas de este tipo de redes. Los principales inconvenientes radican principalmente en la pobre capacidad de ancho de banda y la limitada cobertura de la señal [2].



Figura 8: Enrutador Inalámbrico provisto de 7 antenas inteligentes [2]

El cambio repentino del nivel de fuerza la señal es un problema común que ocurre en los clientes de WLAN con IEEE 802.11a/b/g (una laptop, un PDA u otro dispositivo con una tarjeta inalámbrica). Si uno mueve el dispositivo unos cuantos centímetros, la fuerza de la señal que se recibe del punto de acceso (access point) fluctúa del máximo al mínimo, o viceversa. Ocasionalmente, en la mayoría de las veces, que el enlace se corte entre el punto de acceso y el dispositivo cliente.

Llegados a este momento, podemos introducir una nueva tecnología conocida como MIMO que permite aumentar las capacidades en ancho de banda, velocidad, la cobertura, y por consiguiente, una mejora en la calidad de la señal de las redes inalámbricas Wi-Fi de la actualidad.

2.2.2 ¿Qué es MIMO?

MIMO (multiple input multiple output) es una tecnología de radiocomunicaciones que se refiere a enlaces de radio con múltiples antenas en el lado del transmisor y del receptor. Debido a las múltiples antenas, la dimensión espacial puede ser explotada para mejorar el desempeño del enlace inalámbrico, haciendo la señal más fuerte, más confiable y transmisiones más rápidas.



Se refiere específicamente a la forma como son manejadas las ondas de transmisión y recepción en antenas para dispositivos inalámbricos como enrutadores. En el formato de transmisión inalámbrica tradicional la señal se ve afectada por reflexiones, lo que ocasiona degradación o corrupción de la misma y por lo tanto pérdida de datos. MIMO aprovecha fenómenos físicos como la propagación multicamino para incrementar la tasa de transmisión y reducir la tasa de error.

Según los proponentes de esta tecnología y dependiendo del número de antenas de que dispongamos, incrementará [2] hasta más de 8 veces la cobertura y hasta más de 6 veces la velocidad de las actuales redes IEEE 802.11g. Aunque en la actualidad MIMO es una tecnología no estandarizada, ya esta considerada en el estándar 802.11n de la IEEE, el cual piensa liberarse a finales de 2006 o principios del 2007. Los consumidores ven a MIMO como una nueva clase de productos inalámbricos categorizados como “pre-n”, debido a que se anticipan al estándar 802.11n de IEEE.

Gráfico de Estándares de las WLAN	
802.11	La WLAN estándar original. Soporta desde 1 Mbps hasta 2 Mbps.
802.11a	Estándar WLAN de alta velocidad para la banda de 5 GHz. Soporta hasta 54 Mbps.
802.11b	Estándar WLAN para la banda de 2,4 GHz. Soporta hasta 11 Mbps.
802.11d	Itinerancia internacional: configura dispositivos automáticamente para que cumplan con las regulaciones RT locales
802.11e	Dirige la calidad de los requisitos de servicios para todas las interfaces de radio de WLAN IEEE.
802.11f	Define comunicaciones del punto de acceso interno para facilitar redes WLAN múltiples distribuidas por proveedores.
802.11g	Establece una técnica de modulación adicional para la banda de 2,4 GHz. Soporta velocidades de hasta 54 Mbps.
802.11h	Define la gestión del espectro de la banda de 5 GHz.
802.11i	Dirige las flaquezas de la seguridad actual tanto para los protocolos de codificación como de autenticación. El estándar abarca los protocolos 802.1X, TKIP y AES.
802.11n	Proporciona mejoras de mayor capacidad de proceso. Se pretende que proporcione velocidades de hasta 500 Mbps.

Tabla 1: Estándares de la WLAN

El proceso para establecer de la siguiente generación del estándar Wi-Fi ha sido difícil y todavía no llega a un feliz término. Ya se han hecho varias reuniones alrededor del mundo entre el comité 802.11n y los principales proponentes, y aún no hay una decisión condensada del nuevo estándar. Para que una propuesta sea aceptada como estándar oficial por el IEEE, se requiere de un 75% de consenso de los votos por los miembros del comité. Hace un año, más de 30 propuestas fueron sometidas para definir especificaciones del estándar 802.11n.

En la actualidad, dos son los grupos principales que están conteniendo y sometiendo propuestas para el estándar IEEE 802.11n. Estos consorcios son TGn Sync y WWiSE. Ambas propuestas son muy similares, pero difieren en varios detalles. TGn Sync



es un consorcio que incluye compañías como Agere, Atheros, Intel, Sony, Nortel, Samsung, Qualcomm, Philips, Panasonic, entre otros. TGn Sync propone expandir el tamaño del canal de 20 MHz a 40 MHz, permitiendo así un caudal eficaz máximo de 315 Mbps con multicanalización por división espacial MIMO. Este cambio podría disminuir el número de canales disponibles de 22 a 11 en la banda de 5 GHz.

WWiSE es un consorcio que está compuesto por compañías como Airgo Networks, Broadcom, Motorola, Nokia, Conexant Systems, STMicroelectronics, Texas Instruments, France Telecom, NTT, entre muchos otros. WWiSE propone utilizar el canal existente de 20 MHz, dos antenas MIMO, y cambios en la capa de MAC (media control access) para permitir una capacidad de canal de 135 Mbps.

El mercado de productos y chips MIMO en lo que respecta a productos en el mercado, actualmente Airgo Networks fabrica chips de una tecnología propietaria conocida como True MIMO, liderando el mercado con productos “pre-n”. Es importante notar que el término “pre-n” no es una terminología oficial, más bien es un término de mercadotecnia, que implica un estatus de borrador del estándar 802.11n, cuando tal borrador no existe.

Otros fabricantes de chips MIMO son Atheros, Video54 y Athena. Entre los fabricantes de equipos WLAN con tecnología MIMO se encuentran Belkin, Linksys, Samsung, Netgear, entre muchos otros. La mayoría de ellos utiliza el chip True MIMO de Airgo Networks. Netgear, otro fabricante de equipos, ha lanzado productos bajo el nombre de “RangeMax” el cual utiliza una mezcla de la tecnología Super-G de Atheros y BeamFlex de Video54, pero también producen una línea de productos que utiliza True MIMO de Airgo. Otros fabricantes como D-Link han optado por la tecnología MIMO conocida como channel-bonding spectrum-hogging. Según pruebas independientes de benchmark, los equipos con True MIMO han demostrado tener una mayor cobertura y mejor caudal eficaz que las otras tecnologías competidoras.

Pero no todo van a ser ventajas, MIMO también posee una serie de inconvenientes en los que se está trabajando activamente para subsanarlos [9]:

- La tecnología está aún por desarrollar.
- Necesita un proceso amplio de estandarización.
- La sincronización y la identificación del canal es esencial.
- Los sistemas tienen un coste triple respecto al los de antena única.
- La estandarización lleva un retraso considerable.
- Beneficios diferentes para tecnologías diferentes.

2.2.3 Transmisión Multicanal: la Matriz “H” de Transmisión

La teoría y la práctica de los sistemas MIMO se centran en torno al concepto de matriz de transmisión [4]. En un enlace radio de una única pareja de antenas, una transmisora y otra receptora, la relación entre lo que se transmite por una antena y lo que se recibe por la otra, se puede expresar en el dominio de la frecuencia como:



$$y(\omega) = h(\omega) * x(\omega) \quad 2.7$$

Donde $\chi(\omega)$ es el fasor complejo de la tensión a la entrada de la antena transmisora, $y(\omega)$ el de la tensión a la salida de la antena receptora, y $h(\omega)$ la función de transferencia compleja del canal radio. En lo que sigue, y sin perder generalidad, se prescindirá de la variación en ω , suponiendo que el sistema radio es de banda estrecha. En un apartado posterior se volverá al caso de banda ancha, donde no altera los razonamientos y conclusiones que se desarrollan a continuación.

Tal como se muestra en la figura X, en un sistema de varias antenas la propagación puede ser en principio diferente entre cada una de las antenas transmisoras y cada una de las receptoras. Para caracterizarla no basta entonces con una ecuación sencilla; es necesario de un juego de tantas ecuaciones como parejas de antenas. En este sentido, en el caso de las antenas mostradas en la figura 9 se tiene que:

$$\begin{aligned} y_1 &= b_{11}x_1 + b_{12}x_2 \\ y_2 &= b_{21}x_1 + b_{22}x_2 \end{aligned} \quad 2.8$$

Donde x_i e y_j son las tensiones a las entradas y salidas de las antenas transmisoras y receptoras j e i , respectivamente, y h_{ij} la función de transferencia compleja entre la antena transmisora j y la receptora i .

Expresando estas dos ecuaciones de forma matricial:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}; [y] = H * [x] \quad 2.9$$

En esta expresión, $[y]$ y $[x]$ son los vectores de las tensiones de salida y entrada, y H la denominada matriz de transmisión.

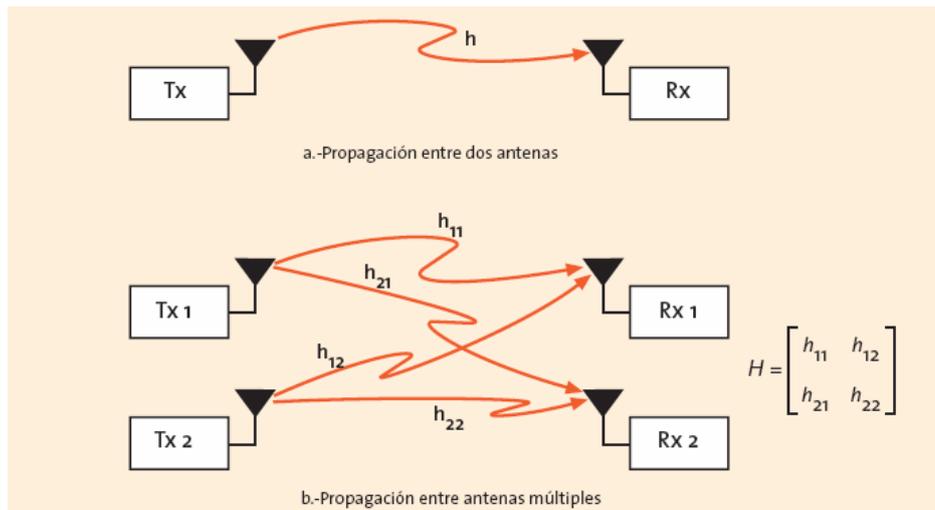


Figura 9: Propagación entre Antenas [4]

La ecuación 2.9 no es del todo completa para reflejar un sistema multicanal de comunicaciones, porque le falta el efecto del ruido a la entrada de los receptores. Sin embargo, ésto se consigue fácilmente añadiendo un vector $[n]$ en esa ecuación, cuyas componentes ni representan los niveles de tensión de ruido que inevitablemente contaminan las señales y_i , obteniéndose la ecuación:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix}; [y] = H * [x] + [n] \quad 2.10$$

2.2.4 Principio de Funcionamiento de los Sistemas MIMO

2.2.4.1 Aumento de la ganancia en la transmisión multicanal

De la propia definición del concepto de información, que es máxima cuando la indeterminación de lo que va a suceder es máxima, se deduce que en el caso de la transmisión multicanal, la capacidad es máxima cuando los diferentes canales son independientes [4], tal como se mencionó en el apartado de introducción. Aplicando este hecho a las ecuaciones 2.9 y 2.10, lo cual sucede cuando la matriz H es diagonal ($H=D$), es decir, cuando una antena receptora recibe señal únicamente de una antena transmisora, se dispone de la ecuación:



$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} = d_1 & 0 \\ 0 & h_{22} = d_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix}; [y] = D \cdot [x] + [n] \quad 2.11$$

Claramente, salvo en casos extremos o de laboratorio, en los que los caminos de propagación entre antenas estén deliberadamente aislados, la matriz H no es diagonal, hay propagación entre cada antena transmisora y cada una de las receptoras.

En este sentido, lo que viene a continuación es la clave del concepto del aumento de ganancia en MIMO. Partiendo de la base de que la matriz H no es diagonal, ¿es posible diagonalizarla? Esto es equivalente a preguntar: ¿existe alguna forma de procesar las señales de entrada y salida de las antenas de forma que la matriz que representa el conjunto “proceso + propagación” sea diagonal? La respuesta es afirmativa. Siempre es posible encontrar dos matrices, P_r y P_t , tales que:

$$P_r^H \cdot H \cdot P_t = D \quad 2.12$$

Esto implica que se puede realizar el proceso siguiente:

- En el transmisor se multiplica el vector de las señales de salida $[x]$ por la matriz P_t antes de radiar las señales por las antenas obteniéndose la ecuación:

$$[x'] = P_t \cdot [x] \quad 2.13$$

- A la salida de las antenas receptoras, el vector recibido $[y]$ se multiplica por la matriz P_r^H obteniéndose la ecuación:

$$[y] = P_r^H \cdot [y] = P_r^H \cdot H \cdot [x'] = P_r^H \cdot H \cdot P_t \cdot [x] = D \cdot [x] \quad 2.14$$

El resultado que se refleja en la figura 10, es que se obtienen caminos equivalentes de propagación independientes, es decir, caminos de propagación que combinados con el preprocesado en el transmisor y el postprocesado en el receptor proporcionan canales independientes, dando lugar a la ecuación:

$$[y] = D \cdot [x] \quad 2.15$$

A las agrupaciones de antenas en las que se realiza este proceso, que es dinámico porque el canal varía con el tiempo, se las denomina de entrada y salida múltiple, MIMO.

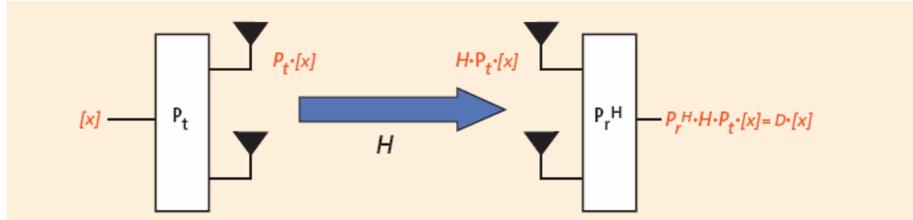


Figura 10: Procesado MIMO que da lugar a caminos de propagación diferentes [4]

2.2.4.2 Capacidad de los canales MIMO

Una vez calculadas las matrices P_r y P_t , tras realizar el procesado mostrado en la figura (XX) se obtienen tantas señales de salida independientes como parejas de antenas haya, dando lugar a la ecuación:

$$y_i = d_i \cdot x_i; \quad \text{con } i = 1, 2, \dots, n \quad 2.16$$

La transferencia de potencia entre y_i y x_i es $|d_i|^2$, y al canal independiente i se le denomina modo de propagación MIMO i . Hay tantos modos de propagación como parejas de antenas. Cuanto mayor sea el valor de un coeficiente D_i menor será la atenuación del canal i , y por tanto mayor será su capacidad, porque para una potencia dada de transmisión será mayor la relación señal-ruido en el receptor.

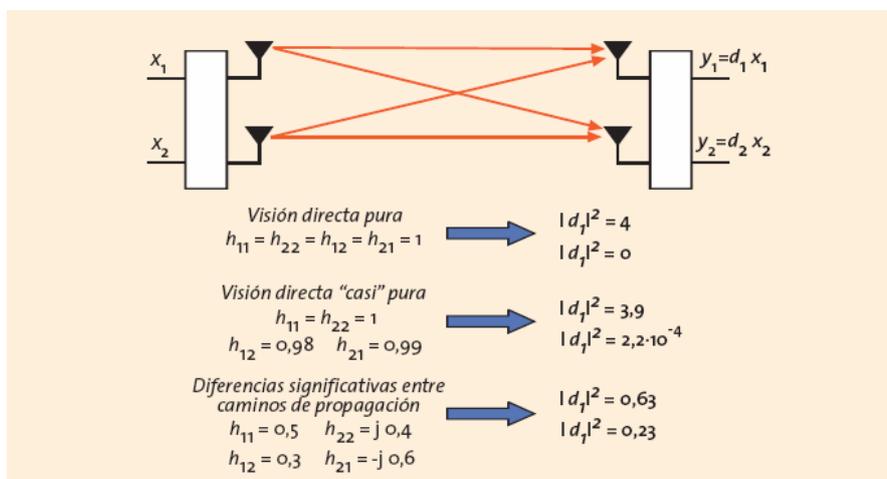


Figura 11: Ejemplos de tres casos de propagación [4]



Para sacar conclusiones de los valores d_i^2 y la capacidad de los modos, en la figura 11 se muestran tres ejemplos de propagación diferentes en un sistema MIMO de dos parejas de antenas. En el primer caso, la propagación es por visión directa e idéntica para todos los caminos; en el segundo hay poca diferencia entre lo que se recibe entre las diferentes antenas; y en el tercero la diferencia es sustancial, como sería el caso de que hubiese una componente fuerte de propagación multitrayecto. Se ha descontado en la matriz de transmisión la atenuación y el retardo común a todas las propagaciones. Los valores $|d_i|^2$ se han obtenido aplicando un procedimiento que omitimos por irrelevante en este proyecto.

En el primer caso mostrado en la figura 11, propagación realizada únicamente por un rayo directo, lo que se constata es que toda la potencia se transfiere entre una pareja de antenas, la primera (d_1), mientras entre que entre las dos antenas de la segunda pareja no se transfiere nada ($d_2=0$). A medida que aparecen diferencias en los caminos de propagación, va disminuyendo la preponderancia de la potencia a la salida de la primera antena receptora, y empieza a aparecer una componente de potencia apreciable en la segunda.

Este hecho, que se ha presentado como un ejemplo, se puede generalizar con rigor a un sistema de n parejas de antenas, ya que:

- En el caso de la propagación sea con un mismo rayo directo, los sistemas MIMO no ofrecen ningún beneficio práctico: sólo se excita un modo, es decir, se radia por una sola antena transmisora y se recibe señal por una única antena receptora. Todas las demás permanecen inactivas.
- Los sistemas MIMO tienen utilidad únicamente cuando existen caminos de propagación diferentes entre las diferentes parejas de antenas. En este caso se pueden excitar de forma significativa varios modos. Para que esto ocurra, en los sistemas de comunicaciones móviles tienen que cumplirse alguna de las dos condiciones siguientes:
 - Que tanto las antenas transmisoras como las receptoras estén separadas entre sí varias longitudes de onda (al menos 2 o 3).
 - Que la propagación sea básicamente multitrayecto, con una componente de rayos pequeña. En este caso, que se presenta generalmente en escenarios metropolitanos y de interiores, suele ir acompañado por unas pérdidas de propagación elevadas, que se suele traducir en una cobertura radioeléctrica pobre.

En un apartado posterior se hará uso de estas conclusiones para describir el tipo de sistemas con el que el operador puede conseguir una gran ganancia de capacidad. Antes de llegar a ello es preciso proseguir con la descripción de los sistemas MIMO y sus implicaciones.



Como los modos son canales independientes, la capacidad total de un sistema MIMO es la suma de las capacidades de cada modo. Para calcularlas hay que saber la atenuación de cada modo, $|d_i|^2$, y la potencia que se transmite en cada uno, $P_i = |x_i|^2$.

Suponiendo que a la entrada de todos los receptores la potencia de ruido es la misma (N), la capacidad total C_{total} , suma de las capacidades individuales (C_i), es:

$$C_{total} = \sum_{i=1}^n C_i = B \cdot \sum_{i=1}^n \log_2 \left(1 + \frac{P_i \cdot |d_i|^2}{N} \right) \quad 2.17$$

Siendo la potencia total: $P = \sum_{i=1}^n P_i$

Evidentemente no se debe gastar potencia en aquellos modos en que la propagación es nula ($|d_i|=0$), se debe gastar poca potencia en los modos en que la propagación sea pobre y se debe concentrar la mayor parte de la potencia en aquellos modos en los que $|d_i|$ sea mayor. El cálculo del reparto óptimo de la potencia entre las antenas cuando la potencia total que se puede transmitir es un parámetro conocido es un problema clásico de optimización con condiciones de contorno, y se conoce en la literatura técnica como “llenado de agua” (water filling).

2.2.5 Los sistemas MIMO dentro del Enfoque Actual del Operador

Desde el punto de vista de un operador de comunicaciones móviles [4], MIMO se inscribe dentro de un conjunto de iniciativas enfocadas a mejorar las prestaciones de los sistemas de 3G, y, más específicamente, de UMTS. Estas iniciativas estarían destinadas a mejorar el rendimiento del sistema más allá de los límites establecidos inicialmente a través de sus primeras versiones, incluso más allá de la más reciente versión. Como ejemplos de estas iniciativas se pueden citar, además de MIMO, la opción HSDPA, HSUPA, todavía en fase de especificación. A más largo plazo se habla incluso de introducir nuevas técnicas radio, como la OFDM.

En general, los requisitos de un operador a la hora de plantearse una mejora o evolución futura de la red de acceso radio de UMTS dependen bastante visión del negocio, y de las circunstancias que rodeen el despliegue de red que tiene que efectuar. Sin embargo, a título general y sin riesgo a equivocarse excesivamente, es posible señalar algunos de los aspectos que serán comunes a muchos de los requisitos, como son:

- El aprovechamiento de los emplazamientos existentes.



- La reducción del coste por bit, sin descuidar también la eficiencia en la transmisión.
- Uso eficiente del espectro.
- La prestación de nuevos y mejores servicios, o al menos una mejora en la calidad de los ya existentes.
- La mejora de la cobertura. Este es un aspecto muy importante.
- La adecuada escalabilidad.
- El impacto sobre los terminales. Aspectos como el incremento en coste, volumen, consumo o procesamiento habrán que tenerse en cuenta. Una propuesta adecuada deberá reflejar un equilibrio razonable entre sus puntos fuertes y débiles, tanto en el extremo de la red como en los terminales.

Particularizando a MIMO, es obvio que el estado de inmadurez de esta tecnología no permite todavía un análisis concluyente con respecto a los puntos mencionados. No obstante, es posible hacer una serie de consideraciones preliminares, que pueden contribuir a orientar mejor los desarrollos que se irán haciendo sobre esta solución.

En primer lugar, MIMO aparece como una solución que a priori no obliga a descartar los emplazamientos existentes, aunque por otra parte sí que exige dotar a estos de un mayor número de antenas, y de una mayor capacidad de procesamiento. Si lo segundo no es tan problemático en una estación base, lo primero sí puede plantear complicaciones, en función del grado de ocupación que presenten los emplazamientos, y del impacto psicológico que sobre el público pueda tener un mayor número de antenas que tiende a resumirse en la máxima “a mayor número, mayor nivel de visiones”. Diferente es en cambio la situación desde el punto de vista de los terminales. Resulta inabordable hoy por hoy la inclusión de más de dos antenas en un terminal móvil y parece mucho más práctica la variante conocida como MIMO distribuido. En cualquier caso, un aspecto que los operadores de redes móviles deberán conocer es la mejora de prestaciones que permite MIMO, en función del número de antenas, para aquellos modelos de canal de interés.

La valoración anterior habrá de tener forzosamente en cuenta los términos económicos, ya que la inversión en equipamiento adicional tendrá que contrastarse con las ventajas, principalmente de mejora de cobertura y capacidad, que MIMO puede aportar. Así mismo, será preciso evaluar el consumo de recursos que pudiera requerir un eventual canal de retorno así como el escenario de despliegue.

2.2.6 Parámetros MIMO: estudio teórico

El fundamento de los canales MIMO es la capacidad de transmitir en paralelo varios canales de información en un medio en el que se producen multitud de reflexiones. El número de estos canales es como máximo el mínimo número de elementos en los



extremos del canal. Para comprobar esta afirmación se hace un estudio de los valores propios de la matriz del canal en cada medida de frecuencia realizando una descomposición SVD [9].

$$\begin{aligned}
 H &= U \Sigma V^H \\
 \Sigma &= \text{diag}(\lambda_1 \cdots \lambda_k) \\
 U &= [u_1 \cdots u_M] \in \mathbb{C}^{M \times M} \\
 V &= [v_1 \cdots v_M] \in \mathbb{C}^{N \times N}
 \end{aligned}
 \tag{2.18}$$

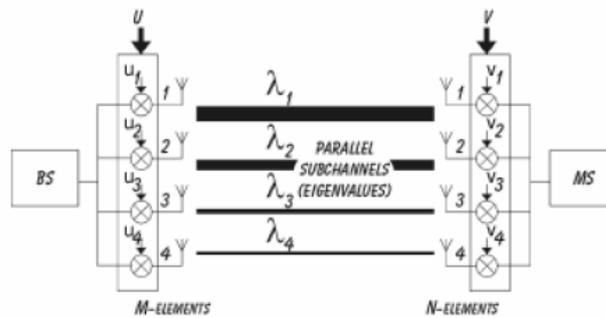


Figura 12: Transmisión paralela en MIMO [9]

El número de canales paralelos transmitiéndose simultáneamente equivale al número de esos valores propios con valores positivos no nulos:

$$N^{\circ} \text{Canales} = \sum_{\substack{k \\ \lambda_k \geq 0}} \text{indice}(\lambda_k)
 \tag{2.19}$$

2.2.6.1 Capacidad MIMO

Para un sistema sin memoria con una antena transmisora y otra receptora (Single-Input Single-Output) (figura 13), la capacidad máxima del sistema viene dada por [11]:

$$C_{\text{SISO}}(t) = \log_2 \left(1 + \rho |h(t)|^2 \right) \text{bps} / \text{Hz}
 \tag{2.20}$$

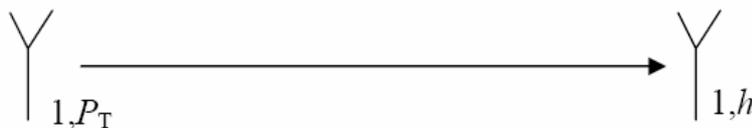


Figura 13: SISO [11]



donde $h(t)$ es la respuesta instantánea compleja normalizada del canal, y ρ es la relación señal a ruido (SNR) en el receptor.

En el caso que se aumente el número de antenas en recepción (Single-Input Multiple-Output SIMO) (Diversidad en recepción, figura 14b), la capacidad máxima viene dada por:

$$C_{SIMO}(t) = \log_2 \left(1 + \rho \sum_{i=1}^N |h_i(t)|^2 \right) bps / Hz \quad 2.21$$

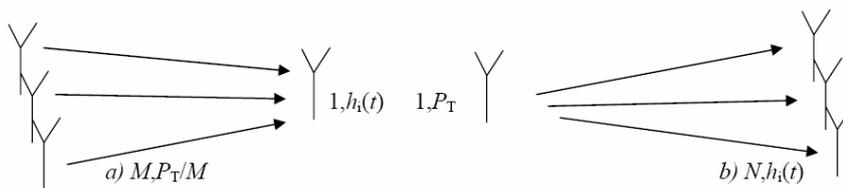


Figura 14: a) MISO b) SIMO [11]

donde N es el número de antenas receptoras, y $h_i(t)$ es la respuesta compleja normalizada se utiliza diversidad en recepción tiene un aumento logarítmico con el número de antenas, similar a un aumento de ρ . El caso dual sería aumentar el número de antenas transmisoras dotando de diversidad de transmisión al sistema (Multiple-Input Single-Output MISO) (Figura 14a). La capacidad resultante es:

$$C_{MISO}(t) = \log_2 \left(1 + \frac{\rho}{M} \sum_{i=1}^M |h_i(t)|^2 \right) bps / Hz \quad 2.22$$

donde M es el número de antenas transmisoras y $h_i(t)$ es la respuesta compleja normalizada del canal cuando se transmite por la antena i -ésima. La normalización de la señal a ruido con el número de antenas transmisoras se debe a la restricción de que la potencia total transmitida debe ser constante para que todos los casos sean comparables, es decir, que la suma de las potencias de cada antena transmisora es constante y de valor P_T .

Anteriormente se ha repasado la capacidad máxima teórica de los sistemas SISO, SIMO y MISO. Como extensión de estos, si se aumenta el número de antenas tanto en transmisión como en recepción tendremos un sistema MIMO (Multiple-Input Multiple-Output). El modelo más sencillo (banda estrecha) de un canal MIMO es:

$$R = Gs + n \quad 2.23$$

donde \mathbf{R} es un vector complejo de dimensiones $N \times 1$ y representa la señal recibida en las N antenas receptoras, \mathbf{G} es una matriz de dimensiones $N \times M$, donde cada elemento $G_{i,j}$ es la respuesta del canal cuando transmite la antena j y recibe la antena i , s es un vector $M \times 1$



que representa las señales transmitidas por las M antenas transmisoras y \mathbf{n} es un vector ruido de las mismas dimensiones que \mathbf{r} . La capacidad máxima viene dada por:

$$C_{MIMO}(t) = \log_2 \left(\det \left[\mathbf{I}_N + \frac{\rho}{M} \mathbf{H}(t) \mathbf{H}^H(t) \right] \right) \text{bps/Hz} \quad 2.24$$

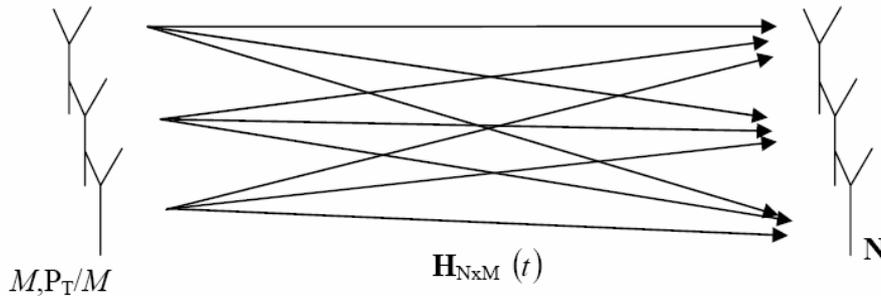


Figura 15: MIMO [11]

donde $(\cdot)^H$ indica transpuesto-conjugado, \mathbf{I}_N es la matriz identidad de dimensiones $N \times N$ y \mathbf{H} es la matriz \mathbf{G} normalizada de tal forma que el valor medio de $|H_{ij}|, E \langle |H_{ij}| \rangle = 1$. \mathbf{H} debe conocerse en el receptor para demodular adecuadamente la señal. Se puede demostrar que el aumento de la capacidad máxima teórica para un sistema de estas características tiene un incremento lineal con el número de antenas.

La expresión anterior indica cuál es la capacidad máxima para un sistema de múltiples antenas cuando el transmisor no conoce la respuesta del canal \mathbf{H} . En este caso el transmisor reparte la potencia de forma igual entre todas las antenas. Cuando el transmisor conoce la respuesta del canal, éste puede optimizar la transmisión de la información repartiendo la potencia de forma que la capacidad sea máxima (inyectando más potencia en los canales más favorables).

2.2.6.2 Correlación en el Transmisor y Receptor

La correlación como se ha explicado en una sección anterior nos da una idea de la máxima capacidad que se puede alcanzar usando el sistema MIMO en un entorno determinado, como el estudio de la capacidad a partir de la matriz que define el canal tiene un gran coste computacional, ya que las dimensiones de la matriz de correlación es de $NM \times NM$ se suele estudiar la correlación en el transmisor y en el receptor de manera independiente utilizando las siguientes expresiones [9]:

$$\rho_{Tx} = \frac{E \{ G(k,i) G(k,j)^* \}}{\sqrt{E \{ |G(k,i)|^2 \} E \{ |G(k,i)|^2 \}}} \quad 2.25$$



$$\rho_{Rx} = \frac{E \{G(i,k) G(j,k)^*\}}{\sqrt{E \{|G(i,k)|^2\} E \{|G(i,k)|^2\}}} \quad 2.26$$

2.2.6.3 Factor K

Para caracterizar los canales MIMO se suele utilizar la función de densidad de probabilidad de tipo Rice, el parámetro que nos muestra la relación entre la señal aportada por el rayo directo y el reflejado es el llamado factor K. Éste tiene la siguiente forma:

$$K = \frac{\sqrt{1-\gamma}}{1-\sqrt{1-\gamma}} \quad 2.27$$

Donde $\gamma = \text{var}(R^2) / (E(R^2))$

2.2.6.4 Respuesta Temporal

Para expresar la respuesta al impulso de la señal en cada uno de los canales SISO que componen el sistema solo es necesario realizar la transformada inversa de Fourier a los datos obtenidos de la siguiente forma:

$$g_{n,m}(\tau) = IFFT(G_{n,m}) \quad 2.28$$

De esta forma se va a poder observar el retardo y el nivel del rayo directo así como las contribuciones de los rayos reflejados y difractados en el entrono de propagación.

2.2.6.5 RMS Delay Spread: Retardo Medio y Dispersión del Retardo

A partir de función $P_h(t,\tau)$ para un instante de tiempo t, la función depende únicamente de τ . Esta función se denomina Perfil de Retardo-Potencia, PDP (Power Delay Profile). Indica la potencia en función de la dispersión temporal para un instante dado, y resulta de gran utilidad para calcular la dispersión temporal del canal radio. Se define el retardo medio como el momento de primer orden del PDP:



$$\bar{\tau}(t) = \frac{\int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} \xi P_h(t, \xi) d\xi}{\int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} P_h(t, \xi) d\xi} \quad 2.29$$

Donde τ_{\min} y τ_{\max} es el retardo de la primera y última contribución respectivamente. En el caso de tener un perfil de retardo discreto, el retardo medio queda:

$$\bar{\tau}(t) = \frac{\sum_{i=1}^N \tau_i P_h(t, \tau_i)}{\sum_{i=1}^N P_h(t, \tau_i)} \quad 2.30$$

donde N es el número de contribuciones, y τ_i es el retardo correspondiente a la contribución $P_h(t, \tau_i)$.

Se define la dispersión del retardo (RMS Delay Spread) $\sigma_{\tau}(t)$ como el momento de segundo orden del PDP:

$$\sigma_{\tau}(t) = \sqrt{\frac{\int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} \xi^2 P_h(t, \xi) d\xi}{\int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} P_h(t, \xi) d\xi} - \left(\frac{\int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} \xi P_h(t, \xi) d\xi}{\int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} P_h(t, \xi) d\xi} \right)^2} \quad 2.31$$

y de forma discreta como:

$$\sigma_{\tau}(t) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\tau_i - \bar{\tau}(t))^2 P_h(t, \tau_i)}{\sum_{i=1}^N P_h(t, \tau_i)}} \quad 2.32$$



Como se observa en las expresiones anteriores, tanto el retardo medio como la dispersión de retardo dependen del tiempo. Muchas veces los resultados que se obtienen son estos parámetros promediados y su comportamiento estadístico.

2.2.6.6 Ancho de Banda de Coherencia

El ancho de banda de coherencia [9] mide la distancia en frecuencia donde la correlación entre las envolventes complejas de dos portadoras sin modular que se transmiten en un canal dado están altamente correladas. También se puede definir como una medida estadística del rango de frecuencias en el que un canal puede considerarse plano. Este parámetro está ligado inversamente a la dispersión de retardo. En ancho de coherencia se suele definir mediante un umbral a partir del cual la correlación es menor que un cierto valor, normalmente 0.5. La forma de obtenerlo es mediante $\mathfrak{Z}\{P_h(t, \tau)\}_t$, y a partir de esta función medir cuando la correlación disminuye al 0.5.



2.3 Sistemas Distribuidos

Sistemas cuyos componentes hardware y software, que están en ordenadores conectados en red, se comunican y coordinan sus acciones mediante el paso de mensajes, para el logro de un objetivo. Se establece la comunicación mediante un protocolo prefijado por un esquema cliente-servidor.

2.3.1 Introducción a los sistemas distribuidos

Características [13]:

- **Concurrencia.**- Esta característica de los sistemas distribuidos permite que los recursos disponibles en la red puedan ser utilizados simultáneamente por los usuarios y/o agentes que interactúan en la red.
- **Carencia de reloj global.**- Las coordinaciones para la transferencia de mensajes entre los diferentes componentes para la realización de una tarea, no tienen una temporización general, esta más bien distribuida a los componentes.
- **Fallos independientes de los componentes.**- Cada componente del sistema puede fallar independientemente, con lo cual los demás pueden continuar ejecutando sus acciones. Esto permite el logro de las tareas con mayor efectividad, pues el sistema en su conjunto continua trabajando.

Algunos ejemplos de sistemas distribuidos son:

- Una red de estaciones de trabajo en un departamento de una universidad o compañía, donde además de cada estación personal, podría existir una pila de procesadores en el cuarto de máquinas, que no estén asignados a usuarios específicos sino que se utilicen de manera dinámica cuando sea necesario.
- Una fábrica de robots, donde los robots actúan como dispositivos periféricos unidos a la misma computadora central.
- Un banco con muchas sucursales por el mundo, cada oficina tiene una computadora maestra para guardar las cuentas locales y el manejo de las transacciones locales, la cuál se puede comunicar con cualquier computadora de la red. Las transacciones hechas se realizan sin importar dónde se encuentre la cuenta o el cliente.



2.3.2 Ventajas de los sistemas distribuidos respecto de los centralizados

- **Economía:** es la razón número uno de la tendencia hacia los sistemas distribuidos ya que estos sistemas tienen en potencia una proporción precio/desempeño mucho mejor que la de un sistema centralizado.
- **Velocidad:** un sistema distribuido puede tener mayor poder de cómputo que una mainframe.
- **Distribución inherente:** otra razón para la construcción de un sistema distribuido es que ciertas aplicaciones son distribuidas en forma inherente; es decir, algunas aplicaciones utilizan máquinas que están separadas a cierta distancia.
- **Confiabilidad:** un sistema distribuido ofrece mayor confiabilidad: al distribuir la carga de trabajo en muchas máquinas, la falla de un circuito descompondrá a lo más una máquina y el resto seguirá intacto.
- **Crecimiento por incrementos:** si se necesita añadir poder de cómputo a la compañía, con un sistema distribuido, podrían añadirse sólo más procesadores al sistema, lo que permite un desarrollo gradual conforme surjan las necesidades.

2.3.3 Ventajas de los sistemas distribuidos respecto de los PCs independientes

- **Datos compartidos:** Un sistema distribuido permite que varios usuarios tengan acceso a una base de datos común.
- **Dispositivos compartidos:** De igual manera, se pueden compartir periféricos entre diversos usuarios como puede ser una impresora.
- **Comunicación:** un sistema distribuido facilita la comunicación entre computadoras aisladas con el e-mail, por ejemplo.
- **Flexibilidad:** Un sistema distribuido difunde la carga de trabajo entre las máquinas disponibles en la forma más eficaz en cuanto a los costos.

