

*A mis padres, hermanos y amigos por acompañarme en los buenos y malos momentos.
A mis profesores y compañeros, por demostrarme el verdadero valor de la amistad.
En especial a Inma, por quererme tanto y aguantarme muchas veces sin merecerlo.*

Tabla de Contenidos

1. Introducción	1
1.1. Organización	2
2. Trabajos relacionados	5
2.1. Estado del arte	5
2.1.1. Estado del arte en cuanto a protocolos y rendimiento	5
2.1.1.1. Desarrollo a nivel físico	5
2.1.1.2. Desarrollo a nivel MAC	7
2.1.1.3. Desarrollo a nivel de transporte	11
2.1.2. Estado del arte en cuanto a aplicaciones	12
2.2. <i>Software</i> de simulación	15
2.2.1. Simuladores de redes	15
2.2.1.1. The Network Simulator -ns-2	16
2.2.1.2. OMNeT++	17
2.2.1.3. GloMoSim	17
2.2.1.4. JiST/SWANS	18
2.2.1.5. QualNet	19
2.2.1.6. cnet	20
2.2.1.7. OPNET	20
2.2.1.8. NCTUns v2.0	21
2.2.1.9. ML Designer	22
2.2.2. Generadores de tráfico, <i>software</i> de medidas	22
2.2.2.1. Iperf	23
2.2.2.2. Netperf	23
2.2.2.3. TTCP	23

3. Diseño del proceso de medidas	25
3.1. Variables medibles durante las pruebas	25
3.2. Desarrollo de la prueba	26
3.2.1. <i>Hardware</i>	26
3.2.2. Medidas	27
3.2.3. <i>Software</i> de medida	29
3.2.4. Entornos	32
3.3. Justificación del desarrollo de las medidas	33
3.3.1. Sistema operativo	34
3.3.2. <i>Software</i> auxiliar	34
3.3.3. <i>Software</i> de medidas	35
4. Pruebas y resultados	37
4.1. Entorno libre	37
4.1.1. Descripción	37
4.1.2. Resultados	39
4.1.2.1. Sin distancia entre los dispositivos.	39
4.1.2.2. Distancia de 3 metros entre dispositivos.	41
4.1.2.3. Distancia de 6 metros entre dispositivos.	42
4.1.2.4. Distancia de 9 metros entre dispositivos.	44
4.1.2.5. Distancia de 14 metros entre dispositivos.	45
4.1.2.6. Distancia de 20 metros entre dispositivos.	49
4.1.2.7. Distancia de 28 metros entre dispositivos.	51
4.1.2.8. Distancia de 35 metros entre dispositivos.	54
4.1.3. Resumen para entorno libre.	56
4.2. Entorno ofimático	59
4.2.1. Descripción	59
4.2.2. Resultados en modo <i>ad-hoc</i>	60
4.2.2.1. Sin distancia entre los dispositivos.	60
4.2.2.2. Distancia de 3 metros entre dispositivos.	61
4.2.2.3. Distancia de 6 metros entre dispositivos.	62
4.2.2.4. Distancia de 9 metros entre dispositivos.	63
4.2.2.5. Distancia de 14 metros entre dispositivos.	64
4.2.2.6. Distancia de 14 metros entre dispositivos y sin visión directa.	66
4.2.2.7. Distancia de 19 metros entre dispositivos.	67
4.2.3. Resumen para entorno ofimático en modo <i>ad-hoc</i>	68
4.2.4. Resultados en modo <i>managed</i>	70

4.2.4.1.	Sin distancia entre los dispositivos.	71
4.2.4.2.	Distancia de 3 metros entre dispositivos.	74
4.2.4.3.	Distancia de 6 metros entre dispositivos.	75
4.2.4.4.	Distancia de 9 metros entre dispositivos.	76
4.2.4.5.	Distancia de 14 metros entre dispositivos.	77
4.2.4.6.	Distancia de 19 metros entre dispositivos.	79
4.2.5.	Resumen para entorno ofimático en modo <i>managed</i>	81
4.3.	Entorno industrial	83
4.3.1.	Descripción	83
4.3.2.	Resultados	85
4.3.2.1.	Sin distancia entre los dispositivos.	86
4.3.2.2.	Distancia de 4 metros entre dispositivos.	87
4.3.2.3.	Distancia de 8 metros entre dispositivos.	91
4.3.2.4.	Distancia de 16 metros entre dispositivos.	94
4.3.2.5.	Distancia de 32 metros entre dispositivos.	97
4.3.2.6.	Distancia de 48 metros entre dispositivos.	100
4.3.3.	Resumen para entorno industrial	102
4.4.	Resumen para todos los entornos	106
5.	Conclusiones y líneas futuras	111
A.	Instalación de Linux <i>Familiar</i> sobre PDAs	115
B.	Instalación de un compilador cruzado	119
C.	Algoritmo de Cristian	121
D.	Especificaciones del dispositivo de medidas	123
E.	Especificaciones del punto de acceso	125

Lista de Figuras

2.1.	Imagen del simulador ns-2.	16
2.2.	Imagen del simulador OMNeT++.	17
2.3.	Imagen del simulador GloMoSim.	18
2.4.	Imagen del simulador SWANS.	19
2.5.	Imagen del simulador QualNet.	19
2.6.	Imagen del simulador cnet.	20
2.7.	Imagen del simulador OPNET.	21
2.8.	Imagen del simulador NCTUns v2.0.	22
2.9.	Imagen del simulador ML Designer.	22
3.1.	Esquema de funcionamiento de la aplicación de medidas para el módulo cliente.	30
3.2.	Esquema de funcionamiento de la aplicación de medidas para el módulo servidor.	31
4.1.	Vista interior de la Iglesia San Francisco Javier en San Javier.	38
4.2.	Dispositivos medidores realizando la prueba sin separación entre ellas.	39
4.3.	Resultados en entorno libre y sin separación.	40
4.4.	Dispositivo medidor y material auxiliar utilizado para el desarrollo de la campaña de medidas.	41
4.5.	Resultados en entorno libre y distancia 3 metros.	41
4.6.	Disposición del equipo medidor en la prueba de 6 metros.	43
4.7.	Resultados en entorno libre y distancia 6 metros.	44
4.8.	Resultados en entorno libre y distancia 9 metros.	45
4.9.	Resultados en entorno libre y distancia 14 metros.	46
4.10.	Resultados en entorno libre y distancia 14 metros.	48
4.11.	Vista reducida de resultados en entorno libre y distancia 14 metros.	48

4.12. Vista reducida de resultados en entorno libre y distancia 14 metros.	49
4.13. Resultados en entorno libre y distancia 20 metros.	49
4.14. Vista reducida de resultados en entorno libre y distancia 20 metros.	50
4.15. Vista reducida de resultados en entorno libre y distancia 20 metros.	51
4.16. Resultados en entorno libre y distancia 20 metros.	51
4.17. Disposición del equipo medidor para la prueba de 28 metros.	52
4.18. Resultados en entorno libre y distancia 28 metros.	53
4.19. Comparativa entre las pruebas de 6, 9, 14 y 20 metros.	54
4.20. Disposición del equipo medidor para la prueba de 35 metros.	55
4.21. Resultados en entorno libre y distancia 35 metros.	56
4.22. Comparativa de las gráficas probabilidad de error de paquete - retardo para todos los casos en entorno libre.	57
4.23. Comparativa de las gráficas probabilidad de error de paquete - retardo para los casos 14 y 20 metros en entorno libre.	58
4.24. Vista general del laboratorio IT6 de la Universidad Politécnica de Cartagena.	60
4.25. Resultados en entorno ofimático, modo <i>ad-hoc</i> y sin separación.	61
4.26. Resultados en entorno ofimático, modo <i>ad-hoc</i> y distancia 3 metros.	62
4.27. Resultados en entorno ofimático, modo <i>ad-hoc</i> y distancia 6 metros.	63
4.28. Resultados en entorno ofimático, modo <i>ad-hoc</i> y distancia 9 metros.	64
4.29. Vista del dispositivo medidor en el pasillo exterior para la prueba de 14 metros.	65
4.30. Resultados en entorno ofimático, modo <i>ad-hoc</i> y distancia 14 metros.	66
4.31. Resultados en entorno ofimático, modo <i>ad-hoc</i> , distancia 14 metros y sin visión directa.	67
4.32. Resultados en entorno ofimático, modo <i>ad-hoc</i> y distancia 19 metros.	68
4.33. Comparativa de las gráficas probabilidad de error de paquete - retardo para todos los casos en entorno ofimático y modo <i>ad-hoc</i>	69
4.34. Disposición del punto de acceso y del dispositivo medidor emisor.	71
4.35. Disposición del punto de acceso y del dispositivo medidor emisor.	72
4.36. Resultados en entorno ofimático, modo <i>managed</i> y sin separación.	72
4.37. Resultados en entorno ofimático, modo <i>managed</i> y sin distancia entre dis- positivos medidores.	73
4.38. Resultados en entorno ofimático, modo <i>managed</i> y distancia 3 metros.	75
4.39. Resultados en entorno ofimático, modo <i>managed</i> y distancia 6 metros.	76
4.40. Resultados en entorno ofimático, modo <i>managed</i> y distancia 9 metros.	77
4.41. Vista reducida de resultados en entorno ofimático, modo <i>managed</i> y dis- tancia 14 metros.	78

4.42. Vista reducida de resultados en entorno ofimático, modo <i>managed</i> y distancia 14 metros.	78
4.43. Comparativa de la distribución temporal de la probabilidad de error de paquete para los casos de 9 metros y 14 metros.	79
4.44. Resultados en entorno ofimático, modo <i>managed</i> y distancia 19 metros.	80
4.45. Comparativa de las gráficas probabilidad de error de paquete - retardo para todos los casos en entorno ofimático y modo <i>managed</i>	82
4.46. Vista general de estructuras Mar Menor realizada desde la oficina.	84
4.47. Trabajador realizando soldadura durante las medidas.	85
4.48. Disposición de los dispositivos en la oficina de estructuras Mar Menor.	86
4.49. Vista ampliada de resultados en entorno industrial y sin separación.	87
4.50. Detalle del dispositivo medidor en la prueba de 4 metros.	88
4.51. Resultados en entorno industrial y distancia 4 metros.	88
4.52. Vista ampliada de resultados en entorno industrial y distancia 4 metros.	89
4.53. Resultados en entorno industrial y distancia 4 metros.	90
4.54. Disposición del dispositivo medidor en la prueba de 8 metros.	91
4.55. Resultados en entorno industrial y distancia 8 metros.	92
4.56. Vista ampliada de resultados en entorno industrial y distancia 8 metros.	92
4.57. Resultados en entorno industrial y distancia 8 metros.	93
4.58. Disposición del dispositivo medidor en la prueba de 16 metros.	94
4.59. Trabajador realizando soldadura en el equipo a la izquierda del dispositivo medidor.	95
4.60. Resultados en entorno industrial y distancia 16 metros.	95
4.61. Vista ampliada de resultados en entorno industrial y distancia 16 metros.	96
4.62. Resultados en entorno industrial y distancia 16 metros.	97
4.63. Resultados en entorno industrial y distancia 32 metros.	98
4.64. Vista ampliada de resultados en entorno industrial y distancia 32 metros.	98
4.65. Resultados en entorno industrial y distancia 32 metros.	99
4.66. Detalles sobre la longitud total y la cantidad de material almacenado.	100
4.67. Resultados en entorno industrial y distancia 48 metros.	101
4.68. Vista ampliada de resultados en entorno industrial y distancia 48 metros.	101
4.69. Resultados en entorno industrial y distancia 48 metros.	102
4.70. Comparativa de las gráficas probabilidad de error de paquete - retardo para todos los casos en entorno industrial.	103
4.71. Comparativa de la distribución temporal de la probabilidad de error de paquete para todos los casos en entorno industrial.	104
4.72. Comparativa de valores medios de retardo y probabilidad de error de paquete en función de la distancia para todos los entornos.	106

4.73. Comparativa de caudal medio en función de la distancia para todos los entornos.	107
4.74. Comparativa de las gráficas probabilidad de error de paquete - retardo para los peores casos en entorno todos los entornos.	108
A.1. Vista del programa HyperTerminal enviando el archivo jffs2.	117
A.2. Navegador <i>web</i> <i>konqueror</i> para <i>Familiar Opie 1.2</i>	118
C.1. Algoritmo de Cristian para sincronización de sistemas síncronos.	121
E.1. Punto de acceso utilizado para la campaña de medidas en modo <i>managed</i>	125

Lista de Tablas

3.1. Especificaciones del dispositivo iPAQ Pocket PC h5500	27
3.2. Efectos de atenuación de varios elementos.	33
3.3. Configuración tipo de la tarjeta para los experimentos.	36
4.1. Valores medios para entorno libre sin distancia entre dispositivos.	40
4.2. Valores medios para entorno libre a 3 metros de distancia.	42
4.3. Valores medios para entorno libre a 6 metros de distancia.	44
4.4. Valores medios para entorno libre a 9 metros de distancia.	45
4.5. Valores medios para entorno libre a 14 metros de distancia.	47
4.6. Valores medios para entorno libre a 20 metros de distancia.	50
4.7. Valores medios para entorno libre a 28 metros de distancia.	53
4.8. Valores medios para entorno libre a 35 metros de distancia.	56
4.9. Valores del retardo medio y varianza del retardo por orden ascendente para entorno libre.	58
4.10. Valores de la probabilidad de error de paquete media y caudal medio or- denados de mejor caso a peor caso para entorno libre.	59
4.11. Valores medios para entorno ofimático, modo <i>ad-hoc</i> y sin distancia entre dispositivos.	61
4.12. Valores medios para entorno ofimático, modo <i>ad-hoc</i> y sin distancia entre dispositivos.	62
4.13. Valores medios para entorno ofimático, modo <i>ad-hoc</i> y distancia 6 metros.	63
4.14. Valores medios para entorno ofimático, modo <i>ad-hoc</i> y sin distancia entre dispositivos.	64
4.15. Valores medios para entorno ofimático, modo <i>ad-hoc</i> y sin distancia entre dispositivos.	66
4.16. Valores medios para entorno ofimático, modo <i>ad-hoc</i> , distancia de 14 me- tros y sin visión directa.	67