2.3.4 Desventajas de los sistemas distribuidos

- **Software:** No hay mucha experiencia en el diseño, implantación y uso del software distribuido, además existe poco software para los sistemas distribuidos en la actualidad.



- **Redes:** Una vez que el sistema llega a depender de la red, la pérdida o saturación de ésta puede negar algunas de las ventajas que el sistema distribuido debía conseguir.
- **Seguridad:** si las personas pueden tener acceso a los datos en todo el sistema, entonces también pueden tener acceso a datos con los que no tienen nada que ver.

2.3.5 Aplicaciones

A continuación se enumeran las aplicaciones más importantes de los sistemas distribuidos [12]:

- **Sistemas Comerciales.-** Inicialmente fueron construidos con hardware dedicado y entornos centralizados, son, por sus características de distribución geográfica y necesidad de acceso a sistemas distintos, ideales para implementarse en sistemas distribuidos. Requieren ciertas características de fiabilidad, seguridad y protección. Algunos ejemplos son:

- Sistemas de reservas de líneas aéreas.
- Aplicaciones bancarias.
- Cajas y gestión de grandes almacenes.

- **Redes WAN.-** Debido al gran crecimiento de este tipo de redes (Internet), ha tomado gran importancia el intercambio de información a través de la red. Y para esto tenemos los siguientes ejemplos: Los servicios comunes que brinda Internet: Correo electrónico, servicio de noticias, transferencia de archivos, la World Wide Web, etc.

- **Aplicaciones Multimedia.-** Son las últimas incorporaciones a los sistemas distribuidos. Estas aplicaciones imponen ciertas necesidades de hardware para poder tener una velocidad y regularidad de transferencia de una gran cantidad de datos. Los ejemplos de estos sistemas son:

- Videoconferencia.
- Televigilancia.
- Juegos multiusuarios.
- Enseñanza asistida por ordenador.

- **Áreas de la informática aplicada a los Sistemas Distribuidos.-** En este punto se tienen en cuenta toda la variedad de aplicaciones de los sistemas distribuidos, pues su diseño involucra a muchas áreas, por ejemplo:

- Comunicaciones.
- Sistemas operativos distribuidos.
- Base de datos distribuidas.
- Servidores distribuidos de ficheros.
- Lenguajes de programación distribuidos.
- Sistemas de tolerancia de fallos.

2.3.6 Sistemas MIMO Distribuidos

La definición básica de un sistema MIMO distribuido se representa en la figura 16 [4]. El sistema está compuesto por una BTS, con n antenas separadas entre sí unas pocas longitudes de onda y unos terminales, cada uno con una antena, que la BTS agrupa en grupos de n . La comunicación se establece entre la BTS y los diferentes conjuntos de n terminales. El término distribuido viene de hecho de que las antenas del extremo terminal no están concentradas en un único equipo, si no que se encuentran separadas o distribuidas espacialmente entre varios equipos. Como hemos dicho en apartados anteriores, este caso se diferencia del estudiado teórica y experimentalmente en este proyecto, en el que las antenas del extremo terminal si están concentradas en un único equipo, separadas una distancia determinada.

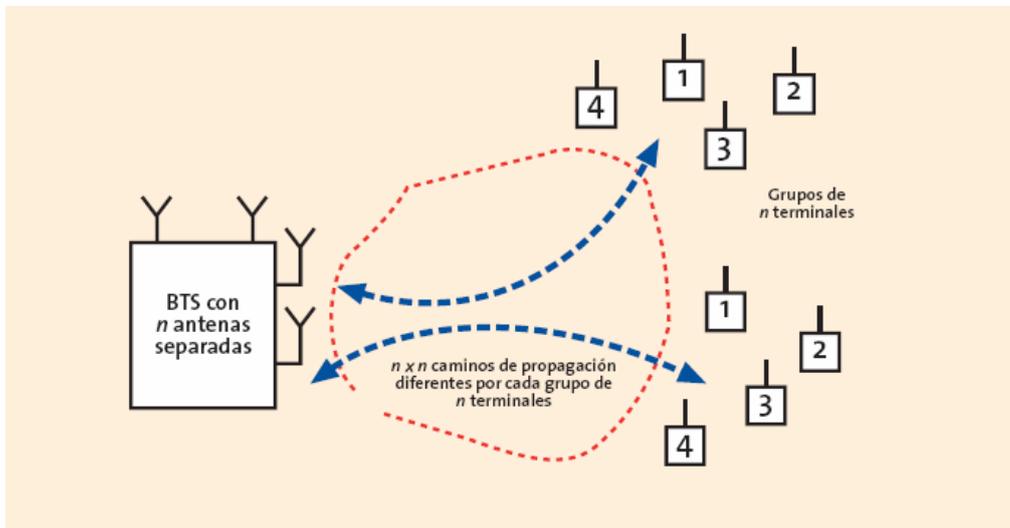


Figura 16: Sistema MIMO Distribuido [4]

La primera gran ventaja de este esquema es que la separación entre terminales prácticamente garantiza la incorrelación de todos los caminos de propagación, lo que a su vez permite reutilizar los recursos radio del sistema hasta n veces, al menos en teoría, tal y como se ha descrito en apartados anteriores.

De esta incorrelación “casi” asegurada entre caminos se desprende que se puede utilizar transmisión ciega en el enlace ascendente, sin necesidad de canal de retorno. Aplicando en la BTS en recepción el procedimiento de la ecuación 2.33, no es de prever una amplificación del ruido ya que la matriz H está bien condicionada. Si x_i es la señal que transmite el terminal i , perteneciente a un grupo de n terminales, e y_i es la señal a la salida de la antena i en la BTS, la estimación de receptor será:

$$Est\{[x]\} = H^{-1} \cdot [y] = H^{-1} \cdot H \cdot [x] + H^{-1} \cdot [n] = [x] + H^{-1} \cdot [n] = [x] + [n] \quad 2.33$$



Siendo la potencia de ruido similar antes y después de la detección, por lo que:

$$\left|n_i\right|^2 \approx \left|n_i\right|^2 \quad 2.34$$

Con lo expuesto hasta ahora los recursos radio se reutilizan hasta n veces solo en el camino ascendente, aumentando únicamente la complejidad de la BTS. El paso siguiente es reutilizarlos también en el descendente, pero sin aumentar la complejidad de los terminales. Esto es posible mediante el mecanismo conocido como preecualización, que consiste en que si la BTS conoce la matriz de transmisión, H' , en el enlace descendente puede preprocesar las señales, antes de transmitir las, multiplicándolas por el inverso de esa matriz H' , de forma que:

$$\text{La señal transmitida } = [s] = H'^{-1} \cdot [x'] \quad 2.35$$

Por tanto, lo que llega al conjunto de los receptores queda definido por la ecuación:

$$[y'] = H' \cdot [s] + [n] = H' \cdot H'^{-1} \cdot [x'] + [n] = [x'] + [n] \quad 2.36$$

La ecuación 2.36 indica que cada receptor recibe únicamente la señal que le corresponde, sin interferencia de las señales que van a los otros $n-1$ receptores de su grupo. La preecualización es posible porque la incorrelación de cambios se traduce en que la matriz H' está bien condicionada, y por tanto su inversa no es muy grande, y la multiplicación de las señales que se quiere transmitir por la matriz H' invertida no saca a los transmisores de la BTS de su zona lineal de funcionamiento.

Para que la BTS conozca la matriz H' se puede implementar un canal de retorno entre los terminales y la BTS. Es posible, sin embargo, utilizar otro procedimiento que conduce a un sistema mucho más simple. Consiste en utilizar multiplexación en el tiempo entre los enlaces ascendente y descendente, el conocido en nomenclatura UMTS como TDD, y utilizar tramas lo suficientemente cortas para asegurar que la duración de las ráfagas en sentido descendente más la duración de las ráfagas en sentido ascendente sea inferior al tiempo durante el cual el canal de transmisión se mantiene prácticamente constante. Si se cumple esta condición la matriz de transmisión descendente es la transpuesta de la ascendente ($H' = H_t$), que la BTS ya ha calculado como paso previo a la detección de las señales procedentes de los terminales.



Se puede concluir que es posible aprovechar la ganancia teórica que ofrecen los sistemas MIMO utilizando la novedosa técnica de procesar en bloque las señales de n terminales. Si además se implementa adecuadamente el modo de funcionamiento TDD, los terminales y las estaciones base se pueden desarrollar con la tecnología que se utiliza hoy en día, sin tener que esperar a la aparición de nuevas generaciones de circuitos integrados con transistores submicrométricos, de consumo similar pero mucho más rápidos.

Conviene mencionar que el MIMO distribuido es atractivo en el escenario de un operador de comunicaciones móviles. Sin embargo, existen otros escenarios, como las redes inalámbricas, con otros condicionantes como el canal de transmisión y la complejidad en los terminales, en los que se pueden aplicar procedimientos MIMO alternativos. A título simplemente informativo, uno de estos procedimientos es el de codificación por bloques espacio temporal (STBC), cuya descripción se sale de este proyecto.

2.3.6.1 Ancho de banda y sistemas de modulación

Queda por mencionar la componente del ancho de banda de los sistemas MIMO [4]. Si el ancho de banda de las portadoras moduladas es suficientemente pequeño, su matriz de transmisión asociada se podrá describir con parámetros independientes de la frecuencia. Si no lo es, hay que generalizar a banda ancha procedimientos expuestos anteriormente, para lo que básicamente existen dos familias de procedimientos. La primera consiste en ecualizar la respuesta del canal. La segunda consiste en emplear OFDM, multiplexación por división ortogonal de frecuencia. La ecualización, en alguna de sus múltiples alternativas, sería adecuada para UMTS. OFDM es más atractiva para sistemas celulares de nueva generación y para redes inalámbricas, por su modularidad, flexibilidad y sencillez conceptual.

En OFDM la capacidad se distribuye entre un número elevado de portadoras, decenas o centenas, cada una de ellas modulada a un régimen binario aproximadamente igual al régimen binario total, dividido por el número de portadoras. Claramente la matriz H no se puede considerar igual para todas las portadoras, pero cada portadora individual sí se puede considerar de banda estrecha y, dependiendo del escenario, puede que a varias portadoras contiguas sea posible asignarles la misma matriz.

En la gráfica de siguiente figura se muestran, a modo de ejemplo, los parámetros de un sistema OFDM con velocidad agregada de 10 Mbits. La gráfica indica el ancho de banda que tiene que tener cada subportadora para distinto número de subportadoras y mecanismos de modulación y corrección de errores.



Si se escoge un ancho de banda de 100 kHz, con un canal de exteriores invariante, durante al menos 1 ms, y un sistema de modulación QPSK con código de protección $\frac{3}{4}$, el número mínimo de subportadoras es 128.

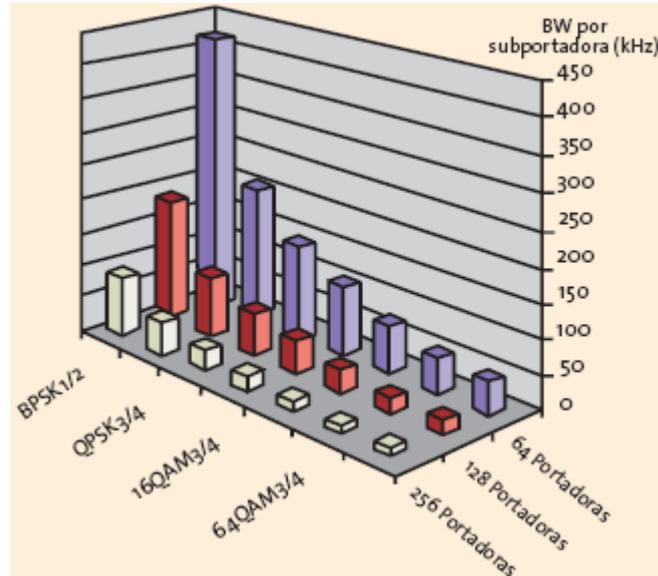


Figura 17: Ancho de banda por subportadora en OFDM a 10Mbit/s [4]

2.3.6.2 Modelo del canal MIMO distribuido

En el sistema de MIMO distribuido hay (N) estaciones base conteniendo (L) antenas cada una, teniendo la parte receptora (M) antenas. A este sistema se le conocerá como (M;N;L), como se ve en la siguiente imagen [14]:

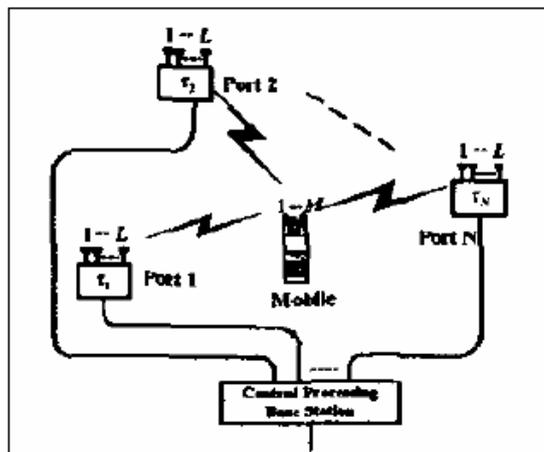


Figura 18: Sistema MIMO Distribuido (M,N,L) [14]



Las señales recibidas en las antenas se representarán como símbolos sincronizados, y el canal se supone que es lineal y cuasi-estático con una respuesta plana en la banda de frecuencia de la comunicación. El modelo de señal recibida para la conexión se podría expresar así:

$$r(d) = \mathbf{H}(d)\mathbf{T}_s + n \quad 2.37$$

donde \mathbf{T}_s es el vector transmisor de señal del móvil con valor 0 y una matriz y \mathbf{N} un ruido Gaussiano complejo, simétrico y circular con valor 0 respectivamente. Asumimos que \mathbf{T} es el vector de transmisión de energía con $E(\mathbf{T}\mathbf{T}^H) = \mathbf{Q}$ y el transmisor de energía se trazaría $\{\mathbf{Q}\} \leq \mathbf{P}_T$. \mathbf{H} es la matriz $N \times M$ y sus parámetros vienen dados por el vector de distancia $\mathbf{d} = \{d_1, d_2, d_3, \dots\}$ donde “ d ” representa la distancia entre el móvil y las antenas. \mathbf{H} puede ser dividida en dos partes y expresada así:

$$\mathbf{H}(d) = \mathbf{H}_{SH}(d)\mathbf{H}_{SSF} \quad 2.38$$

Donde \mathbf{H}_{SSF} y \mathbf{H}_{SH} son las matrices que representan el *small scale fading* y el desvanecimiento relativo de la señal respectivamente.

2.3.6.3 Capacidad del Canal MIMO Distribuido

La capacidad del canal MIMO viene dada por [14]:

$$C(\mathbf{H}, \mathbf{Q}) = \log_2 \det \left(\mathbf{I} + \mathbf{H} \mathbf{Q} \mathbf{H}^H / \sigma_n^2 \right) \quad 2.39$$

Cuando el transmisor es desprovisto de algún CSI, la asignación óptima de la energía es $\mathbf{Q} = (\mathbf{P}_T / M) \mathbf{I}_M$, en el caso que la información necesaria para el canal ascendente sea de la siguiente forma:

$$C_{eq}(\mathbf{H}) = \log_2 \det \left(\mathbf{I}_{NL} + \frac{\Gamma_T}{M} \mathbf{H} \mathbf{H}^H \right) \quad 2.40$$



Donde $\Gamma_T = \frac{P_T}{\sigma_n^2}$ es la potencia de transmisión de señal y la ratio de ruido. Para el canal descendente hay antenas transmisoras N_L y antenas receptoras M para que la capacidad del enlace descendente se convierta en:

$$C_{eq}(H) = \log_2 \det \left(I_M + \frac{\Gamma_T}{N_L} H H^t \right) \quad 2.41$$

Cuando el canal es conocido perfectamente por transmisor y receptor, la capacidad es:

$$C_{op}(H) = \max_{Q: \text{Trace}(Q) = P_T} \log_2 \det (I + H Q H^t / \sigma_n^2) \quad 2.42$$

donde la asignación de energía óptima para Q debe ser calculada por un método de optimización numérica.



Capítulo 3. Trazador Indoor 3D

En este capítulo vamos a desarrollar el primero de los objetivos de este proyecto, y es la realización de un trazador de rayos en 3 dimensiones para la caracterización del canal de radiocomunicaciones, en este caso particular, para sistemas MIMO tradicionales y sistemas MIMO distribuidos en un entorno cerrado o indoor, como es el laboratorio SICOMO (Sistemas de COmunicaciones MÓviles). En este capítulo introduciremos la teoría pertinente sobre trazado de rayos, así como la óptica geométrica utilizada. A continuación se irá explicando las partes del programa realizado y para concluir se mostrará como se construyen las imágenes del trazador según el número de reflexiones.

3.1 Trazado de rayos

Algunos modelos de iluminación, además de considerar la contribución de las fuentes de luz, también tienen en cuenta la luz reflejada y la transmitida procedente de los objetos circundantes. El algoritmo **trazador de rayos** (o **ray tracing**), utiliza un modelo de iluminación de este estilo [15]. Lo de utilizar rayos, proviene por las elipses de Fresnel, ya que al aumentar la frecuencia, la trayectoria se puede aproximar a un rayo.

Así, en la versión típica del algoritmo de *ray tracing*, el color (intensidad) en un punto de intersección rayo-superficie cualquiera viene determinado por tres tipos de aportaciones lumínicas:

- Por un lado está la *contribución* o color local, que se debe a la iluminación directa de las fuentes, y la luz ambiental.
- Por otro lado está la *contribución* o color reflejado, que consiste en la luz que llega al punto de intersección desde los objetos circundantes, siguiendo la trayectoria de reflexión de la luz.
- Por último, el algoritmo de ray tracing también cuenta con la aportación del color transmitido, que se debe la luz que llega al punto de intersección después de cruzar (traspasar) los objetos vecinos (si es que son transmisores de la luz), siguiendo la trayectoria de transmisión.

En la Figura 19 se pueden apreciar las tres contribuciones en un punto de intersección rayo-superficie dado.

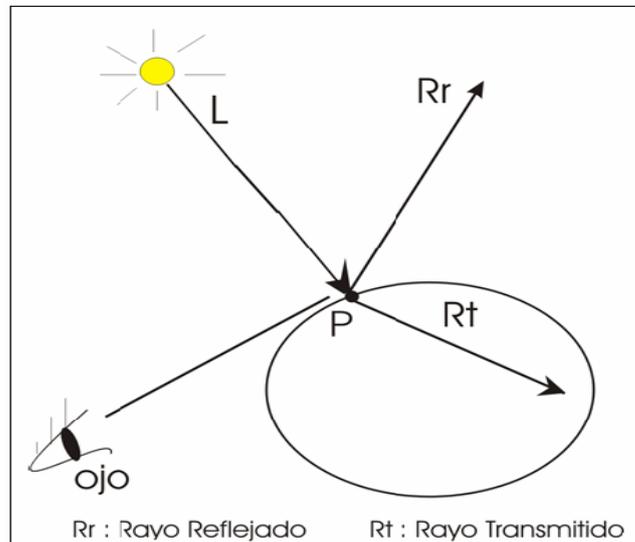


Figura 19: Contribuciones de Luz en el algoritmo Ray Tracing [15]

El trazado de rayos o ray tracing no es más que una expansión o generalización del algoritmo de ray casting [15]. En éste solamente se traza un tipo de rayos, conocidos como rayos primarios, que van desde el observador hasta los objetos en el escenario, a través de cada píxel del plano visual. En ray tracing, además de los rayos primarios, en cada punto de intersección rayo-superficie son trazados otros dos rayos, el rayo reflejado y el rayo transmitido.

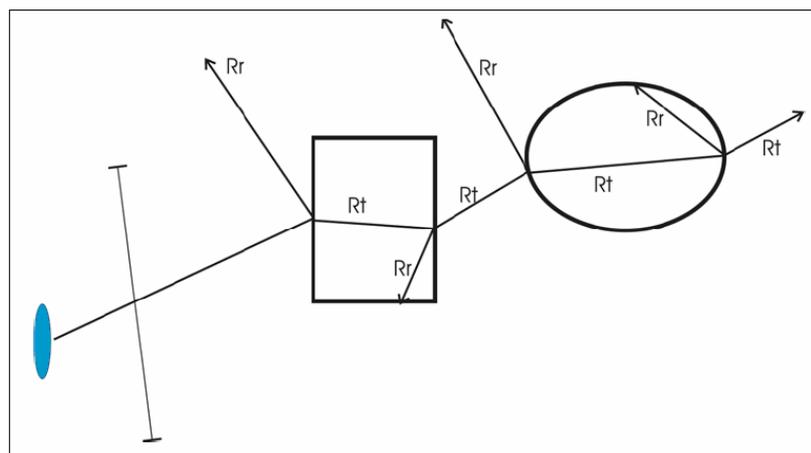


Figura 20: Rayos reflejados y transmitidos [15]

En la figura anterior puede apreciarse el trazado del rayo reflejado y transmitido, en cada punto de intersección.



En la misma figura puede verse que cada rayo primario trazado lleva asociado un árbol binario (árbol de rayos) como el mostrado a continuación:

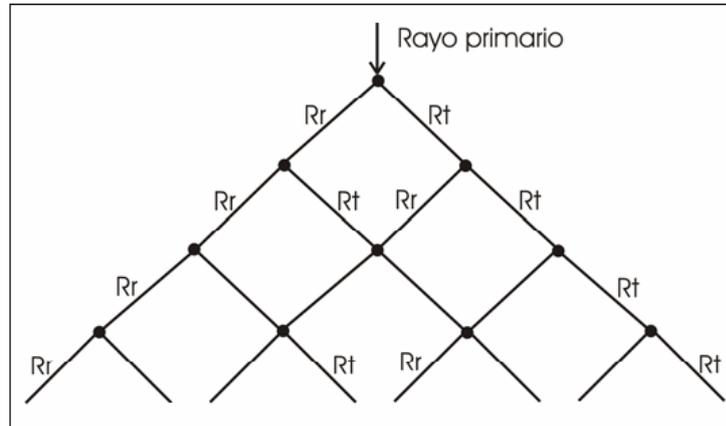


Figura 21: Árbol binario asociado a cada rayo primario [15]

A la vista del árbol anterior es fácil comprender la naturaleza recursiva del algoritmo de ray tracing. Por la descripción gráfica que acabamos de ver del algoritmo, los pasos a dar para su desarrollo son [15]:

- 1) Primero se ha de trazar el rayo primario, es decir, hay que calcular el rayo procedente del ojo que pasa a través de un píxel dado, buscando la intersección más cercana con los objetos del escenario.

- 2) Una vez encontrado el punto de intersección, para averiguar el color global (final) del rayo primario (y del píxel), se calcula primero la contribución local en el punto de intersección. Para ello es preciso conocer, entre otros datos, qué fuentes aportan luz, y cuales no. Esto se consigue trazando rayos de sombra desde el punto de intersección hacia cada una de las fuentes de luz, evaluando la contribución de cada fuente en función de sus características y de los objetos interpuestos (si los hay) en la trayectoria del correspondiente rayo de sombra.

- 3) En el caso de que la superficie presente reflexión (que es lo más frecuente) calcularemos la trayectoria del rayo reflejado con respecto a la normal a la superficie en el punto de intersección. En el cálculo de esta trayectoria normalmente se supone que el objeto (superficie) es un reflector perfecto.

- 4) De la misma forma, si el objeto es transmisor de la luz, se ha de calcular la trayectoria del rayo transmitido hacia el interior del objeto, determinando el ángulo de refracción por la ley de Snell.

A la hora de calcular el color global deberemos tener en cuenta que no todos los rayos generados influyen en la misma proporción. Por ejemplo, la luz que llega directamente de una fuente, normalmente es bastante más intensa que la que llega a través de una trayectoria de reflexión, tras efectuar varias intersecciones. Cuanto más abajo sea el



nivel de un rayo (en el árbol de rayos), menor será su influencia a la hora de determinar el color final de un píxel.

Una vez que hemos introducido los principios fundamentales del trazado de rayos, podemos añadir que el trazado de rayos es un modelo determinista que se emplea para la predicción de la respuesta del canal de radiocomunicaciones [11]. De esta manera, será el modelo utilizado en el programa Trazador Indoor 3D.

El trazado de rayos se fundamenta en la aplicación de la Óptica Geométrica (GO). A medida que la frecuencia aumenta, la primera zona de *Fresnel*, que es la que concentra la mayor parte de la energía, tiende a estrecharse y se puede simular como un rayo. De este modo la propagación de las ondas electromagnéticas se puede seguir de la misma forma que el camino que recorre un rayo óptico, simplificando enormemente el análisis.

Los mecanismos fundamentales de propagación son la reflexión, la difracción y la difusión. Como comenté en el capítulo anterior, la reflexión ocurre cuando una onda electromagnética incide sobre un objeto cuyas dimensiones son superiores a la longitud de onda. La óptica geométrica contempla la reflexión y la trata con la ley de *Snell*. El fenómeno de la difracción surge cuando un rayo es obstruido por una superficie con irregularidades abruptas (aristas). En este caso se generan ondas secundarias desde esta arista por el principio de *Huygens*, y es la *UTD* la teoría electromagnética que estudia y resuelve este problema. Por último, la difusión tiene lugar cuando una onda viaja por un medio con objetos de dimensiones similares a la longitud de onda, o cuando el número de objetos por unidad de volumen es alto. La difusión en comunicaciones móviles suele tener un valor muy bajo con respecto a otras contribuciones, y no se suele tener en cuenta en el trazado de rayos.

Existen dos formas de trazar rayos [11]. La primera llamada en inglés *Ray Launching*, consiste en el lanzamiento de rayos desde la posición del transmisor con una separación angular constante y en su posterior seguimiento. La segunda de ellas, *Ray Tracing* en inglés, se basa en la generación de imágenes a partir de las posibles reflexiones que puedan producirse en un entorno. El trazado de rayos que se ha utilizado en el presente proyecto es del segundo tipo.



3.2 Óptica Geométrica

La *Óptica Geométrica (GO)* es un método aproximado aplicable a altas frecuencias, en el que los frentes de ondas son tratados como rayos que representan una onda esférica [11]. Se obvia entonces el comportamiento ondulatorio de los campos electromagnéticos para hacer un estudio del problema en forma de teoría de rayos, que incluye la Ley de Snell para la reflexión de un rayo en una superficie. Con la aplicación de la *GO* se pueden determinar las contribuciones de los campos correspondientes a las ondas incidentes, reflejadas y refractadas de una forma mucho más sencilla que si se aplicase un análisis mediante las ecuaciones de *Maxwell*. *GO* contempla las siguientes contribuciones:

3.2.1 Rayo Directo

Las ondas se propagan en medios que van a estar caracterizados por un índice de refracción n . Estos medio suelen considerarse homogéneos (n constante dentro de un mismo medio), lo que quiere decir que el camino que siga cada rayo entre dos determinados puntos será siempre una línea recta (sin obstáculos). De esta forma, el frente de ondas que representa el rayo en cuestión no sufre ningún mecanismo de propagación adicional, y solamente sufrirá la atenuación con la distancia propia de una onda esférica. Es lo que se denomina situación de visión directa entre transmisor y receptor: *Line of Sight (LoS)*.

El campo electromagnético definido por el rayo directo es:

$$E_{DIR}(r) = E_0 \frac{e^{-jkr}}{r} \quad 3.1$$

donde E_0 es un factor que depende del transmisor, r es la distancia entre el transmisor y el receptor, y k es el número de onda:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad 3.2$$

La expresión se corresponde con el campo propio de una onda esférica, el cual se atenúa inversamente con la distancia entre el transmisor y el receptor. El término exponencial indica la fase de la onda, que depende de la distancia recorrida.

3.2.2 Reflexión

La reflexión se produce cuando una onda incide sobre la superficie que separa dos medios con diferentes propiedades electromagnéticas, representadas por índices de



refracción (n_1 y n_2). Parte de la onda incidente es reflejada, y parte es transmitida al segundo medio. GO permite el cálculo de los campos (rayos) que se reflejan de forma especular en una superficie lisa de geometría cualquiera, basándose en las leyes de Snell para la reflexión. Para ello se define un coeficiente de reflexión, R , que relaciona la onda incidente y la onda reflejada, y que depende de las características eléctricas de la superficie de reflexión (permitividad y conductividad), de la polarización de la onda incidente, del ángulo de incidencia y de la frecuencia de la onda.

Las propiedades electromagnéticas de una superficie cualquiera se caracterizan mediante la definición de una constante dieléctrica compleja relativa:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \epsilon_r' - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} = \epsilon_r' (1 - j \tan \delta_e) \approx \epsilon_r' - j60\lambda\sigma \quad 3.3$$

donde ϵ_r' es la permitividad relativa del medio sobre el que incide la onda, j es la raíz de -1 , σ es su conductividad en Siemens/m, ω es la frecuencia angular, ϵ_0 es la permitividad en el vacío, δ es la tangente de pérdidas y λ es la longitud de onda a la que se propaga la onda en metros.

3.2.2.1 Polarización Soft

También llamada polarización *horizontal* o *TE*, se produce cuando el vector campo eléctrico de la onda incidente es perpendicular al plano de incidencia, definido como el plano que contiene al rayo incidente y al reflejado (según las leyes de Snell para la reflexión, el rayo incidente y el reflejado están contenidos en el mismo plano) (figura 22). El campo magnético asociado a la onda estará contenido en dicho plano, ya que, al considerarse campo lejano, $H \perp E$.

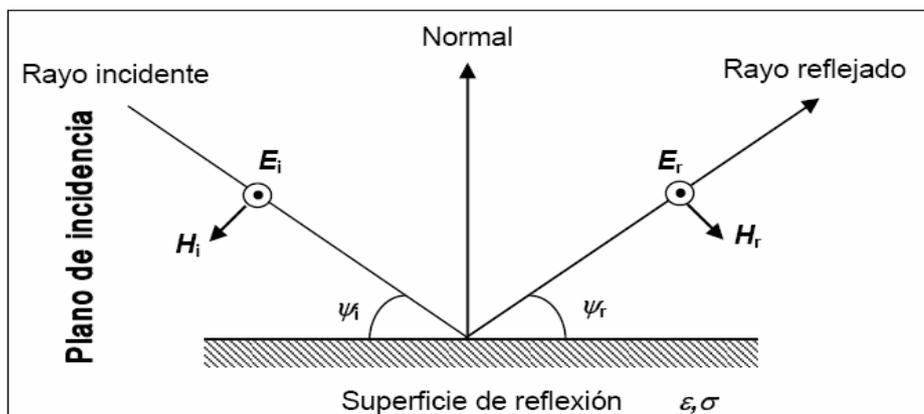


Figura 22: Reflexión-Polarización Soft [11]

El ángulo de incidencia ψ_i coincide con el ángulo de reflexión ψ_r , según la ley de Snell ($\psi_i = \psi_r = \psi$). El coeficiente de reflexión cuando la incidencia es *soft* es:



$$R_{\perp}(\psi) = \frac{\text{sen}\psi - \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \psi}}{\text{sen}\psi + \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \psi}} \quad 3.4$$

3.2.2.2 Polarización Hard

Tiene lugar cuando el vector campo eléctrico de la onda incidente está contenido en el plano de incidencia (figura 23). El campo magnético será, pues, perpendicular al mismo. A esta polarización también se le denomina polarización *vertical* o *TM*.

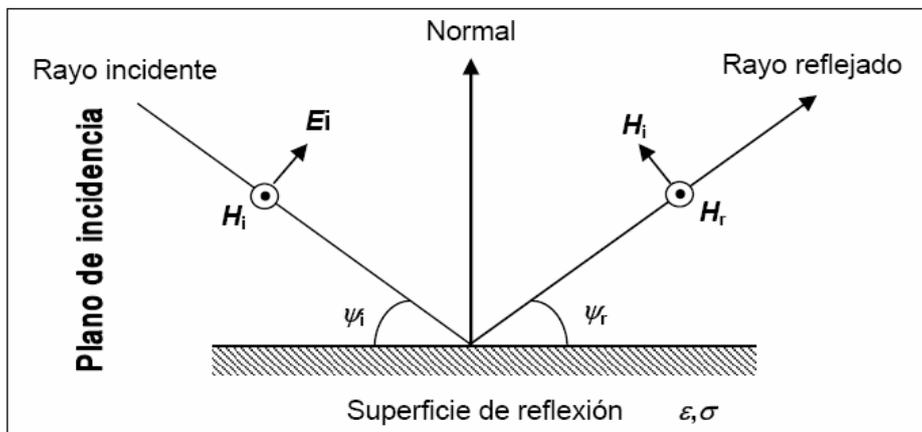


Figura 23: Reflexión-Polarización Hard [11]

El coeficiente de reflexión para una polarización *hard* es:

$$R_{\perp}(\psi) = \frac{\epsilon_r \text{sen}\psi - \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \psi}}{\epsilon_r \text{sen}\psi + \sqrt{\epsilon_r - \cos^2 \psi}} \quad 3.5$$

3.2.2.3 Campo Eléctrico definido por un rayo reflejado

En el caso de que ésta sea una polarización mixta, bastará con descomponer el campo incidente en una componente *soft* y otra *hard*, y así utilizar los coeficientes R_{\perp} y $R_{||}$ según corresponda y por separado, para finalmente sumar vectorialmente las dos soluciones ortogonales obtenidas. La expresión del campo electromagnético asociado a la contribución de una onda reflejada (o rayo reflejado, en *GO*) es la siguiente:

$$E_R(r) = E_0 R \frac{e^{-jkr}}{r} \quad 3.6$$



donde E_0 es un factor que depende del transmisor, k es el número de onda, r hace referencia a la distancia total recorrida por el rayo reflejado y R es el coeficiente de reflexión, dependiendo de si la polarización del campo incidente es *soft* o *hard*. Si se produjesen múltiples reflexiones para una misma onda, el valor de R sería el producto acumulado de cada valor R_i correspondiente a la reflexión número i :

$$R = \prod_i R_i \quad 3.7$$

3.3 Programa Trazador Indoor 3D

Como hemos comentado anteriormente, este software realiza un trazado de rayos en un entorno indoor para sistemas MIMO tradicionales y distribuidos en la frecuencia de WIFI de 2.45Ghz. Una vez realizado este trazado de rayos, obtenemos un campo eléctrico según la posición de las antenas transmisoras y receptoras. Utilizando este campo eléctrico e invocando otros programas, podremos calcular los parámetros más importantes de la caracterización del canal de radiocomunicaciones que deseamos realizar.

Este software está realizado con el programa de análisis matemático MatLab y está dividido en diferentes scripts, que iremos desglosando en este apartado.

Como hemos comentado anteriormente, los mecanismos fundamentales de propagación son la reflexión, la difracción y la difusión. Éste último no se suele tener en cuenta en el trazado de rayos ya que posee un valor muy bajo en comunicaciones móviles, como ya hemos dicho. Y en nuestro caso particular, como realizaremos un estudio teórico en un espacio indoor sin obstáculos, es decir, un espacio vacío, no tendremos en cuenta la difracción. Por lo tanto, como se comprobará en los scripts correspondientes, solo tendremos en cuenta el campo eléctrico del rayo directo y de los rayos reflejados que calcularemos mediante imágenes, como explicaremos en el siguiente apartado.

En el programa principal (el script que invoca al posterior y recibe los resultados de los otros invocados) contiene los parámetros para caracterizar el canal radio:

- Frecuencia: 2.45Ghz. Con el valor de la frecuencia, obtendremos el valor de λ (lambda).
- Valores de permitividad y conductividad: $\epsilon_r=5$ y $\sigma=0.01$.
- Dimensiones del espacio indoor en el que queremos caracterizar el canal radio, en nuestro caso, las dimensiones del laboratorio SICOMO:
 - Anchura: 5.7 metros.
 - Profundidad: 6.6 metros.
 - Altura: 4 metros.

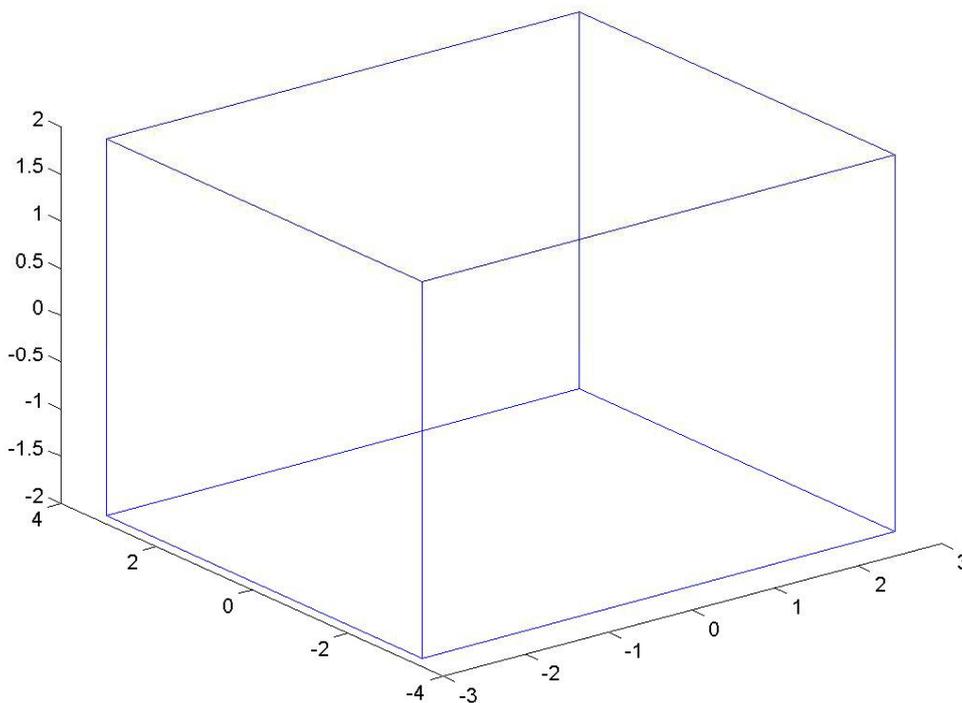


Figura 24: Laboratorio SICOMO

- Número de reflexiones deseadas: en nuestro caso 3.