4.17. Valores medios para entorno ofimático, modo <i>ad-hoc</i> y distancia 19 metros.	68
4.18. Valores del retardo medio y varianza del retardo por orden ascendente para entorno ofimático y modo <i>ad-hoc</i> .	70
4.19. Valores de la probabilidad de error de paquete media y caudal medio ordenados de mejor caso a peor caso para entorno libre.	70
4.20. Valores medios para entorno ofimático, modo <i>managed</i> y sin distancia entre dispositivos medidores.	73
4.21. Valores medios para entorno ofimático, modo <i>managed</i> y distancia 3 metros.	75
4.22. Valores medios para entorno ofimático, modo <i>managed</i> y distancia 6 metros.	76
4.23. Valores medios para entorno ofimático, modo <i>managed</i> y distancia 9 metros.	77
4.24. Valores medios para entorno ofimático, modo <i>managed</i> y distancia de 14 metros.	79
4.25. Valores medios para entorno ofimático, modo <i>managed</i> y distancia de 19 metros.	80
4.26. Valores del retardo medio y varianza del retardo por orden ascendente para entorno ofimático y modo <i>managed</i> .	83
4.27. Valores de la probabilidad de error de paquete media y caudal medio ordenados de mejor caso a peor caso para entorno ofimático y modo <i>managed</i> .	83
4.28. Valores medios para entorno industrial y sin distancia entre dispositivos.	87
4.29. Valores medios para entorno industrial y 4 metros de distancia entre dispositivos.	90
4.30. Valores medios para entorno industrial y 8 metros de distancia entre dispositivos.	93
4.31. Valores medios para entorno industrial y 16 metros de distancia entre dispositivos.	97
4.32. Valores medios para entorno industrial y 32 metros de distancia entre dispositivos.	99
4.33. Valores medios para entorno industrial y 48 metros de distancia entre dispositivos.	102
4.34. Valores del retardo medio y varianza del retardo por orden ascendente para entorno industrial	105
4.35. Valores de la probabilidad de error de paquete media y caudal medio ordenados de mejor caso a peor caso para entorno industrial	105
4.36. Valores del retardo medio y varianza del retardo por orden ascendente para los peores casos obtenidos.	109
4.37. Valores de la probabilidad de error de paquete media y caudal medio ordenados de mejor caso a peor caso para los peores casos obtenidos	110

Introducción

Las redes inalámbricas se han convertido en la actualidad en una alternativa barata, fiable y eficaz en el marco de las transmisiones digitales. El hecho de utilizar una banda de frecuencias no regulada, de exigir la interoperabilidad entre dispositivos de diversos fabricantes, de reducir precios y de proporcionar valores de movilidad, integridad, escalabilidad y desarrollo tecnológico están permitiendo posicionar la tecnología inalámbrica como una alternativa seria a su equivalente cableada, e incluso, superándola en ciertos entornos y condiciones. Bajo estas expectativas se ha movido un creciente interés por conocer el modo en que este tipo de tecnologías podrían ser aplicadas dentro del sector industrial como agente catalizador en su actividad productiva.

El estándar inalámbrico 802.11b está orientado al desarrollo de Redes de Área Local (RAL) inalámbrica con aplicación dentro de espacios interiores. Esto no ha sido impedimento para que existan aplicaciones inalámbricas más allá de su concepción inicial. Sin embargo, los puntos débiles de esta tecnología suelen coincidir con los requisitos más estrictos dentro del entorno industrial. Por ejemplo, aplicaciones de tiempo real en contraposición a una alta probabilidad de error hacen en un principio que probablemente esta tecnología no sea la más adecuada. Existen numerosos estudios sobre la adaptación de la tecnología inalámbrica a entornos hostiles y sobre la integración de tecnologías existentes con nuevas redes inalámbricas. No obstante, la gran mayoría de estos estudios se centran en cálculos teóricos, simulaciones y modificaciones del estándar sin implementación alguna, existiendo pocos estudios realizados a partir de experimentos *in situ* sobre este tipo de entornos.

En el presente proyecto fin de carrera se estudian los efectos de los entornos hostiles, como son los entornos industriales, bajo el estándar 802.11b, el cual es el estándar *de facto* para dispositivos inalámbricos. Para ello, se han usado dispositivos fácilmente accesibles en el mercado. Se pretende con ello obtener una visión realista de la tecnología actual y de sus posibilidades en nuevos campos de desarrollo, así como la de estudiar las características de los entornos industriales para poder proponer mejoras o soluciones distintas a la necesidad de implantación de servicios.

Para el desarrollo del presente proyecto se han empleado dispositivos móviles inalámbricos del tipo *Personal Digital Assistant* (más conocidos como *PDA*) debido al alto grado de aceptación y venta en el mercado, así como de sus capacidades inalámbricas. Como

sistema operativo se ha instalado en las *PDA*s la distribución *Familiar* de Linux para sistemas empujados debido al alto grado de libertad que permite a la hora de programar aplicaciones propias, a la facilidad de obtener estadísticos.

Se han elegido tres tipos de escenarios para confrontar los datos y obtener una lectura más clara de lo que ocurre en los entornos industriales. Se ha seleccionado un entorno libre, donde existe una visión directa entre los dos dispositivos medidores y se ha procurado evitar la presencia de interferencias y de otras redes inalámbricas. El siguiente entorno donde se han desarrollado las pruebas ha sido un entorno de oficina, en donde existen otros dispositivos electrónicos como ordenadores portátiles o de sobremesa, impresoras, faxes junto a los fenómenos propios de distorsión de señal que se puedan dar en un entorno modelo. La siguiente prueba se desarrolló en un ambiente industrial donde existen equipos capaces de generar altos niveles de ruido electromagnético, así como gran tránsito de personal y fenómenos de distorsión más acusados que en un entorno ofimático.

Tras un estudio en profundidad de las capacidades de medición en los dispositivos inalámbricos integrados en las *PDA*s se ha decidido limitar los estadísticos a recoger en las pruebas al registro del retardo entre dos paquetes consecutivos, a la probabilidad de error de paquete producida en ese intervalo y al *throughput medio*, debido a que el desarrollo y rendimiento en estos dispositivos no permite realizar otro tipo de medidas.

Finalmente y como conclusión se ofrece una comparativa de los datos en distintos entornos, donde se exponen las condiciones que se deben dar para poder implementar redes inalámbricas con éxito, bajo unas determinadas condiciones de funcionamiento y rendimiento. Los datos obtenidos en las medidas podrán ser punto de partida para realizar en un futuro simulaciones de estos entornos y poder, así, obtener estudios más profundos o proponer soluciones diversas para conseguir un rendimiento óptimo para este tipo de redes en condiciones similares a un entorno industrial.

El objetivo final y a largo plazo de este estudio es ser piedra angular para futuros trabajos que permitan que las industrias puedan utilizar redes inalámbricas como elemento integrante de su infraestructura informática y de telecomunicaciones.

1.1. Organización

La estructura por capítulos de este proyecto se expone a continuación, dando un breve resumen de los contenidos de los mismos, y en los que se exponen el trabajo desarrollado para alcanzar los objetivos planteados en la introducción.

- En el capítulo dos se describe sucintamente el estado de la vanguardia sobre las comunicaciones inalámbricas y se hace un breve recorrido por los artículos más relevantes publicados hasta el momento. Además, se exponen algunos proyectos iniciados sobre la integración de redes inalámbricas en entornos hostiles, complementados con un repaso a simuladores de redes inalámbricas existentes y *software* para generar tráfico.
- En el capítulo tres se describe y se discute en profundidad el proceso seguido para la selección de estadísticos, los dispositivos de medida y el *software* desarrollado para realizar las pruebas.

- El capítulo cuatro muestra una descripción de los distintos escenarios elegidos en el punto anterior y se complementa con los resultados obtenidos en cada una de las distintas pruebas.
- Finalmente, en el quinto capítulo se detallan las conclusiones obtenidas, las observaciones necesarias y se apuntan líneas de actuación futuras.

Trabajos relacionados

2.1. Estado del arte

En este capítulo se va a tratar la actualidad de la tecnología inalámbrica desde distintas perspectivas. Se verá en resumen el estado del arte en cuanto a protocolos y rendimiento y en cuanto a aplicaciones actuales. Finalmente se hace un amplio resumen sobre simuladores inalámbricos, lenguajes y herramientas usadas para el análisis de redes.

2.1.1. Estado del arte en cuanto a protocolos y rendimiento

Las comunicaciones inalámbricas se han convertido en objeto de un fuerte estudio y experimentación para mejorar su rendimiento en distintas situaciones. En este sentido los trabajos relacionados con el estándar sobre el nivel físico se centran en construir patrones matemáticos que sean capaces de modelar los distintos entornos y ambientes donde se pueda implantar una red inalámbrica. Los primeros estudios sobre la capa física estaban enfocados a describir su rendimiento en entornos modelos mediante la variación de distintos parámetros. Las capacidades del protocolo inalámbrico están bastante relacionadas con la siguiente capa del estándar, la capa MAC, y es ahí donde se concentran los mayores esfuerzos por desarrollar modificaciones que permitan la máxima capacidad posible con el mayor rendimiento en varias situaciones y con distintos tipos de tráfico. El problema de la integración de los protocolos de nivel 3 más usados en la actualidad con esta nueva tecnología queda de manifiesto cuando se observa que el diseño de protocolos, como TCP, está enfocado a entornos con probabilidades de error mucho más bajas que las que se dan en entornos inalámbricos. Este tema, y la interconexión de redes cableadas con nuevas redes de tecnología inalámbrica son estudiados en la documentación científica. A continuación se ofrece un estudio de los protocolos y capas existentes, y se discuten posibles variantes.

2.1.1.1. Desarrollo a nivel físico

La capa física de las redes de área local inalámbricas soporta múltiples tasas de transmisión, habitualmente esta tasa de transmisión es determinada por la estación emisora

para cada trama. Sin embargo, esta tasa debería ser elegida de una manera dinámica partiendo del hecho de que las condiciones del canal inalámbrico varían en el tiempo, debido a causas como la movilidad de las estaciones, variación del tiempo de las interferencias y los errores dependientes de cada posición. En [1] se presenta un nuevo algoritmo de adaptación al enlace, el cual tiene el propósito de mejorar el rendimiento específico del sistema adaptando la tasa de transmisión a la condición instantánea del enlace. Este algoritmo se basa simplemente en la intensidad de la señal recibida de las tramas provientes del emisor, por lo que no requiere ningún cambio en la especificación actual del protocolo 802.11b. Evaluado mediante simulación y corroborado mediante análisis numérico se muestra como este algoritmo alcanza un estado cercano al ideal con el conocimiento perfecto acerca de las condiciones del canal y del aparato receptor. Se ha propuesto como trabajo futuro comparar este algoritmo con otros algoritmos existentes [2], [3], [4] y [5]. También pretenden estudiar los efectos de interferencias con variación en el tiempo, como puedan ser las interferencias creadas por dispositivos *Bluetooth*, y analizar los efectos de degradación de la señal por propagación multicamino o los efectos Doppler. En tales casos el algoritmo podría necesitar ajustes adicionales.

Otro estudio, [6], de los mismos autores trata experimentalmente el efecto de otros dispositivos que operan en la misma banda de frecuencias que el estándar 802.11b sobre el rendimiento de éstos últimos. Los resultados muestran que el *throughput* de dispositivos 802.11b se degrada sustancialmente en presencia de dispositivos que usan la modulación *FHSS*. Sin embargo, esta degradación está limitada en muchos casos debido a las características en la capa física de los dispositivos *FHSS*. Por ejemplo, debido a la baja potencia de transmisión de dispositivos *Bluetooth* el efecto nocivo depende de la distancia relativa entre este dispositivo y un dispositivo 802.11b. Sin embargo el efecto es devastador cuando los dispositivos *Bluetooth* se comunican en el radio de cobertura de los dispositivos 802.11b, lo cual es el escenario más probable en la vida real. Los autores piensan que existen técnicas que pueden mitigar estos efectos. Como colofón señalan que la degradación en el rendimiento del *throughput* depende de la naturaleza de la señal interferente en términos de frecuencia, tiempo y del nivel de ruido recibido (el cual depende del nivel del nivel de potencia de transmisión de la señal y de la distancia a la que se encuentre). Otros parámetros que pueden afectar al rendimiento de la red son la topología y la distancia entre dispositivos 802.11b y otros dispositivos que usen modulación *FHSS*.

En [7] se describe una simulación sobre 8 estaciones en modo ad-hoc y realizada usando un modelo [8] del mecanismo de potencia del estándar. El objetivo de esta simulación fue observar como influyen los parámetros típicos sobre el rendimiento final. Este estudio fue llevado a cabo antes de terminar el estándar, por lo que sirvió de información para la realización final de éste. Como conclusión expone figuras del rendimiento general en función del intervalo de tramas Beacon y tramas asociadas a ésta.

Los patrones y las causas de pérdida de paquetes son importantes a la hora del diseño del enrutamiento, de los protocolos de corrección de errores así como de la planificación de la red. En [9] se analizan las causas de pérdida de paquetes en una red urbana multi-salto. Tras estudiar los enlaces concluyen que en la mayoría de los casos se da una tasa de error media, que no existe una distinción clara entre enlaces “trabajando” y enlaces “no trabajando”. También concluyen que tanto la relación señal a ruido como la distancia tienen efectos en la tasa de error, pero que la correlación entre estas dos variables es dé-

bil. Por último usan un emulador *hardware* del canal para realizar experimentos que los instan a pensar que una causa influyente en la tasa de pérdida intermedia es la propagación multicamino que se producen en el entorno, incluso más que las interferencias o las atenuaciones.

Por otro lado [10] expone que el diseño y la simulación de esquemas de códigos, la capa MAC (control de acceso al medio) y protocolos de nivel de enlace para futuras redes de área local en entornos industriales parte primeramente de la comprensión de las propiedades estadísticas de los errores de bit que se obtienen en un enlace inalámbrico. En su estudio obtienen medidas de error de bit tomadas con un modem acorde a la norma IEEE 802.11 en un entorno industrial. Como conclusiones más importantes destacan la gran variabilidad en la escala de tiempos, incluso cuando las pruebas duraron del orden de varias horas, lo cual afecta directamente a la tasa de error y en MBER (*mean bit error rate*). Esta variabilidad es atribuida a la gran variabilidad en las condiciones del entorno como puedan ser el desplazamiento de trabajadores, las actividades de máquinas como grúas o camiones o grandes movimientos de materias primas. Concluyen que estas condiciones no son representativas de todos los entornos industriales, pero si lo son sus efectos. Estos efectos son 1) La gran variación en los tiempos. 2) Ocurrencias, escasez de repetitividad en propiedades del experimento, órdenes de magnitud en la pérdida de paquetes. 3) La gran variabilidad en la distribución de la longitud de ráfagas libres de error para paquetes perdidos y bit erróneos, las cuales les siguen grandes períodos de condiciones aceptables. 4) Tendencia de producirse pérdidas de paquete y errores de bit a ráfagas. Otra conclusión importante que obtienen es que las tasas de transmisión de 11 Mbps y 5 Mbps presentan un peor rendimiento ya que se muestran más vulnerables a las pérdidas de paquete. En el plano de la simulación concluyen que los modelos estocásticos usados en la literatura (modelo independiente, modelo de *Gilbert/ Elliot*) no son útiles para verificar los resultados obtenidos experimentalmente. Sin embargo si que son válidos para simular un enlace inalámbrico modelo lo cual puede sugerir que estos modelos bajo alguna modificación pudieran resultar útiles para simular entornos inalámbricos industriales.

Finalmente en [11] se aloja un proyecto que intenta caracterizar los errores de transmisión que ocurren en modelos 802.11 operando en las bandas 2.4GHz y 5GHz. Este proyecto pretende tomar un gran número de medidas sobre parámetros a nivel físico sobre las características de transmisión en varias localizaciones y tiempo. Esto les permite usar estrategias de optimización para analizar estas medidas y desarrollar un modelo matemático, con parámetros obtenidos empíricamente. Una vez obtenido este modelo matemático es posible caracterizar cualquier entorno real y aplicar mejoras sobre los protocolos para mitigar los efectos del ambiente.

2.1.1.2. Desarrollo a nivel MAC

Conocer el máximo *throughput* teórico es el primer paso para considerar el uso de dispositivos 802.11b. Este estudio [12] muestra el límite máximo que puede alcanzar en ausencia de errores y condiciones ideales. Las variables consideradas en este estudio van desde distintos medios físicos a distintos valores en parámetros de la capa MAC. El cálculo considera que la tasa de errores de bit es cero, que no hay pérdidas debido a colisiones, que el modo de funcionamiento puntual no se usa, no hay pérdidas en el nodo receptor

debido al desbordamiento del *buffer*, el nodo transmisor siempre tiene suficientes paquetes para enviar, la capa MAC no usa fragmentación y las tramas de gestión de red no son consideradas. Bajo estas hipótesis se obtienen gráficas para distintas tecnologías, modulaciones y tasas de transmisión. Por ejemplo, para una tasa de 11 Mbps. y tamaño de paquete IP de 1500 *bytes* el máximo *throughput* alcanzado es de 6,1 Mbps.

Un estudio sobre la capacidad del protocolo MAC fue llevado nada más salir el estándar 802.11 en [13]. Mediante un modelo analítico se estudian las capacidades del canal, esto es, máximo *throughput*. Se proporcionan fórmulas de aproximación al cálculo de la probabilidad de colisión, el *throughput* máximo y el límite máximo de estaciones en una misma celda. Como conclusiones destacan que la probabilidad de colisión no depende de la longitud del paquete, de la latencia, de que expire el contador para el paquete de reconocimiento, del espacio entre tramas ni del tamaño del slot. La probabilidad de error y el máximo *throughput* (y otras medidas del rendimiento general) dependen del tamaño mínimo de ventana W y del número de estaciones n a través de la siguiente fórmula $g=W/(n+1)$. De esta forma dividir por la mitad el tamaño de ventana es como doblar el número de usuarios. Otra conclusión es que el tamaño máximo de la ventana de contención tiene mínimos efectos en la probabilidad de colisión y en el *throughput* máximo. La elección del tamaño de ventana que maximiza el *throughput* es proporcional a la raíz cuadrada de la longitud del paquete. Por último también se concluye que el *throughput* máximo se alcanza cuando la tasa de transmisión (incluidas las colisiones) varía a la inversa que el tiempo de transmisión, y esto ocurre cuando el ancho de banda desperdiciado por las colisiones equilibra el ancho de banda desperdiciado por los tiempos de espera para la transmisión.

Una discusión sobre la influencia de los distintos parámetros configurables del protocolo 802.11 y como puede ser alcanzado el máximo ancho de banda disponible está disponible en [14]. El escenario simulado en este artículo no es representativo de un escenario real, ya que se asume el canal sin errores, no existen nodos ocultos y no hay movilidad por parte de los usuarios, pero resulta útil para determinar el máximo rendimiento bajo una variedad de condiciones. El objetivo final es determinar el rendimiento máximo del protocolo y lo que se requiere para cumplirlo. Las conclusiones son que las velocidades del estándar se pueden alcanzar pero usando el mecanismo de RTS/CTS para evitar congestión de tráfico. Otra conclusión es que el mejor desempeño se logra con velocidades de transmisión lentas, o lo que es lo mismo, la velocidad de transmisión y el rendimiento específico son inversamente proporcionales. Estos mismos autores en [15] se ocupan de simular la capa MAC usando la función de coordinación distribuida sobre una red de área local ideal y alcanzando el máximo rendimiento. Sus resultados muestran como en el caso anterior que el mejor rendimiento se alcanza con velocidades de transmisión relativamente bajas. Esto es debido a los retardos constantes y los contadores especificados en el protocolo, los cuales se mantienen constantes siempre, incluso cuando la velocidad de transmisión aumenta.

Otros trabajos se centran en adaptaciones de la capa MAC para una optimización del *throughput*. Éste es el caso de [16] en donde se estudian los rendimientos de los modos de funcionamiento a nivel MAC. En redes 802.11 existe la función de coordinación distribuida y centralizada a la hora de acceder al medio, que operan alternativamente para satisfacer las distintas demandas de tráfico. Debido a la diferencia de mecanismos son

adecuados para cierto tipo de tráfico, mientras que para otro tipo podrían degradar el rendimiento. Ninguno de ellos puede garantizar un rendimiento alto para todos los tipos de tráfico. En este artículo se propone un algoritmo de control adaptativo para conservar el *throughput* cercano al rendimiento óptimo y bajo distintas demandas de tráfico mediante un ajuste dinámico de los periodos de funcionamiento de ambos modos y basado en el tráfico reciente en la red. La capa MAC del protocolo se transforma en un modelo de simulación OPNET que soporta el algoritmo anterior, y que mediante dicho algoritmo cambia dinámicamente los porcentajes de funcionamiento dentro de cada modo de acceso al medio. Mediante simulaciones en el artículo comprueban que se alcanza un alto grado de rendimiento durante distintas demandas de tráfico. El algoritmo de control propuesto requiere simplemente una extensión de la capa MAC en el punto de acceso y por lo tanto sigue siendo compatible con la capa MAC del estándar.

En [17] se propone otra modificación de la capa MAC para adecuar el estándar 802.11b de redes inalámbricas de área local a entornos exteriores y amplios para formar redes celulares. Aprovechan el hecho de que en el estándar los contadores de tiempo no están especificados. De esta manera definen una nueva estructura de tiempos para el período de funcionamiento DCF y del intercambio de paquetes RTS/CTS para evitar los efectos de la propagación de la señal en grandes entornos exteriores. Tras analizar los resultados se observó que con los tiempos propuestos en el estándar se obtenían resultados satisfactorios para celdas de menos de 6 kilómetros, y que la degradación del rendimiento era mínima si se comparaban celdas de 600 metros con celdas de 6 kilómetros, con lo que se concluye en este estudio que, en cuanto a la capa MAC se refiere es posible la formación de celdas de hasta 6 kilómetros usando tecnología 802.11b. Estos mismos autores en un trabajo posterior [18] repiten el mismo estudio pero a nivel físico. Concluyen que es posible realizar celdas en el rango de 0.7-3 kilómetros aunque quizá esté sujeto a algunos ajustes para evitar algunos efectos nocivos. El estudio se realiza usando el modo de operación DSSS a 1 Mbps porque permite maximizar el área de cobertura. Concluye que, aunque estas celdas sean la mitad que en sistemas WCDMA su desarrollo pueda estar justificado por el bajo coste de los dispositivos, por usar una frecuencia sin licencia y compatibilidad con las redes de área local inalámbricas. Como futuro trabajo se proponen estudiar estos sistemas en entornos urbanos, donde los requisitos de capacidad son bastante fuertes.

Existen estudios que se centran en desarrollar patrones de movilidad. Es el caso de [19], donde se presentan los resultados obtenidos al investigar un entorno de espacio amplio, durante cuatro semanas. Se estudian patrones de movilidad y se introducen nuevos parámetros para poder modelarla. Se analizan el número de usuarios y la carga a través de cada punto de acceso. Los resultados obtenidos son comparados con otros estudios para extraer y explicar distintos usos en la red y características de movilidad. Conclusiones de este estudio son que la velocidad de transferencia sigue una ley potencial, la carga está desigualmente distribuida a través de los puntos de acceso y está más influenciado por el tipo de usuario presente que por el número de usuarios. Describen los parámetros de persistencia y predominio para modelar la movilidad. La persistencia es definida como la duración de la sesión y el predominio refleja la frecuencia con la cual cada usuario visita una zona determinada. La función de probabilidad de ambos parámetros sigue una ley potencial.

En este mismo sentido se mueve [20], en el cual se estudia el efecto de la movilidad

en grandes entornos de exterior. Su conclusión más significativa es que el rendimiento del actual estándar sobre usuarios móviles es insuficiente, y se hacen necesarias pequeñas modificaciones en el estándar para asegurar la efectividad de este tipo de casos.

Otro estudio sobre redes inalámbricas alojadas en vehículos móviles [21] muestra que el *throughput* y la calidad del enlace proporcionan un rendimiento pobre bajo ciertas condiciones. Las variables de los distintos escenarios son la movilidad de los vehículos, la distancia entre extremos y las condiciones climáticas del entorno. El peor resultado se obtuvo en entornos urbanos, y en entornos semiurbanos se lograron rendimientos satisfactorios bajo separaciones de 400 metros. En este estudio proponen una mejora del rendimiento en este tipo de condiciones mediante la variación del tamaño del paquete, ya que en sus experimentos observaron que en ciertos escenarios este ajuste producía unas condiciones mejores en la comunicación.

Existe un estudio sobre una anomalía que afecta a la implementación de este protocolo llevado a cabo por [22]. En este estudio se observa que cuando algunos usuarios móviles de una red inalámbrica trabajan a tasas más bajas que el resto, el rendimiento general de la red baja considerablemente. Esta situación se puede dar cuando un usuario se encuentra a mayor distancia que el resto del punto de acceso, ya que es más vulnerable al debilitamiento de la señal y a las interferencias. La explicación a éste fenómeno también se da en este artículo. Cuando un terminal transmite a una tasa más baja captura el canal durante más tiempo debido a su tasa más baja, con lo que se penaliza a los usuarios que tengan en ese momento una tasa más alta. Se analiza este fenómeno teóricamente, se valida después mediante simulación y se compara con distintas medidas del rendimiento. Todo ello lleva a tener en cuenta que a la hora de implementar una red la posición del punto de acceso puede llevar a un mal funcionamiento de la red si no se tienen en cuenta estos aspectos.

Un punto importante estudiado en la literatura es la potenciación de servicios añadidos como son la seguridad, la calidad de servicio o el rendimiento. A pesar de que el estándar 802.11b es una tecnología probada para una conectividad básica es deseable mejorar los campos anteriores. La capa MAC es el primer punto a estudiar para conseguir los aspectos y así [23] esboza distintos aspectos sobre la calidad de servicio, acceso al medio y rendimientos de la capa MAC para proponer un esquema llamado Detección de Colisión Inteligente que mejora el rendimiento de la capa MAC. Hacen la observación de que el factor que distingue los sistemas inalámbricos de los de cable es la naturaleza del medio, por lo que la solución pasa por acercar la pila de protocolos a las características de éste.

Es deseable que el estándar pueda soportar comunicaciones de voz, por lo que este punto se estudia en [24] usando distintos valores en los modos de operación. Se muestra que cuando se alarga el período de sondeo (modo de funcionamiento puntual) se pueden acomodar más conversaciones pero a costa de un retardo mayor. Un sistema de control de admisión de llamadas puede ser la solución para garantizar un rendimiento aceptable en este tipo de comunicaciones. Tras analizar las tasas de error obtenidas en los paquetes de voz reflejan en su estudio la necesidad de implantar mecanismos de corrección de errores en este tipo de paquetes y proponen como estudio futuro las implicaciones de retardo que llevarían el uso de retransmisión de paquetes perdidos.