Previamente a realizar las simulaciones de cada una de las configuraciones, realizamos un estudio de la convergencia del valor de campo eléctrico según el número de reflexiones que se le indicaban al programa. De esta manera se ejecutó el programa con 1, 2, 3 hasta 10 reflexiones, visualizando los valores de campo eléctrico obtenidos, que fueron los siguientes:

Número de Reflexiones	Valor de Campo Eléctrico
1	37.5037
2	37.4337
3	37.4272
4	37.4272
5	37.4272
6	37.4272
7	37.4272
8	37.4272
9	37.4272
10	37.4272

Tabla 2: Campo Eléctrico vs Número de Reflexiones



Como se puede comprobar, a partir de 3 reflexiones, el valor de campo eléctrico converge a un mismo valor, de aquí que se optara por el valor 3 para el número de reflexiones de nuestras simulaciones.

En este programa principal también situamos las antenas transmisoras en el sitio que deseemos, es decir, si estamos simulando un sistema MIMO tradicional, situamos las antenas en una pared juntas, separadas una distancia que variará entre los $\lambda/8$ y lo 2λ ($\lambda/8$, $\lambda/6$, $\lambda/4$, $\lambda/2$, λ , $3\lambda/2$ y 2λ); de esta forma tendremos separadas las antenas unas distancias proporcionales a la longitud de onda.

Si simulamos sistemas MIMO distribuido, pondremos las antenas separadas dentro del espacio cerrado, del laboratorio. En nuestro estudio teórico, tendremos tres opciones diferentes, como se podrán comprobar en el capítulo de resultados, a mitad de cada una de las paredes laterales, separadas una distancia de la mitad de cada una de las paredes laterales, y en cada una de las esquinas del laboratorio.

También situamos cada una de las antenas receptoras por el laboratorio, según si simulamos con 2, 3 ó 4 antenas receptoras. La manera de disponerlas es dividir el espacio indoor en unos cientos de puntos equiespaciados, y centrarlas en estos puntos, de esta manera calcularemos el campo recibido en casi todo el espacio indoor.

Una vez que este programa recibe el campo eléctrico para cada una de las posiciones dentro del espacio indoor, es decir, valores para cada una de las antenas transmisoras y receptoras, realiza un procesado para el cálculo de parámetros más característicos del modelo teórico estudiado:

- En primer lugar, normaliza cada uno de los valores de campo eléctrico recibidos. La normalización se realiza dividiendo el valor de campo eléctrico en cada una de las posiciones de todas las antenas transmisoras y receptoras, entre la raíz cuadrada del módulo de dicho valor dividido por el número de antenas transmisoras y el número de antenas receptoras
- Posteriormente invoca a una función que calcula la capacidad, introduciendo el campo eléctrico normalizado, y un valor de SNR, en nuestro caso 10 en primer lugar y 20 posteriormente. Ambos valores son valores característicos y muy óptimos para realizar las simulaciones.
- Por último, calcula la potencia recibida en cada una de las posiciones anteriores.

Para recibir el campo eléctrico de cada una de las antenas transmisoras y receptoras, según la configuración MIMO que deseemos, este programa principal llama a una función de MatLab (segundo script de nuestro Trazador Indoor 3D), introduciendo los parámetros antes descritos, como frecuencia, dimensiones del laboratorio, posiciones en cada una de las 3 coordenadas de las antenas transmisoras y receptoras, permitividad, número de reflexiones...

En este segundo script, calculamos una tabla de coordenadas de los dipolos imaginarios. Según el número de reflexiones deseadas, se obtendrá un mayor o menor número de imágenes, cuyas coordenadas en 3 dimensiones (en los 3 ejes conocidos) calculará este script según las dimensiones del espacio indoor que deseemos caracterizar.

Es decir, este programa determina cada una de las coordenadas de imágenes generadas a partir de las posibles reflexiones que puedan producirse en el entorno indoor,



que es la base del trazado de rayos, o ray tracing. Cómo se calculan cada una de estas coordenadas se explicará con más detalle en el siguiente apartado.

Para concluir, este programa es el que devuelve al programa principal el campo eléctrico de cada una de las antenas transmisoras y receptoras. Del cálculo de éste se encargan los siguientes scripts.

El tercer script recibe del anterior las coordenadas de los dipolos imaginarios calculados anteriormente, además de la permitividad y las coordenadas de las antenas transmisoras y receptoras, y es el que se encarga de invocar al siguiente script, que calcula el campo eléctrico para cada una de las posibilidades ofrecidas por las imágenes generadas por las posibles reflexiones. Como he dicho antes, esto se verá más detenidamente en el siguiente apartado.

Los dos últimos scripts son los que se encargan verdaderamente de calcular el campo eléctrico, tanto si estamos en situación de campo directo, con sus fórmulas pertinentes, como si nos encontramos en situación de campo reflejado. De esta manera, en ellos introducimos las fórmulas que hemos descrito en los apartados anteriores.

Uno de ellos es el encargado de calcular los ángulos que se producen entre la posición de transmisor y receptor, utilizando fórmulas trigonométricas. Cuando nos referimos a posición entre transmisor y receptor, nos referimos los ángulos que se producen entre a las antenas receptoras y las posiciones de las transmisoras cuando realizamos el estudio de imágenes generadas por las reflexiones.

Estos aplican las fórmulas según convenga, es decir, según el número de reflexiones, el ángulo entre transmisor y receptor, según la polarización sea horizontal o vertical, etc.

Sobre este último punto, como hemos dicho en capítulos anteriores, tenemos dos opciones de polarización: la polarización soft (horizontal) y la polarización hard (vertical), con fórmulas distintas para el coeficiente de reflexión. Según la opción que deseemos simular, este programa tiene programadas ambas fórmulas y las aplica convenientemente:

```
if(ipol==0); %Vertical
    rte=(cox-tx1)/(cox+tx1);
    rtm=(er.*coy-ty1)/(er.*coy+ty1);
    rtz=(coz-tz1)/(coz+tz1);
    sit=siy;
    sfi=six;
else; %Horizontal
    rte=(coy-ty1)/(coy+ty1);
    rtm=(er.*cox-tx1)/(er.*cox+tx1);
    rtz=(er.*coz-tz1)/(er.*coz+tz1);
    sit=six;
    sfi=siy;
end;
```



Para terminar, como también hemos comentado, realiza la multiplicación conveniente entre coeficientes de reflexión diferentes para una misma onda, devolviendo finalmente el valor de campo eléctrico calculado con la fórmula conocida:

$$evp = v * \exp(-j * ak * r) / r \quad 3.8$$

donde v es el coeficiente de reflexión convenientemente calculado; r es la distancia entre transmisor y receptor (o coordenadas de las imágenes); y ak es $2 * \pi * \text{frecuencia} / \text{velocidad de la luz}$.

A grandes rasgos, este Trazador Indoor 3D, calcula para la posición de cada una de las antenas receptoras, y cada una de los dipolos imágenes de las antenas transmisoras, el campo eléctrico. Si estamos en el caso de rayo directo, directamente utilizamos las coordenadas de las antenas transmisoras y receptoras, mientras que si nos encontramos en el caso de rayos reflejados, utilizamos las coordenadas de antenas receptoras y las coordenadas de los dipolos imaginarios calculadas en el segundo script. La forma de coger dichas coordenadas para cada una de las imágenes, es tarea del tercer script.

Una vez que tenemos calculado el campo eléctrico para cada una de las antenas transmisoras y receptoras, podemos pasar a calcular los parámetros que nos permitirán caracterizar el canal de radiocomunicaciones.

De esta manera tenemos un programa realizado en MatLab que nos caracteriza el canal radio en la banda de frecuencias WIFI (2.45 Ghz) en un entorno indoor, como el laboratorio SICOMO, de una forma totalmente teórica, teniendo en cuenta solamente los rayos directo y reflejados, y con la distribución de antenas transmisoras y receptoras que deseemos dentro de nuestro espacio cerrado. En nuestro caso, sistemas MIMO tradicional y distribuido.



3.4 Coordenadas de los dipolos imaginarios

Para determinar cada una de las coordenadas de imágenes generadas a partir de las posibles reflexiones que puedan producirse en el entorno indoor, utilizamos el siguiente algoritmo programado en el segundo script de nuestro Trazador Indoor 3D:

```
%tabla de coordenadas de los dipolos imaginarios
for n=0:nref+1;
    if(rem(n,2)==0);
        txp(n+1)=n*a+x0;
        typ(n+1)=n*b+y0;
        tzp(n+1)=n*c+z0;
    else;
        txp(n+1)=(n)*a-x0;
        typ(n+1)=(n)*b-y0;
        tzp(n+1)=(n)*c-z0;
    end;
end;
for n=1:nref;
    if(rem(n,2)==0);
        txn(n)=-n*a+x0;
        tyn(n)=-n*b+y0;
        tzn(n)=-n*c+z0;
    else;
        txn(n)=-n*a-x0;
        tyn(n)=-n*b-y0;
        tzn(n)=-n*c-z0;
    end
end;
```

Donde x_0 , y_0 y z_0 son las coordenadas de la antena receptora que estamos simulando, $nref$ es el número de reflexiones y a , b y c son las dimensiones del espacio indoor.

Como se puede observar, si $nref$ es igual a 0, es decir, ninguna reflexión, solo tenemos de coordenadas posibles las coordenadas de la antena transmisora sin ninguna reflexión, por lo que solo tendremos en cuenta para calcular el campo eléctrico el rayo directo.



El siguiente gráfico se describe la situación para una reflexión:

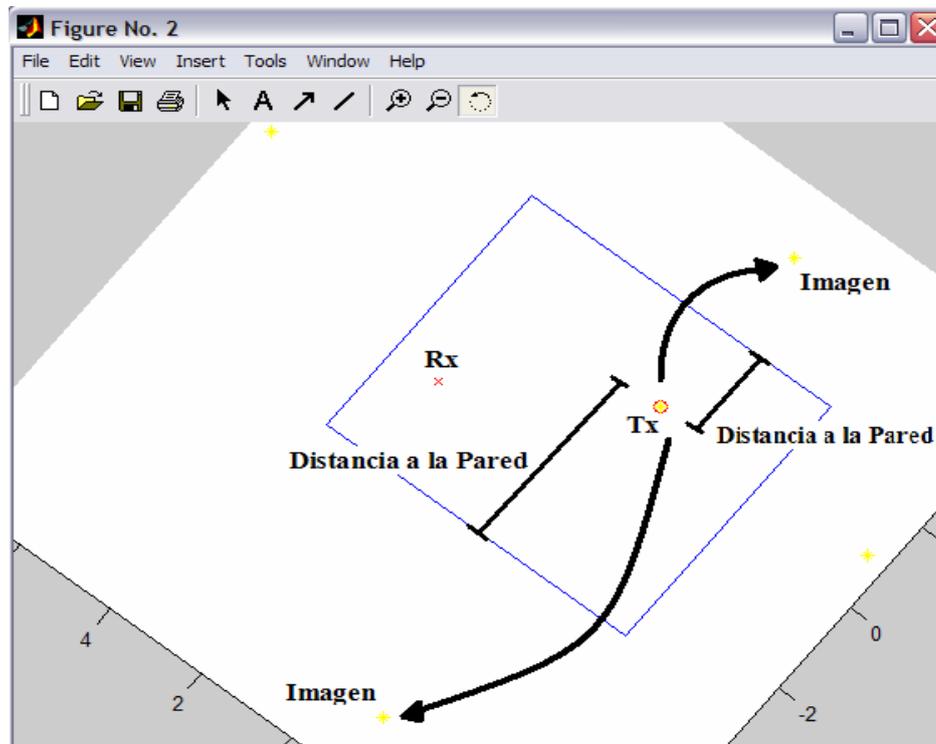


Figura 25: Creación de dipolos imágenes

En el gráfico tenemos una vista desde arriba del laboratorio SICOMO, con solo una antena transmisora y una receptora, y podemos observar como se dibujan dos imágenes de la transmisora, pertenecientes a un solo eje, en este caso el eje X. Se observa como la distancia del transmisor a la pared de su derecha (pared eje X positiva) es la misma que dicha pared hasta la coordenada de la imagen calculada.

De esta manera, conforme vayan aumentando las reflexiones se irán produciendo más imágenes siempre respetando las distancias entre transmisor y pared del eje correspondiente.

Como podemos observar y es obvio, tenemos que tener en cuenta la distancia a las paredes para realizar las reflexiones. Como estamos en el caso de 3 dimensiones, tendremos que tener en cuenta 6 distancias: las positiva y negativa para cada pared reflejada.

Si la distancia a la pared es menor, la distancia a su imagen será menor, por lo tanto si la distancia es mayor, su imagen estará más alejada. Estas imágenes que se van construyendo para cada eje (en nuestro caso que son 3 dimensiones, tanto para el eje X, eje Y e eje Z, es decir, para el ancho, la profundidad y la altura del laboratorio), hasta que al final disponemos de las 27 contribuciones posibles, 26 de ellas de las rayos reflejados.

Lo que hace el tercer script es ir llamando a los programas que calculan el campo eléctrico introduciéndole a ellos las coordenadas de la imagen de la antena transmisora y las coordenadas de la antena receptora. Por lo tanto, lo que realmente realiza este script, es



coger cada una de las coordenadas que el anterior programa le pasa y ordenarlas para así formar todas las imágenes. De esta manera, el programa cogerá y ordenará en primer lugar solo la “imagen” cuando no hay reflexiones, es decir, las mismas coordenadas que la antena transmisora.

A continuación cogerá la combinación de coordenadas de las imágenes en el eje X positivas junto a las positivas y negativas del eje Y y Z, sin coger las coordenadas propias del transmisor, así hasta coger todas las combinaciones posibles de coordenadas de las imágenes que el script anterior ha calculado según el número de reflexiones y las dimensiones del entorno indoor. Para cada combinación es para quien los scripts posteriores irán calculando los ángulos y, en definitiva, el campo eléctrico buscado.

A continuación vamos a poner un ejemplo para visualizar lo explicado. Situaremos la antena receptora por el laboratorio SICOMO con coordenadas:

```
xr=-1;  
zr=c/2-1; % c es la dimensión de profundidad del laboratorio  
yr=0;
```

Y la antena receptora en medio del laboratorio, es decir, con coordenadas:

```
xt=0;  
yt=0;  
zt=0;
```

Si le decimos al programa que no hay reflexiones, $n_{ref}=0$, entonces la única “imagen” que nos dibuja es la propia coordenada de la antena transmisora, es decir, a la hora de calcular el campo eléctrico, solo trazaría un rayo: el rayo directo.

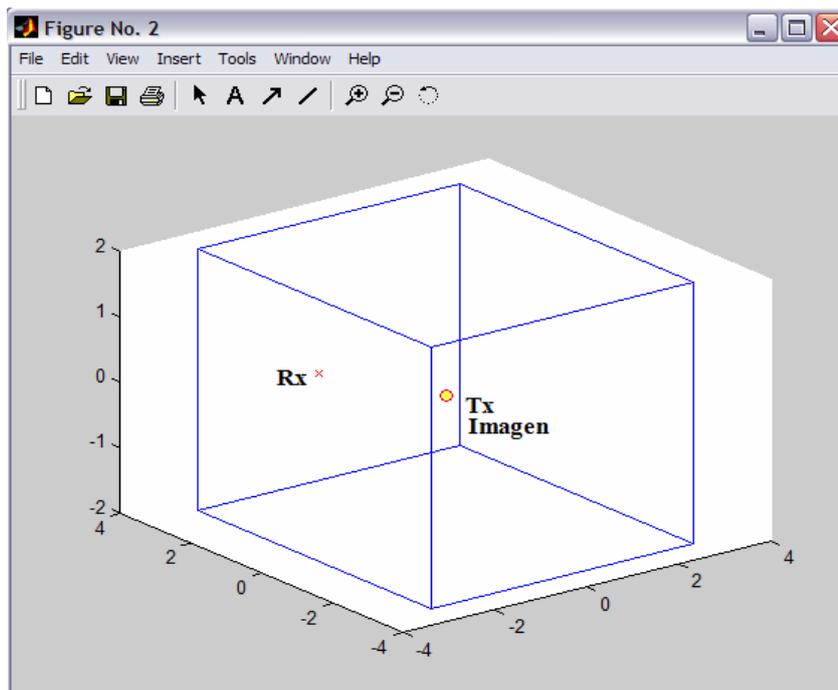


Figura 26: Laboratorio SICOMO con Antenas Tx y Rx para 0 reflexiones



Visto desde arriba:

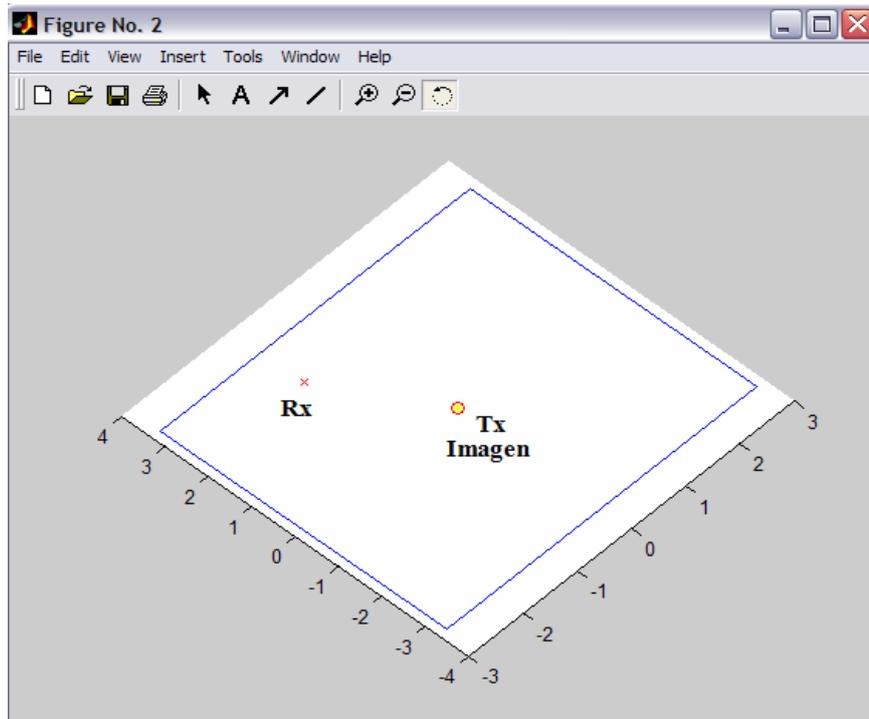


Figura 27: Laboratorio SICOMO vista superior con Antenas Tx y Rx para 0 reflexiones

Ahora simulamos el programa con 1 reflexión, es decir, $nref=1$; el resultado es el siguiente:

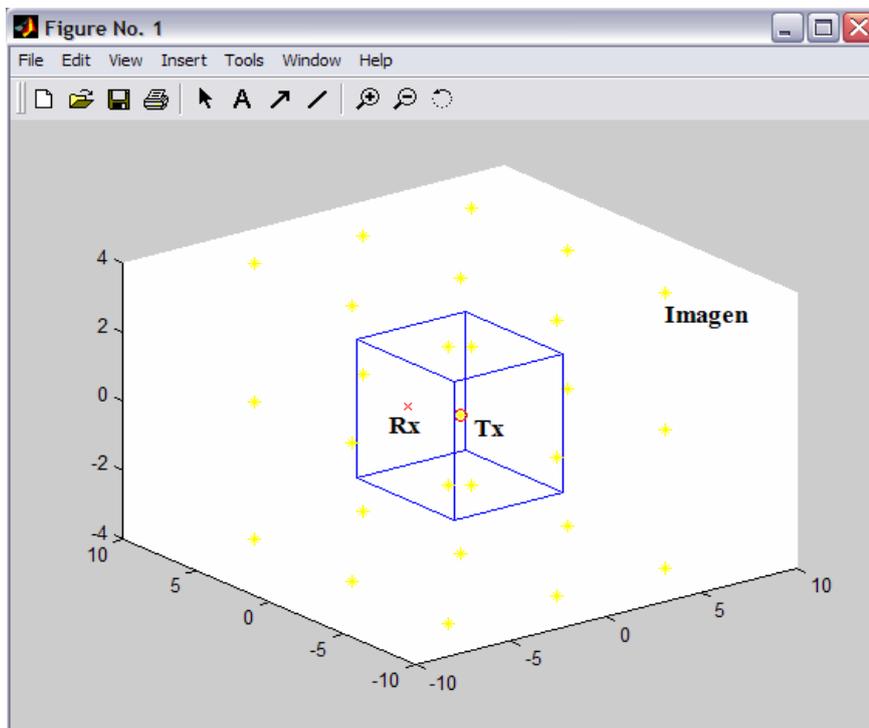


Figura 28: Laboratorio SICOMO con Antenas Tx y Rx para 1 reflexión



Ahora podemos observar como se crean las 27 imágenes (dibujadas con asteriscos amarillos) para cada uno de los ejes en sentido positivo y negativo, respetando las distancias entre el transmisor y cada una de las paredes reflejadas.

Como ejemplo, si nos fijamos en la imagen de la figura con nombre, podemos observar que se trata de la imagen que tiene distancia con los tres ejes, en este caso, X positivo, Y positivo y Z negativo.

Habrán imágenes que solo tienen en cuenta la distancia con el eje X negativo, otra solo con el eje Y positivo, otra con el eje Z positivo y el eje X positivo, etc.

En este mismo caso, veamos el laboratorio, antenas y las imágenes vistas desde arriba:

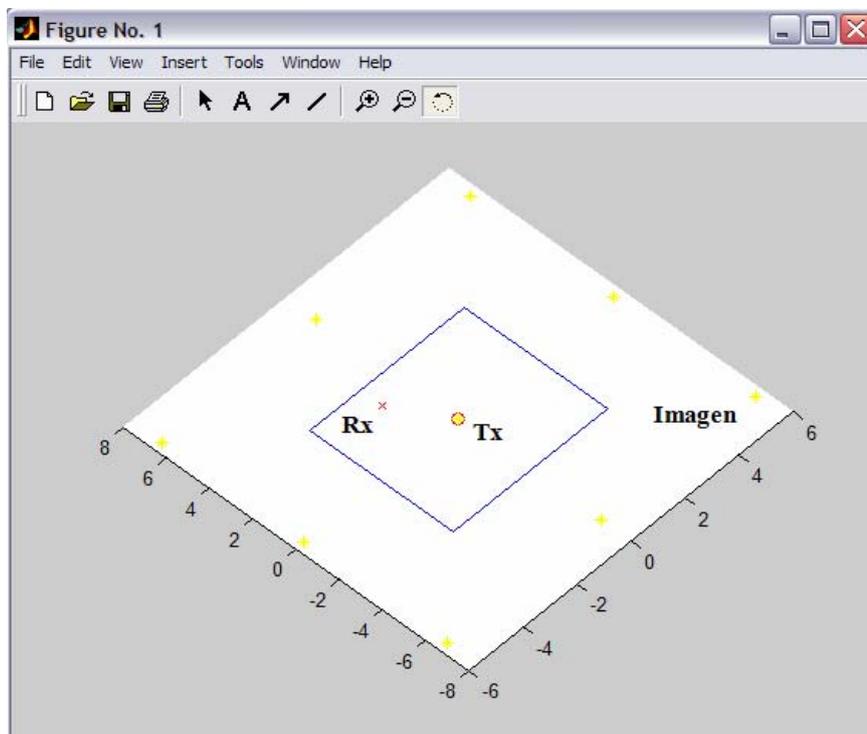


Figura 29: Laboratorio SICOMO vista superior con Antenas Tx y Rx para 1 reflexión



Observemos ahora el caso para 2 reflexiones, es decir, $n_{ref}=2$:

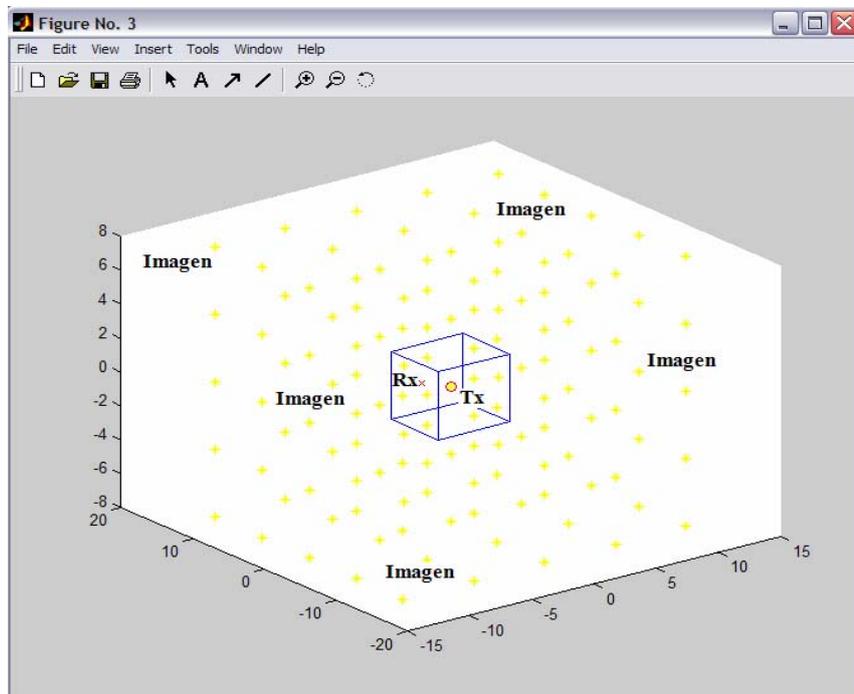


Figura 30: Laboratorio SICOMO con Antenas Tx y Rx para 2 reflexiones

Como observamos, el número de imágenes aumenta considerablemente, y no de una forma lineal, sino casi exponencial. De esta forma vemos que el programa calcula el campo eléctrico en muchos puntos, debidas al mayor número de reflexiones en cada una de las paredes del entorno indoor.



Si lo vemos desde arriba:

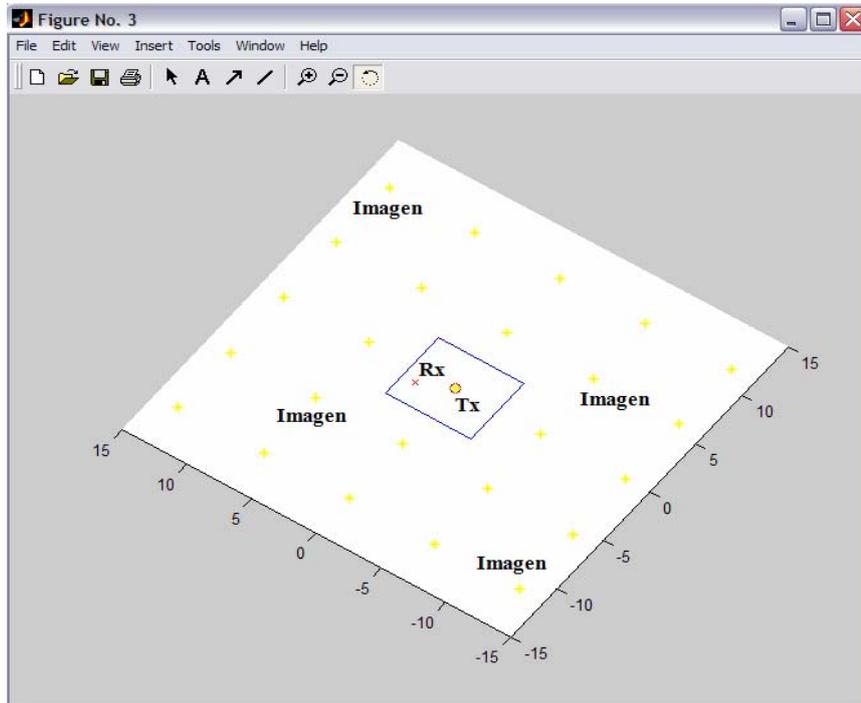


Figura 31: Laboratorio SICOMO vista superior con Antenas Tx y Rx para 2 reflexiones

Si lo vemos desde delante, eje X:

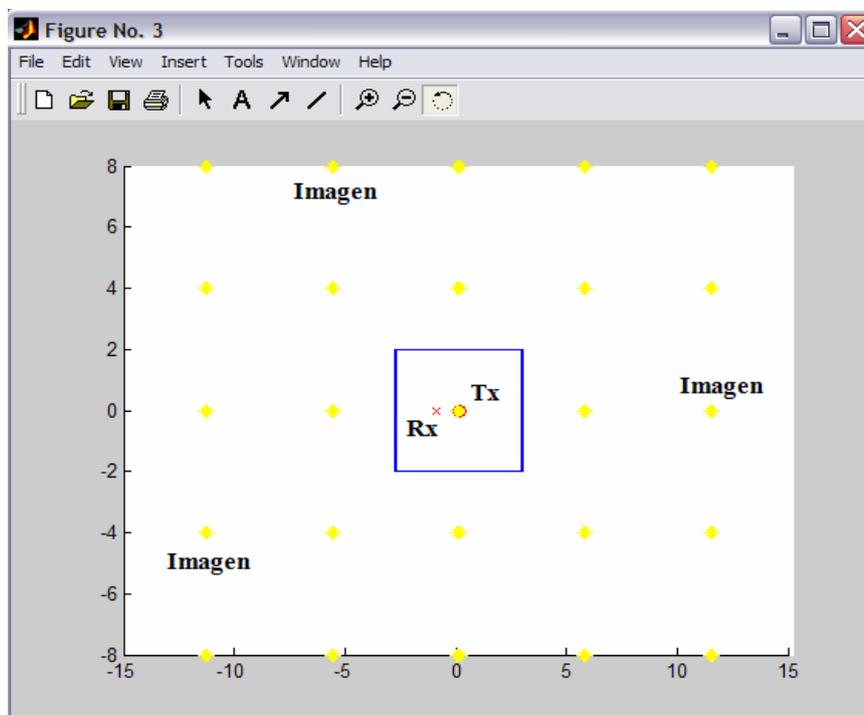


Figura 32: Laboratorio SICOMO vista frontal con Antenas Tx y Rx para 2 reflexiones



Omitimos poner la gráfica para $n_{ref}=3$, porque el número de imágenes aumenta en demasía y resulta muy complicado observar algo legible en ella.

En el Anexo 1 mostraremos otro ejemplo de creación de los dipolos imágenes para otra distribución diferente de antenas transmisoras y receptoras.

Para terminar, sólo comentar que los resultados obtenidos de ejecutar el *Trazado Indoor 3D* para los modelos que deseamos simular teóricamente, se encontrarán en el capítulo 5 de este proyecto, donde se podrán comprobar que con las diferentes gráficas y parámetros obtenidos, caracterizaremos el canal de radiocomunicaciones para un espacio indoor en 3 dimensiones mediante el trazado de rayos.



Capítulo 4. Campaña de Medidas

Como ya se ha comentado en capítulos anteriores, el análisis de la función de transferencia del canal radio (matriz **H**) es una de las piezas claves para la implementación de un sistema de comunicaciones móviles en un entorno determinado. En este proyecto se ha seleccionado un entorno cerrado (indoor), como el laboratorio de investigación SICOMO, para sistemas MIMO tradicionales y distribuidos. I.

Nos servirá para realizar de una forma experimental lo que en el apartado anterior hemos simulado de forma teórica. De esta manera, podremos realizar en el capítulo siguiente una comparación teórico experimental del tema a estudiar: sistemas MIMO tradicionales y distribuidos en un entorno indoor en la banda de frecuencias de WIFI.

Este apartado del proyecto está dividido en diferentes sub-apartados, en los que realizaremos una descripción del entorno de medidas, los equipos de medidas utilizados, la metodología...

4.1 Entorno de medidas

Nuestro entorno de medidas, como se ha ido escribiendo a lo largo del proyecto, es un entorno cerrado (indoor), y el lugar escogido ha sido el laboratorio de investigación SICOMO (Sistemas de COmunicaciones MÓviles). Está situado en la planta sótano del edificio de la E.T.S.I.T., el Antiguo Cuartel de Antiguones.

La distribución del laboratorio se muestra en la siguiente imagen:

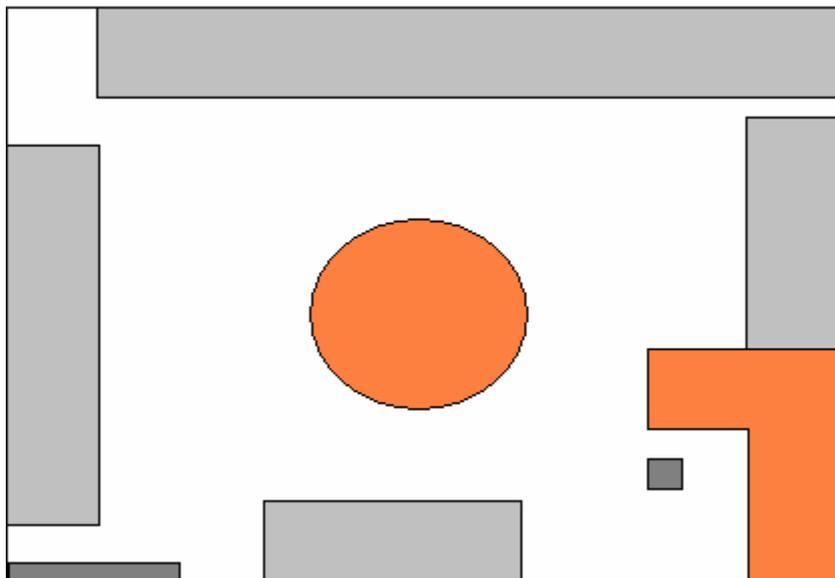


Figura 33: Entorno de medidas-> Laboratorio SICOMO vista superior



Como podemos observar, el laboratorio tiene forma rectangular y cuyas dimensiones fueron introducidas en el capítulo anterior, y que aquí vamos a recordar:

- Anchura: 5.7 metros.
- Profundidad: 6.6 metros.
- Altura: 4 metros.

En el laboratorio se encuentran varias mesas y sillas, ordenadores de mesa, armarios, estanterías... y una viga de hormigón de forma cuadrada, dibujada de color gris oscuro en la imagen. La otra zona rectangular dibujada en gris oscura es la puerta que da acceso al pasillo del sótano del edificio, como ya hemos dicho.

Conviene resaltar que las medidas fueron realizadas sin encontrarse en el interior del laboratorio ninguna persona, para intentar acercarse este estudio experimental al estudio teórico del trazador de rayos visto anteriormente.

Las antenas transmisoras se situaron en diferentes puntos del laboratorio cerca de las paredes, según los casos que veremos a continuación, y las antenas receptoras se pusieron en varios puntos a lo largo del laboratorio, exactamente 19, realizando de esta manera 19 posiciones de medidas, para cada configuración de antenas transmisoras.

4.2 Configuraciones de Posiciones de las Antenas

Como hemos ido comentando a lo largo del proyecto, deseamos caracterizar el canal de radiocomunicaciones para los sistemas MIMO tradicionales y distribuidos. De esta manera, hemos realizado 6 diferentes configuraciones en la campaña de medidas, situando las antenas transmisoras en lugares determinados para conseguir los objetivos de este proyecto.

Por lo tanto, vamos a dividir las configuraciones en dos tipos, las de MIMO tradicionales y las de MIMO distribuidas.

Empecemos por las configuraciones de MIMO distribuidas:

- Antenas transmisoras situadas a la mitad de las paredes del laboratorio:
Podemos observar en la siguiente imagen como estaban situadas las antenas transmisoras:

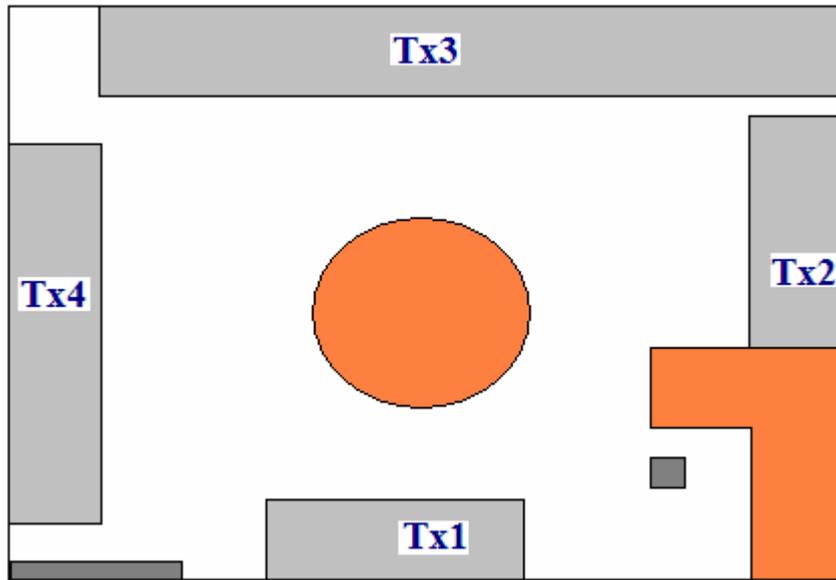


Figura 34: Configuración Antenas Tx Distribuidas en medio de las paredes

- Antenas transmisoras situadas en las esquinas del laboratorio:

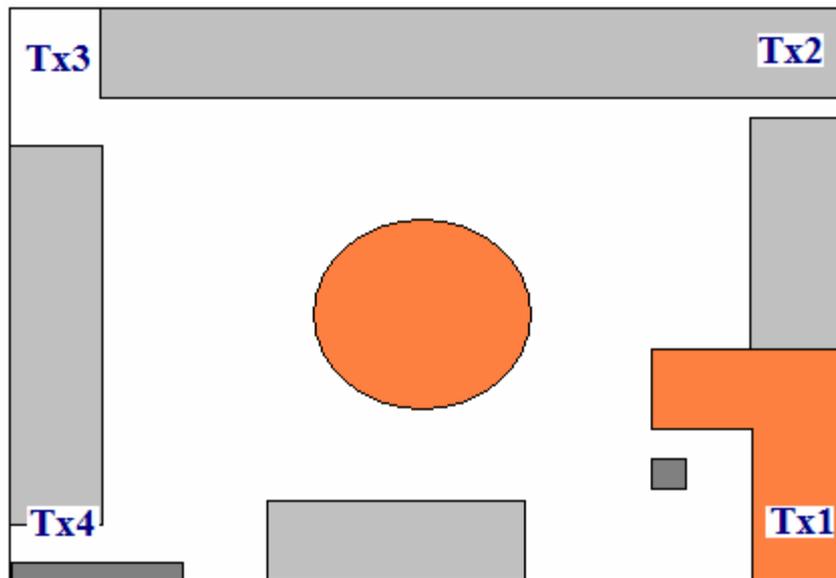


Figura 35: Configuración Antenas Tx Distribuidas en las esquinas



- Antenas transmisoras situadas a una distancia respecto de la mitad de las paredes del laboratorio:

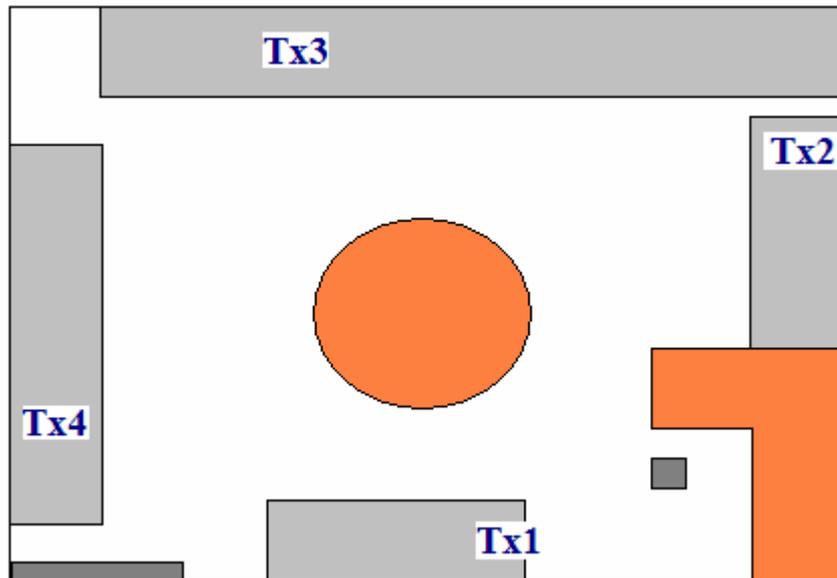


Figura 36: Configuración Antenas Tx Distribuidas a una distancia del medio de las paredes

Nos quedan por mostrar las tres configuraciones restantes que pertenecen a un sistema MIMO tradicional. En este caso, la única diferencia entre ellas es la distancia entre las antenas transmisoras situadas en una misma pared:

- Separadas 2λ .
- Separadas λ .
- Separadas $\lambda/2$.



Se muestra en la siguiente imagen en que pared del laboratorio están situadas las antenas:

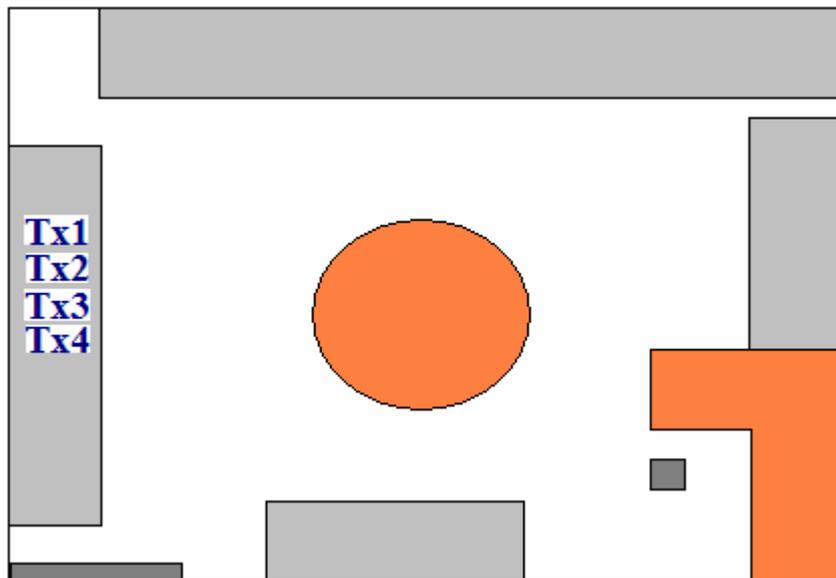


Figura 37: Configuración Antenas Tx en la misma pared

Ya hemos observado gráficamente en que lugar del laboratorio se encuentran las antenas transmisoras según queramos medir sistemas MIMO tradicional ó distribuido.

Queda por mostrar en qué lugares del laboratorio se situaban las antenas receptoras. Como hemos dicho anteriormente, situamos las antenas receptoras en 19 puntos o posiciones del laboratorio, separadas entre sí una distancia igual a 2λ , calculando para cada posición una medida (realmente haremos más de una medida en cada posición ya que el software de medidas nos permite realizar para cada posición unas cuantas repeticiones, las que deseemos).



Los puntos o posiciones en los que situamos las antenas receptoras se muestran en la siguiente imagen del laboratorio SICOMO y vienen numerados de la siguiente forma:

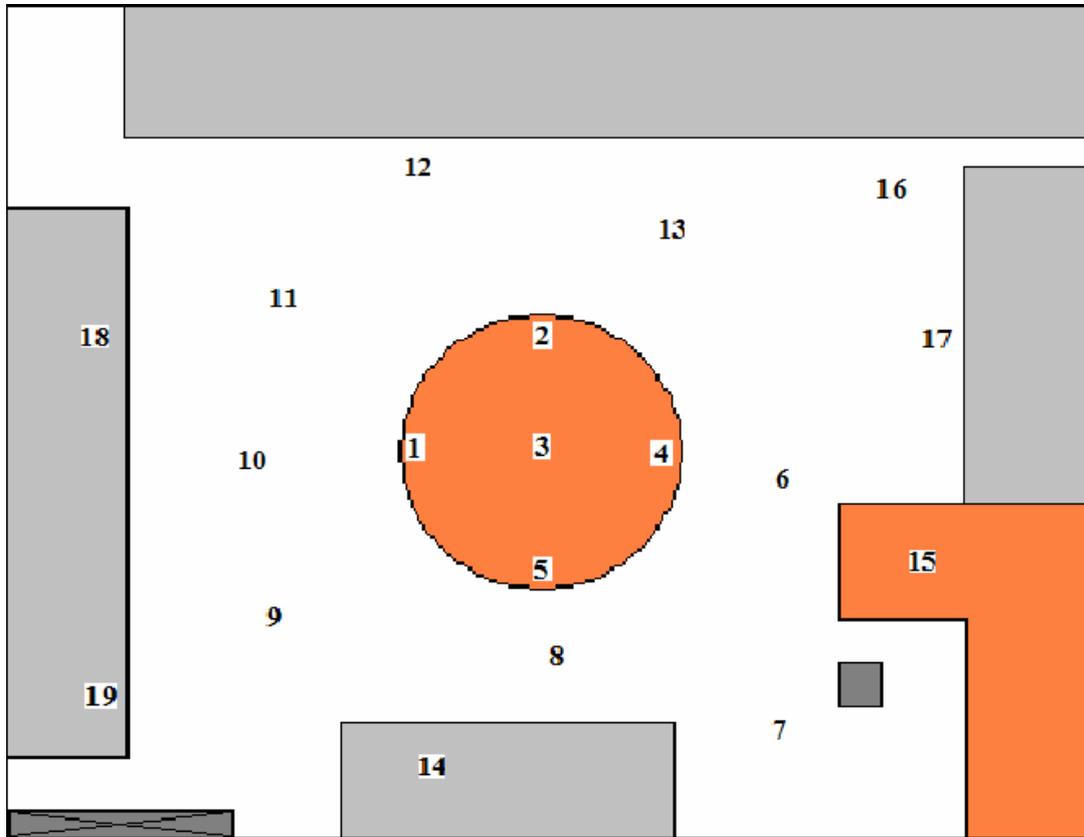


Figura 38: Posiciones de las Antenas receptoras en el laboratorio Sicomo

Por último, como se ha observado y además se hará hincapié en capítulos posteriores de resultados y conclusiones, hemos utilizado una configuración MIMO 4×4 , es decir, haremos medidas, al igual que simulamos con el Trazador Indoor 3D, con 4 antenas transmisoras y 4 antenas receptoras.

4.3 Equipos de medidas

En primer lugar, vamos a mostrar el sistema de medidas que utilizamos para la caracterización del canal radio. En la siguiente figura podemos ver la estructura básica del sistema que hemos utilizado para realizar las medidas:

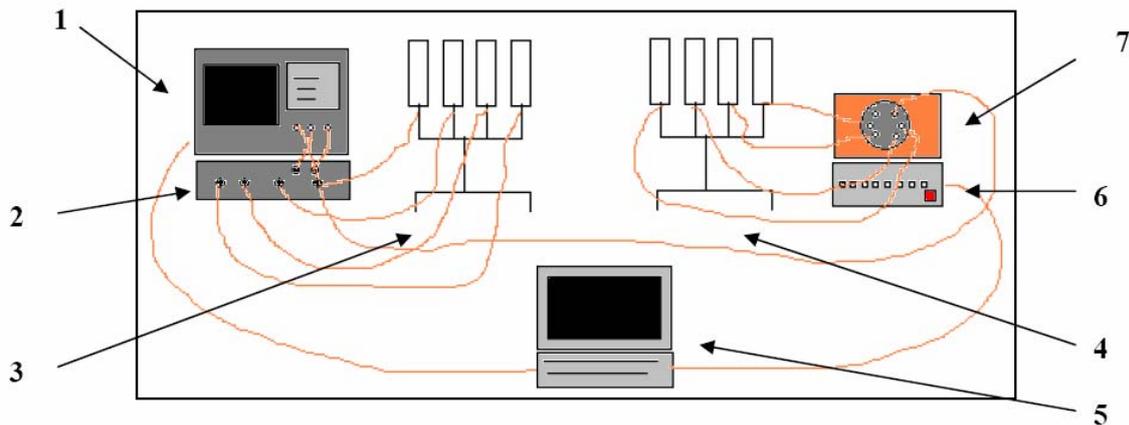


Figura 39: Sistema de Medidas

Los diferentes elementos que podemos observar que existen en nuestro sistema, y que en los siguientes apartados vamos a describir, son los siguientes:

1. Analizador de Redes ENA.
2. Multipuerto.
3. Antenas Receptoras.
4. Antenas Transmisoras.
5. Ordenador Portátil.
6. Controlador.
7. Conmutador.

Como hemos podido observar en la figura anterior el sistema que hemos dibujado es para el caso de utilizar un sistema con cuatro antenas transmisoras y cuatro antenas receptoras, que es el sistema MIMO 4x4 que deseamos medir en el entorno indoor.

4.3.1 Analizador de Redes ENA E5071B y Ampliación Multipuerto E5091A

Este analizador de Redes de la compañía Agilent Technologies dispone de tres puertos para el análisis [10]. Para su control dispone del sistema operativo Windows NT. Por su parte trasera dispone de numerosos puertos para conectar un ratón, un teclado, puertos USB, puerto de red...



El primero de sus puertos frontales se utiliza en el sistema como fuente de señal, proporcionando una señal de un ancho de banda especificado por el usuario y una potencia que en nuestro caso será de 0dBm para evitar la posible saturación de los elementos conectados a el.

Para aumentar el número de entradas de análisis se amplía con un sistema multipuerto. A este se le conectan los puertos 2 y 3 del analizados dividiéndose estos en R2+, R3+ y R2-, R3- respectivamente. La selección del puerto de análisis en este caso se selecciona mediante el analizador conectado a la ampliación mediante un puerto USB. El análisis en los puertos se realiza alternando temporalmente cada pareja de ellos comportándose como si se encontraran de manera totalmente aislada. A la salida de cada uno de ellos se conecta una antena que realizará la función de elemento receptor del sistema.

Con este analizador de redes, vamos a ser capaces de medir la magnitud y la fase de la señal recibida de forma que a partir de estas dos medidas podremos obtener otros parámetros, como hemos comentado a lo largo del proyecto.



Figura 40: Analizador de redes ENA y Ampliación Multipuerto

En la siguiente figura se observa una captura de imagen de lo que es la pantalla principal del ENA en la que podremos ver la magnitud y fase de la señal recibida por las antenas:



Figura 41: Ventana Principal del ENA: Amplitud y Fase de las Señales

En esta figura podemos apreciar ocho ventanas en las que estamos viendo los parámetros S_{21} y S_{31} . Como vemos, las ventanas se dividen en 4 filas y 2 columnas, la forma de observar correctamente las ventanas es la siguiente:

- 1ª fila → Transmisor 1
- 2ª fila → Transmisor 2
- 3ª fila → Transmisor 3
- 4ª fila → Transmisor 4

- 1ª columna → Receptores 1 y 3
- 2ª columna → Receptores 2 y 4

Por ejemplo, si queremos ver el canal SISO correspondiente al enlace Tx3-Rx2 deberíamos situarnos en la ventana correspondiente a la tercera fila y la segunda columna y dentro de esa ventana elegiríamos el parámetro S_{21} , mientras que si quisiéramos observar el enlace Tx2-Rx3 deberíamos situarnos a la ventana correspondiente a la segunda fila y la primera columna y dentro de esa ventana elegiríamos el parámetro S_{31} .

En la figura 39 y 40 también podemos ver varios botones que también hemos utilizado para la campaña de medidas. Accediendo a esos botones, podemos cambiar el ancho de banda intermedio, la potencia de salida, el formato de presentación de medidas, el tipo de calibración, etc.

A continuación veremos las principales funciones que hemos utilizado en la toma de medidas [10]:

- Botón **Measurement**
 - Este botón se utiliza principalmente para poder elegir entre el parámetro S_{21} y el parámetro S_{31} .
- Botón **Format**
 - Lo utilizaremos para cambiar el formato de representación de medidas.



- Botón **Scale**
 - Con este botón podremos cambiar la escala de medidas así como el valor de referencia.
- Botón **Average**
 - Aquí podremos cambiar el número de medidas que realizará el ENA automáticamente en una misma posición para después promediarlas.
- Botón **Calibration**
 - En este botón podremos acceder a calibrar el sistema.
- Botón **Trigger**
 - Con este botón podemos acceder al trigger para habilitarlo o deshabilitarlo.

Una vez terminada una campaña de medidas los datos almacenados en el disco duro se extraen para el análisis mediante un puerto USB que se encuentra en la parte frontal.

4.3.2 Antenas AIR-ANT2506

Las antenas son los dispositivos encargados de transmitir y de recibir la señal radioeléctrica para su posterior procesado. Se trata de antenas omnidireccionales de forma que radian por igual en todo el espacio. Es lógico pensar que las antenas sean omnidireccionales y no directivas ya que para un sistema celular formado por antenas directivas, sólo tendríamos cobertura en aquellas zonas que caigan dentro del lóbulo principal de radiación de la antena. Su aspecto es el siguiente:



Figura 42: Antena



Sus características son las que se muestran a continuación [10]:

Frequency Range	2.4-2.83 Ghz
VSWR	Less than 2:1, 1.5:1 Nominal
Gain	5.2dBi
Polarization	Vertical
Azimuth 3dB BW	Omnidirectional 360 degrees
Elevations Plan (3dB BW)	50 degrees
Antenna Conector	RP-TNC
Dimensions (HxW)	11.5 x 1.125 in.
Mounting	Mast mount-indoor/outdoor

Tabla 3: Características de las Antenas

4.3.3 Conmutador 87406B y Controlador 11713A



Figura 43: Conmutador de Señal

El conmutador de estado sólido de Agilent Technologies utilizado dispone de 6 puertos para la selección de señal. En nuestro caso se ha configurado de tal manera que usamos el puerto 6 como entrada de señal, y los puertos 1 hasta 4 para la salida de señal. Si se quiere ampliar el sistema a más de 4 sistemas radiantes a la vez se puede utilizar la salida número 5 para incorporar otro conmutador. Algunas características y esquemas del dispositivo se presentan a continuación:

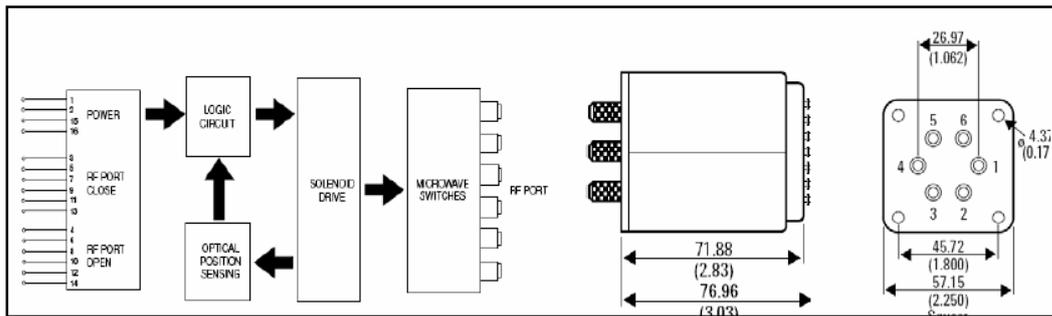


Figura 44: Esquema del conmutador de señal [10]

Para el control del conmutador utilizamos un controlador de la misma compañía. Este elemento tiene dos formas de control, de forma local mediante la pulsación de los botones correspondientes a cada salida, o de forma remota mediante un puerto GPIB que se encuentra en su parte trasera que se conecta a un ordenador portátil mediante un conector USB.

Este dispositivo presenta dos grupos de cuatro botones, X e Y, lo que indica que es capaz de controlar dos conmutadores simultáneamente. El cable del puerto X se conecta al conmutador de estado sólido para configurar el dispositivo como ya se indicó.



Figura 45: Conmutador y Controlador del sistema de medidas

4.3.4 Ordenador Portátil

El ordenador portátil es el cerebro de todo el sistema ya que es el encargado de dar todas las órdenes concernientes a la toma de medidas como puede ser la indicación al ENA del momento en tomar una medida de la señal, en qué instantes hacer la conmutación de antenas, etc.

En la siguiente imagen se muestra el ordenador portátil utilizado para el control de todo el sistema de medidas. Se comunica con el conmutador por medio de un puerto USB a GPIB y con el analizador de redes por medio de una tarjeta de red y un cable de red



cruzado. Este ordenador tiene instalado el software capaz de automatizar la realización de medidas, realizado por un alumno de la UPCT como proyecto final de carrera.



Figura 46: Ordenador Portátil

4.3.5 Cables

- **Cables**

Los cables utilizados para el montaje del sistema han sido los siguientes [9][10]:

- Latiguillos de 20 centímetros
 - Son dos cables usados para conectar la salida del ENA con la entrada del conmutador. Las pérdidas de este cable están en torno a 0.5 – 1 dB.
- Cable de radiofrecuencia de 50 metros
 - Es un cable usado para poder separar físicamente el transmisor del receptor. Las pérdidas de este cable son de unos 50 dBs.
- Cables de antenas
 - Son cables usados para conectar las antenas con el conmutador y con el ENA. Sus pérdidas están en torno a 1 dB.



Figura 47: Tipos de Cables



Como vemos en la figura 46, estos son los 3 tipos de cables que hemos utilizado. En la izquierda podemos ver los latiguillos de 20 cm., en el centro vemos los cables de antenas mientras que a la derecha vemos el cable de radiofrecuencia de 50 m.

- **Conectores y transiciones**

Sirven como puente de enlace entre conectores incompatibles entre sí. En la siguiente figura se muestran todos los que hemos utilizado:



Figura 48: Tipos de Conectores

En la figura 47 vemos los distintos conectores que hemos utilizado para poder conectar entre sí todos los aparatos. La transición de la izquierda se usa para conectar los cables de antenas con las antenas. Tanto el conector del centro como de la derecha lo usamos para conectar la salida del ENA con el latiguillo de 20 cm y con los cables de antenas.

4.4 Metodología

En este apartado describiremos paso a paso la metodología utilizada para realizar las medidas, desde la calibración de los cables, pasando por la toma de medidas hasta obtener el archivo de medidas que obtenemos del analizador de redes.

Como hemos dicho en apartados anteriores, realizaremos medidas para cada configuración de antenas transmisoras, según queramos medir MIMO tradicional o MIMO distribuido y para cada punto o posición de las antenas receptoras.

Por lo tanto, en cada campaña de medidas, situamos las 4 antenas receptoras en uno de los 19 puntos escogidos en el laboratorio y ponemos las antenas transmisoras en una de las configuraciones estudiadas.

4.4.1 Calibración

Todos los componentes de cualquier sistema de medidas introducen pérdidas simplemente por el hecho de estar presentes, por este motivo antes de realizar cualquier medida se debe comprobar que todas estas pérdidas se compensan correctamente, es decir, que el circuito esta calibrado.

Para calibrar nuestro sistema realizamos el siguiente montaje:

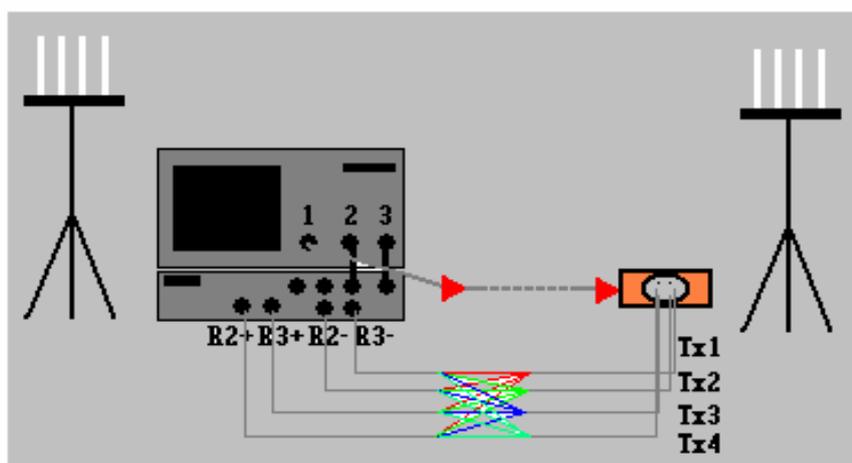


Figura 49: Montaje de Calibración

El analizador E5071B permite realizar diferentes tipos de calibración, en nuestro caso vamos a realizar el llamado “*Calibrate Thru*”.

Para anular las pérdidas por este sistema se debe cerrar el circuito, conectando entre sí los cables que unen el conmutador de estado sólido con las antenas transmisoras y los que unen las antenas receptoras al analizador, dejando sólo fuera del sistema los dos juegos de antenas.



Las pérdidas en los cables de conexión de las antenas y las ganancias de las mismas se han considerado iguales para este análisis, si se quiere realizar la calibración de una manera mas rigurosa incorporándolas al montaje se debe disponer de una cámara anecoica.

Los pasos que hemos realizado son los siguientes:

1. En primer lugar, hay que activar una de las ventanas del analizador de redes y poner el estado del *trigger* de esa ventana en *continuous*, es decir, en el estado para recibir datos, mientras que las otras ventanas deben estar en *hold*, es decir, sin realizar ninguna acción.
2. Se configura el analizador con tantas ventanas como sea necesario para medir todas las combinaciones SISO del sistema.
3. Se coloca en cada ventana el parámetro a analizar, en nuestro caso S_{21} y S_{31} en formato polar, para tener en cuenta tanto la magnitud como la fase.
4. Para comenzar, cogemos el cable de la antena transmisora 1 y lo acoplamos con el cable de la antena receptora 1. Como estamos con el cable que va hacia la primera antena transmisora, en el controlador debemos pulsar la tecla 1. Si tuviésemos el cable que va hacia la antena transmisora 2, deberíamos pulsar la tecla 2, y así sucesivamente.
5. Una vez cerrado el circuito, pulsamos el botón *Cal* del analizador. Con el ratón pulsamos sobre *Responde Thru*, y a continuación *Thru* y finalmente *Done*. Debemos observar que la señal de fase se sitúa en forma lineal sobre 0 dB.
6. Ahora con el mismo cable del transmisor, cogemos el cable que va hacia el receptor 3 y los acoplamos. Realizamos de nuevo el punto 5.
7. Ya tendríamos la mitad de la calibración para la primera antena transmisora, y la primera ventana ya la tendríamos terminada. Para seguir a la siguiente ventana, pulsamos en *Measurements*, pulsamos en *Hold All Channels* y a continuación a *Continuous*.
8. Ahora cogeríamos el cable que va al receptor 2 y de nuevo hacemos el punto 5. A continuación cogeríamos el cable que va a la antena receptora 4, hacemos el punto 5 nuevamente y ya tendríamos la calibración completa para la primera antena transmisora con todas las receptoras. Realizamos el proceso del punto 7 y proseguimos la calibración para un nuevo cable que se dirige a la antena transmisora 2. Y así sucesivamente con todos cables.

Tras acabar de calibrar todos los cables con sus combinaciones posibles, deberíamos obtener una pantalla en el analizador de redes como la que se muestra a continuación:

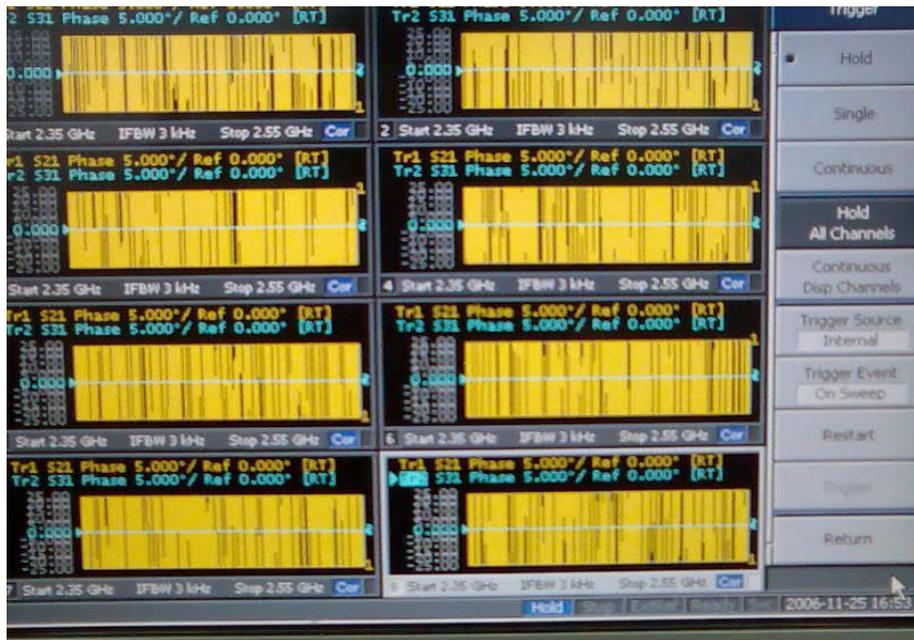


Figura 50: Pantalla del analizador después de calibrar

Cuando hemos realizado la calibración de todas las combinaciones guardamos el estado del analizador en un archivo para poder cargarlo mas tarde si es necesario. Si se respeta el montaje del sistema, este archivo puede servir para varias jornadas de medida, pero en la práctica, el sistema si conserva la calibración en magnitud pero no hace lo mismo con la fase ya que el cable que utilizamos para la medida experimenta torsiones, pliegues... durante el traslado.

4.4.2 Realización de una Campaña de Medidas

Como ya hemos comentado al principio del apartado en el que nos encontramos, en cada campaña de medidas situamos las 4 antenas receptoras centradas en uno de los 19 puntos escogidos en el laboratorio y ponemos las antenas transmisoras en una de las configuraciones estudiadas.

Para no explicar todas las campañas de medidas, ya que en todas se realiza el mismo método, vamos a simplificar la toma de medidas, describiendo el proceso para una configuración de antenas transmisoras.

Partimos en este momento, de la óptima realización del punto anterior de *Calibración*, ya que es fundamental eliminar los posibles ruidos que se introducen en los cables y que harían que no recibiéramos fielmente la potencia en las antenas receptoras.

Una vez calibramos los cables, debemos situar las antenas transmisoras, por ejemplo, en la primera configuración: MIMO distribuido con las antenas en medio de los laterales del laboratorio, como en la figura 33.



Una foto realizada en el laboratorio de esta configuración es la que se muestra a continuación:



Figura 51: Antenas en medio de los laterales en SICOMO (1)

Vemos como las antenas transmisoras 1 y 2 están situadas convenientemente para caracterizar el modelo deseado y las antenas receptoras se encuentran en la posición número 3 del laboratorio (ver imagen 37) separadas $\lambda/2$.



En la siguiente fotografía se pueden observar las antenas transmisoras 3 y 4 para la configuración anterior:



Figura 52: Antenas en medio de los laterales en SICOMO (2)

En la siguiente imagen observamos las antenas receptoras:

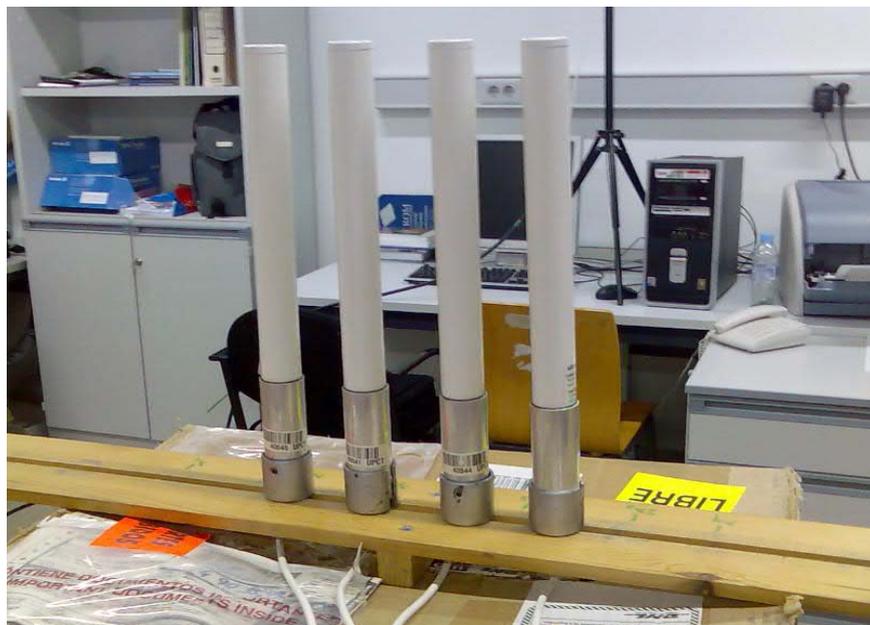


Figura 53: Antenas Receptoras en SICOMO



Una vez hemos colocado las antenas transmisoras y receptoras en el lugar y posición que deseamos medir, debemos conectar todos los cables y poner en funcionamiento los equipos para que tengamos el sistema de medidas de la figura 38 bien montado y conectado.

Una vez realizado lo anterior, debemos ejecutar el software capaz de automatizar la realización de medidas:



Figura 54: Pantalla de Inicio del Software de Medidas

Una vez pulsamos continuar, nos saldrá la ventana principal de este programa:



Figura 55: Pantalla Principal del Software de Medidas

Para nuestras medidas, utilizamos los siguientes parámetros:

- Dirección IP ENA: 15.1.201.236
- Dirección GPIB: 28



- Número de repeticiones: 10
- Tiempo de espera entre repeticiones: 0 segundos
- Directorio destino de datos: Carpeta correspondiente a la configuración deseada.

Dentro del menú Configurar, realizaremos las medidas con los siguientes parámetros:

Form1

Antenas Tx: 4 IFBW: 3.00E+3

Antenas Rx: 4 Average: 0

Frecuencia inicial: 2.35E+9 Formato: 9 - Polar (Lin)
(por defecto: 9 - Polar (Lin))

Frecuencia final: 2.55E+9

Número de puntos: 512

Aceptar <-- Atrás

Figura 56: Menú de Configuración del Software de Medidas

- Número de antenas transmisoras: 4
- Número de antenas receptoras: 4
- Frecuencia inicial: 3.35GHz
- Frecuencia final: 2.55GHz
 - Banda de Frecuencias de WIFI
- Número de puntos: 1024
- IFBW: 3 KHz

Aceptamos y volvemos a la ventana principal del programa. Pulsamos sobre el botón *Rutina de Medidas* y comienza el cálculo de las medidas.

Una vez terminada la rutina de medidas del programa, en el analizador de redes se han creado una serie de archivos dentro de la carpeta que anteriormente habíamos escrito en el programa principal.



Estos archivos siguen un patrón en sus nombres, y es el siguiente:

DATOSXY_Z

Donde X e Y indican el número de antena receptora y transmisora respectivamente, y Z indica el número de la repetición de la medida. Por lo tanto, si introducimos los parámetros antes descritos, tendremos para cada posición de las antenas receptoras dentro del laboratorio un total de $(4+4+4+4)*10= 160$ archivos, con el formato de nombre antes expuesto:

Desde DATOS11_1, DATOS11_2, DATOS11_3,..., DATOS12_9, DATOS12_10, DATOS13_1,..., DATOS24_5, DATOS24_6, DATOS24_7,..., DATOS32_3, DATOS32_4, DATOS32_5,..., DATOS34_10, DATOS41_1, DATOS41_2,..., DATOS43_10, DATOS44_1,..., hasta DATOS44_10.

Como podemos observar en los nombres de los archivos, estamos tomando medidas para un sistema MIMO 4×4 , es decir, con 4 antenas transmisoras y 4 antenas receptoras, y tomando además para cada posición del receptor 10 repeticiones.

Ahora introduzcámonos en el contenido de estos archivos, que es realmente lo que nos interesará para caracterizar el canal de radiocomunicaciones. En la siguiente imagen se observa el contenido del archivo obtenido en una medida:

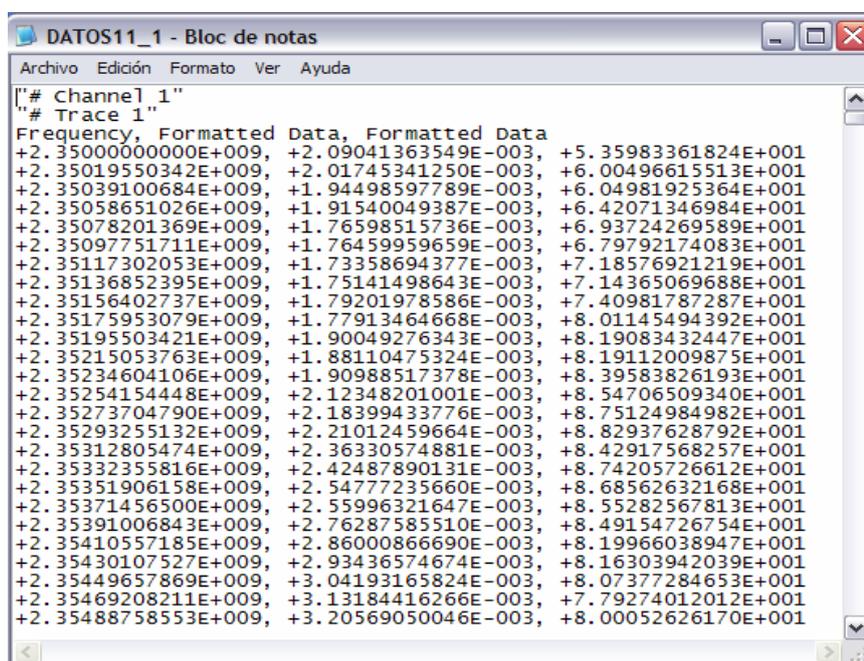


Figura 57: Contenido del Archivo creado en las medidas

Como se observa, este archivo se ha obtenido para la repetición 1 de la posición 1 y las antenas 1 tanto transmisora como receptora. Hagamos un inciso: ahora se preguntará: ¿cómo es posible que sepa que es realizada esta medida en la posición 1 si no lo pone explícitamente?



La respuesta es la siguiente: si observamos la figura de la ventana principal del software de medidas, tenemos la posibilidad de detallar el número por el cual empieza la medida. Aprovechando este hecho, he empezado cada numeración según la posición del laboratorio este midiendo. Es decir:

Posición 1 -> empieza en $Z=1$, y como hay 10 repeticiones, termina en $Z=10$;

Posición 2 -> empieza en $Z=11$ y termina en $Z=20$;

Posición 3 -> empieza en $Z=21$ y termina en $Z=30$;

:

Posición 10 -> empieza en $Z=91$ y termina en $Z=100$;

Posición 11 -> empieza en $Z=100$ y termina en $Z=110$;

:

Posición 17 -> empieza en $Z=161$ y termina en $Z=170$;

Posición 18 -> empieza en $Z=171$ y termina en $Z=180$;

Posición 19 -> empieza en $Z=181$ y termina en $Z=190$.

Por lo tanto, tendremos 190 archivos para cada combinación antena transmisora y receptora en cada una de las configuraciones y a simple vista se puede conocer en qué posición del laboratorio se ha realizado la medida para un archivo cualquiera, además de saber para qué antena transmisora y receptora, y el número de repetición.

Para una configuración de antenas transmisoras, una campaña de medidas en las 19 posiciones de las antenas receptoras, tendremos como resultado:

$$(4 + 4 + 4 + 4) \times 190 = 3040 \text{ archivos} \quad 4.1$$

Y para finalizar con el número de archivos obtenido en este proyecto, como tenemos 6 diferentes configuraciones de antenas transmisoras, el número total de archivos será:

$$3040 \times 6 = 18240 \text{ archivos} \quad 4.2$$

Ahora pasamos, como habíamos dicho, al contenido de los archivos:

Como podemos observar en la imagen anterior, el archivo contiene tres columnas y unas cuantas filas. El número de filas es igual al número de puntos que hemos introducido en el menú Configurar del programa. En nuestro caso, será igual a 1024 filas.

Las columnas tienen el siguiente significado:



1ª columna -> frecuencia.

2ª columna -> valor de amplitud.

3ª columna -> valor de fase.

Por lo tanto, con un procesado que veremos en el siguiente apartado, a partir de estos valores de amplitud y fase, calcularemos el campo eléctrico medido, y los demás parámetros de interés para la caracterización, que tendremos para cada combinación de antenas transmisoras y receptoras y frecuencia determinada.

Para concluir, podemos observar que las campañas de medidas son muy mecánicas de realizar, repitiendo el mismo proceso de medida en cada punto o posición del laboratorio y para cada configuración de antenas transmisoras. En el siguiente apartado se podrán apreciar los resultados de las medidas realizadas tras pasarlas por un procesado que nos permitirá obtener una serie de parámetros con los que caracterizaremos de una manera experimental en este caso, el canal de radiocomunicaciones en un entorno indoor para la banda de frecuencias de WIFI.



Capítulo 5. Resultados

Una vez ya hemos realizado un análisis teórico y una toma de medidas de forma experimental para un entorno indoor de los sistemas MIMO tanto tradicionales como distribuidos, para la banda de frecuencias de WIFI, en este apartado nos encontramos los resultados obtenidos de ambos análisis, tras pasarlos por un procesado para obtener los valores de parámetros más característicos del canal radio.