2.1.1.3. Desarrollo a nivel de transporte

Se han escrito muchos artículos sobre el desempeño de protocolos de transporte sobre redes 802.11b. El uso más común para dar acceso a Internet es el protocolo TCP, sobre el que se centran la gran mayoría de estudios. Como se señala en [25] es importante observar el rendimiento de TCP/IP sobre los enlaces inalámbricos debido al gran aumento de accesos a Internet a través de enlaces inalámbricos. Resaltan que el gran problema de TCP es que fue diseñado para entornos donde la pérdida de paquetes tuviera origen en la congestión. En entornos inalámbricos esto no ocurre así, debido a la alta probabilidad de error que existe en el canal de comunicación. Otro trabajo es [26] el cual mediante simulación concluye que el protocolo MAC esconde los paquetes descartados a las capas superiores. Estas retransmisiones, en función del algoritmo de encolamiento usado en la simulación, se muestran casi invariantes respecto al *throughput* mientras que, respecto al retardo a nivel TCP, ofrecen distintos rendimientos. También analizan un escenario con múltiples nodos y evalúan el rendimiento del mecanismo RTS/CTS, afirmando que el rendimiento general aumenta con dicho mecanismo, y esta mejora es más importante cuando el tamaño de paquete también aumenta. Otro estudio que ahonda más en lo mismo es [27]. En éste se describen los parámetros que afectan a la caída del rendimiento en redes inalámbricas multisalto cuando se utiliza el protocolo TCP. Demuestra que el tamaño máximo de la ventana de congestión TCP por defecto es demasiado grande, ya que usando un valor más pequeño en función de los números de saltos TCP se consigue un mejor rendimiento. El análisis también demuestra que el número de intentos de retransmisión de la capa MAC inalámbrica no es el óptimo. Dicho valor óptimo está en función de la carga de tráfico y de la movilidad. Para una topología estática o con baja movilidad aumentando el número de retransmisiones se consigue un rendimiento mejor. Para topologías con alta movilidad este incremento supone un incremento en el retardo y en la detección de enlaces rotos. También observan el efecto del tamaño del paquete TCP. Un mayor tamaño proporciona una mejor utilización del canal, pero aumenta la probabilidad de error. Descubren que existe un límite a partir del cual el tamaño de paquete degrada el rendimiento del *throughput* y que este límite es función de la longitud del enlace como de las interferencias debidas a cada salto.

A la hora de interconectar usuarios a Internet es relativamente frecuente que se den combinaciones de distintos tipos de red, así como que en una misma red existan distintos tipos de terminales. Existe en [28] un estudio sobre redes heterogéneas en cuanto a acceso al medio, sistema operativo, dispositivos físicos y protocolo de transporte. Se asume que las redes en la realidad están formadas por un conjunto de elementos del tipo anterior y con ayuda de un generador de tráfico establecen el *throughput* y retardo general. Demuestran que para condiciones de tráfico bajo no existe una correlación entre el *throughput* y el retardo, pero si que existe una relación cuando la carga de tráfico aumenta. La contribución principal de este trabajo es identificar los elementos del sistema que son responsables finales de la degradación en el rendimiento y la forma de funcionar de distintos protocolos bajo diferentes escenarios reales.

Como queda de manifiesto los protocolos usados en Internet no ofrecen buenas prestaciones en entornos inalámbricos. Más aún, incluso cuando en una misma red inalámbrica conviven otros protocolos tiene también efectos negativos en el rendimiento de TCP como

se puede ver en [29]. En este estudio se pone de manifiesto como afecta al rendimiento del protocolo TCP en entornos inalámbricos en presencia de ráfagas de UDP. Parten primero del estudio del rendimiento de TCP en enlaces inalámbricos para posteriormente estudiar su efecto bajo la coexistencia de ráfagas de UDP. Sus conclusiones más importantes son que medidas simples como incrementar las retransmisiones a nivel MAC pueden mejorar el rendimiento de TCP bajo ráfagas UDP. El protocolo MAC tal como está definido en el estándar es insuficiente para mejorar el rendimiento de TCP en estas condiciones. Un sistema de colas simple puede mejorar bastante el rendimiento de TCP. Otra aportación de este trabajo es un nuevo esquema que proporciona control de flujo de nodo en nodo llamado Back-pressure. Tras simularlo observan que bajo las condiciones de partida se mejora un 95 % el goodput, se mejoran sustancialmente el rendimiento de TCP sin sacrificar el goodput de UDP y además puede ser ajustado para un mejor aprovechamiento del ancho de banda en medio de tramas TCP y UDP.

Un grave problema es cuando el tráfico a transportar en la red inalámbrica es voz o vídeo. En este caso también hay estudios como [30], donde se destaca que la baja capacidad de los enlaces inalámbricos y el rendimiento inaceptable en presencia de otros tipos de tráfico (provenientes de otras aplicaciones) puede suponer un grave problema para transportar voz y vídeo. En un principio por cada comunicación de voz se requieren unos 10 Kbps, y 802.11b operando a 11 Mbps podría soportar sobre 500 conversaciones de voz simultáneas, pero la realidad es que sólo puede soportar una cantidad muy reducida. La razón principal es la inviabilidad de TCP y aplicaciones de voz en una misma red inalámbrica. En este estudio se propone una solución modificando el protocolo MAC en los puntos de acceso, de tal manera que la solución aumenta la disponibilidad, y estaciones finales no necesitan variar.

Para terminar de dar una visión generalista se comenta el trabajo [31] que trata sobre la transmisión de vídeo sobre redes inalámbricas multisalto. En este estudio se muestra una arquitectura basada en cluster, modo *ad-hoc* e inalámbrica para transmisión de vídeo. Se usa la modulación 2GFSK usando 802.11 FHSS y para mejorar el rendimiento de dichas aplicaciones se usa una combinación no coherente de bits de Viterbi. Se contemplan también métodos de protección de errores y se incluyen los resultados de la simulación, los efectos del diseño del receptor y la diversidad de la calidad de vídeo recibida. Este sistema podría ser implementado para casos en que la necesidad de transmisión de vídeo va ligada a la imposibilidad de cablear una zona, como puede ser el caso de la construcción, fabricación, vehículos subterráneos y operaciones de rescate.

2.1.2. Estado del arte en cuanto a aplicaciones

En la actualidad la tecnología inalámbrica abre nuevas expectativas en diferentes áreas de aplicación puesto que ha adquirido una gran importancia debido a un conjunto de claves. La *Wireless Ethernet Compatibility Alliance* garantiza la compatibilidad de funcionamiento entre equipos de distintos fabricantes. Los precios se han reducido considerablemente ofreciendo una alternativa en infraestructuras donde el cable es inviable o la movilidad es un valor añadido. Fabricantes de ordenadores y *PDA*s incluyen de serie sistemas WiFi en sus equipos. Los dispositivos de comunicación móviles comienzan a incluir sistemas WiFi de serie, lo que podría proporcionar conexiones de banda ancha.

Utilizan una banda de frecuencias libre. A continuación se resumen los distintos campos de desarrollo en la actualidad.

- **Domótica:** Actualmente son varios los fabricantes que integran en un mismo equipo un punto de acceso inalámbrico más un modem y un router. Incluso los proveedores de Internet ofrecen acceso inalámbrico en sus ofertas regalando dichos dispositivos. Estos dispositivos son usados para interconectar uno o varios ordenadores y proporcionar acceso compartido a Internet, impresoras, discos duros, etc. En la actualidad diversos fabricantes están desarrollando dispositivos de ocio para acceso a contenidos digitales. Es el caso de las nuevas cadenas de música que, además de las características estándar de reproducción de DVDs, radio, y otros, son capaces de conectarse a librerías de audio codificadas en MP3, tanto de forma local a la red del hogar, o a servidores de Internet a través del acceso compartido en banda ancha. La televisión digital interactiva precisa de un canal de retorno y WiFi se presenta como una alternativa. La distribución de audio y video dentro del hogar puede tomar forma gracias a los nuevos estándares 802.11 a y g que ofrecen un mayor ancho de banda.
- **Redes ciudadanas:** Este tipo de aplicaciones pretende compartir una conexión a Internet entre varios ciudadanos conectados. En España no está proliferando mucho esta aplicación, puesto que la calidad y estabilidad de la red precisa de inversiones. Existen diversas páginas web que ofrecen información y un cierto nivel de coordinación en ciertas regiones de España. Asimismo, los organismos de gobierno local no pueden proporcionar acceso legal según la reglamentación vigente a la hora de escribir este proyecto.
- **Redes de área local inalámbricas en la empresa:** Estas redes ofrecen ventajas como son la movilidad, la ausencia de cables, acceso a la red con independencia del puesto de trabajo, etc. Puede resultar una solución mejor que el uso del cable para tráfico bajos o entornos limpios de interferencias. Actualmente, las empresas adoptan soluciones mixtas, aprovechando su infraestructura cableada. Como se vió en 2.1.1 es posible usar estos dispositivos para proporcionar voz o también para transportar datos.
- **Conexión inalámbrica en el teletrabajo:** Un teletrabajador puede necesitar una conexión inalámbrica de banda ancha para tener acceso a los datos de una empresa en cualquier lugar. Normalmente una red privada virtual junto con una conexión inalámbrica a Internet permite tener acceso a dicho recurso. Actualmente operadoras de telefonía móvil ofrecen en sus ofertas productos que satisfagan lo anterior.
- **Conexión inalámbrica en *hot spot*:** Tanto en EEUU como en el resto del mundo, están apareciendo iniciativas para el desarrollo de las denominadas *Public Wireless LAN* (PWLAN). Bajo este tipo de uso del WiFi están apareciendo compañías denominadas WISP (*Wireless Internet Service Provider*), que ofrecen un servicio de acceso a Internet dentro de espacios de uso público como pueden ser hoteles, aeropuertos, restaurantes. El espacio de cobertura WiFi y acceso a Internet se denomina

hot spot. Los usuarios de este tipo de negocio pueden ser residenciales (cafeterías, bibliotecas) o usuarios profesionales (hoteles, aeropuertos).

- Red inalámbrica en hoteles: Existen cadenas hoteleras que han montado infraestructura inalámbrica en todos sus hoteles para ofertar acceso a Internet como valor añadido a su oferta. Se necesita personal propio de la empresa para el mantenimiento de esta, o bien, hacer uso de empresas WISP. En un futuro podrán ofertar aplicaciones de ocio usando esta red.
- Tecnología inalámbrica y la seguridad: En este sector una red inalámbrica podría permitir la interconexión de dispositivos de vigilancia como son cámaras o sensores. Hoy en día, en España, existe comercialmente el servicio de video vigilancia usando una conexión a Internet de banda ancha.
- Red inalámbrica para la interconexión de entornos: La tecnología inalámbrica permite la interconexión de ciertas aplicaciones exteriores con bajo coste y alto ancho de banda. Entre estas aplicaciones se encuentra la interconexión de edificios cercanos que tengan visión directa mediante antenas muy direccionales y con alta ganancia. En entornos urbanos también se pueden tener redes punto multipunto como pueden ser las desplegadas por los proveedores de servicios de Internet inalámbricos en entornos residenciales. En entornos rurales es posible interconectar dos poblaciones, pudiéndose beneficiar de esto edificaciones lejanas a los núcleos urbanos como hoteles rurales, balnearios, restaurantes, etc. En entornos rurales aparece como posible solución de interconexión a Internet el uso combinado de una conexión a Internet vía satélite y una red de distribución local mediante WiFi. También resultan combinaciones de aplicaciones como pueda ser la video vigilancia y detección automática de emergencias en entornos naturales o el uso de estos dispositivos para la implementación de la agricultura de precisión y control de riegos.
- Red inalámbrica en recintos portuarios y aeroportuarios: Aplicaciones actuales son la carga de combustible gestionada con la ayuda de un dispositivo inalámbrico en el camión cisterna, gestión de carga y descarga en los puertos mediante dispositivos inalámbricos en las grúas o interconexión de buques a la red inalámbrica del puerto para su uso y todo ello sin necesidad de cableado. Existen compañías de vuelo que ya ofertan acceso a Internet en sus vuelos.
- Red inalámbrica en el ámbito hospitalario: La gran ventaja de los equipos WiFi es que no interfieren en los equipos médicos, con lo que es posible una mejor gestión de los recursos de instrumentación e información.
- Red inalámbrica en la Universidad: Gracias a la cobertura existente en estas es posible acceder a información, descargar prácticas, ejercicios, etc. . . desde cualquier zona. Otra aplicación es la interconexión de edificios cercanos.
- Red inalámbrica en almacenes de distribución y grandes superficies: Dispositivos como *PDA*s o *Tablet PCs* permiten el uso de *software* para gestión de mercancías. Si a esto se añade una red inalámbrica la gestión se podrá llevar a cabo desde cualquier punto del almacén.

- Otros ámbitos de aplicación: Es la imaginación la que pone límites a las posibles aplicaciones inalámbricas y el mercado el que dicta su éxito y en que medida. Algunas aplicaciones distintas a las anteriores son:
 - Medios de pago: Con la nueva normativa europea se exige que el cobro de cualquier servicio o consumición se haga con el cliente presente. Esto permite la posible integración de los terminales de venta con tecnología WiFi. Otra solución consiste en el uso de dispositivos móviles GPRS.
 - Distribución Multimedia: El acceso a la banda ancha de locales, comercios y en general de espacios públicos invita al desarrollo de aplicaciones donde exista una distribución de contenido multimedia como pueda ser publicidad, noticias, video clips ...
 - Transporte público: Las conexiones entre autobuses o trenes mediante WiFi son ya una realidad, lo que permite obtener información sobre horarios, llegadas, retrasos, etc...

2.2. *Software* de simulación

El rendimiento de una red bajo determinadas condiciones puede ser evaluado de distintas maneras. Una de ellas es mediante simulación por *software*. Como gran ventaja de este método respecto a la experimentación y medida con equipos y entornos reales, está la escalabilidad, es decir, no existe diferencia de coste entre simular una red con unos pocos dispositivos o una red con bastantes dispositivos. Como desventajas existen el hecho de saber elegir un simulador correcto para un determinado experimento, y que este simulador recoja todas las variables que influyen en los resultados, y que a veces no se conocen a priori.