Estos parámetros característicos de los sistemas MIMO son: la capacidad, potencia recibida, la correlación entre transmisor y receptor, el factor K, la respuesta temporal, el RMS Delay Spread y al ancho de banda de coherencia. Sus fórmulas teóricas fueron introducidas en apartados anteriores y en este capítulo mostraremos los resultados que obtenemos de ellos tanto de forma teórica como experimental.

5.1 Resultados de las simulaciones del Trazador Indoor 3D

Como vimos en el capítulo 3 de este proyecto, el Trazador Indoor en 3 dimensiones, es un software capaz de caracterizar el canal de radiocomunicaciones utilizando el trazado de rayos, teniendo en cuenta rayos directos y rayos reflejados. Con este programa podemos obtener el campo eléctrico para cada combinación de antenas transmisoras y receptoras, y a partir de éste, obtendremos la *potencia recibida* en cada punto del entorno indoor simulado y también la *capacidad* en cada uno de ellos.

Como dijimos en aquel capítulo, el laboratorio SICOMO lo dividimos en cientos de puntos, exactamente 50 en el eje X y 50 en el eje Y, por lo que tendríamos: $50 \times 50 = 2500$ puntos o posiciones donde centraríamos las antenas receptoras.

Las distintas configuraciones de antenas transmisoras son las mismas que describimos para la toma de medidas experimental, añadiendo algún caso más para el sistema MIMO tradicional:

- MIMO tradicional:
 - Antenas separadas 2λ .
 - Antenas separadas $3\lambda/2$.
 - Antenas separadas λ .
 - Antenas separadas $\lambda/2$.
 - Antenas separadas $\lambda/4$.
 - Antenas separadas $\lambda/6$.
 - Antenas separadas $\lambda/8$.



- MIMO distribuido:
 - Antenas distribuidas a mitad de cada una de las paredes laterales del laboratorio.
 - Antenas distribuidas en cada una de las esquinas del laboratorio.
 - Antenas distribuidas a una distancia de la mitad de cada una de las paredes laterales del laboratorio.

Con este software también hemos simulado para diferentes casos en recepción, es decir, para:

- 4 antenas receptoras (MIMO 4×4)
- 3 antenas receptoras (MIMO 4×3)
- 2 antenas receptoras (MIMO 4×2)
 - Todas ellas separadas una distancia de $\lambda/2$.

También debemos hacer distinción en el valor de relación señal a ruido (SNR) a la hora de calcular la capacidad. Esta capacidad la calculamos utilizando la fórmula 2.24 de este proyecto. Para la serie de gráficas que vamos a mostrar a continuación, se ha tomado un valor de SNR=10 dB. En el anexo 2 se mostrarán algunas gráficas para valores de SNR=20 dB.

5.1.1 MIMO tradicional

5.1.1.1 Antenas separadas 2λ

a) Capacidad:

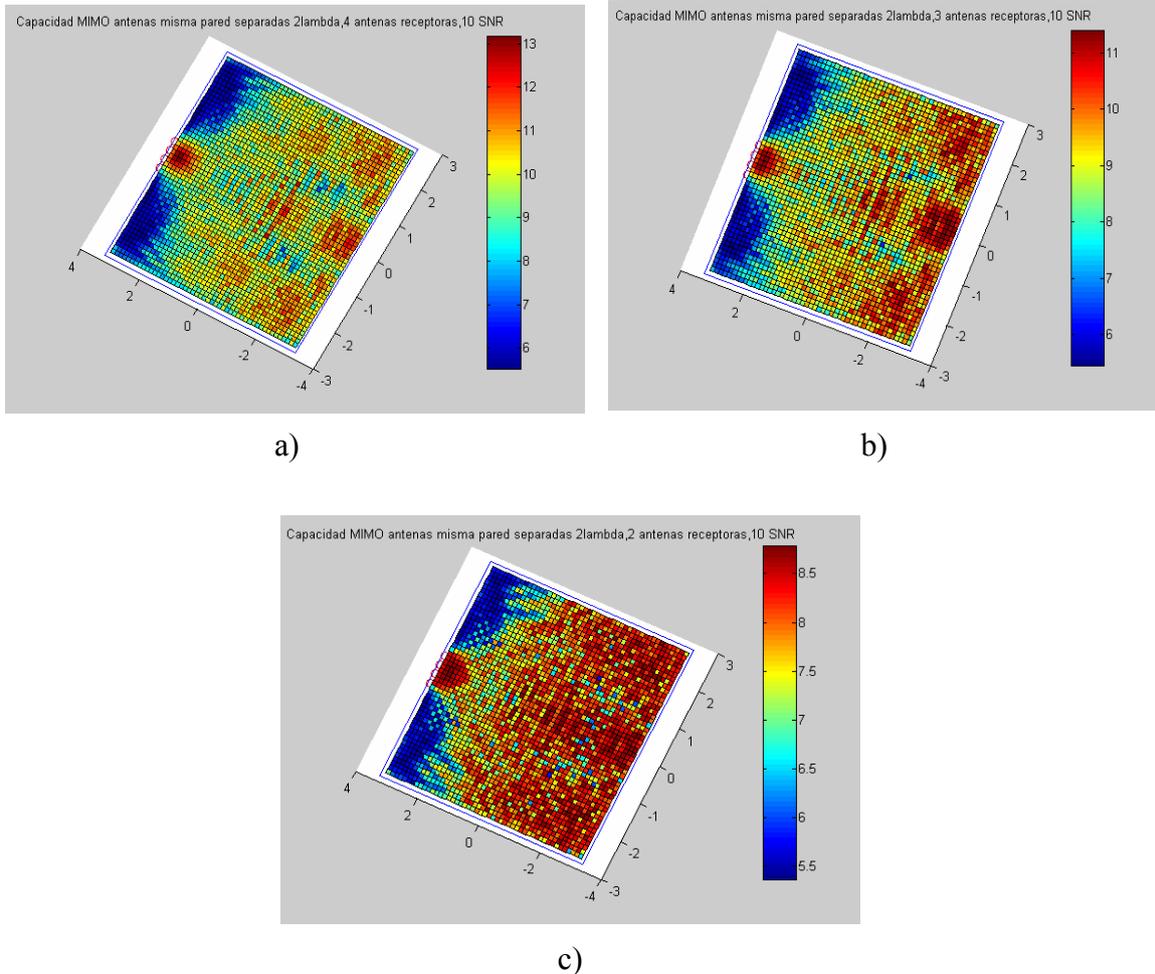


Figura 58: Capacidad Simulada MIMO Tradicional: Antenas Tx separadas 2λ para a) 4 Antenas Rx b) 3 Antenas Rx c) 2 Antenas Rx

Podemos observar en los valores de la barra de colores, como la configuración con mayor número de antenas receptoras tiene mayor capacidad. Observamos que existen zonas de muy poca capacidad en las esquinas de la misma pared en las que están situadas las antenas transmisoras.

Con respecto a la potencia recibida, podemos comentar que en la zona cercana a las antenas transmisoras es donde existe una mayor potencia recibida, como es lógico.

5.1.1.2 Antenas separadas $3\lambda/2$

a) Capacidad:

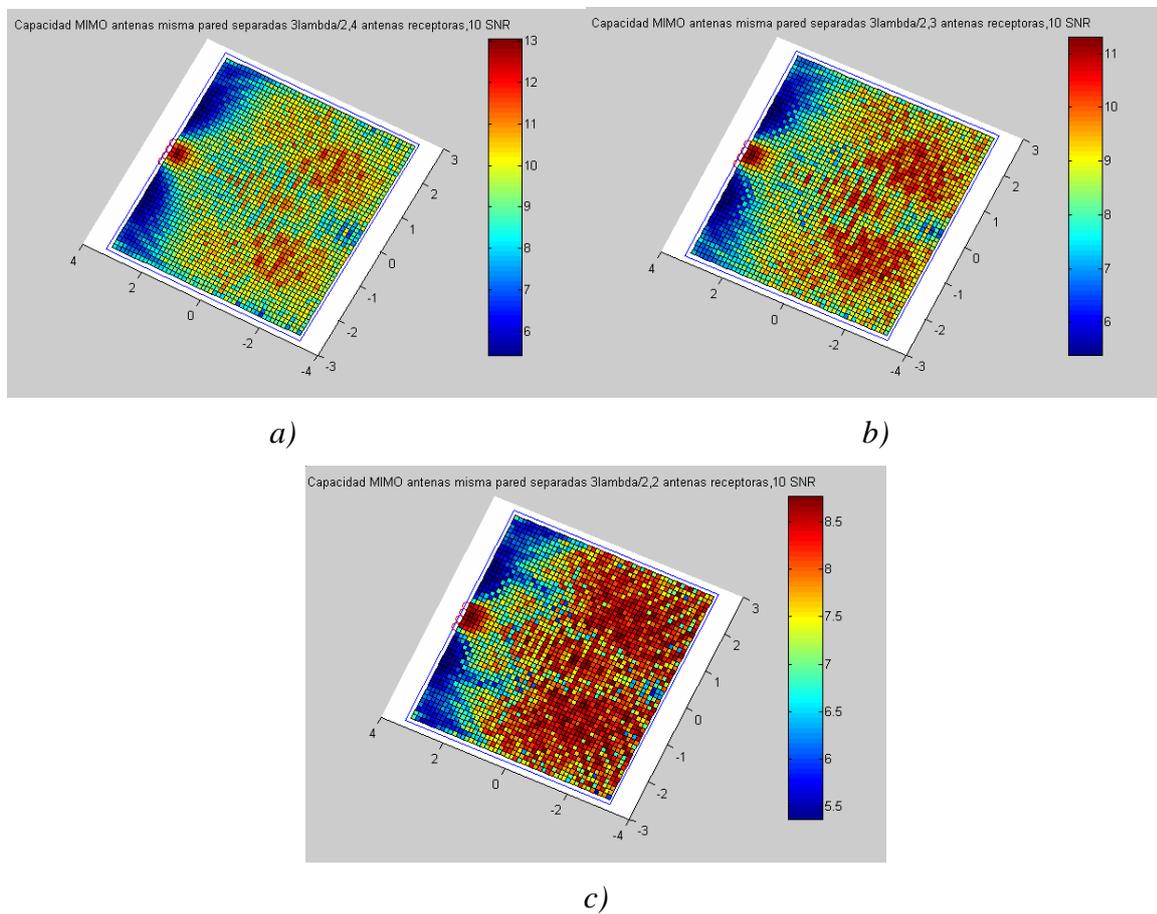


Figura 59: Capacidad Simulada MIMO Tradicional: Antenas Tx separadas $3\lambda/2$ para a) 4 Antenas Rx b) 3 Antenas Rx c) 2 Antenas Rx

Podemos llegar a la misma conclusión que en el caso anterior.



5.1.1.3 Antenas separadas λ

a) Capacidad

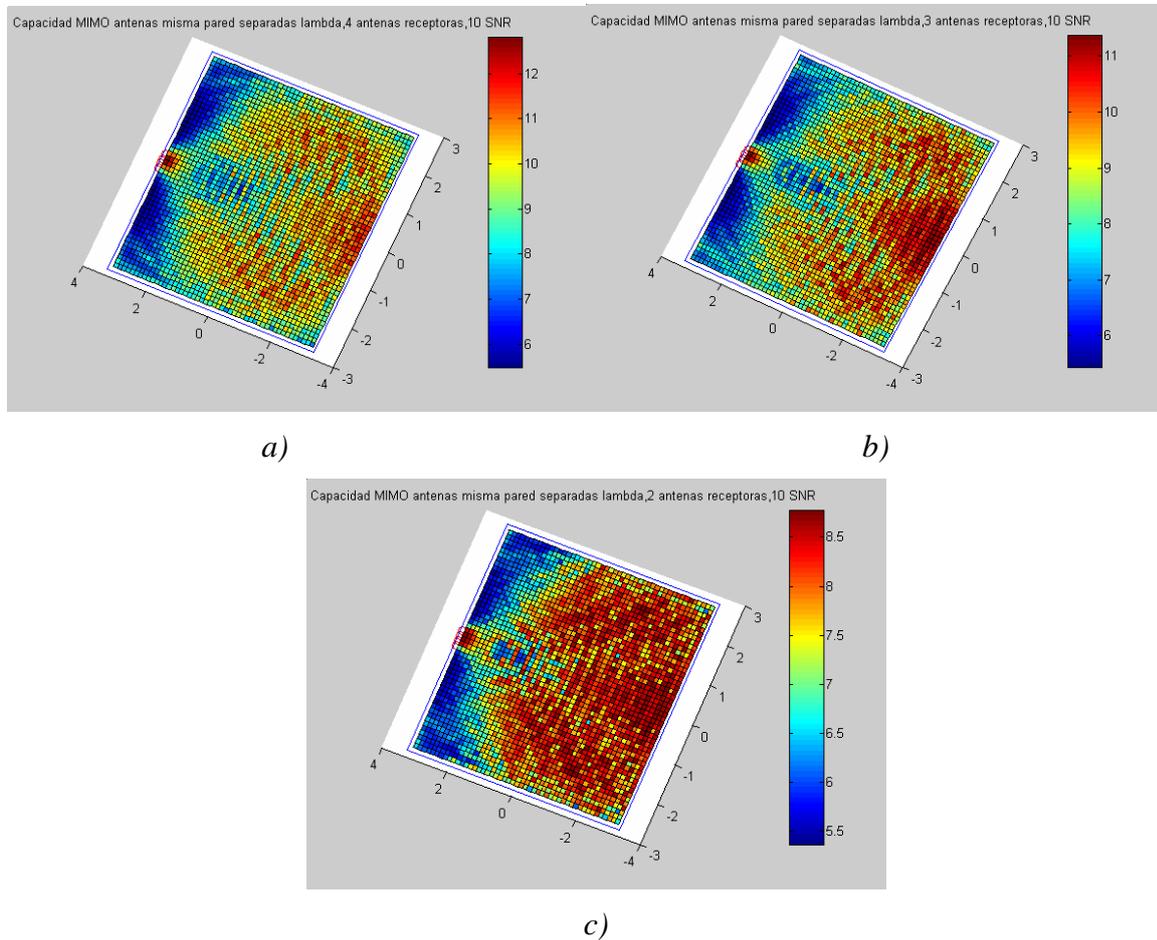
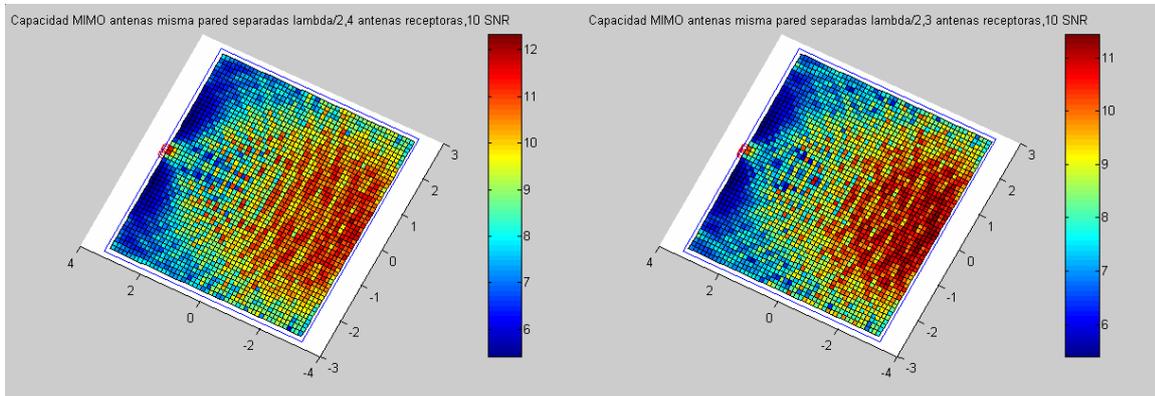


Figura 60: Capacidad Simulada MIMO Tradicional: Antenas Tx separadas λ para a) 4 Antenas Rx b) 3 Antenas Rx c) 2 Antenas Rx



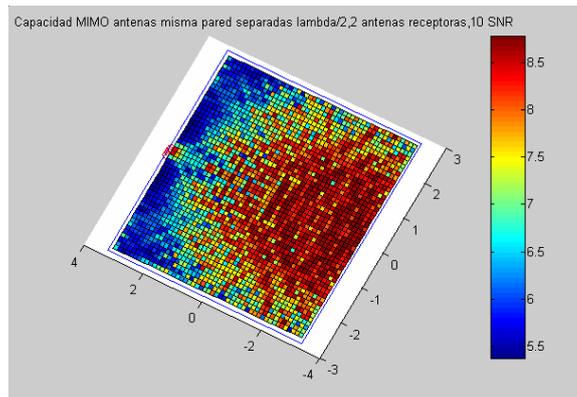
5.1.1.4 Antenas separadas $\lambda/2$

a) Capacidad



a)

b)



c)

Figura 61: Capacidad Simulada MIMO Tradicional: Antenas Tx separadas $\lambda/2$ para a) 4 Antenas Rx b) 3 Antenas Rx c) 2 Antenas Rx

5.1.1.5 Antenas separadas $\lambda/4$

a) Capacidad

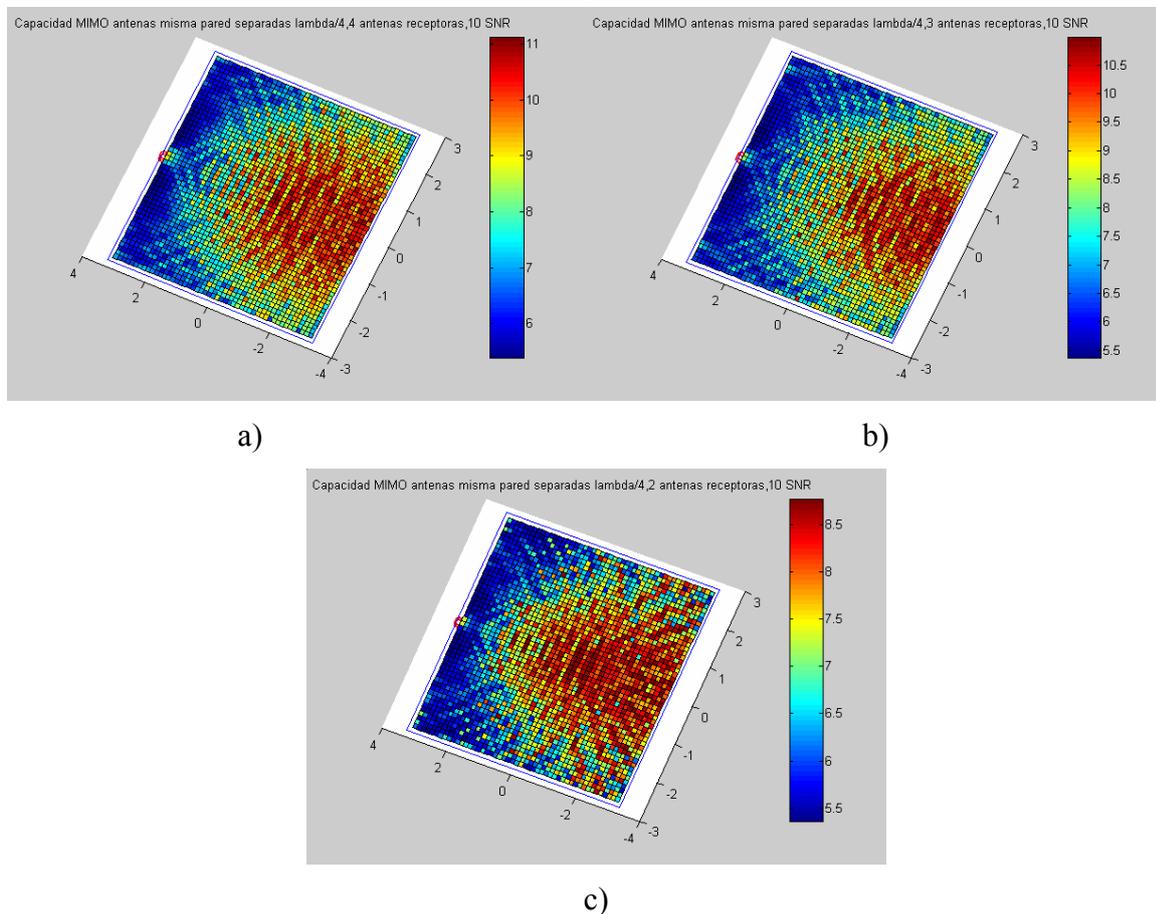


Figura 62: Capacidad Simulada MIMO Tradicional: Antenas Tx separadas $\lambda/4$ para a) 4 Antenas Rx b) 3 Antenas Rx c) 2 Antenas Rx

Como ya hemos comentado anteriormente, al aumentar el número de antenas receptoras, aumenta la capacidad en media dentro de nuestro espacio indoor. También comprobamos que en los modelos con el mismo número de antenas receptoras, la capacidad es mayor en aquellas configuraciones en las que la separación entre las antenas transmisoras es mayor. A continuación mostramos una tabla resumen de capacidades medias (en bits/seg/Hz) obtenidas tras la simulación para cada uno de los casos de este apartado y en las que podremos comprobar las conclusiones a las que hemos llegado:



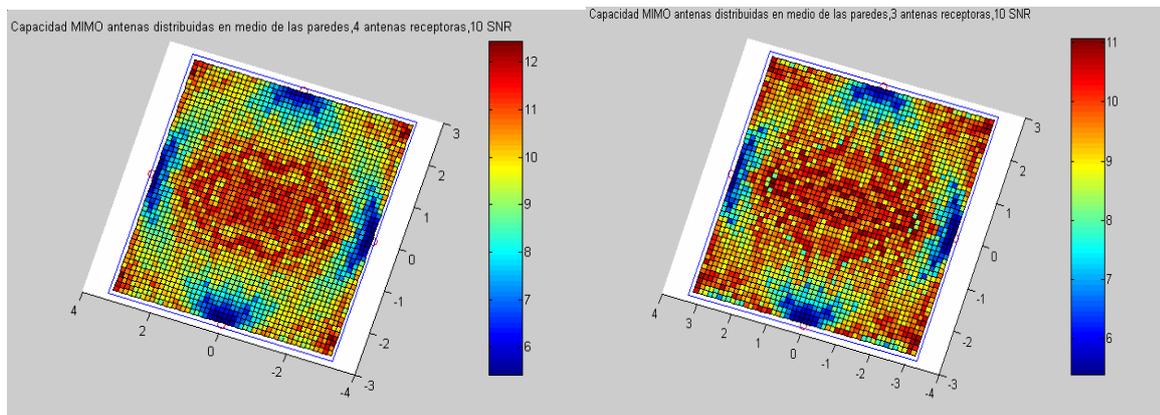
CONFIGURACIÓN	4 Antenas Receptoras	3 Antenas Receptoras	2 Antenas Receptoras
Antenas Tx separadas 2λ	9.4705	8.8461	7.6069
Antenas Tx separadas $3\lambda/2$	9.2821	8.6882	7.5214
Antenas Tx separadas λ	9.2735	8.6508	7.4940
Antenas Tx separadas $\lambda/2$	8.9678	8.5782	7.4182
Antenas Tx separadas $\lambda/4$	8.2460	7.9931	7.1122

Tabla 4: Resumen Capacidades Simuladas MIMO Tradicional en bits/seg/Hz

5.1.2 MIMO distribuido

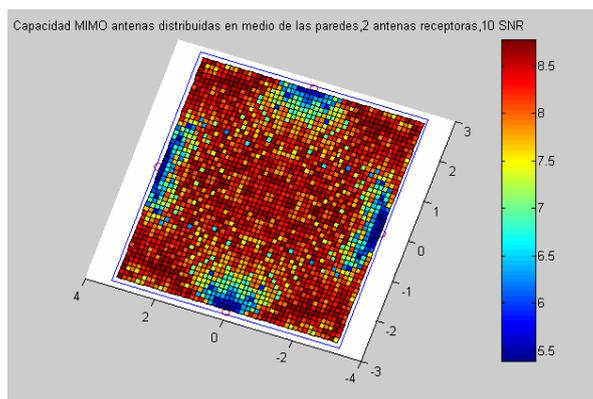
5.1.2.1 Antenas en medio de las paredes laterales

a) Capacidad



a)

b)



c)

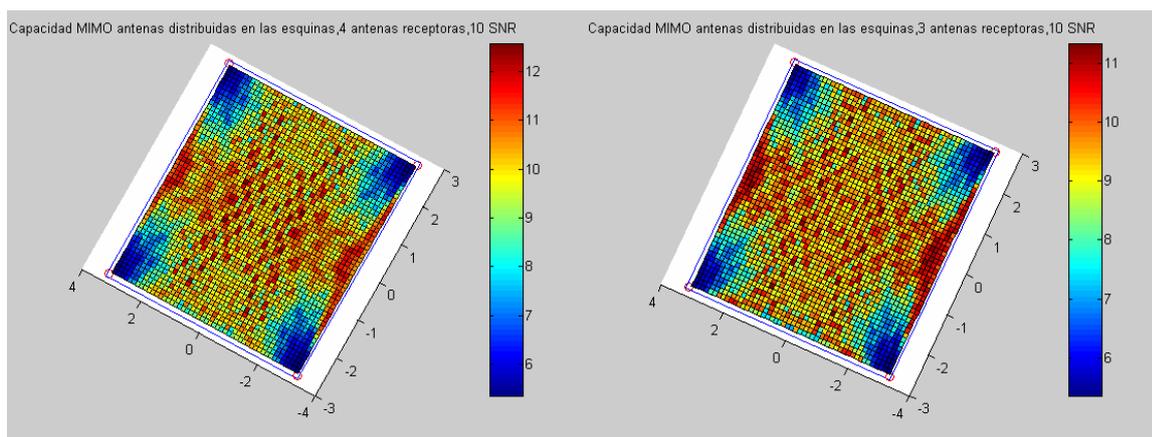
Figura 63: Capacidad Simulada MIMO Distribuido: Antenas Tx en medio de los laterales para a) 4 Antenas Rx b) 3 Antenas Rx c) 2 Antenas Rx

Podemos observar de forma visual que la capacidad es mayor por el medio y las zonas cercanas a las esquinas del laboratorio, y esto se debe a los valores propios.

Al igual que en MIMO tradicional y como es obvio, en las zonas cercanas a las antenas transmisoras la potencia recibida será mayor, como podemos observar en las imágenes, donde en las zonas cercanas a las antenas transmisoras el color es más calido que en las otras zonas del laboratorio, donde predomina el color azul oscuro.

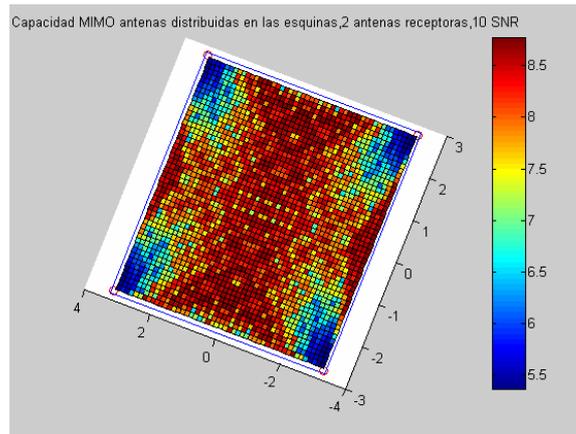
5.1.2.2 Antenas en las esquinas

a) Capacidad



a)

b)

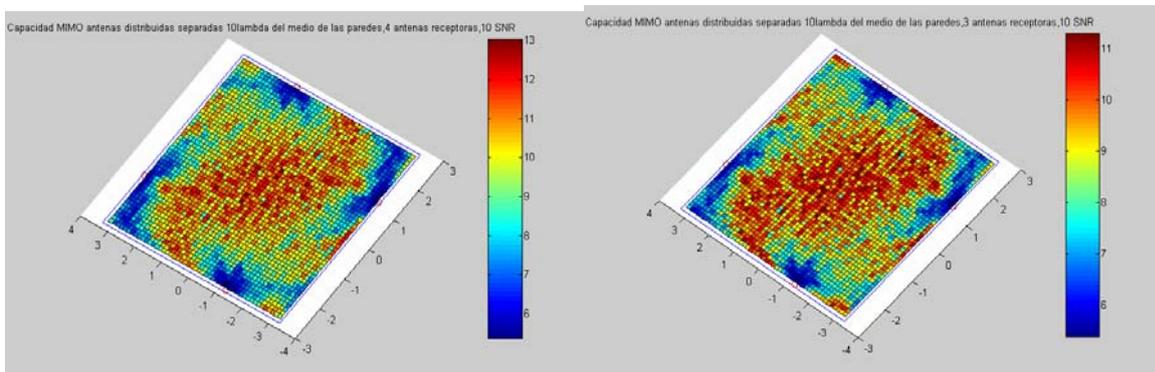


c)

Figura 64: Capacidad Simulada MIMO Distribuido: Antenas Tx en las esquinas para a) 4 Antenas Rx b) 3 Antenas Rx c) 2 Antenas Rx

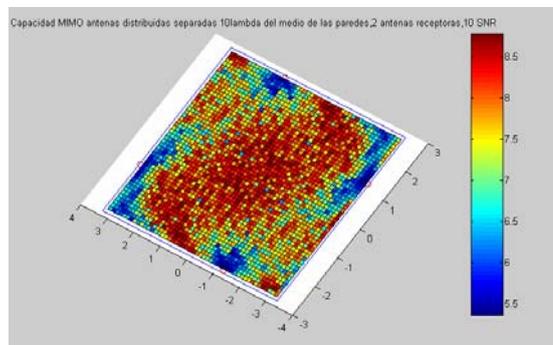
5.1.2.3 Antenas a una distancia del medio de las paredes

a) Capacidad



a)

b)



c)

Figura 65: Capacidad Simulada MIMO Distribuido: Antenas Tx a una distancia del medio para a) 4 Antenas Rx b) 3 Antenas Rx c) 2 Antenas Rx



Por último, y al igual que hicimos en el caso de MIMO tradicional, mostraremos en una tabla los valores medios de capacidad (bits/seg/Hz) obtenidos para cada una de las configuraciones estudiadas:

CONFIGURACIÓN	4 Antenas Receptoras	3 Antenas Receptoras	2 Antenas Receptoras
Antenas Tx en medio de las paredes	9.6635	9.0754	7.9678
Antenas Tx en las esquinas	9.5394	8.9522	7.8020
Antenas Tx a una distancia de las paredes	9.5416	8.8540	7.5830

Tabla 5: Resumen Capacidades Simuladas MIMO Distribuido en bits/seg/Hz

Una vez hemos visto los valores de capacidad dibujados en nuestro entorno indoor, en el laboratorio, y mostrados los valores medios en las tablas anteriores, convendría hacer un análisis estadístico de esta capacidad para poder comparar los valores obtenidos entre las distintas configuraciones para llegar a posibles conclusiones sobre los modelos estudiados teóricamente.



Si realizamos este análisis, por un lado, para las configuraciones de MIMO 4×4 tradicional obtenemos la siguiente gráfica:

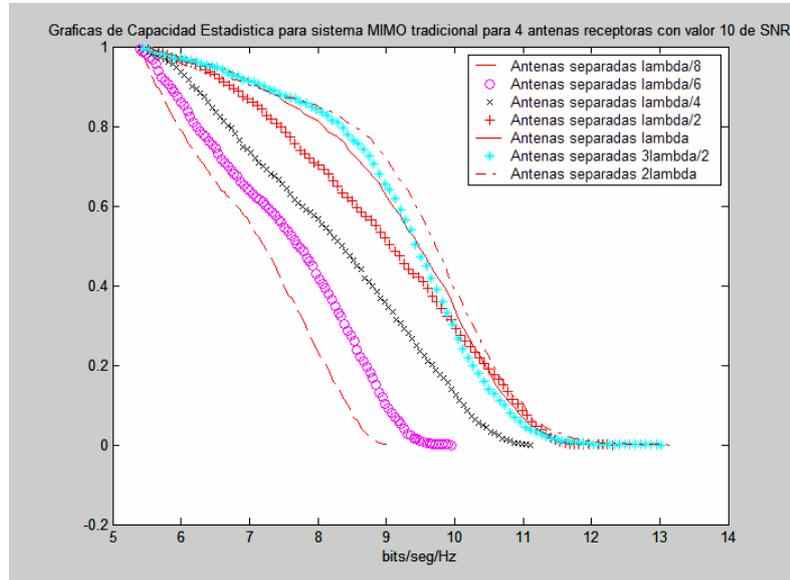


Figura 66: Capacidad Estadística MIMO Tradicional (1)

En esta gráfica y las siguientes, tenemos en el eje de abscisas valores de capacidad obtenidos tras la simulación y el procesamiento estadístico, y en el eje de ordenadas valores porcentuales, es decir, después de realizar este análisis estadístico, tendremos valores en el eje Y entre 0 y 1.

Echándole un vistazo a la gráfica, podemos observar, por ejemplo, que el 80% de valores de capacidad para el caso de antenas transmisoras separadas 2λ , están por encima de 8.5 bits/seg/Hz:

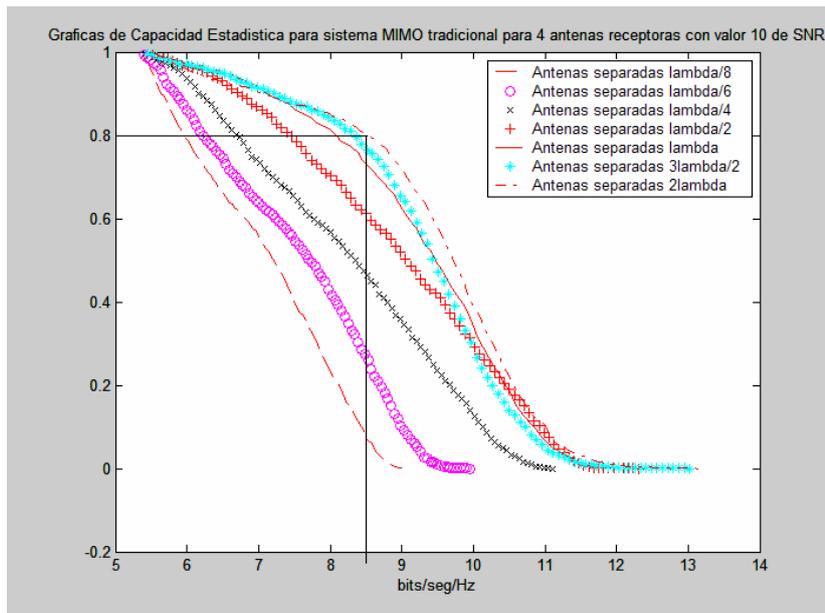


Figura 67: Capacidad Estadística MIMO Tradicional (2)

Si ahora realizamos este análisis para el caso de sistemas MIMO 4×4 distribuido, obtenemos la siguiente gráfica:

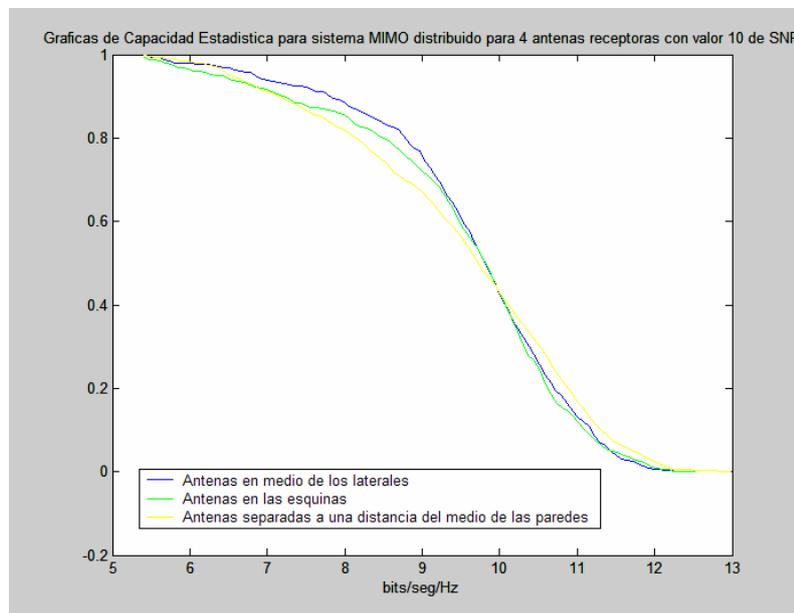


Figura 68: Capacidad Estadística MIMO Distribuido (1)

Al igual que antes, si echamos un vistazo a la gráfica, podemos observar que el 80% de los valores de capacidad en las posiciones del laboratorio para el caso de antenas transmisoras situadas en las esquinas del mismo tienen un valor por encima de 8.5Db:

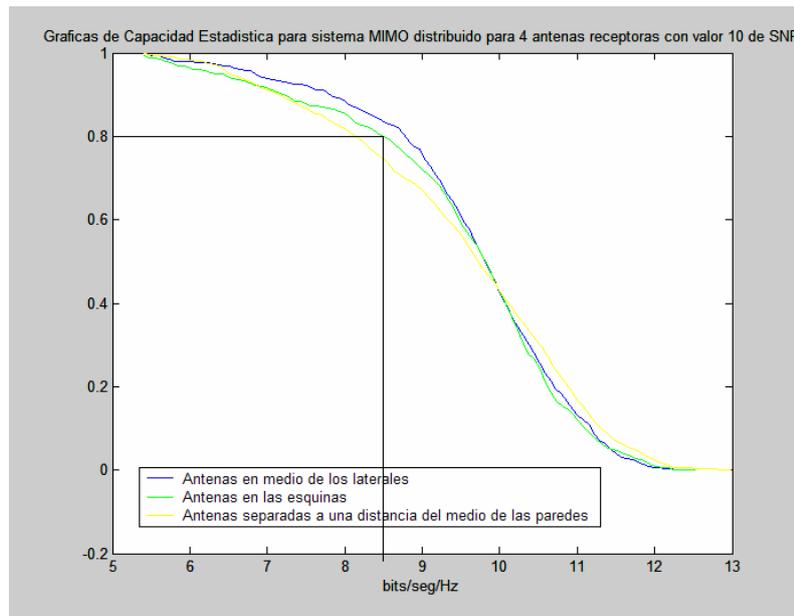


Figura 69: Capacidad Estadística MIMO Distribuido (2)

Si ponemos en una gráfica todas las situaciones para comparar ambos sistemas MIMO obtenemos la gráfica siguiente:

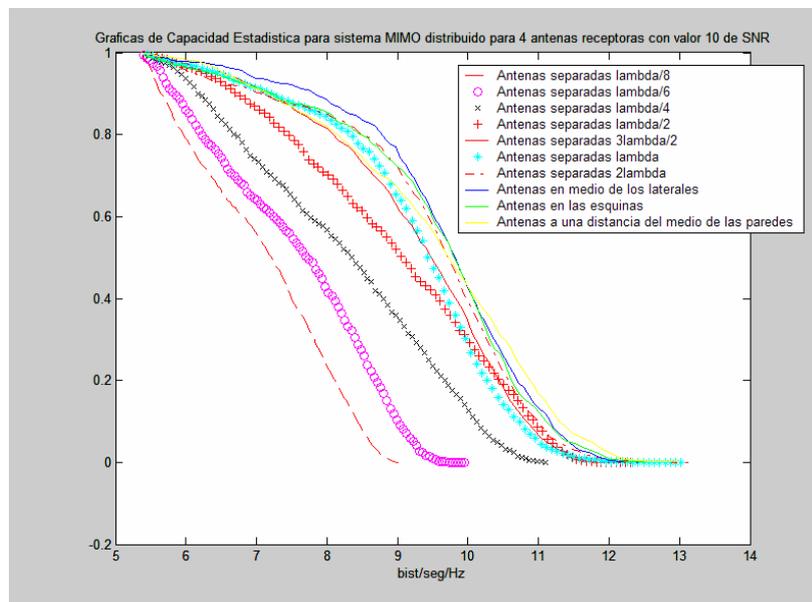


Figura 70: Capacidad Estadística Sistema MIMO 4x4

A simple vista podremos concluir que un sistema MIMO distribuido ofrece mayor capacidad que un sistema MIMO tradicional. En el siguiente capítulo del proyecto se reflejarán una serie de conclusiones y allí abordaremos este tema.

Aprovechando este análisis estadístico que realizamos a cada una de las simulaciones realizadas, es decir, a cada una de las configuraciones de antenas



transmisoras y receptoras, podríamos también comparar para cada configuración los resultados obtenidos de capacidad según el número de antenas receptoras situadas en cada uno de los cientos de puntos en los que dividimos el laboratorio: 2, 3 o 4 antenas receptoras. A continuación vamos a mostrar los resultados para cuatro de las configuraciones:

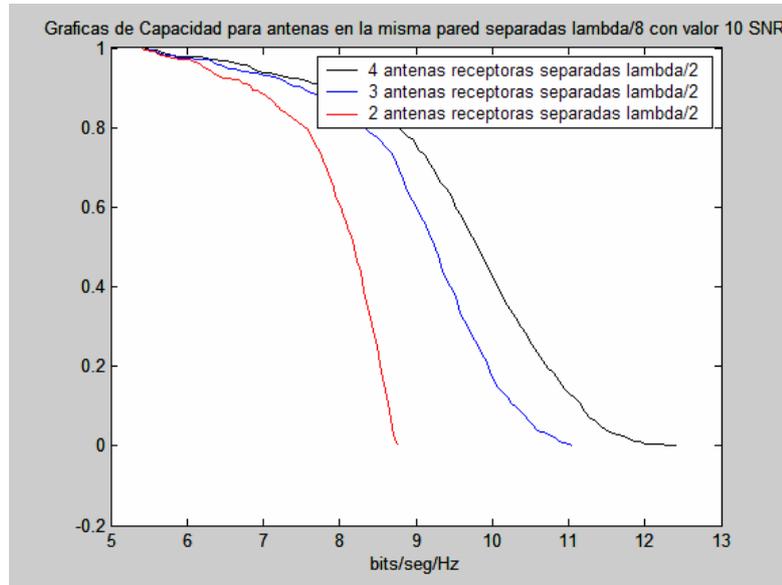


Figura 71: Capacidad Estadística MIMO Distribuido Antenas Tx a mitad de las paredes según el número de Antenas Rx

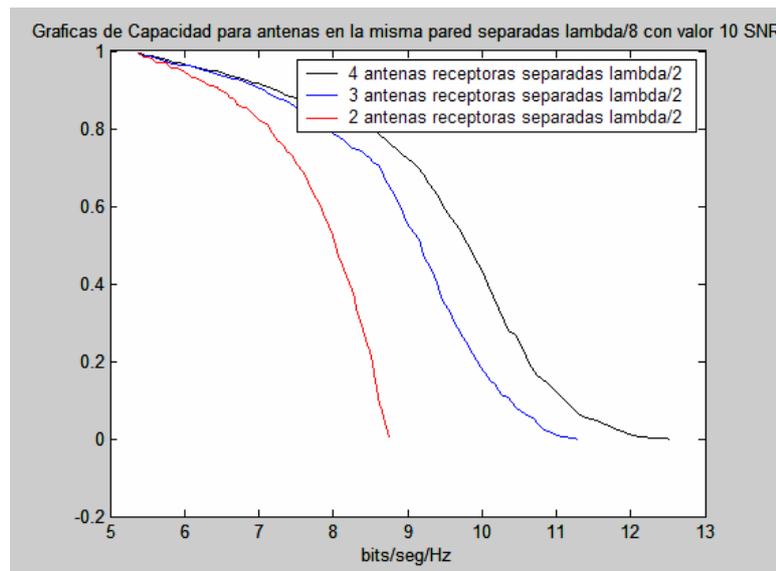


Figura 72: Capacidad Estadística MIMO Distribuido Antenas Tx en las esquinas según el número de Antenas Rx

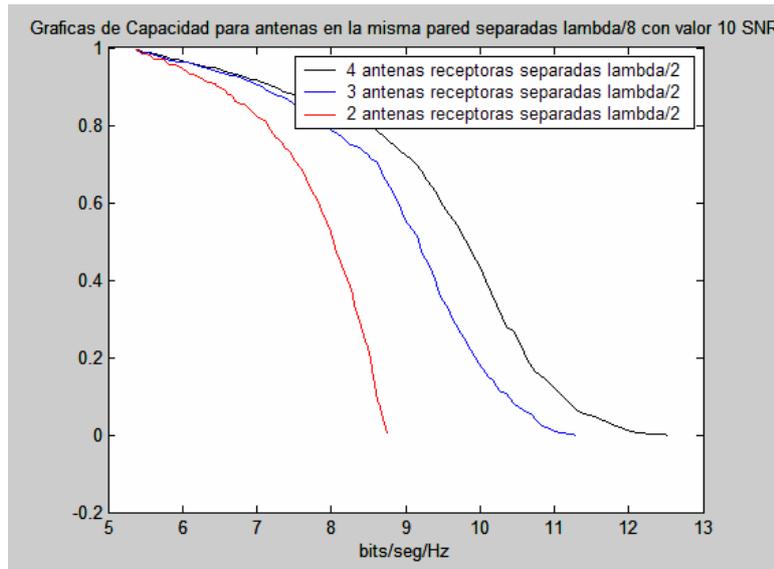


Figura 73: Capacidad Estadística MIMO Tradicional Antenas Tx separadas 2λ según el número de Antenas Rx

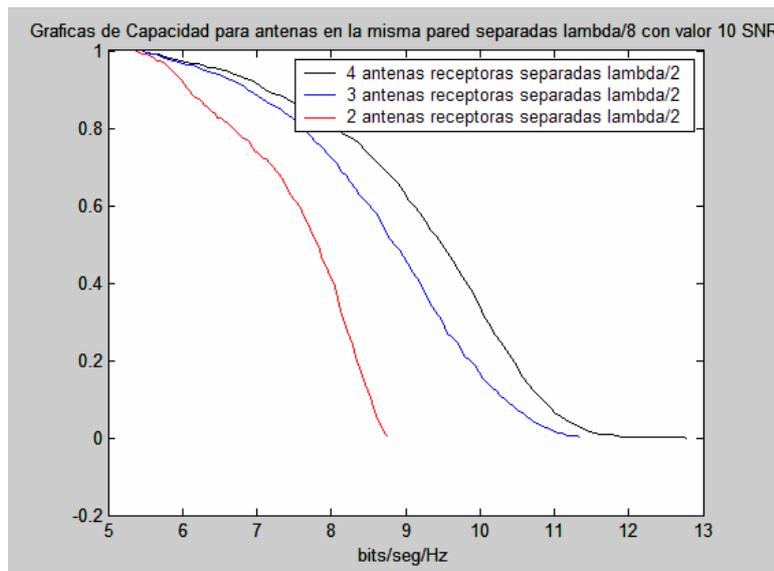


Figura 74: Capacidad Estadística MIMO Tradicional Antenas Tx separadas λ según el número de Antenas Rx

A simple vista se puede apreciar que, como ya habíamos comentado anteriormente, los sistemas MIMO 4×4 ofrecen mayor capacidad que los sistemas 4×3 y 4×2 , tanto en los sistemas MIMO tradicionales como en los sistemas MIMO distribuidos.

Para terminar, comentar que todos estos resultados han sido realizados con el Trazador Indoor 3D, simulando un entorno cerrado, como es el laboratorio SICOMO, en la banda de frecuencias WIFI. Se han simulado teóricamente los sistemas MIMO bajo estas condiciones y hemos caracterizado el canal de radiocomunicaciones teóricamente



utilizando las fórmulas descritas en el primer apartado de este capítulo, una vez nuestro programa nos devuelve valores de campo eléctrico.

5.2 Resultados del procesado realizado sobre las campañas de medidas

En este apartado, mostraremos los resultados obtenidos de caracterizar el canal de radiocomunicaciones experimentalmente, es decir, con las campañas de medidas realizadas en el laboratorio SICOMO en la banda de frecuencias WIFI.

Esta caracterización se realiza sobre todos los archivos obtenidos de las medidas, y se hace con varios programas software realizados con MatLab [16]. En primer lugar, un programa que principalmente realiza una carga de todos los archivos además de introducir los parámetros más importantes. Posteriormente, el segundo programa realiza el procesado propiamente dicho, calculando valores de los parámetros más relevantes para todas las medidas. Y por último, un tercer programa que se encarga de dibujar gráficamente estos parámetros obtenidos en el programa anterior.

Los parámetros que introducimos en el primer programa son los siguientes:

- Número de antenas transmisoras: 4.
- Número de antenas receptoras: 4.
- Número de posiciones en el laboratorio de las antenas receptoras: 19.
- Número de repeticiones en cada posición: 10.
- Número de puntos para cada archivo de medida: 1024.
- Frecuencia central: 2.45Ghz.

Una vez ejecutado este programa, tendemos construida la matriz H que contendrá valores de campo eléctrico para cada una de las combinaciones de las distintas configuraciones de antenas transmisoras, las posiciones de las antenas receptoras, el número de antena transmisora y receptora, repetición de cada medida y para cada punto del archivo de medida, es decir, para frecuencia de la banda que deseamos.

Como hemos dicho anteriormente, el segundo programa realiza un procesado de la matriz H que carga al principio del código para calcular los valores de los parámetros que nos interesan para caracterizar el canal radio, como son: potencia de ruido y potencia de señal útil, factor K utilizando la distribución Rice, capacidad para una SNR fija y para la SNR medida en el laboratorio, correlación entre el transmisor y el receptor, RMS Delay Spread...

Por último, el tercer programa muestra gráficamente los resultados obtenidos del procesamiento, en una serie de gráficas que veremos a continuación, y en las que podremos observar los valores de los parámetros anteriores en cada una de las posiciones del receptor y para cada configuración de antenas transmisoras, es decir, sistemas MIMO 4×4 tradicionales y distribuidos.



Antes de realizar el análisis, recordemos de nuevo la imagen del laboratorio SICOMO con las posiciones de las antenas receptoras numeradas, ya que las gráficas siguientes mostrarán el valor de los parámetros en da una de ellas. Para ello observemos la figura TAL.

5.2.1 Análisis de Potencia recibida

En primer lugar, vamos a distinguir entre los distintos tipos de configuraciones de antenas transmisoras, es decir, entre los sistemas MIMO 4×4 tradicionales por un lado, y por otro lado los sistemas MIMO 4×4 por otro. Las gráficas que obtenemos las mostramos a continuación:

a) Sistema MIMO 4×4 tradicional:

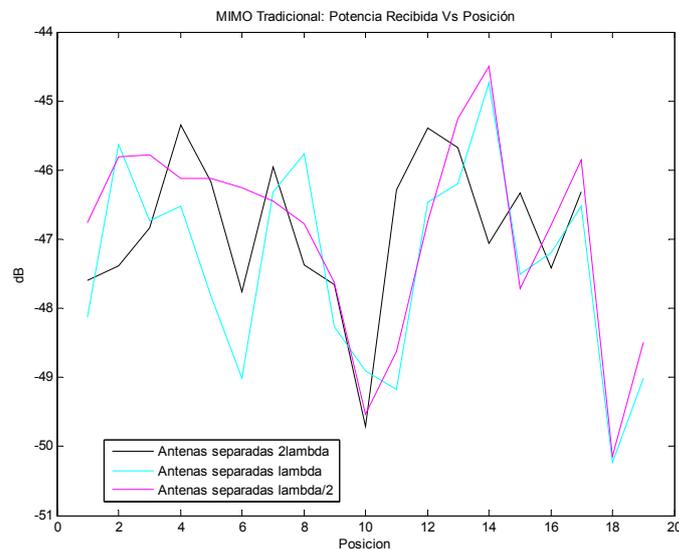


Figura 75: Potencia Recibida Medida MIMO 4×4 Tradicional

Podemos observar que hay posiciones de las antenas receptoras en las que la potencia recibida es algo menor, por ejemplo la posición 10, las 18 y 19, y algo mayores para la franja central del laboratorio.



b) Sistema MIMO 4x4 distribuido:

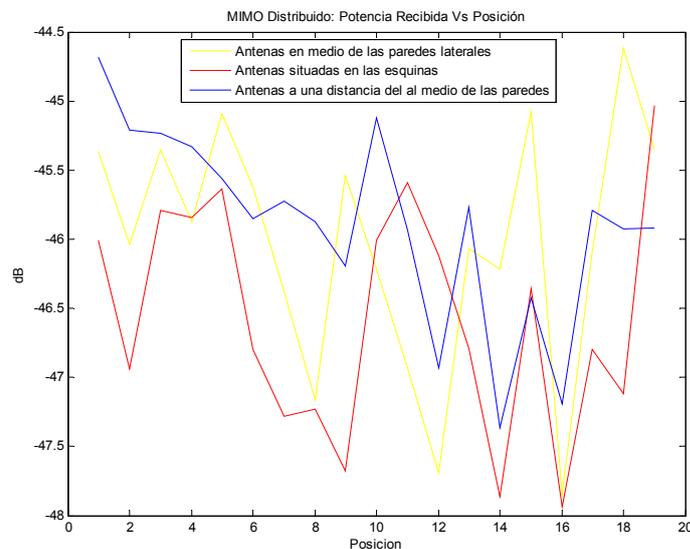


Figura 76: Potencia Recibida Medida MIMO 4x4 Distribuido

En esta gráfica varían un poco más las formas entre las curvas, ya que cada una de ellas tiene situadas las antenas transmisoras en una posición diferente, aunque podemos observar zonas en las que las 3 configuraciones MIMO distribuidas tienen valores más pequeños, por ejemplo la posición 16, o valores mayores, como la posición 5.

Si hacemos una comparación entre ambos sistemas, podemos observar que los valores de potencia son parecidos para ambos sistemas. Según la posición de las antenas receptoras y según la configuración de antenas transmisoras, tendremos mayor o menor nivel de señal útil recibida.

Potencia Media Sistema MIMO tradicional: -46.8566 dB

Potencia Media Sistema MIMO distribuido: -46.0950 dB

5.2.2 Análisis de la Capacidad

A continuación pasamos al análisis de los valores de capacidad obtenidos para cada uno de los sistemas estudiados. Como hemos hecho anteriormente, distinguimos entre MIMO 4x4 tradicional y MIMO 4X4 distribuido. Posteriormente realizamos, al igual que hicimos con los valores de capacidad obtenidos de la simulación con el Trazador Indoor 3D, un análisis estadístico de la capacidad. Para comenzar, mostramos las gráficas de capacidad para ambos sistemas por separado. Esta capacidad se realiza para una SNR medida de valor 44.4126:



a) Sistema MIMO 4x4 tradicional:

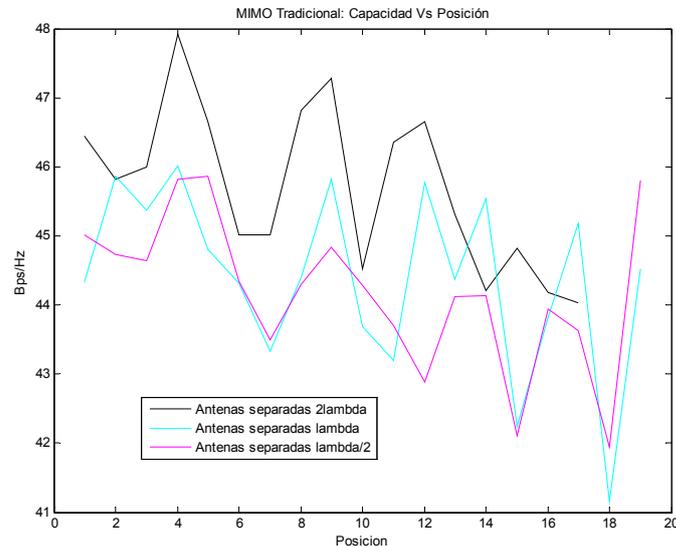


Figura 77: Capacidad Medida MIMO 4x4 Tradicional

Como podemos ver, valores más altos de capacidad son para la configuración de antenas transmisoras separadas 2λ y las más bajas para la configuración de antenas transmisoras separadas $\lambda/2$. Si nos fijamos en las posiciones de las antenas receptoras, tenemos valores de capacidad mayores para las zonas centrales del laboratorio.

Si nos fijamos bien en la gráfica, y como pudimos ver en la primera gráfica expuesta en este apartado, para la configuración de MIMO tradicional con las antenas separadas 2λ , las medidas solamente llegan hasta la posición 17. Esto es así por problemas en las medidas en las dos últimas posiciones que nos han hecho omitir los resultados de todos los parámetros de éstas.



b) Sistema MIMO 4x4 distribuido:

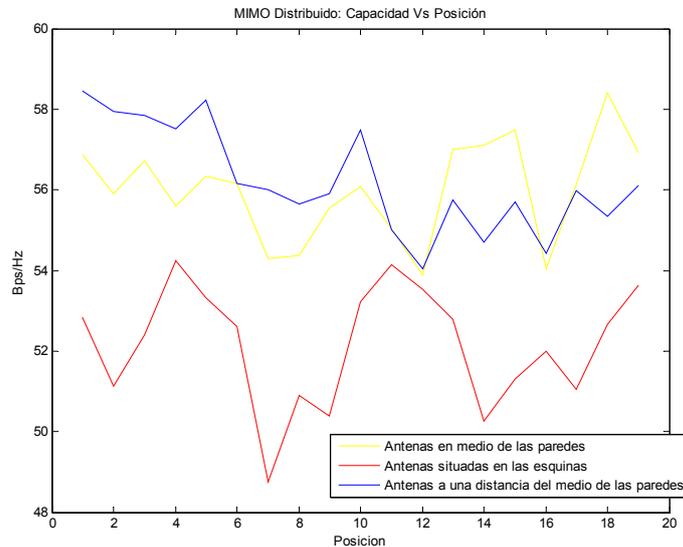
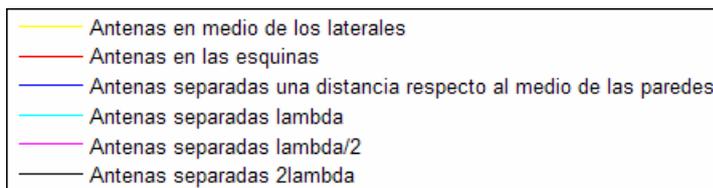


Figura 78: Capacidad Medida MIMO 4x4 Distribuido

En un sistema MIMO distribuido podemos observar como los valores de capacidad para las antenas por la mitad de las paredes son mayores que situando las antenas transmisoras en las esquinas.

El análisis de la capacidad en el laboratorio arroja para visión directa entre antenas transmisoras y receptoras que la capacidad aumenta conforme aumenta la separación de los elementos radiantes, ya que esta separación contribuye a distinguir de mejor manera la contribución de cada uno de ellos.

Si dibujamos en una gráfica ambos sistemas:



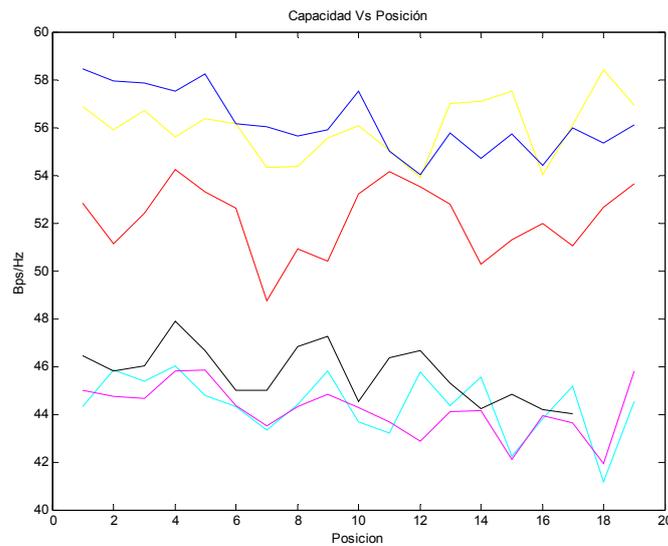


Figura 79: Capacidad Medida MIMO 4x4

La conclusión más relevante que sacamos es la mayor capacidad de los sistemas MIMO distribuidos que los sistemas MIMO tradicionales. Realizamos en este momento el análisis estadístico y la gráfica que obtenemos es la siguiente (los colores se mantienen como en la leyenda de la gráfica anterior):

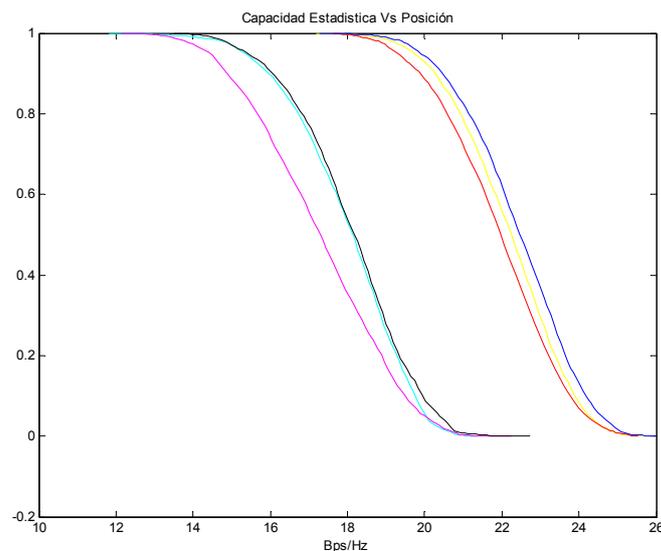
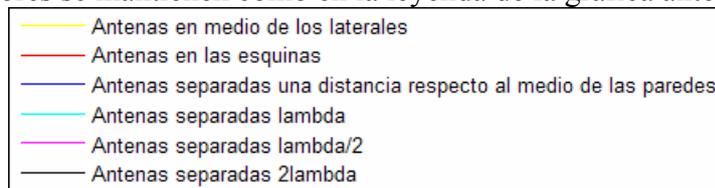


Figura 80: Capacidad Medida Estadística MIMO 4x4

Como podemos observar, los valores de más a la derecha, de mayor capacidad, son los del sistema MIMO distribuido, como ya habíamos concluido anteriormente.



Compararemos esta gráfica con la obtenida de realizar el mismo procesado al modelo teórico simulado con el Trazador Indoor 3D.

5.2.3 Análisis de la Correlación

La gran complejidad del medio por su forma física y la distribución de ordenadores, armarios, sillas, mesas... hace que la correlación de los elementos tanto en transmisión como en recepción, experimenten variaciones a lo largo de todo el recorrido por las 19 posiciones escogidas en el laboratorio.

A continuación mostramos las gráficas obtenidas de la Correlación en transmisión y recepción respecto de las posiciones de las antenas receptoras, para todas las configuraciones posibles de antenas transmisoras:

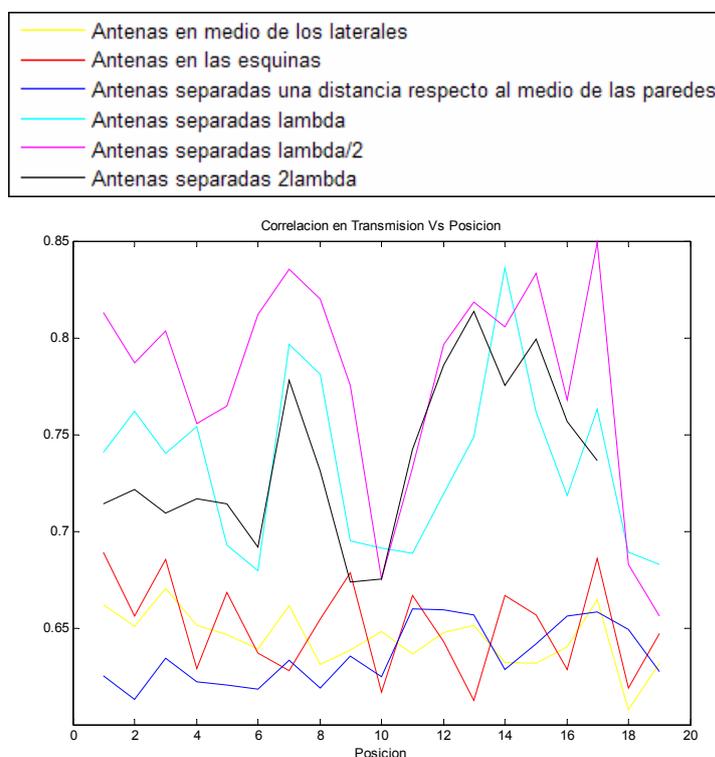


Figura 81: Correlación Medida en Transmisión MIMO 4x4

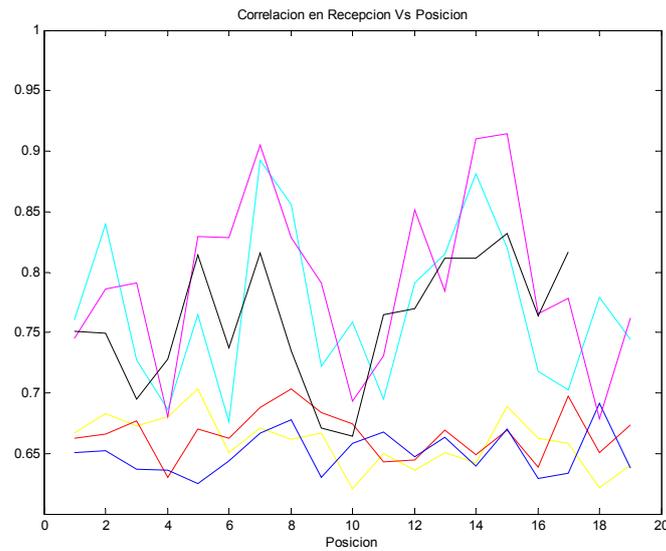


Figura 82: Correlación Medida en Recepción MIMO 4x4

Podemos observar que la variación de este parámetro a lo largo del recorrido por cada una de las posiciones del laboratorio presenta fluctuaciones en algún caso notables que se pueden interpretar como la incorporación de nuevos elementos físicos en canal. Podemos observar que los valores de correlación para el sistema MIMO 4x4 distribuido son menores y fluctúan en menor medida que el sistema MIMO 4x4 tradicional.

5.2.4 Análisis del Factor K

Para caracterizar los canales MIMO hemos utilizado la función de densidad de probabilidad de tipo Rice. La relación entre el rayo directo y el resto de las contribuciones se ve reflejada en este parámetro, denominado *factor K*, para todas y cada una de las posiciones estudiadas.



La gráfica que obtenemos es la siguiente:

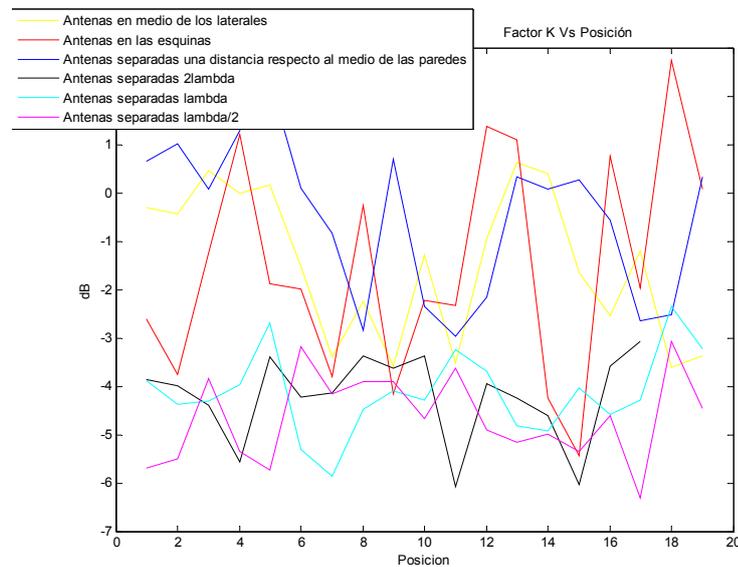


Figura 83: Factor K Medido MIMO 4x4

Las posiciones en las que el valor del factor K es mayor es debido a que los transmisores se encuentran más cercanos a las antenas receptoras y por tanto los obstáculos que los separan son de menor entidad. En las zonas en las que no se presenta una visión directa, el valor disminuye considerablemente.

5.2.5 Análisis del RMS Delay Spread

Con este parámetro vamos a tener una idea de lo cercanos o lejanos, en tiempo, que llegan las contribuciones de la señal con respecto a la aportación principal del rayo directo. En la medida de este parámetro podemos observar que en posiciones con visión directa, al ir aumentando la distancia entre antenas transmisoras y receptoras, las reflexiones y difracciones hacen que éste se vaya incrementando. En este caso las configuraciones que aportan un nivel más alto son las que tienen menor separación entre las antenas y una orientación de enfrentamiento de los componentes.



Las gráficas que obtenemos son las siguientes:

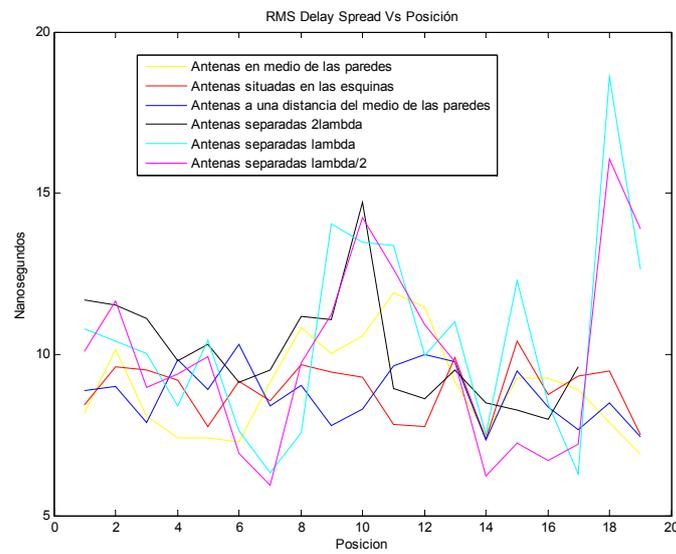


Figura 84: RMS Delay Spread Medido MIMO 4x4 (1)

Si a todos los valores de RMS Delay Spread, de cada una de las configuraciones, le aplicamos una desviación estándar, la gráfica que obtenemos es la siguiente:

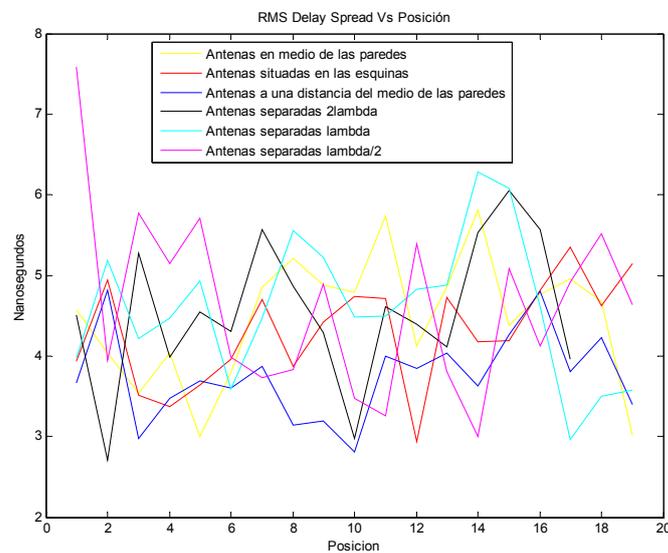


Figura 85: RMS Delay Spread Medido MIMO 4x4 (2)

Como se explicó en el primer apartado teórico de este capítulo, este parámetro está relacionado inversamente con el ancho de banda de coherencia, que en los supuestos de ocultación parcial, hace que la velocidad máxima de transmisión de datos sin interferencia deba de ser menor.



Para concluir este apartado, vamos a mostrar una tabla a modo de resumen con los valores medidos de algunos de los parámetros estudiados anteriormente para cada posición de las antenas receptoras y cada configuración de antenas transmisoras:

a) Capacidad (bits/seg/Hz):

La SNR que se ha utilizado es la obtenida de las medidas, que como hemos dicho en apartados anteriores tiene un valor de 44.4126 dB:

Configuración ----- Posición	Antenas separadas 2λ	Antenas separadas λ	Antenas separadas $\lambda/2$	Antenas distribuidas en medio de las paredes	Antenas distribuidas en las esquinas	Antenas a una distancia del medio de las paredes
1	46.4467	44.3350	45.0127	56.8706	52.8487	58.4609
2	45.8173	45.8669	44.7235	55.8967	51.1360	57.9495
3	46.0021	45.3773	44.6396	56.7178	52.3998	57.8479
4	47.9112	46.0138	45.8144	55.5866	54.2398	57.5129
5	46.6589	44.8069	45.8650	56.3416	53.3169	58.2358
6	45.0160	44.3136	44.3467	56.1671	52.6195	56.1672
7	45.0203	43.3336	43.5010	54.2982	48.7539	56.0154
8	46.8214	44.4048	44.3014	54.3759	50.9093	55.6373
9	47.2733	45.8254	44.8396	55.5417	50.3897	55.8960
10	44.5188	43.6815	44.2893	56.0767	53.2216	57.4957
11	46.3484	43.2008	43.6981	55.0419	54.1441	55.0205
12	46.6578	45.7731	42.8851	53.8876	53.5293	54.0363
13	45.3104	44.3696	44.1137	56.9878	52.7815	55.7457
14	44.2138	45.5355	44.1356	57.0937	50.2670	54.6997
15	44.8144	42.2410	42.1029	57.4960	51.2972	55.7050
16	44.1795	43.8284	43.9442	54.0420	51.9966	54.4224
17	44.0333	45.1793	43.6225	56.1265	51.0462	55.9660
18	--	41.1537	41.9461	58.4093	52.6580	55.3336
19	--	44.5259	45.7992	56.9228	53.6357	56.1134
MEDIA	45.7084	44.4087	44.1885	55.9937	52.1679	56.2243

Tabla 6: Resumen Capacidad Medida vs Posición para las distintas configuraciones MIMO



b) RMS Delay Spread (nanosegundos):

Configuración ----- Posición	Antenas separadas 2λ	Antenas separadas λ	Antenas separadas $\lambda/2$	Antenas distribuidas en medio de las paredes	Antenas distribuidas en las esquinas	Antenas a una distancia del medio de las paredes
1	11.6744	10.7847	10.0807	8.1712	8.4449	8.8690
2	11.5347	10.4212	11.6672	10.1528	9.6011	9.0003
3	11.1117	10.0188	8.9826	8.0807	9.5098	7.8742
4	9.7932	8.3992	9.3904	7.3987	9.1918	9.8425
5	10.3103	10.4365	9.9309	7.4186	7.7624	8.9090
6	9.1385	7.6400	6.9320	7.2885	9.1522	10.3186
7	9.5216	6.3402	5.9438	9.1287	8.5679	8.3934
8	11.1872	7.5553	9.7295	10.8297	9.6857	9.0294
9	11.0816	14.0355	11.2376	10.0127	9.4402	7.7787
10	14.7023	13.4657	14.2531	10.5800	9.3033	8.3108
11	8.9472	13.3680	12.6345	11.9081	7.8209	9.6487
12	8.6078	9.9736	10.9266	11.4629	7.7671	9.9898
13	9.5105	11.0129	9.7686	9.1691	9.9070	9.7651
14	8.4794	7.4981	6.2184	7.5439	7.3848	7.3466
15	8.2828	12.2791	7.2570	9.2603	10.4104	9.4763
16	7.9924	8.4663	6.7088	9.2648	8.7520	8.3630
17	9.6135	6.2837	7.2065	8.9164	9.3186	7.6646
18	--	18.6056	16.0693	7.8918	9.4927	8.4932
19	--	12.6302	13.8727	6.8920	7.5055	7.4447
MEDIA	10.0876	10.4850	9.9374	9.0195	8.8957	8.7641

Tabla 7: RMS Delay Spread Medido para las distintas configuraciones MIMO



c) Factor K (dB):

Configuración ----- Posición	Antenas separadas 2λ	Antenas separadas λ	Antenas separadas $\lambda/2$	Antenas distribuidas en medio de las paredes	Antenas distribuidas en las esquinas	Antenas a una distancia del medio de las paredes
1	-3.8522	-3.8891	-5.6964	-0.3096	-2.6165	0.6393
2	-3.9964	-4.3700	-5.4990	-0.4468	-3.7564	1.0025
3	-4.4009	-4.3041	-3.8451	0.4598	-1.2422	0.0788
4	-5.5653	-3.9613	-5.3445	-0.0016	1.2029	1.2956
5	-3.3938	-2.6978	-5.7295	0.1627	-1.8814	1.2956
6	-4.2241	-5.3171	-3.1728	-1.5298	-1.9926	0.0890
7	-4.1332	-5.8655	-4.1669	-3.3837	-3.7891	-0.8386
8	-3.3680	-4.4760	-3.9114	-2.2505	-0.2632	-2.8322
9	-3.6334	-4.0956	-3.8984	-3.5892	-4.1520	0.6819
10	-3.3743	-4.2813	-4.6732	-1.2874	-2.2169	-2.3504
11	-6.0774	-3.2510	-3.6364	-3.5287	-2.3255	-2.9750
12	-3.9369	-3.6932	-4.8939	-0.9456	1.3766	-2.1583
13	-4.2404	-4.8087	-5.1550	0.6251	1.0976	0.3230
14	-4.6019	-4.9195	-4.9878	0.4020	-4.2482	0.0836
15	-6.0236	-4.0372	-5.3423	-1.6412	-5.4356	0.2759
16	-3.5818	-4.5908	-4.6144	-2.5355	0.7643	-0.5623
17	-3.0685	-4.2810	-6.3127	-1.1948	-1.9644	-2.6532
18	--	-2.3461	-3.0734	-3.6150	2.7413	-2.5280
19	--	-3.2182	-4.4541	-3.3667	0.0734	0.3294
MEDIA	-4.2137	-4.3661	-5.3055	-1.4416	-1.2205	-0.2710

Tabla 8: Factor K Medido para las distintas configuraciones MIMO



5.3 Comparación Resultados Teórico-Experimentales

En este apartado realizaremos una comparación entre los resultados obtenidos teóricamente con los obtenidos experimentalmente, es decir, los resultados de las simulaciones con el Trazador de Rayos en 3 dimensiones y los obtenidos de las campañas de medidas.