Otra manera de evaluar una red es la emulación. Esta consiste en reproducir un experimento con partes simuladas y partes con dispositivos reales. Tiene la ventaja de poder simular las partes de la red que no son accesibles o reproducibles fácilmente y por otro lado el hecho de poder medir situaciones reales.

Los estudios sobre las redes inalámbricas en entornos industriales que se encuentran en la literatura son en gran medida simulaciones o se apoyan en experimentos emulados. A continuación se describen los lenguajes y herramientas *software* más usados para simular este tipo de entornos en particular, y en general para cualquier tipo de red.

2.2.1. Simuladores de redes

A continuación se hace un resumen de los simuladores de red más importantes que existen en la actualidad y que pueden permitir el modelado de redes WiFi en entornos industriales. Tras dicha lectura se observa que ns2, opnet y NTCUns son quizá los simuladores más flexibles y que más se acercan a la simulación versátil y funcional de redes inalámbricas en ambientes industriales. Hace falta una mención especial al simulador ML Designer, ya que se trata de un simulador de procesos industriales en el que permite el modelado de redes inalámbricas.

2.2.1.1. The Network Simulator -ns-2

Se trata de un simulador de eventos discretos dirigidos a la investigación de redes. Provee soporte para simulación de TCP, multicast y distintos algoritmos de enrutamiento sobre redes cableadas y redes inalámbricas de área local y redes usando enlaces satélite. Soporta modo *ad-hoc* y distintos modelos de propagación.

Está escrito en lenguaje C++, por lo que se necesita un compilador para la plataforma que se tenga instalada en la máquina. Las simulaciones son definidas mediante un lenguaje *script* llamado TCL, aunque existe un editor gráfico que evita tener que manejar este lenguaje. El simulador también dispone de una interfaz gráfica como herramienta adicional que permite visualizar las simulaciones.

Este simulador permite definir para cada simulación distintos algoritmos de enrutamiento, distintos generadores de tráfico, distintas disciplinas de encolado y QoS, fallos como pérdidas probabilísticas o deterministas, fallos en la conexión, distintos modelos de propagación de la señal, energía de los dispositivos, contadores, etc...

Nos ofrece datos sobre el estado del protocolo, flujos de paquete y probabilidad de encolamiento y de pérdida, movimiento de nodos en redes inalámbricas y notas de los sucesos más importantes.

Actualmente ofrece soporte para redes inalámbricas 802.11 en modo *ad-hoc* e infraestructura, un modelo espacial para un entorno en movimiento con patrones de movimiento, modo de funcionamiento PCF, mobile IP, redes *ad-hoc* multisalto, TCP sobre enlace inalámbrico, redes de área local con CSMA/CA, CSMA/CD y el protocolo *snoop*. Como se ha mencionado antes es posible definir distintos modelos de error, con lo que permite simular comunicaciones inalámbricas 802.11b en entornos industriales

En resumen, este simulador es una herramienta gratuita y muy potente dentro del campo de la simulación de redes. Es a la vez muy flexible dada la posibilidad de trabajar con scripts tcl que permite agregar toda la potencia de un lenguaje de programación a los elementos propios de la simulación.

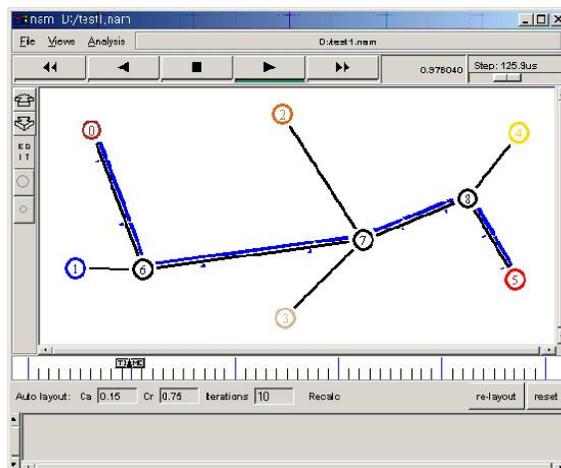


Figura 2.1: Imagen del simulador ns-2.

2.2.1.2. OMNeT++

En este caso también se tiene un entorno de simulación de eventos discretos. Su área de aplicación originaria era la simulación de redes de comunicación, pero debido a su arquitectura genérica y su flexibilidad está siendo usado en otros campos dentro de las tecnologías de la información como son el estudio de colas o arquitecturas *hardware*. OMNeT++ contruye sus modelos a partir de una arquitectura modular. Cada componente o módulo está escrito en C++ y se integran en componentes más complejos o modelos mediante NED, un lenguaje de alto nivel. Este entorno posee interfaces gráficas debido a su arquitectura modular las simulaciones y los modelos pueden ser fácilmente integrados en las aplicaciones de usuario. Aunque no se trate de un simulador de redes en realidad, está ganando popularidad en el ambiente científico como tal y detrás de él está creciendo una gran comunidad de desarrolladores. Puede ser usado para modelar protocolos de comunicación, redes de ordenadores y modelos de tráfico, sistemas multiprocesadores y sistemas distribuidos, etc. Se distribuye libremente bajo una licencia pública académica y actualmente están escritos modelos para IPv6 bajo redes 802.11, Mobility Framework donde incluye un modelo para 802.11 y soporte para redes *ad-hoc* con soporte para usuarios móviles. Tiene soporte para prácticamente todos los sistemas operativos Linux, Unix y plataformas Win32.

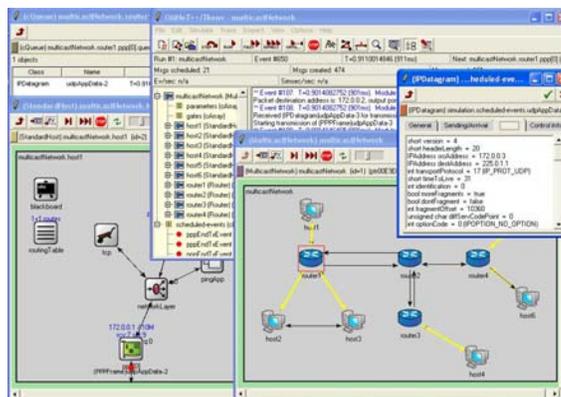


Figura 2.2: Imagen del simulador OMNeT++.

2.2.1.3. GloMoSim

GloMoSim es un entorno de simulación escalable para sistemas de redes inalámbricas y cableadas. Usa una simulación de eventos discretos paralela. Actualmente soporta protocolos únicamente para redes inalámbricas, y en el futuro lo hará para redes cableadas y para redes híbridas. El código binario y el código fuente pueden ser descargados sin licencia por instituciones docentes y para propósitos de investigación. Se necesita un compilador Parsec y conocimiento de este lenguaje si se quiere desarrollar protocolos para este simulador. Provee modelos para simular la movilidad, la propagación de la señal, radio, recepción de paquetes, capa MAC, red, transporte y aplicación obteniéndose gran variedad de estadísticos.

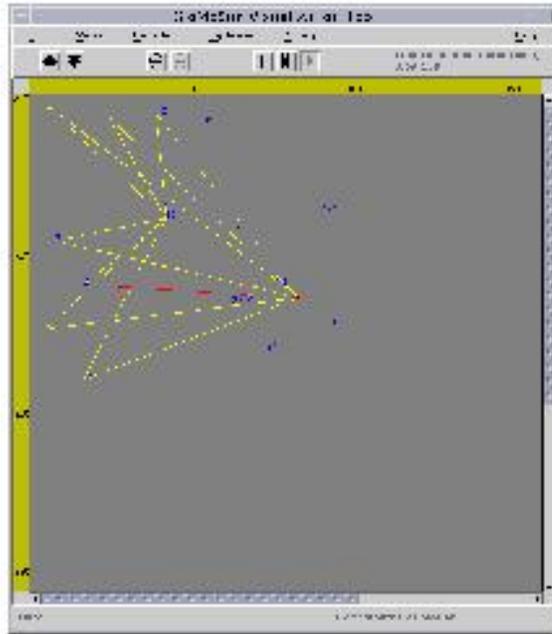


Figura 2.3: Imagen del simulador GloMoSim.

2.2.1.4. JiST/SWANS

Scalable Wireless Ad-hoc Network Simulator (SWANS) es un simulador de red inalámbrica escalable contruido sobre la plataforma *Java in Simulation Time* (JiST). SWANS se organiza con componentes *software* independientes que pueden formar una red inalámbrica o una configuración de redes de sensores. Sus prestaciones son similares a ns2 o GloMoSim aunque es capaz de simular redes mucho más extensas. SWANS ha influenciado el diseño de JiST para que se alcance un rendimiento alto en la simulación, libere memoria en la plataforma donde se ejecuta y pueda ejecutar las aplicaciones de red estándar de Java sobre cualquier red simulada. Además SWANS implementa una estructura de datos, llamada *hierarchical binning* para un cálculo más eficiente de la propagación de la señal.

SWANS puede ser descargado desde su página web y es soportado por aquellas plataformas que tengan instalada la máquina virtual de Java.

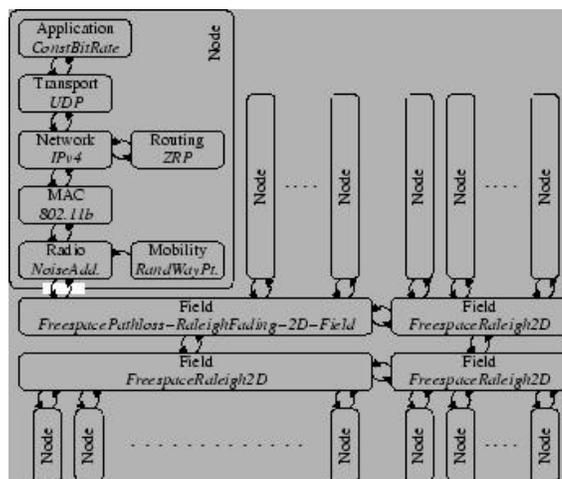


Figura 2.4: Imagen del simulador SWANS.

2.2.1.5. QualNet

Es una herramienta para modelar redes cableadas e inalámbricas. La suite QualNet está compuesta del simulador QualNet el cual presume de ser el más rápido para modelar el tráfico en tiempo real. QualNet Animator permite diseñar gráficamente el modelo de red (usando una amplia librería de componentes) y muestra los resultados tras la simulación. QualNet Designer permite crear máquinas de estado finito para poder describir el comportamiento de la red simulada, mientras que con QualNet Analyzer and Designer permite interpretar resultados de la simulación. Otro producto dentro de su familia es QualNet WiFi el cual es un conjunto de herramientas para desarrollar y testear modelos inalámbricos. La diferencia entre este producto y el anterior es que la librería está especializada para modelos de protocolos de redes de área local inalámbricas, es decir, se adjunta en detalle los protocolos MAC y de capa física optimizados para esta tecnología. Está disponible para Linux y Windows, y se puede obtener una copia de evaluación para usuarios universitarios o bien una versión demo para cualquier otro tipo de usuario.

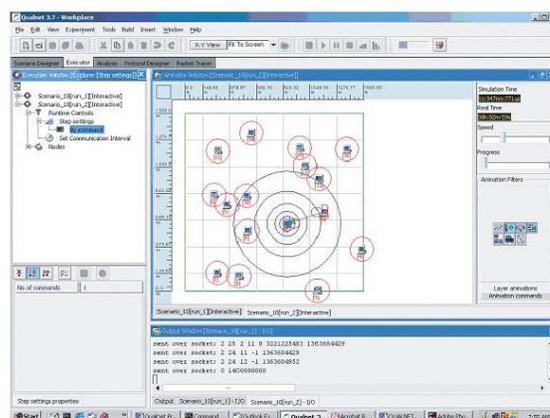


Figura 2.5: Imagen del simulador QualNet.

2.2.1.6. cnet

Es un simulador de redes de ordenadores. Este simulador no está enfocado al uso comercial. Es un simulador de eventos discretos que permite experimentar con distintas capas de enlace, red y protocolos de enrutamiento. Ha sido desarrollado y es usado por cientos de estudiantes desde 1991. Únicamente funciona en plataformas Linux y su uso se enfoca a la enseñanza.

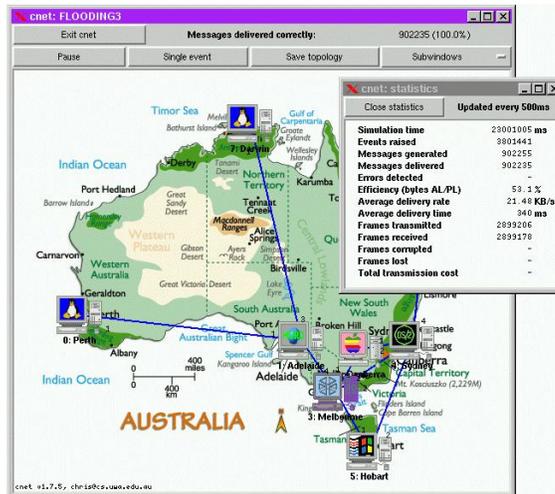


Figura 2.6: Imagen del simulador cnet.

2.2.1.7. OPNET

La suite de productos OPNET combina modelado inteligente y comprensión integra de las tecnologías de red que permiten a sus usuarios diseñar, desplegar y dirigir infraestructuras, equipamientos y aplicaciones de red. El módulo inalámbrico de OPNET extiende la funcionalidad anterior, permitiendo modelar el entorno inalámbrico, escalar el modelo y permitir soluciones flexibles y aplicables en futuras aplicaciones. Este módulo da soporte a toda la pila de protocolos inalámbricos, protocolos de enrutamiento y capas superiores con la opción de modelar aspectos de un sistema inalámbrico como son la propagación de la señal, interferencias, características del transmisor y receptor, movilidad de los nodos e intercomunicación con redes cableadas. Todo lo anterior permite obtener de cada simulación el rendimiento extremo a extremo, evaluar la red y la configuración de la calidad de servicio, diseñar y optimizar protocolos propietarios inalámbricos y planificar el despliegue de redes inalámbricas. OPNET está disponible gratuitamente para investigaciones académicas y la comunidad universitaria.