Para realizar esta comparación, vamos a mostrar las gráficas de capacidad obtenidas para cada uno de los resultados de las distintas configuraciones, para los dos casos anteriores: teórico y experimental. Para realizar estas gráficas hemos fijado el valor de señal a ruido SNR igual a 20 dB.

En primer lugar se muestra la gráfica de capacidad tras realizarle un análisis estadístico, como ya dijimos en apartados anteriores, obtenida tras la simulación con el Trazador Indoor en 3 dimensiones para cada una de las configuraciones:

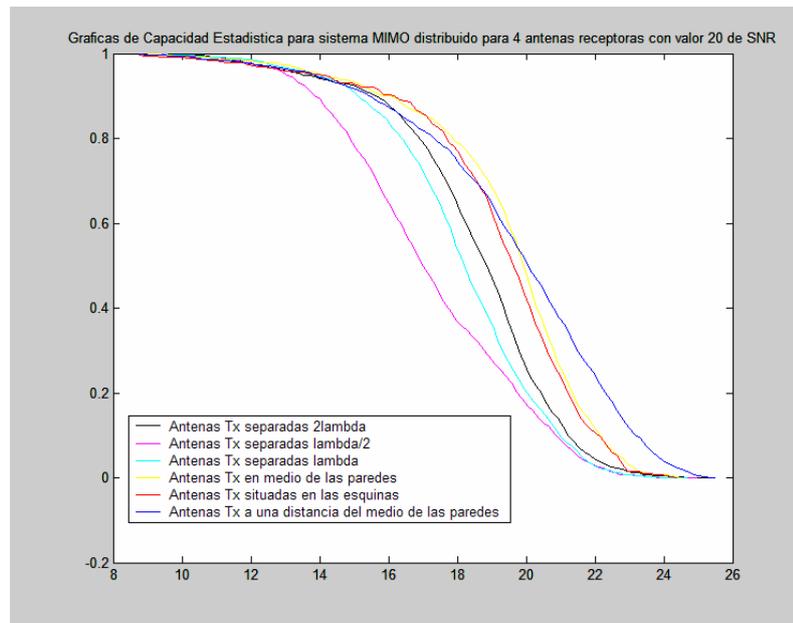


Figura 86: Capacidad Simulada Estadística MIMO 4x4

Y en segundo lugar pasaremos al resultado experimental. Con las campañas de medidas obtenidas en el espacio indoor y los programas de procesamiento que ya explicamos en su momento, realizamos este análisis con el que obtenemos las siguientes gráficas de capacidad, la primera de ellas sin procesamiento estadístico, y posteriormente tras realizarle el procesamiento estadístico convenientemente:

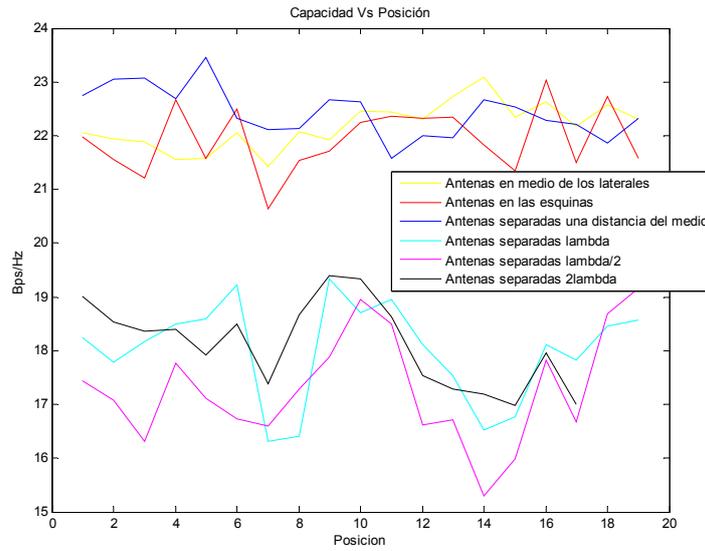


Figura 87: Capacidad Medida MIMO 4x4

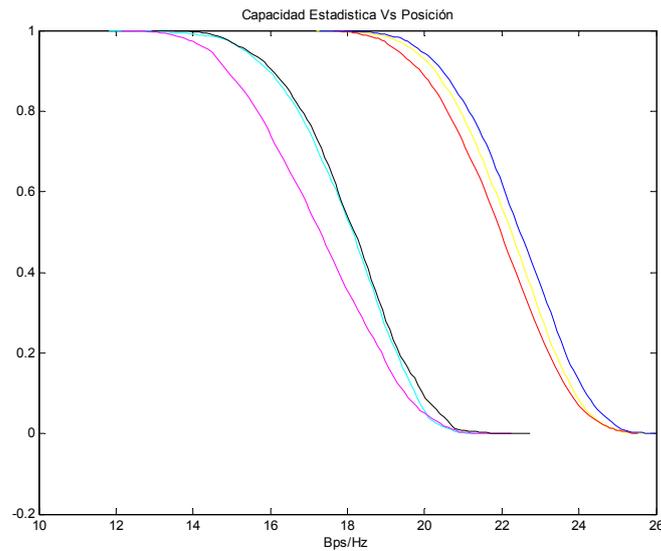


Figura 88: Capacidad Medida Estadística MIMO 4x4

Para realizar la comparación, nos fijamos en las dos gráficas en las que se encuentra la capacidad tras realizarle un procesamiento estadístico, figura 87 y figura 89. Podemos apreciar en ambas gráficas que las curvas son muy parecidas, aunque obtenemos mayores valores de capacidad para las medidas realizadas. Obteniendo mayores valores de capacidad para los sistemas MIMO distribuido frente a los sistemas MIMO tradicionales.

Si realizamos dos comparaciones para dos configuraciones diferentes para las simulaciones y para las medidas, obtenemos las siguientes gráficas:

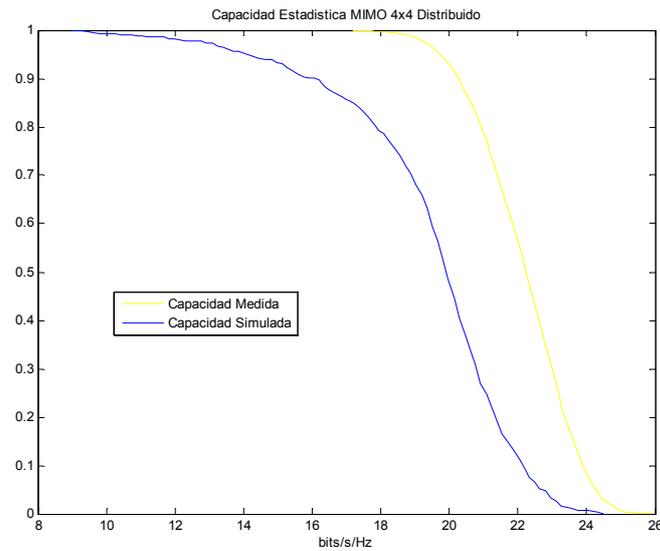


Figura 89: Capacidad Estadística para MIMO 4x4 Distribuido con Antenas Tx en medio de las paredes Medida y Simulada

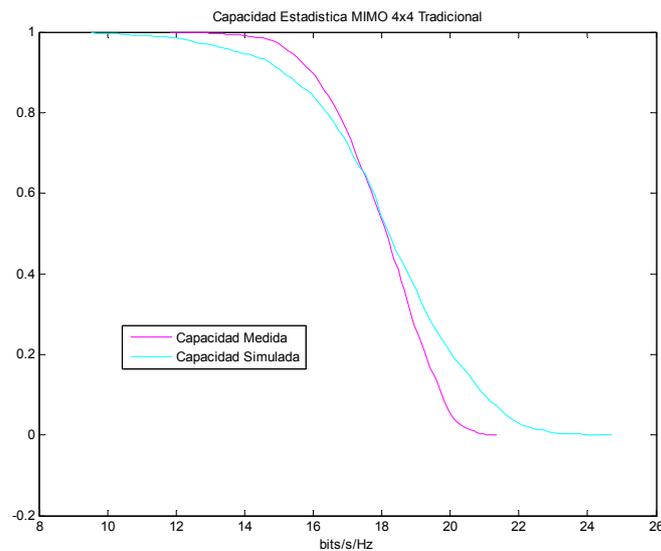


Figura 90: Capacidad Estadística para MIMO 4x4 Tradicional con Antenas Tx separadas λ Medida y Simulada

Podemos observar como en los sistemas MIMO distribuidos la diferencia es mayor entre los valores medidos y los simulados, y en los sistemas MIMO tradicionales es menor la diferencia, como podremos comprobar con los valores de las tablas que pondremos a continuación.

A continuación vamos a mostrar una tabla para demostrar lo anteriormente dicho, con valores medios para cada una de las configuraciones, con un valor de SNR igual a 20, tanto para valores de capacidad (Bps/Hz) obtenidos teóricamente con el programa trazador



de rayos como con los valores de capacidad obtenidos tras las campañas de medidas, que nos ayudará a comparar los resultados obtenidos:

Configuración ----- Modelo	Antenas separadas 2λ	Antenas separadas λ	Antenas separadas $\lambda/2$	Antenas distribuidas en medio de las paredes	Antenas distribuidas en las esquinas	Antenas a una distancia del medio de las paredes
TRAZADOR INDOOR 3D	18.6135	18.1794	17.2782	19.5190	19.3019	19.7344
CAMPAÑA DE MEDIDAS	18.1227	18.0081	17.2967	22.1875	21.9316	22.4383

Tabla 9: Valores de Capacidad medios simulados y medidos para las distintas configuraciones

Como podemos observar, obtenemos valores muy parecidos entre ambos modelos, aunque aparece una mayor diferencia en los valores para los sistemas MIMO distribuidos, que son algo mayores para los obtenidos en las campañas de medidas.

En el análisis teórico se puede observar y comprobar en los valores de la tabla anterior, que los valores de capacidad para la configuración de sistema MIMO tradicional con una separación en las antenas transmisoras de 2λ , se encuentran más cercanos a los valores obtenidos teóricamente en los sistemas MIMO distribuidos, si comparamos este hecho con los valores y curvas obtenidas de la campaña de medidas, en donde la separación es algo mayor.

De esta manera podemos concluir que con la campaña de medidas llegamos a resultados parecidos en la caracterización del canal de radiocomunicaciones para el modelo que nosotros hemos estudiado en este proyecto teóricamente: sistemas MIMO tradicionales y distribuidos en un entorno indoor para la banda de frecuencias de WIFI.



Capítulo 6. Conclusiones

En este apartado vamos a enunciar una serie de conclusiones a las que hemos llegado tras la realización de este proyecto final de carrera. En este proyecto hemos realizado, en primer lugar, un programa software con el que caracterizamos el canal radio de forma teórica en un entorno indoor, en la banda de frecuencias de WIFI para sistemas MIMO. Y en segundo lugar una campaña de medidas para los sistemas MIMO en el mismo entorno que hemos simulado con el programa anterior.

En primer lugar, escribimos una serie de conclusiones más generales sobre el trabajo realizado y posteriormente llegaremos a una serie de conclusiones sobre los sistemas MIMO en entornos indoor en la banda de frecuencias de WIFI.

Las primeras conclusiones que podemos enumerar son las siguientes:

- La carga computacional para la simulación del programa trazador de rayos en 3 dimensiones para caracterizar el canal de radiocomunicaciones es alta, a pesar de sólo tener en cuenta las contribuciones del rayo directo y rayos reflejados en un espacio indoor vacío.
- Si realizamos un estudio de tiempos de duración de las simulaciones según el sistema MIMO simulado y el número de reflexiones, obtenemos la siguiente tabla resumen, en la que visualizaremos como aumenta el tiempo de simulación al aumentarle el número de reflexiones, ya que de esta manera aumentaría muy considerablemente el número de dipolos imágenes creados:

<i>Tiempo</i>	1 Reflexión	2 Reflexiones	3 Reflexiones
MIMO Tradicional	3 min. 10 seg.	12 min. 35 seg.	37 min. 57 seg.
MIMO Distribuido	3 min. 40 seg.	13 min. 55 seg.	36 min. 8 seg.

Tabla 10: Tiempos de simulación según el sistema MIMO y el número de reflexiones

- Si quisiéramos realizar un estudio más real del entorno indoor, también tendríamos en cuenta otras contribuciones como los rayos difractados, además de incrementarse las imágenes de los rayos reflejados por encontrarse un mayor número de materiales y obstáculos, aumentando de esta manera aún mas la carga computacional, y por lo tanto, aumentando el tiempo de espera para la consecución de los resultados.
- Por lo tanto, la toma de medidas para la caracterización del canal radio tiene dos objetivos fundamentales, por una parte la validación de los



resultados teóricos y por otra reducir la carga computacional de los simuladores.

Las siguientes conclusiones son las que hemos llegado sobre los sistemas MIMO, tanto tradicionales como distribuidos, y las enumeramos a continuación:

- Los sistemas MIMO distribuidos, en nuestro caso hemos estudiado distribuir las antenas transmisoras, ofrecen una mayor capacidad que los sistemas MIMO tradicionales. En la siguiente tabla demostramos este hecho con los valores de capacidad media (SNR=20) obtenidos para los sistemas MIMO, tras la simulación del trazador de rayos y la campaña de medidas:

<i>Capacidad(Bps/Hz)</i>	MIMO Distribuido	MIMO Tradicional
TRAZADOR INDOOR 3D	19.5184	18.0237
CAMPAÑA DE MEDIDAS	22.1858	17.8092

Tabla 11: Capacidad medias simuladas y medidas según sistema MIMO

- Si observamos la tabla anterior, podemos llegar a la conclusión de que para un valor determinado de nivel de señal a ruido (SNR), los valores de capacidad para los sistemas MIMO distribuidos son mayores a los obtenidos para estos sistemas tras la simulación teórica.
- Únicamente separando una distancia igual o superior a 2λ las antenas transmisoras en los sistemas MIMO tradicionales, podremos llegar a aproximarnos a los niveles de capacidad de los sistemas MIMO distribuidos. Con lo cual, para sistemas MIMO tradicionales, cuanto mayor separemos las antenas transmisoras, mayores niveles de capacidad obtendremos en el receptor en un entorno indoor.
- Como ya habíamos descrito en uno de los apartados del proyecto, los sistemas MIMO con mayor número de antenas receptoras ofrecen también unos mayores niveles de capacidad en el receptor. Por lo tanto, MIMO 4×4 es más conveniente que MIMO 4×3 y que MIMO 4×2 , tanto para los sistemas tradicionales como los sistemas distribuidos. La siguiente tabla en la que mostramos valores de capacidad medios para SNR igual a 20 demuestra este hecho:



<i>Capacidad (Mbs/Hz)</i>	Antenas separadas 2λ	Antenas separadas λ	Antenas separadas $\lambda/2$	Antenas distribuidas en medio de las paredes	Antenas distribuidas en las esquinas	Antenas a una distancia del medio de las paredes	MEDIA
4 Antenas Receptoras	18.6135	18.1794	17.2782	19.5190	19.3019	19.7344	18.7711
3 Antenas Receptoras	16.8980	16.6554	16.1862	17.6536	17.4483	17.5298	17.0619
2 Antenas Receptoras	13.6816	13.6152	13.3236	14.2601	14.1503	13.8627	13.8156

Tabla 12: Capacidad de las distintas configuraciones según el número de antenas receptoras

- Los valores de correlación, tanto para transmisión como para recepción, para los sistema MIMO distribuidos son menores y fluctúan en menor medida que los sistemas MIMO tradicionales:

<i>Correlación</i>	Sistemas MIMO Distribuido	Sistemas MIMO Tradicional
Correlación en Transmisión	0.6437	0.7497
Correlación en Recepción	0.6586	0.7743

Tabla 13: Resumen Correlación Medida según el sistema MIMO

- Y, por último, para el factor K, que nos indicaba la relación entre el rayo directo y las demás contribuciones, en valor medio, es mayor para los sistemas MIMO distribuidos, ya que las antenas transmisoras se encuentran más cercanas a las antenas receptoras que se distribuyen a lo largo del espacio indoor, y por tanto los obstáculos que los separan son de menor entidad. La siguiente tabla muestra los valores cuantitativos obtenidos tras la realización de la campaña de medidas:

<i>Configuración vs Factor K</i>	Sistemas MIMO Distribuido	Sistemas MIMO Tradicional
Factor K (dB)	-0.9777	-4.6284

Tabla 14: Factor K medio según el sistema MIMO



Anexo 1

En este anexo vamos a mostrar una serie de imágenes, al igual que hicimos en el apartado 3.4 del proyecto, en las que se podrá visualizar la creación de los dipolos imágenes en el modelo del trazado de rayos que utiliza el Trazador Indoor 3D. En este caso, utilizaremos otra posición para las antenas transmisoras y receptoras, en particular, para el caso del sistema MIMO 4×4 distribuido con las antenas situadas en las esquinas, para una antena transmisora y una antena receptora determinada.

Las coordenadas de la antena receptora son:

- Eje X: -2 m.
- Eje Y: 1 m.
- Eje Z: 1 m.

Las coordenadas de la antena transmisora son:

- Eje X: 2.35 m.
- Eje Y: 1 m.
- Eje Z: -2.8 m.

Comenzamos simulando el Trazador sin ninguna reflexión, $nref=0$ por lo tanto la única “imagen” que crea el programa es únicamente la misma posición de la antena transmisora, es decir, solo existe contribución de rayo directo.

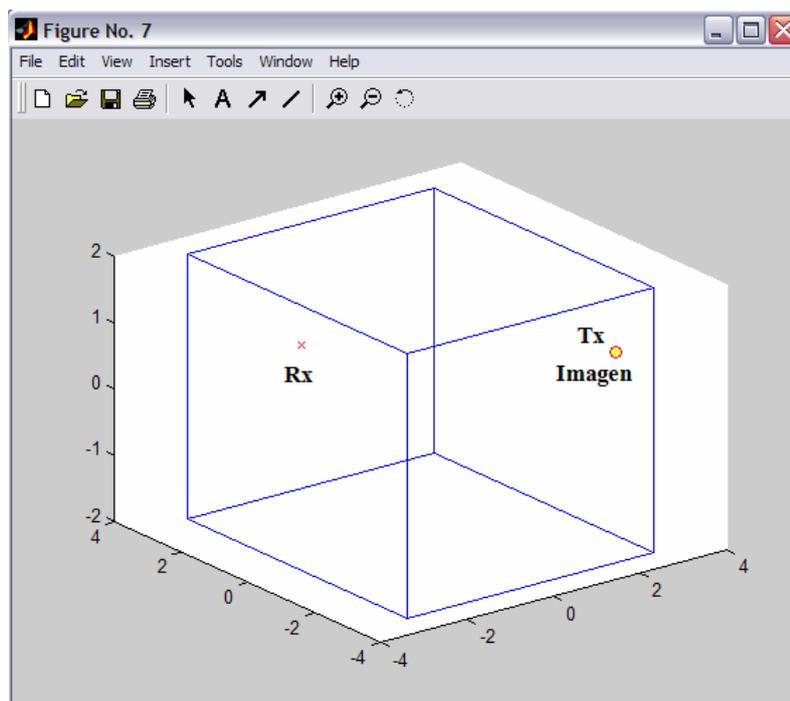


Figura 91: Laboratorio SICOMO con antenas Tx y Rx para 0 reflexiones



A partir de que le pongamos un número determinado de reflexiones, se irán creando los dipolos imágenes, teniendo en cuenta la distancia de la antena transmisora con cada una de las paredes del espacio cerrado.

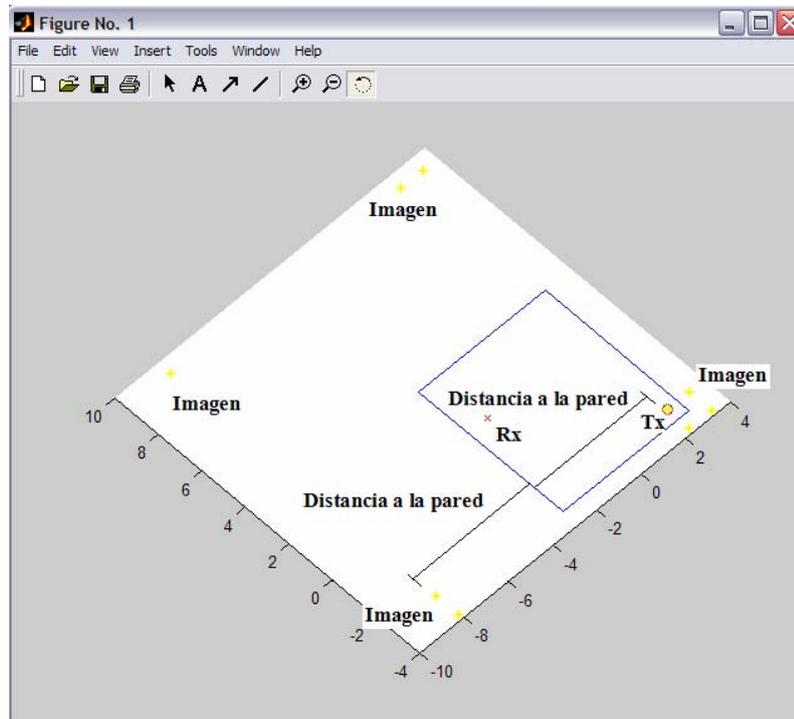


Figura 92: Creación de los dipolos imágenes



De esta manera, para $n_{ref}=1$, obtenemos las siguientes imágenes:

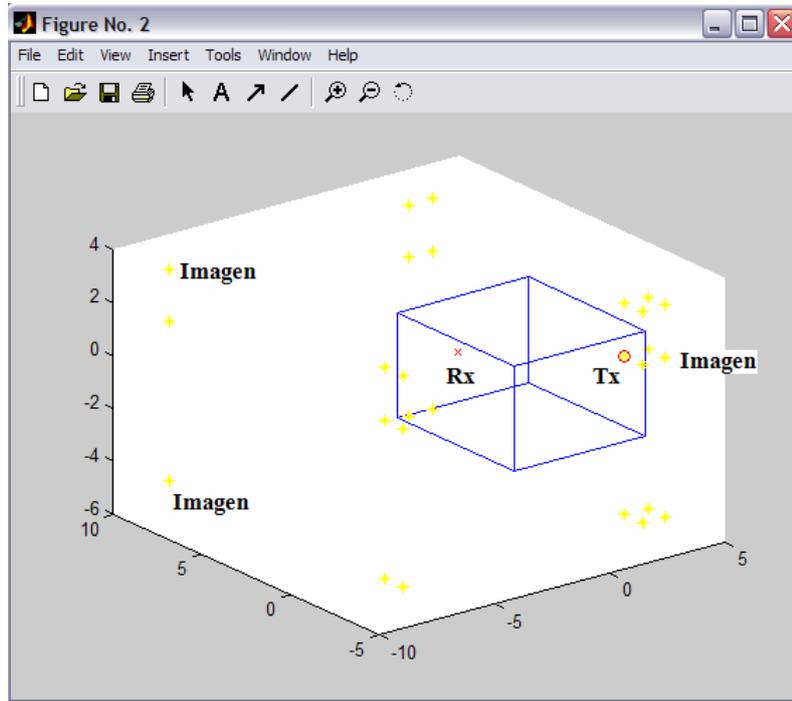


Figura 93: Laboratorio SICOMO con Antenas Tx y Rx para 1 reflexión

Si lo vemos desde arriba:

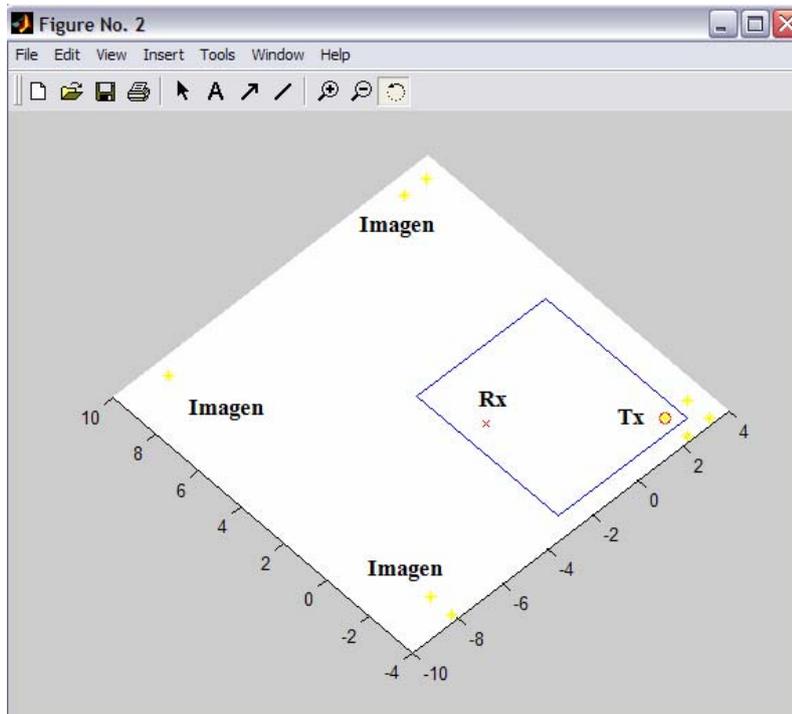


Figura 94: Laboratorio SICOMO vista superior con Antenas Tx y Rx para 1 reflexión



Como ya dijimos durante el proyecto, si aumentamos el número de reflexiones, el número de imágenes aumenta muy considerablemente, como podemos observar para el caso de que el número de reflexiones con el que simulamos sea de 2, es decir, $n_{ref}=2$:

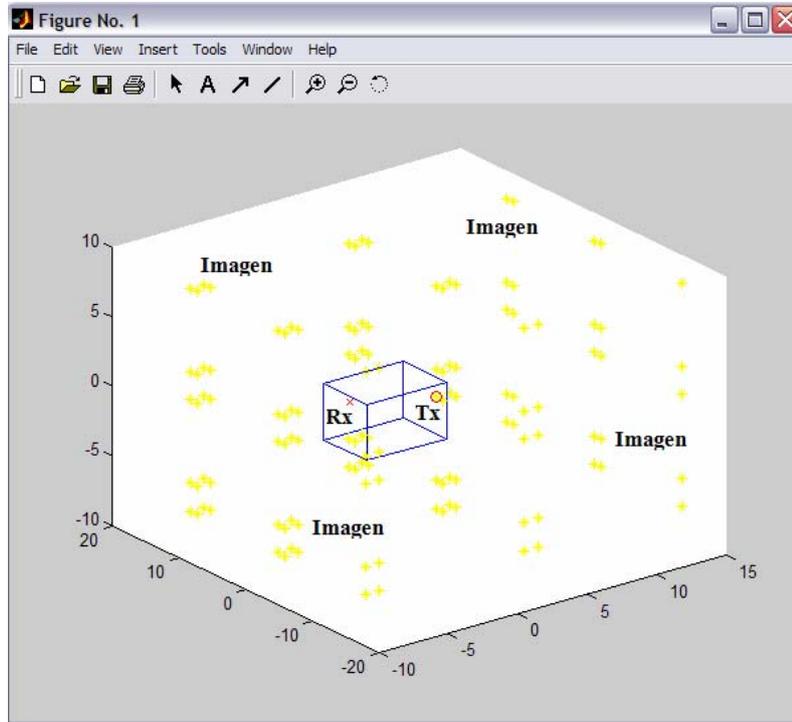


Figura 95: Laboratorio SICOMO con Antenas Tx y Rx para 2 reflexiones

Si lo vemos desde arriba:

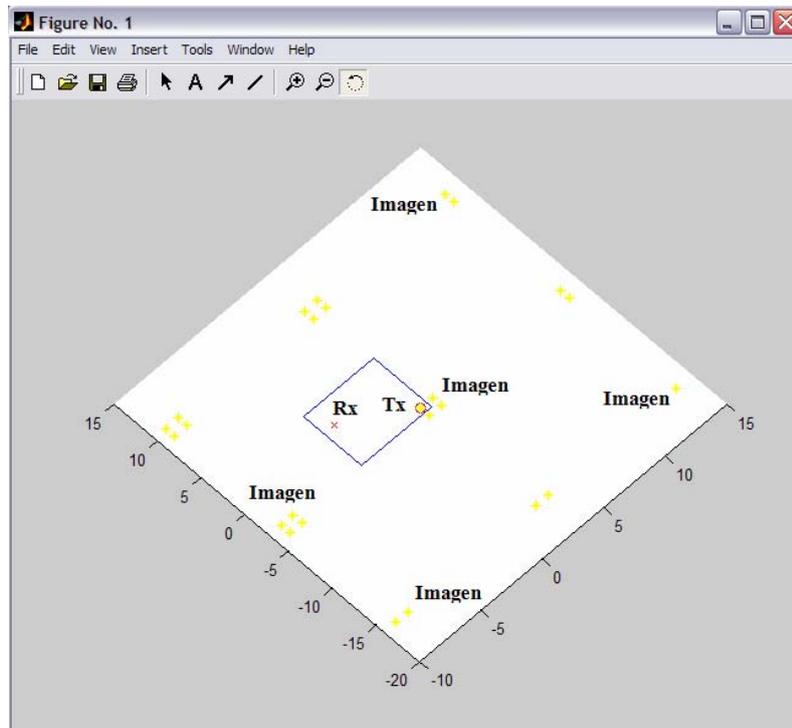


Figura 96: Laboratorio SICOMO vista superior con Antenas Tx y Rx para 2 reflexiones



Anexo 1



Y conforme más vayamos aumentando el número de reflexiones, mayor número de imágenes serán creadas por el programa.

Llegamos a comprobar en las pruebas del programa que a partir de 3 reflexiones, el campo eléctrico daba exactamente el mismo valor, esta es la razón por la cual se utilizó un valor de $nref=3$ para las simulaciones de las distintas configuraciones.



Anexo 2

En este anexo vamos a mostrar las gráficas que hemos obtenido para los valores de capacidad y potencia recibida después de la simulación con el Trazador Indoor 3D para cada una de las configuraciones estudiadas, en este caso para un valor de SNR igual a 20 dB.

A. Sistema MIMO tradicional

A.1 Antenas transmisoras separadas 2λ

a) Capacidad:

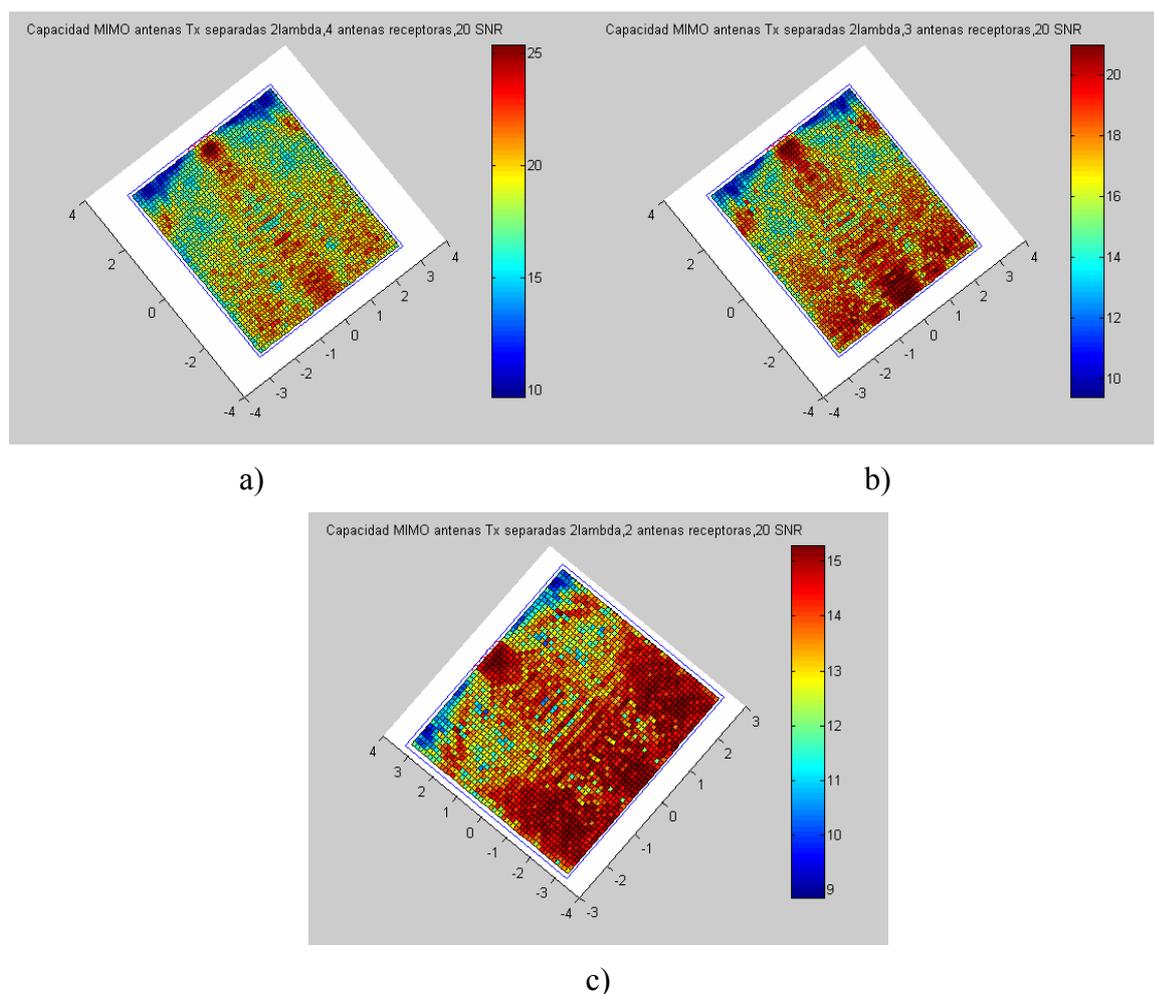


Figura 97: Capacidad Simulada MIMO Tradicional Antenas Tx separadas 2λ para a) 4 Antenas Rx b) 3 Antenas Rx c) 2 Antenas Rx



b) Potencia recibida:

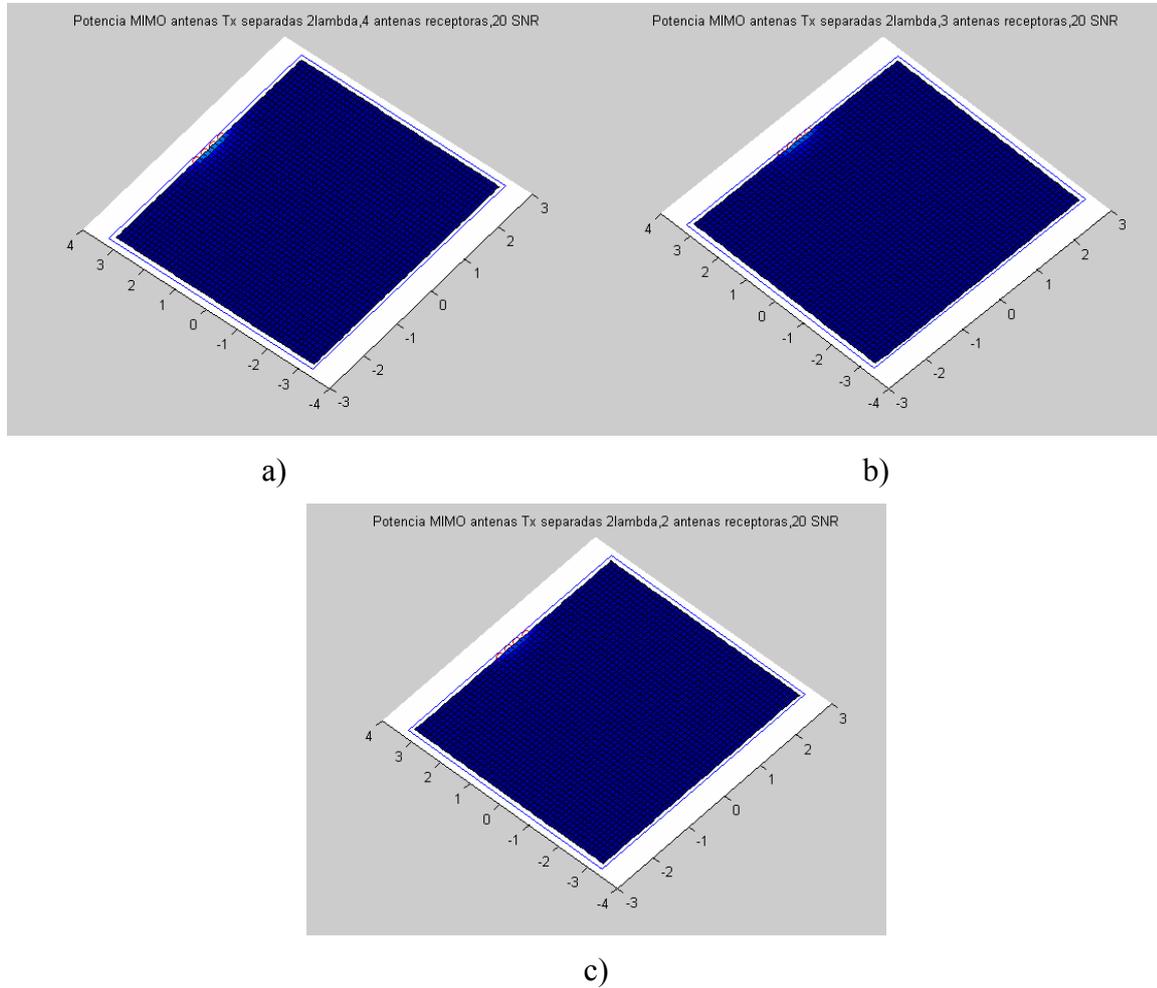


Figura 98: Potencia Recibida Simulada MIMO Tradicional Antenas Tx separadas 2λ para a) 4 Antenas Rx b) 3 Antenas Rx c) 2 Antenas Rx



A.2 Antenas transmisoras separadas $3\lambda/2$

a) Capacidad:

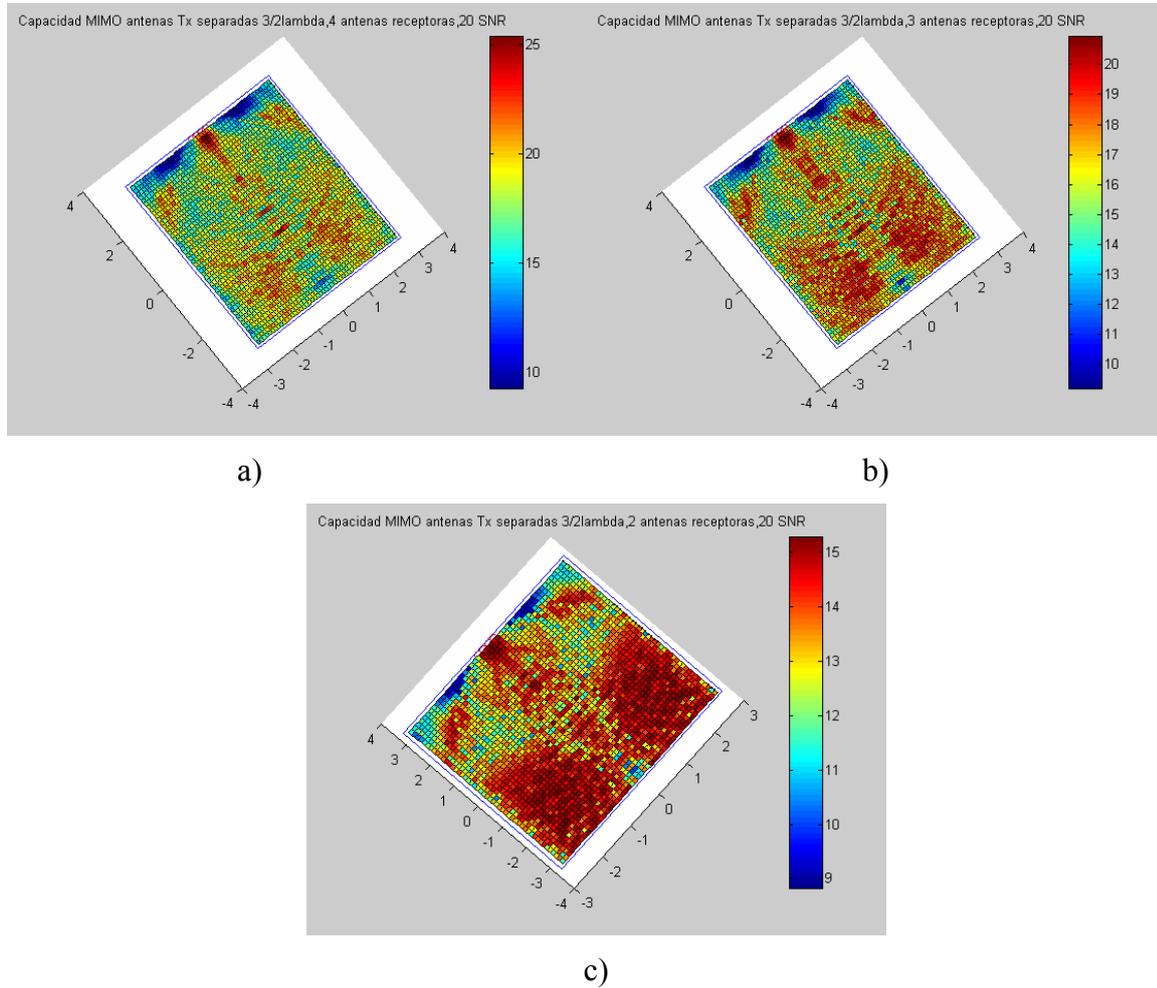


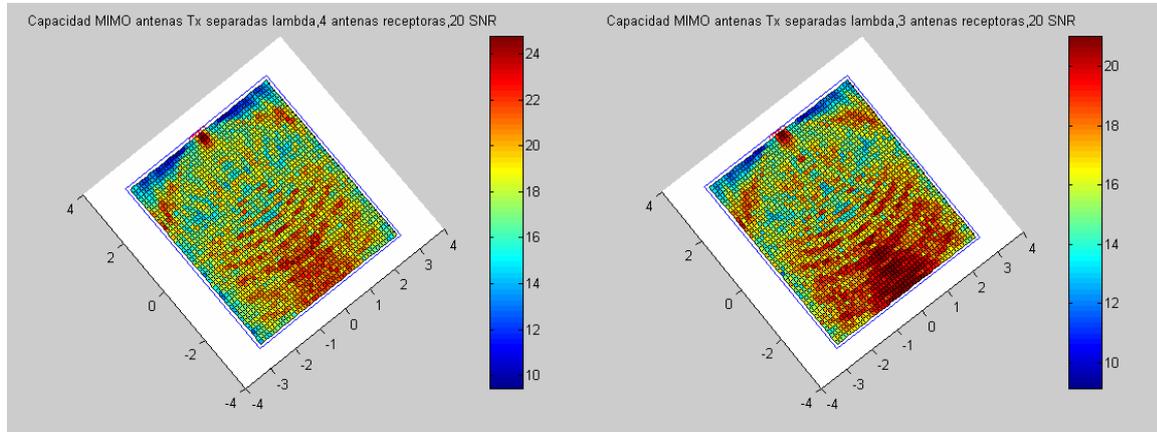
Figura 99: Capacidad Simulada MIMO Tradicional Antenas Tx separadas $3\lambda/2$ para a) 4 Antenas Rx b) 3 Antenas Rx c) 2 Antenas Rx

Omitimos de aquí en adelante en los sistemas MIMO tradicionales mostrar la gráfica de potencia recibida, porque es muy parecida a la mostrada para la primera configuración.



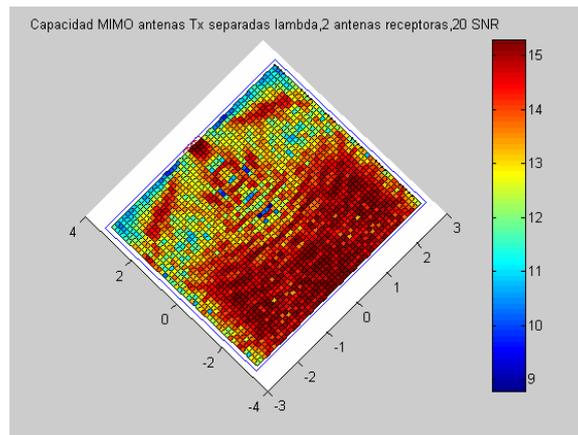
A.3 Antenas transmisoras separadas λ

a) Capacidad:



a)

b)



c)

Figura 100: Capacidad Simulada MIMO Tradicional Antenas Tx separadas λ para a) 4 Antenas Rx b) 3 Antenas Rx c) 2 Antenas Rx



A.4 Antenas transmisoras separadas $\lambda/2$

a) Capacidad:

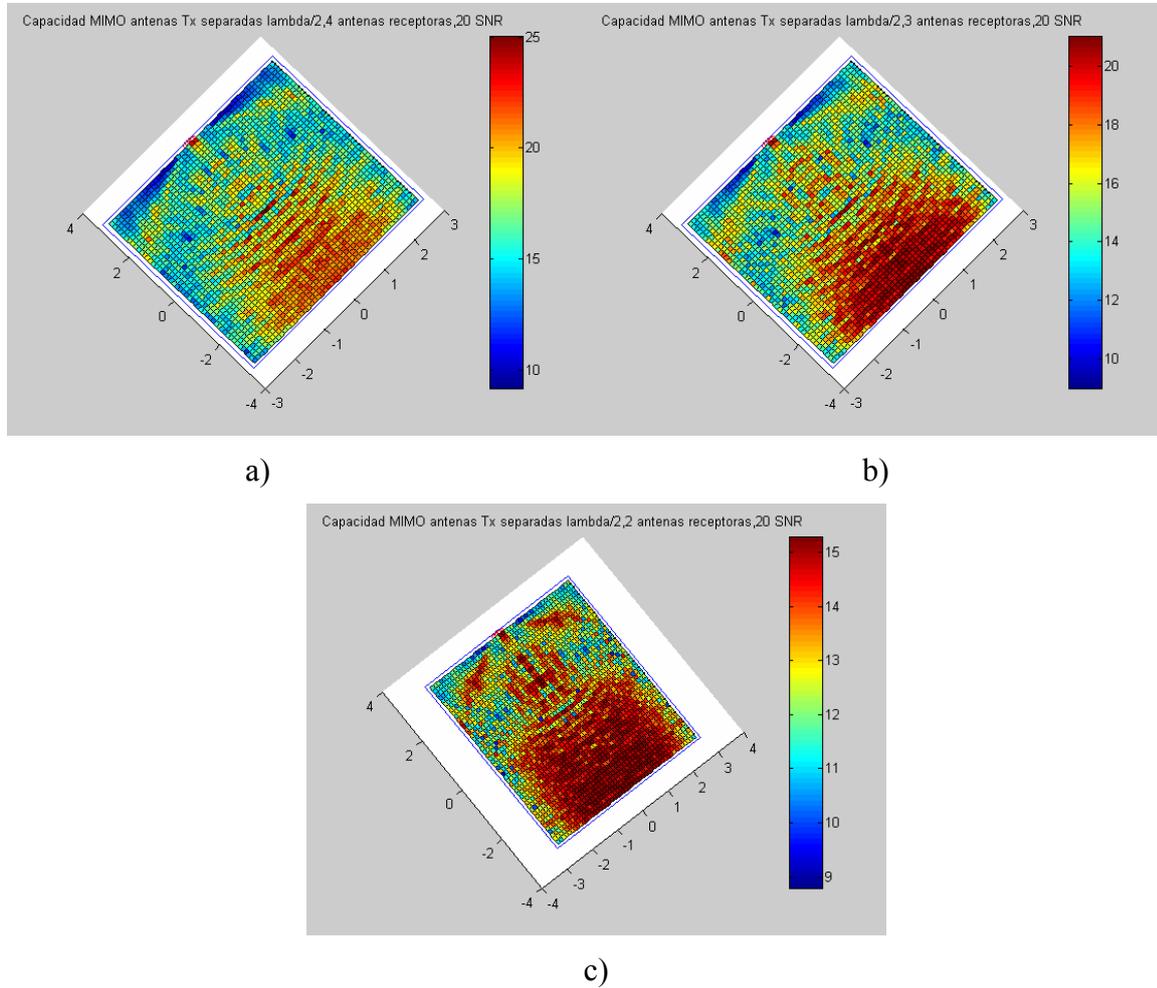
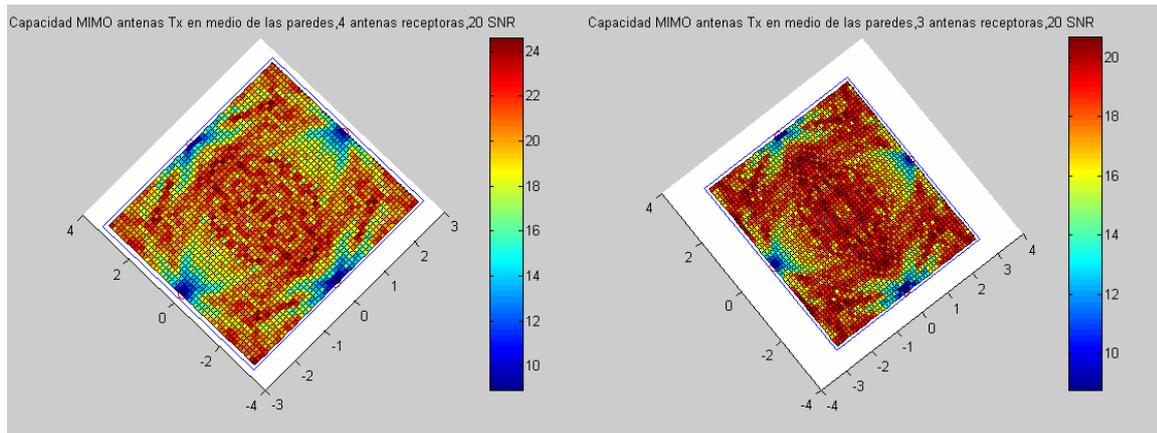


Figura 101: Capacidad Simulada MIMO Tradicional Antenas Tx separadas $\lambda/2$ para a) 4 Antenas Rx b) 3 Antenas Rx c) 2 Antenas Rx

B. Sistema MIMO distribuido

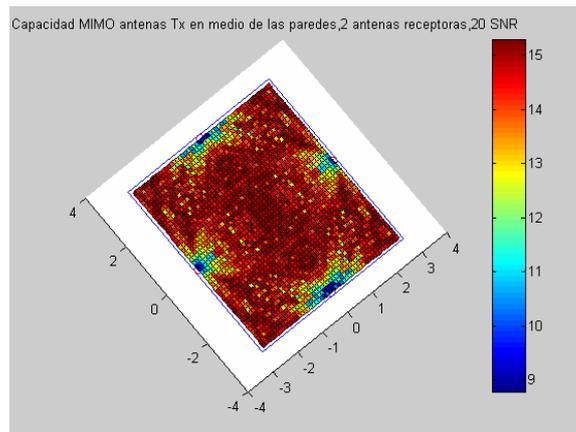
B.1 Antenas transmisoras a mitad de las paredes laterales

a) Capacidad:



a)

b)

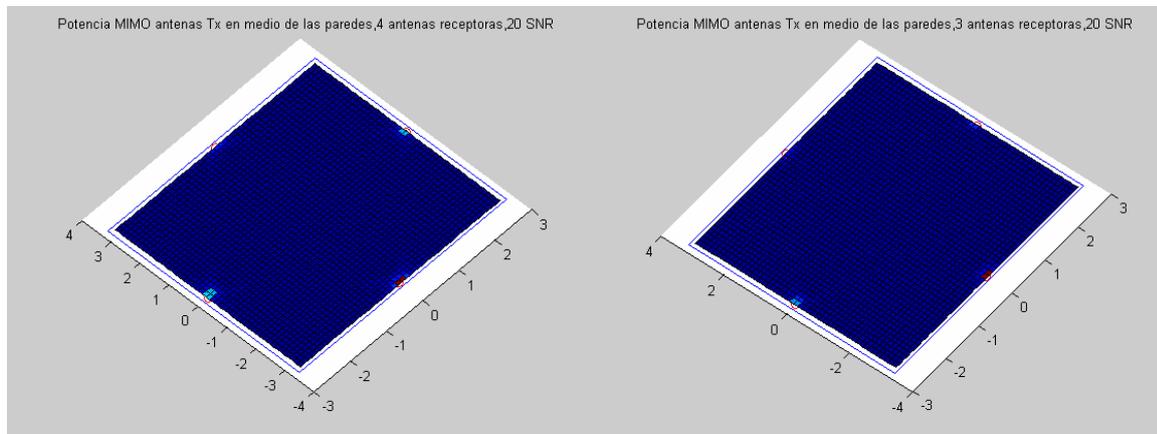


c)

Figura 102: Capacidad Simulada MIMO Distribuido Antenas Tx en medio de las paredes para a) 4 Antenas Rx b) 3 Antenas Rx c) 2 Antenas Rx

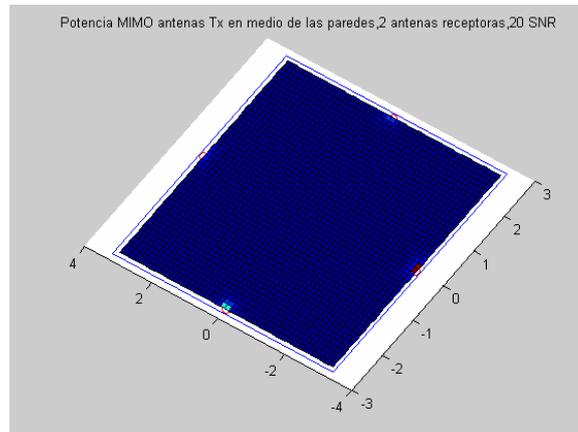


a) Potencia recibida:



a)

b)



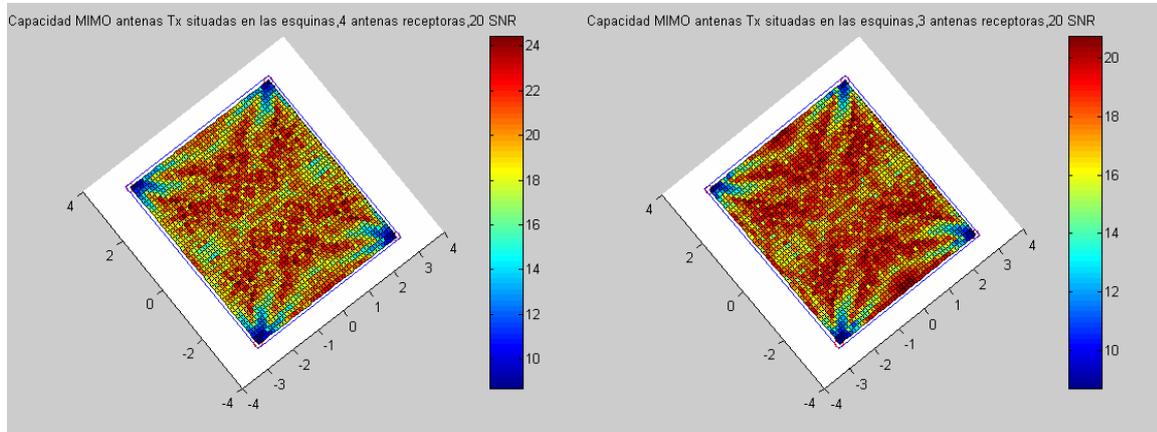
c)

Figura 103: Potencia Recibida Simulada MIMO Distribuido Antenas Tx en medio de las paredes para a) 4 Antenas Rx b) 3 Antenas Rx c) 2 Antenas Rx



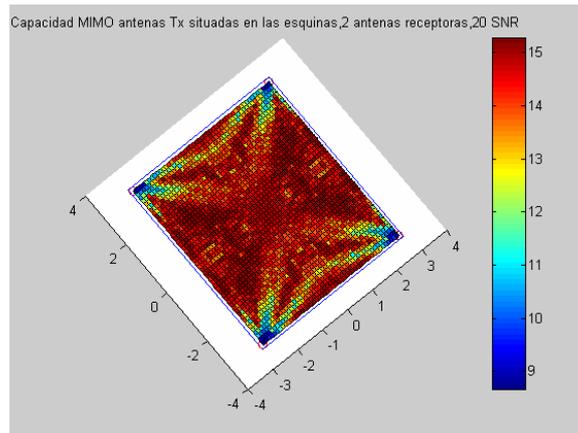
B.2 Antenas transmisoras situadas en las esquinas

a) Capacidad:



a)

b)



c)

Figura 104: Capacidad Simulada MIMO Distribuido Antenas Tx en las esquinas para a) 4 Antenas Rx b) 3 Antenas Rx c) 2 Antenas Rx



c) Potencia recibida:

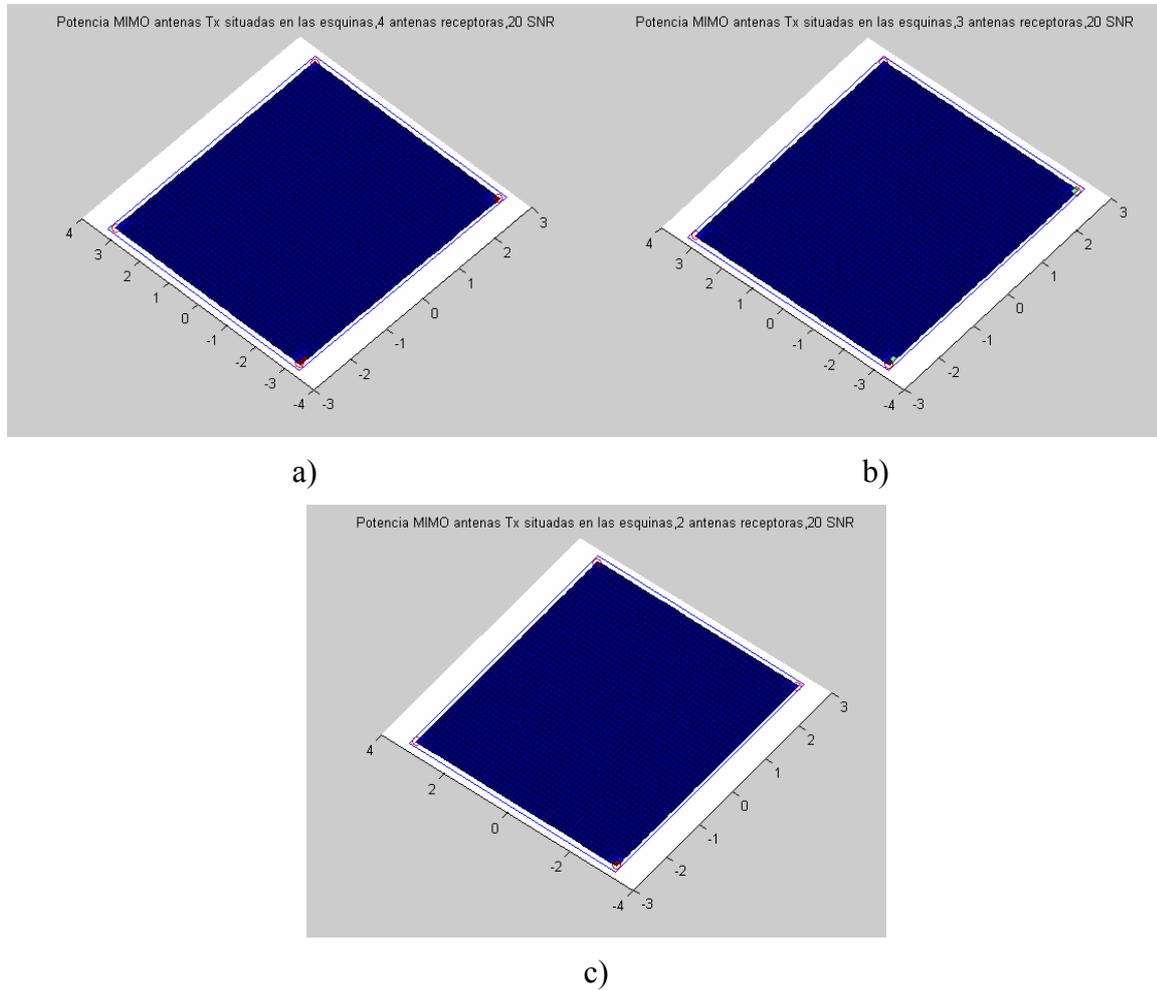
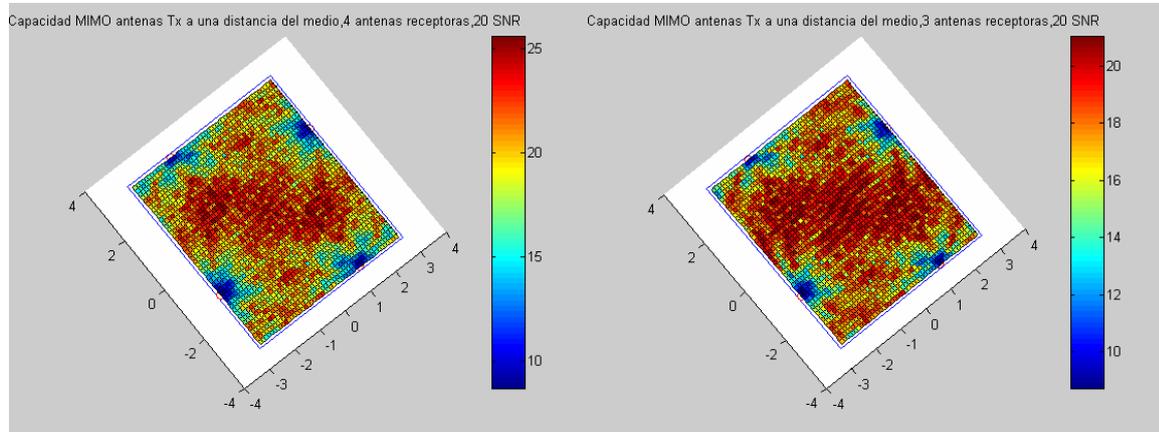


Figura 105: Potencia Recibida Simulada MIMO Distribuido Antenas Tx en las esquinas para a) 4 Antenas Rx b) 3 Antenas Rx c) 2 Antenas Rx



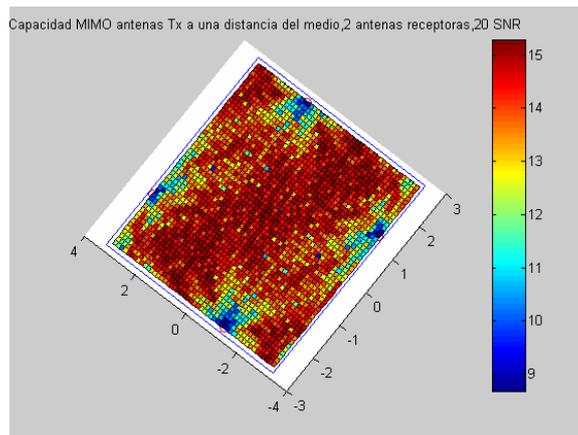
B.3 Antenas transmisoras a una distancia de la mitad de las paredes

a) Capacidad:



a)

b)

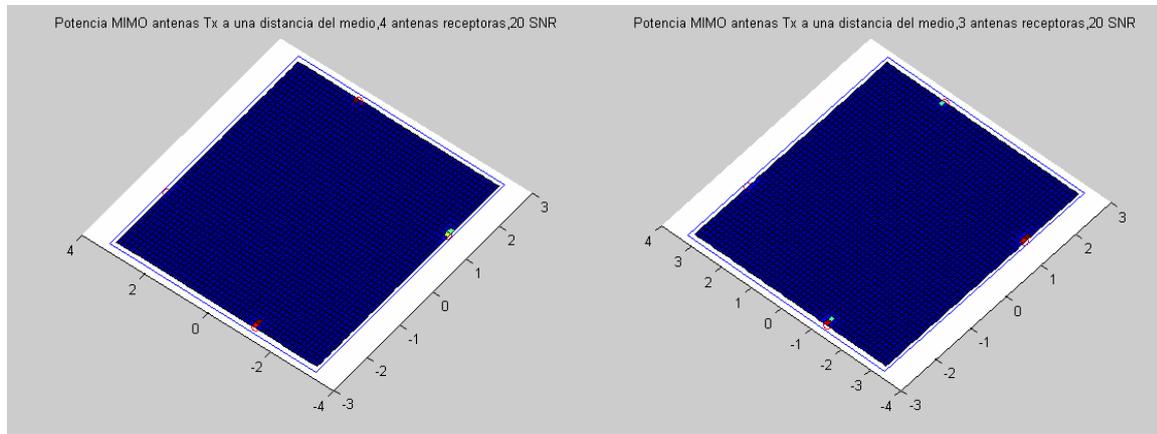


c)

Figura 106: Capacidad Simulada MIMO Distribuido Antenas Tx a una distancia del medio para a) 4 Antenas Rx b) 3 Antenas Rx c) 2 Antenas Rx

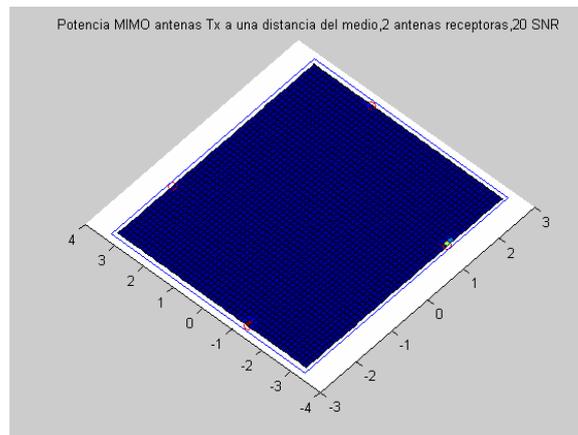


b) Potencia recibida:



a)

b)



c)

Figura 107: Potencia Recibida Simulada MIMO Distribuido Antenas Tx a una distancia del medio para a) 4 Antenas Rx b) 3 Antenas Rx c) 2 Antenas Rx



C. Análisis Estadístico de la Capacidad

a) Sistema MIMO tradicional:

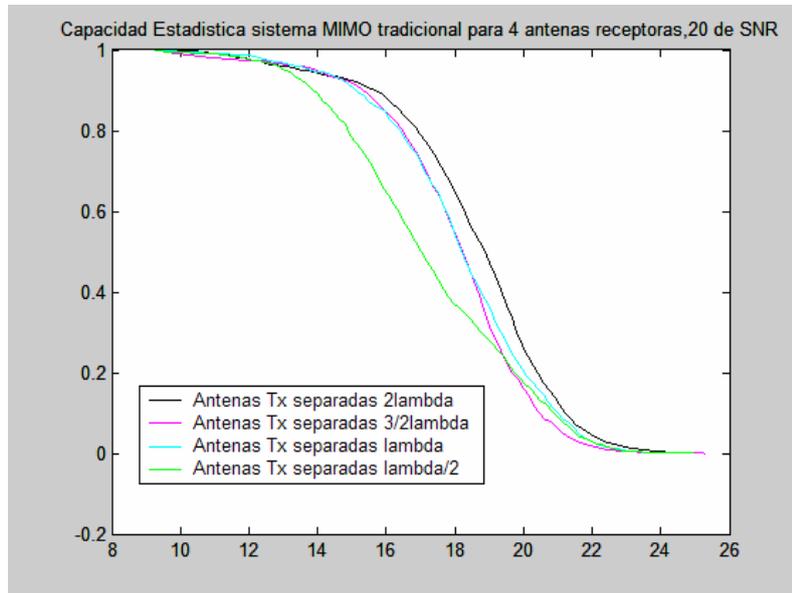


Figura 108: Capacidad Simulada Estadística MIMO 4x4 Tradicional



b) Sistema MIMO distribuido:

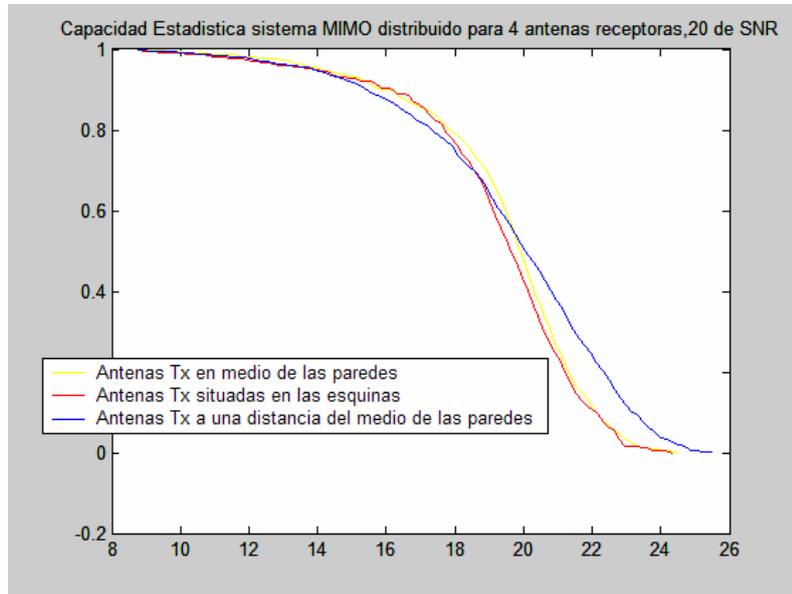


Figura 109: Capacidad Simulada Estadística MIMO 4x4 Distribuido

c) Sistema MIMO:

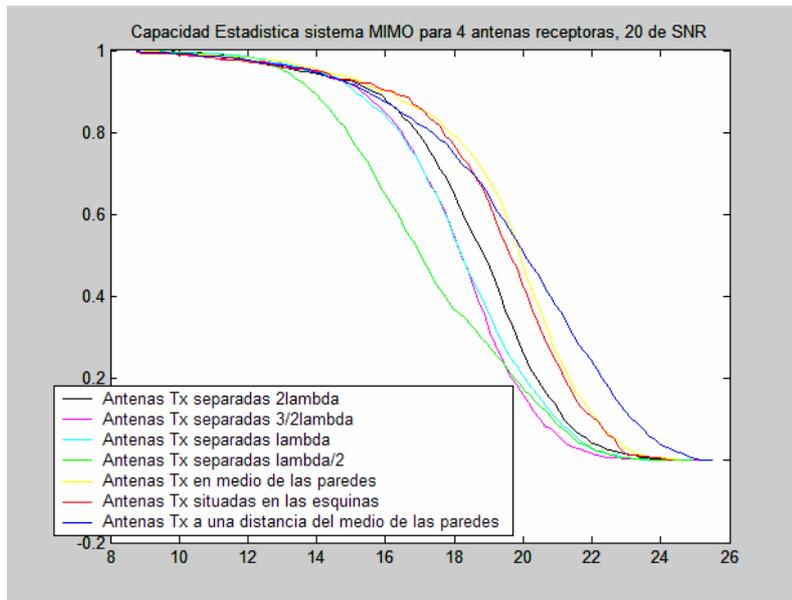


Figura 110: Capacidad Medida Estadística MIMO 4x4



Bibliografía

- [1] O. Gualdrón, S. Pinzón, L. De Luque, I. Díaz, S. Vázquez, “Una herramienta para la predicción de la intensidad de la señal recibida para Wireless LAN 802.11b”. Universidad de Pamplona. Enero 2006.
- [2] Evelio Martínez Pérez, “MIMO: la próxima generación de la tecnología Wi-Fi”. URL: ‘<http://www.eveliux.com/index.php?option=content&task=view&id=81&Itemid=>’. Noviembre 2005.
- [3] W. Warzanskyj, LM. Cervera, “Agrupaciones de Antenas MIMO: una promesa de aumento de capacidad en comunicaciones móviles”. Telefónica Investigación y Desarrollo. Junio 2005.
- [4] División de Relaciones Corporativas y Comunicación de Telefónica I+D, “Las Telecomunicaciones y la movilidad en la Sociedad de la Información” Febrero 2005.
- [5] E. Castellanos, J. Tolero, J. de J. Rugeles, “Análisis de propagación electromagnética en espacios cerrados”. Universidad Industrial de Santander. Marzo 2006.
- [6] G. Wofle, M. Landstorfer, R. Gahleitner, E. Bonek, “Extensions to the field strength prediction technique based on dominant paths between transmitter and receiver in indoor wireless communications” Conference Bonn. Septiembre 1997.
- [7] R. Feick, W. Grote, H. Hristov, “Criterios y procedimientos para mediciones de propagación electromagnética en ambientes confinados”. Senacitel. 2000.
- [8] R. Herradón, F. Jiménez, “Caracterización Estadística de la propagación para comunicaciones móviles en el interior de fábricas”. EUIT de Telecomunicaciones. Universidad Politécnica de Madrid.
- [9] A. García Zapata, “Caracterización del canal radio a 2.4 GHz en un laboratorio y un pequeño túnel para sistemas multiantena”. UPCT. Noviembre 2005.
- [10] O. Gascón Francés, “Caracterización del canal radio a 2,4GHz en una esquina difractoria y un pasillo para sistemas multiantena”. UPCT. Noviembre 2005.
- [11] J.M. Molina García-Pardo, “Análisis técnico-experimental del canal radio en microceldas y entornos especiales para sistemas de comunicaciones móviles de banda ancha”. UPCT. Diciembre 2004.
- [12] G. Coulouris, “Sistemas Distribuidos”. Addison Wesley. Madrid 2001.
- [13] A.S. Tanenbaum, ”Sistemas operativos distribuidos”. Ed. Prentice Hall. 1996.
- [14] Zhi Ni, Daoben Li, “Impact of fading correlation and power allocation on capacity of distributed MIMO”. Beijing University of Posts and Telecommunications. Junio 2004.
- [15] J. Puente, J.R. Diego, A. Marlasca, M. Vazquez, J. Pando, “Trazador de rayos (ray tracing)”. Universidad de Oviedo. 2005.
- [16] P. Quintela Estévez, “Introducción a MatLab y sus aplicaciones”. Universidad de Santiago de Compostela. 1997.



Agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar a *D. José María Molina García-Pardo*, que más allá de ser mi director de proyecto, ha sido a lo largo del mismo la base de mi conocimiento, ayuda y, sobre todo, se ha convertido en un amigo. Gracias por la paciencia, dedicación y confianza depositada en mí.

Gracias a *Rubén Ibernón, Iván Castillo y Fermín J. Egea* por sus ayudas prestadas en el laboratorio y en la toma de medidas y por la ayuda a la hora de solventar los obstáculos que me iban surgiendo, y en general, a todos los compañeros que han compartido este tiempo conmigo en el SICOMO.

A todos los *profesores* que a lo largo de estos años alimentaron mi vocación y me hicieron crecer como estudiante, y sobre todo, como persona.

A *Carlos Zapata* por su amistad, ayuda y colaboración en la redacción del proyecto.

A mi *familia*, con quienes siempre estaré en deuda.

Y por último, y no menos importante, a *Luisa* por su apoyo incondicional, por su colaboración en la redacción de este proyecto, y sobre todo, por ser la base y la razón de mi ser.

Y en general, gracias a todos los que en este tiempo han compartido su tiempo, su amistad, su cariño... sus vidas conmigo.

... “Gracias”