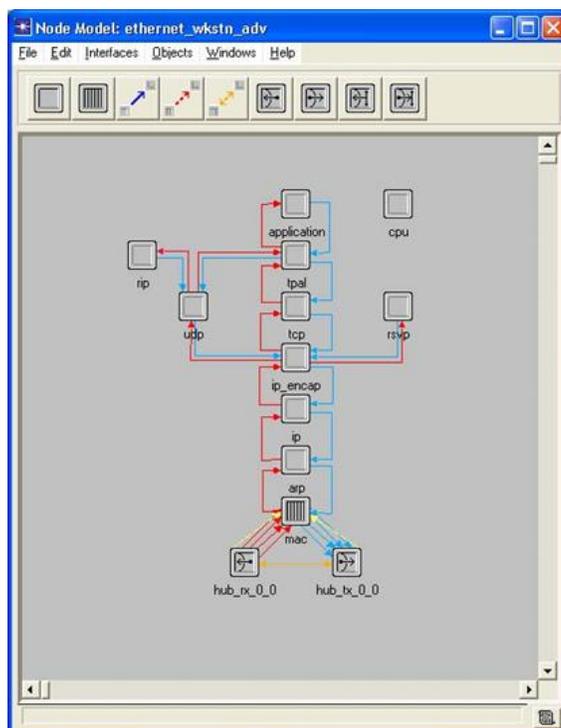


Figura 2.7: Imagen del simulador OPNET.

2.2.1.8. NCTUns v2.0

Se trata de un simulador muy fidedigno de redes extensibles capaz de simular varios protocolos usados en redes cableadas e inalámbricas. Su núcleo está basado en una nueva metodología de entrada inventada por el profesor S. Y. Wang en su tesis doctoral. Es por esto que provee ventajas que otros simuladores no pueden ofrecer. Puede ser usado también como emulador, puesto que directamente usa la pila de protocolos TCP/IP implementada en Linux y en Unix para generar resultados bastante veraces. Aparte de otras numerosas ventajas es capaz de simular redes inalámbricas de área local en su totalidad y modalidad. También puede simular los protocolos característicos de las redes inalámbricas y los modelos de propagación de la señal en entornos inalámbricos. De nuevo está disponible para usos no comerciales.

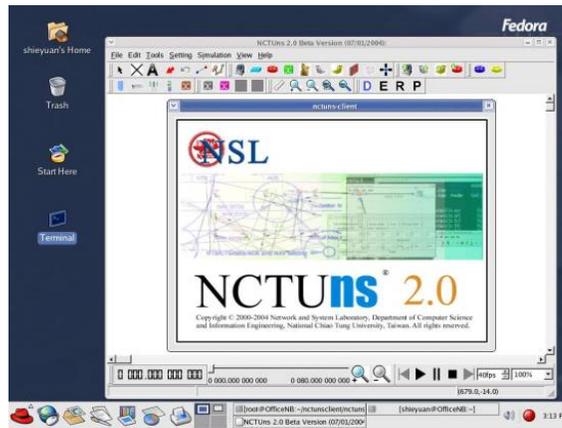


Figura 2.8: Imagen del simulador NCTUns v2.0.

2.2.1.9. ML Designer

Es una plataforma para modelar simulaciones que integra los mayores niveles en el modelado de función y arquitectura y muchos dominios de la simulación (eventos discretos, maquinas de estado finito...) en una herramienta simple. Los modelos son construidos gráficamente mediante una jerarquía de bloques. Posee una gran capacidad de depuración y es realmente extensible. Aplicaciones recientes incluyen análisis sobre el rendimiento de la arquitectura de los equipos, procesadores, análisis de red cableada o inalámbrica, diseño de protocolos, análisis de sistemas celulares y procesos industriales. Es quizá la herramienta capaz de modelar mejor la implantación de una red inalámbrica de área local en un entorno industrial para distintos usos.



Figura 2.9: Imagen del simulador ML Designer.

2.2.2. Generadores de tráfico, *software* de medidas

Existe un gran número de herramientas disponibles para obtener medidas del desempeño de la red. A continuación se muestran algunas herramientas no comerciales que son

frecuentemente usadas por la comunidad investigadora para determinar rendimientos de red.

2.2.2.1. Iperf

Usa un modelo cliente servidor para determinar el *throughput* total, medidas de retardo y paquetes perdidos. Puede descubrir el tamaño máximo de paquete de una determinada red, soporta el tamaño de ventana TCP y puede ejecutar una prueba durante un tiempo especificado o transmitiendo un archivo dado. Puede ser ejecutado en la mayoría de plataformas y sistemas operativos más comunes.

2.2.2.2. Netperf

Es una aplicación cliente servidor que puede ser usada para medir varios aspectos del rendimiento de una red. Ha sido desarrollado por Hewlett Packard y puede ser ejecutada en la mayoría de las implementaciones de red. Netperf genera tráfico bien mediante flujo continuo bien por petición/respuesta pudiendo usar en ambos TCP o UDP. Los datos son enviados desde la memoria RAM del emisor a la memoria RAM del receptor, con lo que evita cuellos de botella. Algunas ventajas de este *software* es la posibilidad de elegir el tamaño de paquete, el buffer de recepción y transmisión, indica el número de paquetes perdidos y puede establecer opciones adicionales a los protocolos de transporte.

2.2.2.3. TTCP

Se trata de una herramienta de medición del *throughput* TCP y UDP. Dicho programa debe ser ejecutado en los extremos de la comunicación a medir. La medidas pueden ser configuradas con un par de parámetros como tamaño de paquete, número de paquetes, etc. Existen un par de versiones de ese *software*.

Diseño del proceso de medidas

3.1. Variables medibles durante las pruebas

Las medidas de rendimiento en redes de ordenadores son cruciales a la hora de determinar que tipo de aplicaciones son factibles. Las medidas que más se aproximan a la realidad se obtienen mediante experimentos *in situ*. Por eso, para alcanzar el objetivo final de este proyecto fin de carrera, las medidas se tomaron en entornos industriales con alto grado de interferencias, con el fin de conseguir un mayor acercamiento al fenómeno estudiado. Para obtener una mayor comprensión se repite dicho estudio en diferentes entornos. Esto permite comparar los distintos resultados y profundizar mejor en el conocimiento de los entornos industriales. Para acercarse aún más a la realidad los equipos de medida son dispositivos que sean accesibles fácilmente en el mercado y que su uso esté extendido dentro del ámbito de las redes inalámbricas. Gracias a ello, los resultados recogidos están influenciados por la tecnología actual, y arrojan medidas reales que permiten un mejor diseño en aplicaciones dentro de estos entornos. Estas medidas podrán ser base para la simulación posterior lo que permitiría estudiar fenómenos con múltiples dispositivos y distribuciones distintas con un menor coste económico y de tiempo que si fueran reales y con un alto grado de fiabilidad. A continuación se discute qué medidas y procedimientos se usan para determinar el rendimiento de una red inalámbrica WiFi en entornos industriales. Se ha de tener en cuenta que los experimentos llevados a cabo deben tener un número mínimo de resultados para que sean lo suficientemente representativos. También hay que tener en cuenta que existen ciertos aspectos no medibles que influyen en los resultados de las pruebas. Es el caso de los equipos a medir o de las características especiales del entorno, y por ello se hace necesario especificar dichos aspectos en apartados sucesivos. Al final queda resumido el objetivo a determinar el comportamiento de una red inalámbrica a nivel de paquete en entornos industriales. Esto permite caracterizar la influencia del entorno industrial a nivel de paquete con la ayuda de dispositivos fácilmente accesibles en el mercado y así establecer los límites para implantar aplicaciones o para exigir ciertos requisitos a este tipo de redes. En [32] se identifican las variables más importantes para determinar el rendimiento de una red *ad-hoc* a nivel de paquete, a saber:

- *Throughput* extremo a extremo: Es la tasa media de transmisión con éxito. Mide el número de paquetes transmitidos satisfactoriamente hacia su destino por unidad

de tiempo. Este aspecto está limitado respecto a los 11 Mbps teóricos, ya que esta cifra no tiene en cuenta las cabeceras de los paquetes, los errores del canal o los paquetes de gestión de la red. Por eso su medida se hace necesaria para delimitar la capacidad que las aplicaciones son capaces de usar.

- Retardo extremo a extremo: Tiempo medio que necesita un paquete para alcanzar su destino. Este parámetro es importante a la hora de evaluar posibles aplicaciones de tiempo real como son voz sobre IP o video conferencias
- Utilización del enlace: Probabilidad de uso del enlace. En redes con muchos nodos esta medida se hace necesaria puesto que el protocolo de acceso al medio se supone que es equitativo para todos los nodos. Si esto no fuera así aplicaciones con requisitos temporales podrían verse seriamente comprometidas.
- Paquetes perdidos: Tasa de paquetes transmitidos que podrían haber sido descartados o perdidos en la red. Esta medida muestra la habilidad del sistema para superar los posibles errores en la comunicación. Si dicha tasa es muy alta ciertas aplicaciones con grandes requisitos de ancho de banda o de tiempo ven degradado su funcionamiento.

Existen en este estudio más medidas como son el tiempo de establecimiento de la red, tiempo de entrada a la red, tiempo de salida de la red, conocimiento de la localización de los nodos, cambios en la topología, potencia media empleada, etc. que son dependientes del *hardware* utilizado o tienen sentido cuando el experimento se aplica a muchos dispositivos o caracterizan el rendimiento de la red a otros niveles más dependientes de las aplicaciones que de la tecnología.

3.2. Desarrollo de la prueba

3.2.1. *Hardware*

Las pruebas fueron llevadas a cabo con la ayuda de dos dispositivos *Personal Data Assistant*, más conocidos como *PDA*s. El hecho de elegir este dispositivo se debe principalmente a que desde el punto de vista del mercado están bastante extendidos, existe cierta similitud con los ordenadores personales actuales, están dotados de varias características que hacen que se puedan probar distintos modos de comunicación (*IrDA*, *Bluetooth*, *Wireless*, etc . . .), y en cierta medida el *hardware* que llevan es muy similar al de la nueva generación de móviles, lo que podrá darnos una idea de usar tecnología *wireless* para conversación de voz. La marca fabricante es HP y el modelo es iPAQ Pocket PC Serie h5500. A continuación se detallan las características más importantes de dichos dispositivos. Para una descripción más completa debe referirse al anexo D.

Como equipos auxiliares se usaron un punto de acceso *CISCO Aironet 1200 Series* (anexo E) y un ordenador personal con procesador AMD-K6 a 500 MHz. y 128 MB de memoria RAM. El punto de acceso se usó para estudiar el comportamiento de las comunicaciones y del *software* de medida en modo infraestructura. El ordenador personal para alojar el compilador cruzado que genera código binario para la arquitectura de los

Característica del sistema	Descripción
Procesador	Intel Xscale a 400 MHz.
RAM (memoria de acceso aleatorio)	SDRAM de 128 MB.
ROM (memoria de sólo lectura)	ROM de 48 MB.
Wireless	802.11b que permite conectar a otros dispositivos compatibles.
Infrarrojos	IrDA, tranferencia de datos de hasta 1,2 Kb por segundo.
<i>Bluetooth</i>	Dispositivo de clase II; transmisión de hasta 4 dBm, rango normal de 10 metros.

Tabla 3.1: Especificaciones del dispositivo iPAQ Pocket PC h5500

dispositivos *PDA*. Este ordenador también se uso para instalar el sistema operativo Linux *Familiar* en su distribución *Opie* en los dos dispositivos *PDA*.

3.2.2. Medidas

El objetivo final de este proyecto fin de carrera es la toma de datos en diversos entornos para poder simular posteriormente distintos sistemas o protocolos con el ánimo de ser capaces de desarrollar comunicaciones en entornos hostiles, como son los industriales. Para hacer esto de la manera más veraz se usan dispositivos fácilmente accesibles en el mercado con todas sus ventajas y limitaciones, puesto que no tendría sentido usar *hardware* específico para obtener resultados globales sobre el comportamiento de dispositivos actuales y su posterior despliegue en redes funcionales. Todo esto lleva a limitar las medidas estadísticas recogidas a la capacidad del dispositivo. Como se vió en 3.1 las variables que caracterizan un sistema de comunicación a nivel de paquete son el *throughput*, el retardo, la probabilidad de error de paquete y la probabilidad de utilización del enlace. A continuación se desarrolla la implementación de cada una teniendo en cuenta las limitaciones de los dispositivos medidores:

- *Throughput*: En un principio se pensó es medir el *throughput* para cada paquete como el número de bits recibidos entre el tiempo que se necesita para enviarlo. Esto requiere que los dos dispositivos estén sincronizados para conocer el tiempo usado en la transmisión. Para conseguir la sincronización se usó el algoritmo de Cristian (anexo C) y la comunicación inalámbrica 802.11b, sin embargo, no se consiguieron resultados coherentes debido principalmente a dos problemas. El primero es que el canal de comunicación, a pesar de conseguir las mejores condiciones de proximidad y ruido, y el protocolo de acceso al medio hacen que siempre exista un retardo que imposibilita la sincronización y agranda la precisión. El segundo problema es que se necesita tener acceso en los dispositivos medidores a la capa de enlace para garantizar la entrega y el tratamiento de la información de los paquetes usados en el proceso de sincronismo para no arrastrar el retardo de entrega de paquetes entre capas al mecanismo de sincronización. Sobre el primer punto nada se puede hacer salvo conseguir la sincronización en un entorno con la probabilidad de error mucho más baja y con un protocolo de acceso al medio más eficaz, como pueda ser la

sincronización de los dispositivos usando una red cableada. Esta solución no es factible en los dispositivos disponibles por no poseer puerto de comunicación ethernet. El segundo punto en un principio puede parecer más probable que pueda llevarse a cabo, sin embargo esto no es así. Se requeriría la modificación del sistema operativo residente y esto, en el caso de Windows es casi imposible, mientras que en el caso de otros sistemas operativos de código abierto requeriría un amplio conocimiento sobre programación, sobre el *hardware* del dispositivo y sobre el *hardware* de la tarjeta más una amplia ración de paciencia y café para conseguir que el sistema operativo resultante o el nuevo *driver* funcionen convenientemente. Con lo cual al final se decide caracterizar el *throughput* como el número de *bytes* recibidos *cada vez que llega un paquete correctamente* dividido entre el tiempo total que dura la prueba.

- Retardo: Debido a las limitaciones en los dispositivos medidores comentadas anteriormente este parámetro también tuvo que ser modificado. El retardo se intentó caracterizar como la diferencia entre el tiempo de simulación de la recepción de paquete y el tiempo de simulación de generación del paquete. Esto requiere de la sincronización de los dos dispositivos que no se puede obtener como se vió anteriormente. También se pudo comprobar otro efecto no deseado que influía en los estadísticos. Se observó durante el período de pruebas que el dispositivo receptor descartaba numerosos paquetes sin razón aparente, influyendo considerablemente en la media del retardo final. Tras varios análisis se observó que el motivo de este comportamiento residía en la forma de ejecutar el *software* de medida. Éste, como se ve en el punto 3.2.3 se compone de un emisor que envía continuamente paquetes al receptor. Se modificó el *software* de medida para que el emisor transmitiera paquetes con un cierto retardo comprobándose que en caso el retardo no sufría el efecto comentado anteriormente. El receptor recibe correctamente paquetes que luego descarta debido a su corta capacidad computacional. Así pues, para evitar este efecto que no tiene su causa en el canal ni en el dispositivo sino en la arquitectura del *software* de medidas se decide definir el retardo como la diferencia entre el tiempo de recepción de dos paquetes consecutivos a nivel de paquete.
- probabilidad de error de paquete: Este parámetro se caracteriza con la ayuda de un contador de los paquetes que se reciben correctamente, y que coincide con el contador para el cálculo del *throughput*, dividido entre el número de paquetes totales transmitidos. De nuevo este parámetro ha de ser modificado, no en su forma de cálculo sino en su significado, puesto que su cómputo no es para toda la duración de la prueba, sino para el intervalo en que se producen dos casos exitosos de medida del retardo, es decir, se computa la probabilidad de error de paquete desde que se reciben dos paquetes consecutivos a nivel de paquete hasta que se vuelven a recibir otros dos paquetes consecutivos a nivel de paquete. Esto permite caracterizar la probabilidad de error de paquete teniendo en cuenta el efecto de descarte de paquetes debido al funcionamiento del *software* de medida, puesto que resulta imposible distinguir entre los paquetes perdidos por la naturaleza de la comunicación o los paquetes perdidos por el efecto del *software* de medida. Así pues, se tienen dos parámetros distintos que se acercan a la caracterización del sistema teniendo

en cuenta el tipo de comunicación (probabilidad de error de paquete) y sin tenerlo en cuenta (retardo). Todo esto se encamina a determinar los parámetros necesarios para poder simular posteriormente distintos entornos y sistemas usando tecnologías WiFi.

- Utilización del enlace: Este parámetro tiene sentido cuando en un mismo entorno conviven varios enlaces inalámbricos. Como no es el caso del sistema de medidas que se va a llevar a cabo en este proyecto simplemente se comenta como se llevaría a cabo su cómputo. En cada emisor se establece una variable que mida el tiempo de uso del enlace en cada transmisión y se divide entre el tiempo total de la prueba. Si la medida se realiza a nivel de paquete se obtendrán parámetros en los cuales influyen los tiempos entre tramas y el mecanismo de *back-off*, y si se realiza a nivel de enlace se obtendrá propiamente la probabilidad de utilización del enlace.

3.2.3. Software de medida

En esta sección se repasa el *software* usado y desarrollado para la consecución de los objetivos de este proyecto fin de carrera. Esta parte es bastante importante pues el *software* elegido es la herramienta que acerca el espacio real del problema al espacio de la simulación.

En primer lugar el *software* utilizado para actuar como sistema operativo residente en los dispositivos *PDA* es una distribución de Linux desarrollada para ellos, llamada *Familiar* en su versión 0.8.2, y usando el entorno Opie.

Este sistema operativo de libre distribución está accesible gratuitamente desde su página web, y dado que no es el sistema operativo que viene de fábrica con los dispositivos se hizo necesario contar con un ordenador personal para instalar dicho sistema operativo. Esta instalación se hizo mediante el *software* HyperTerminal de Windows. En el anexo A se detalla todo el proceso de instalación.

Como *software* adicional se hizo uso de un ordenador personal cuyo sistema operativo es Linux Debian con versión del kernel 2.4.18 para alojar otras aplicaciones necesarias como fue el caso de un compilador cruzado que genera código binario para la arquitectura de las *PDA*s y *software* de creación de gráficas para el tratamiento de los estadísticos obtenidos. En el anexo B se detalla la instalación de un compilador cruzado y los scripts de desarrollo para obtener las gráficas de este proyecto.

Una vez instalado el nuevo sistema operativo se tomó la decisión de desarrollar un *software* propio para la toma de estadísticos en vez de utilizar programas gratuitos para tal efecto. La aplicación desarrollada sigue una arquitectura cliente-servidor. El cliente envía paquetes y el servidor los recibe tomando información de éstos y obteniendo los estadísticos necesarios. Se muestra a continuación un diagrama en lenguaje SDL que describe su funcionamiento.

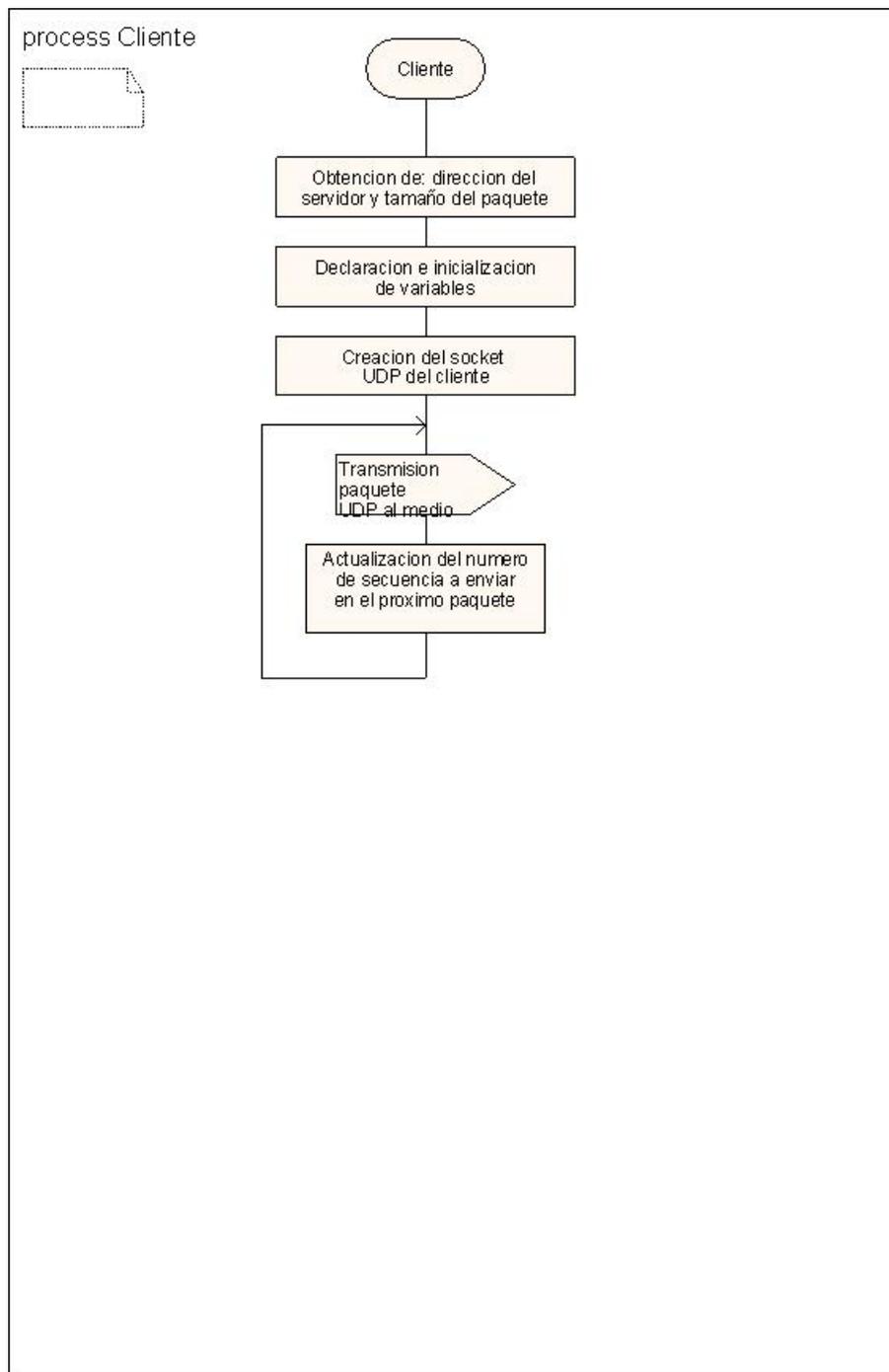


Figura 3.1: Esquema de funcionamiento de la aplicación de medidas para el módulo cliente.

El funcionamiento del módulo cliente es sencillo. Se encarga de mandar constantemente paquetes UDP al servidor con información aleatoria, excepto para el primer dato donde incluye un número de secuencia. Este número sirve al servidor para detectar paquetes perdidos. Para finalizar el programa cliente se ejecuta *Control+c*.

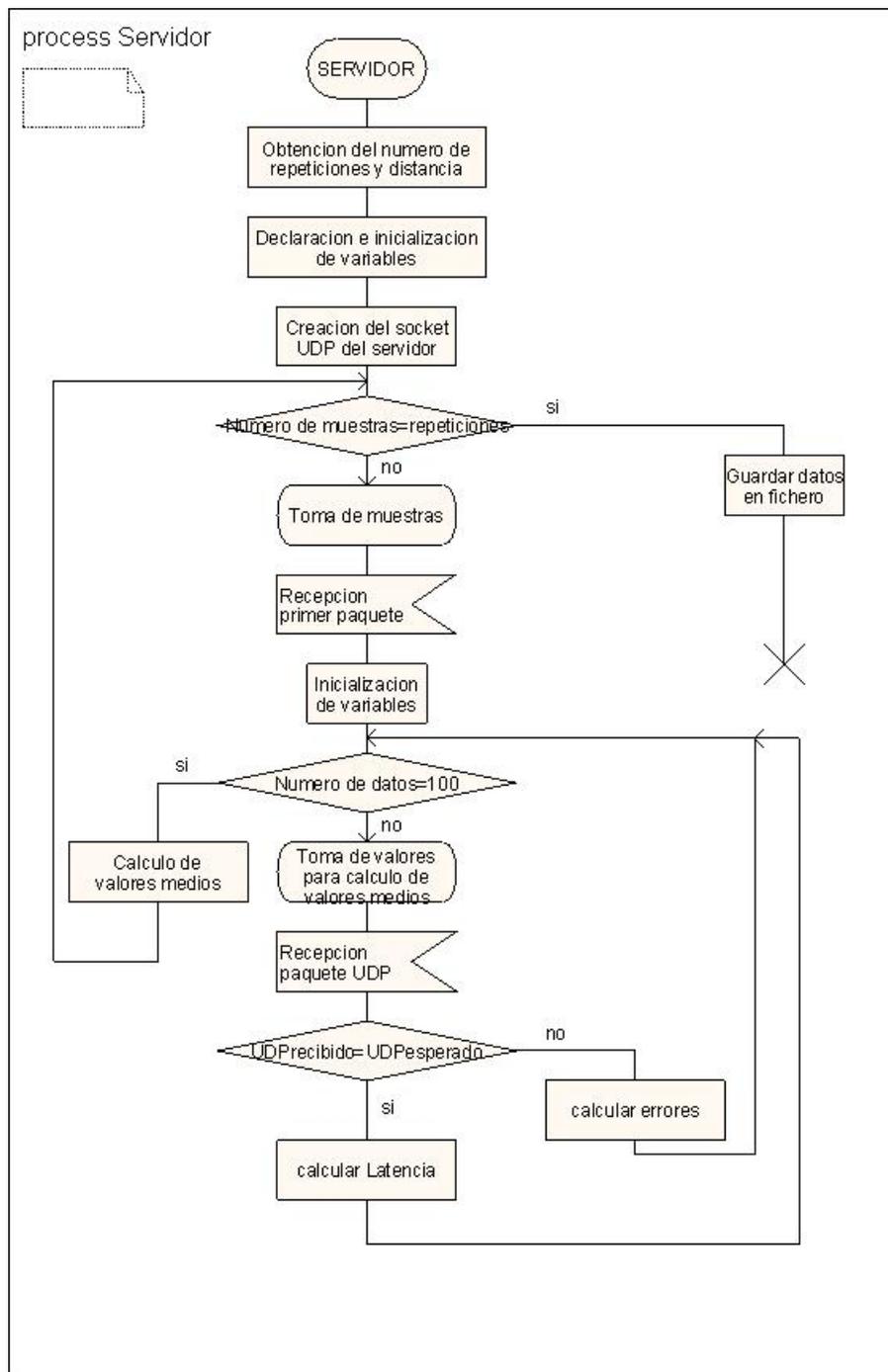


Figura 3.2: Esquema de funcionamiento de la aplicación de medidas para el módulo servidor.

El módulo servidor recibe paquetes desde el módulo cliente. El programa temporiza los momentos de llegada de los paquetes y comprueba el número de secuencia para cada uno de ellos. Cuando recibe dos paquetes UDP consecutivos toma valores de la latencia, y si no son consecutivos toma valores sobre el número de errores que se han producido. Cuando ha tomado 100 valores de latencia el programa calcula los valores medios para di-

cha latencia, probabilidad de error de paquete y *throughput* obteniendo de esta manera una muestra. Cuando el número de muestras alcanza el número de repeticiones introducidas al programa éste finaliza y guarda los datos en un fichero. El nombre del fichero es fichero-DatosRrepeticionesMdistancia.dat, donde *repeticiones* son las repeticiones deseadas para un experimento y *Mdistancia* es la distancia a la que se encuentran los dispositivos.

3.2.4. Entornos

Se hace necesaria una descripción de los parámetros de cada escenario que se intuyen que puedan influir en la comunicación entre los dispositivos que realizan la toma de muestras. Cada escenario se describe con detalle para obtener mayor información a la hora de poder simular distintos entornos. Todo esto sirve de patrón para comparar dicha información con la obtenida en los entornos industriales y poder sacar conclusiones sobre el rendimiento de redes WiFi en dichos entornos. Se muestra en la tabla 3.2 sacada de [35] una relación de tipos específicos de material que afectan a las señales en la banda de 802.11b.

- Entorno libre: En este entorno se busca la ausencia de factores que influyan negativamente en el rendimiento de las comunicaciones inalámbricas 802.11b. Lo ideal sería realizar las pruebas en un entorno al aire libre cerciorándose de que los alrededores estaban libres de fuentes de interferencias electromagnéticas. Se intenta buscar un entorno ideal donde la probabilidad de error de paquete sea lo más baja posible, lo que nos da el límite máximo para las capacidades de comunicación de estos dispositivos en redes inalámbricas 802.11b. Debido a restricciones graves sobre los equipos de medida que obligan a disponer constantemente de, al menos, una fuente de alimentación la solución finalmente adoptada fue elegir un entorno interior de un gran edificio diáfano, con grandes muros para evitar interferencias exteriores, sin mucha concurrencia de personal y que disponga de fuentes de energía accesibles.
- Entorno de oficinas: Este entorno es el caso más común. Se eligió el laboratorio IT-6 de la Universidad Politécnica de Cartagena, situado en el Antiguo Hospital de Marina. En él existen 13 ordenadores personales funcionando, con capacidades inalámbricas desactivadas, y formado por mesas, sillas y vigas de madera. Este entorno permite obtener varias pruebas, como son la comunicación mediante una red *ad-hoc* o el uso de un punto de acceso para dicha prueba. Se obtienen de este mismo entorno el rendimiento de redes 802.11b en los modos de funcionamiento anteriormente citados, lo que nos permite sacar conclusiones sobre dicho funcionamiento.
- Entorno industrial: Realizar medidas en este entorno es el objetivo final de este proyecto, y en él se dan factores que dificultan la transmisión inalámbrica como son las interferencias, el paso de gente y máquinas móviles entre la visión directa de los dispositivos, fenómenos de distorsión de ondas, etc . . . Tras obtener dichos estadísticos es posible determinar las capacidades reales para implantar una red de este tipo en dichos entornos, o bien identificar los factores que afectan negativamente a la comunicación poder ofrecer soluciones. Los datos recogidos permiten un estudio

exhaustivo mediante herramientas de simulación y son el primer paso para evaluar soluciones inalámbricas en entornos industriales.

<i>Barrera RF</i>	<i>Grado relativo de atenuación</i>	<i>Ejemplo</i>
Aire	Minimo	
Madera	Bajo	Mamparas de oficina.
Yeso	Bajo	Muros de interior.
Material sintético	Bajo	Mamparas de oficina.
Amianto	Bajo	Techos.
Cristal	Bajo	Ventanas.
Agua	Medio	Acuarios, paredes con humedad.
Ladrillo	Medio	Muros de interior y exterior.
Mármol	Medio	Muros de interior.
Papel	Alto	Rollos de papel, cajas de cartón.
Hormigón	Alto	Forjados y muros exteriores.
Cristal antibala	Alto	Cabinas de seguridad.
Metal	Muy alto	Escritorios, mamparas de oficina, hormigón armado, ascensores, estanterías de almacén.

Tabla 3.2: Efectos de atenuación de varios elementos.

3.3. Justificación del desarrollo de las medidas

En esta sección se discute la elección del *software* usado y las decisiones que se han tomado respecto a dicho *software*.

3.3.1. Sistema operativo

La elección del sistema operativo Linux para el proceso de toma de medidas fue bastante obvio y a la vez forzado por otras decisiones. Al desarrollar el *software* para medidas se hacía necesario el uso de un sistema que permitiera el desarrollo de aplicaciones propias, y el sistema operativo que viene de fábrica no lo permitía. Además, Linux tiene las ventajas de que es gratuito y de libre distribución, con una gran frecuencia de actualización. Posee numerosas aplicaciones que son fácilmente accesibles, permite escribir y añadir aplicaciones propias de manera sencilla, también permite la intercomunicación con otros sistemas operativos sin muchas complicaciones, es multiusuario y multitarea, es un sistema robusto, estable y rápido, soporta varios entornos gráficos, existe una gran documentación libre por la red, es adecuado para arquitecturas con requisitos mínimos, etc.

La distribución de Linux que se instaló en las *PDA*s fue la distribución *Familiar* v.0.8.2. Esta distribución es la más extendida y desarrollada para el tipo de dispositivos *PDA*s que se disponen para la toma de estadísticos y además permite elegir entre el entorno gráfico a usar, da soporte a actualizaciones de paquetes mediante el sistema de paquetes *ipkg*, la implementación de muchos programas del sistema operativo usan *BusyBox* lo cual permite el ahorro de mucha memoria, cumplimenta los servicios de red más comunes como son SSH, PPP, IPsec, MIPv6 y está construido mediante el sistema *OpenEmbedded* que es un sistema que permite compilar paquetes individuales e imágenes completas para distintos dispositivos a partir del código fuente. *BusyBox* es una herramienta que permite un entorno *POSIX* ideal para sistemas empotrados. Combina en un sólo fichero binario más de 70 utilidades estándar en su versión más ligera. El entorno gráfico usado fue Opie, que es de libre distribución, y enfocado a entornos Linux sobre dispositivos móviles. Posee capacidades multimedia extendidas, documentación, herramientas de gestión de red y comunicaciones y soporte para varios lenguajes. Además está optimizado para el uso en dispositivos móviles como son las *PDA*s, ofrece la funcionalidad propia de cualquier *PDA* como agenda, noticias, acceso a Internet, etc. Opie está basado en XML lo que permite que cualquiera pueda escribir sus aplicaciones o mejoras en el *software*. Este entorno se ejecuta en un Linux empotrado que es compatible con una distribución Linux en un ordenador de sobremesa, lo que permite portar aplicaciones existentes y *drivers* de una arquitectura a otra.

3.3.2. Software auxiliar

Para la instalación del sistema operativo se usó la aplicación HyperTerminal de Windows, puesto que permite la comunicación y el intercambio de ficheros entre dispositivos a través del puerto serie. Una explicación completa de la instalación de Linux *Familiar* Opie en los dispositivos disponibles para las medidas se detalla en el anexo A. Finalmente, se usó el compilador cruzado disponible en [33] que permite compilar código para iPAQ en una plataforma convencional x86. Con esto se evitó la instalación de un compilador para la *PDA*, lo que supondría una fuerte restricción de memoria en el dispositivo. En el anexo B se explica la instalación del compilador cruzado para desarrollar el *software* de medidas. El compilador cruzado fue alojado en una máquina Linux Debian con kernel 2.4.18. El uso de la distribución Debian facilita la instalación de aplicaciones

como la del compilador cruzado. Para generar las gráficas a partir de los datos obtenidos se ha usado el programa `gnuplot` en entorno Linux, ya que se trata de una aplicación de libre distribución ideal para hacer representaciones a partir de datos experimentales.

3.3.3. *Software de medidas*

El *software* de medidas se compone de una arquitectura cliente-servidor con dos ficheros que se ejecutan uno en cada dispositivo *PDA*. Como se vió en 2.2.2 existen muchas herramientas gratuitas que calculan estadísticos del rendimiento de una red. Sin embargo la portabilidad hacia la arquitectura *PDA* no estaba garantizada debido a su complejidad. Aunque la distribución *Familiar* ofrece grandes ventajas para disponer de esta portabilidad el funcionamiento de estos programas está optimizado para ejecutarse en ordenadores de sobremesa o portátiles donde la distribución Linux es mucho más completa que la distribución *Familiar*. Esto hubiera implicado el hecho de instalar los paquetes y accesorios auxiliares lo que supone pérdida de memoria y ralentización de los procesos en unos dispositivos con recursos muy limitados. La distribución *Familiar* ofrece un sistema operativo ligero y rápido, por lo que en aras de seguir con esa filosofía se optó por desarrollar un *software* propio que simplificara al máximo el proceso de medidas y no ralentizara en exceso los dispositivos *PDA*, lo que hubiera podido distorsionar las medidas recogidas.

La campaña de medidas se compondrá de la ejecución del *software* de medidas variando la distancia de los dispositivos medidores en cada uno de los escenarios. Esto permite observar los efectos de la distancia y las condiciones de cada uno de los entornos en el rendimiento de las comunicaciones inalámbricas. Como se ha comentado antes el *software* se compone de una aplicación cliente-servidor que se desarrolla en un enlace *ad-hoc* 802.11b, ejecuta un socket UDP y envía continuamente paquetes UDP con una secuencia numérica en el campo de datos. El programa servidor recoge estadísticos del número de paquetes recibidos, del tiempo recepción para cada paquete y cada vez que obtiene dos paquetes UDP consecutivos obtiene datos para el retardo. El hecho de obtener medidas del retardo cada dos paquetes consecutivos tiene su justificación después de observar el fenómeno comentado en el capítulo 4 del descarte, en principio injustificado, de paquetes UDP por parte del dispositivo medidor receptor. Después obtiene valores medios para poder dispersar el posible error introducido. Para obtener los valores medios se necesita un número de muestras lo suficientemente grande para que la media se estabilice. Tras un análisis en profundidad se decidió que cada cien medidas del retardo se obtuvieran puntos. Las pruebas fueron configuradas para recoger 4000 muestras en cada escenario, salvo para las pruebas en 4.3.2.5 y 4.3.2.6 que se limitaron a la mitad por motivos de limitación del *hardware* de medidas y por seguridad. El uso de un enlace *ad-hoc* está justificado por varios motivos. El primero es que en los entornos donde se reproducen las pruebas es difícil obtener una fuente de alimentación para alimentar al punto de acceso aunque siempre es posible disponer de un punto de acceso alimentado desde una batería. El segundo motivo es que en redes *ad-hoc* el intercambio de paquetes de gestión de red es mucho menor, y se establecen comunicaciones punto a punto con lo que las mediciones pueden reflejar mejor el rendimiento de la red. En modo infraestructura el proceso de comunicación pasa por el punto de acceso por lo que medidas como el retardo se ven afectadas por este hecho. Para establecer la comunicación y la toma de medidas se usa un

socket UDP ya que el protocolo TCP enmascararía los errores producidos en el canal, al tener control de flujo y congestión afectaría a los retardos, en su funcionamiento establece el envío de paquetes de reconocimientos lo que afectaría al *throughput*, la combinación TCP/IP en cuanto a la longitud de las cabeceras es mayor que la combinación UDP/IP, lo que permitiría un mejor uso del campo de datos para futuras aplicaciones del *software* de medidas y por último, aunque en este caso no tenga su uso es que el protocolo TCP no permite comunicación *multicas* lo cual puede ser un camino futuro para implementar nuevas funcionalidades. Para los distintos experimentos se usa una misma configuración de la tarjeta:

Parámetro	Valor
Tasa de transmisión	Auto.
Frecuencia	2,437 GHz. (canal 6) modo <i>ad-hoc</i> . 2,412 GHz. (canal 1) modo <i>managed</i> .
<i>Payload</i> UDP	1472 bytes.

Tabla 3.3: Configuración tipo de la tarjeta para los experimentos.

El tamaño del paquete es el máximo permitido para que no haya fragmentación a nivel IP, y así poder exponer el paquete al máximo a las influencias del entorno y poder recogerlas en los estadísticos. Otra razón para elegir dicho tamaño es que el comportamiento de la capa MAC cuando existe fragmentación es distinto que cuando no la hay. Para tratar de obtener resultados homogéneos se ha de trabajar con el mismo paquete y el mismo modo de funcionamiento. Son varios los motivos por los que el lenguaje elegido para programar el *software* de medidas es lenguaje C. Éste es un componente importante en cualquier sistema Linux, puesto que representa la interfaz tradicional entre cualquier aplicación y el kernel. Además el compilador cruzado usa este lenguaje para los programas fuente y a la hora de manejar tiempos ofrece una precisión del orden de microsegundos.

Pruebas y resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos durante los experimentos. Se describe cada uno de los escenarios medidos y las características más significativas de éstos. Finalmente se introducen posibles justificaciones sobre los resultados obtenidos.

4.1. Entorno libre

Esta prueba está encaminada a establecer el límite máximo sobre las capacidades y servicios que puede ofrecer la tecnología actual en las redes 802.11b. Para conseguir este límite se ha de elegir un entorno cuyas características estén muy próximas a las ideales en cuanto a ruido e interferencias.

4.1.1. Descripción

Este escenario debe caracterizarse por una ausencia total de interferencias en el espectro usado para las pruebas, a la vez que garantizar una visión directa entre los dispositivos medidores. Esto conduce a un escenario a campo abierto en donde se evite la convivencia con redes o dispositivos que usen el rango de frecuencias utilizado en las pruebas y exista una ausencia total de cualquier fuente interferente.

Un escenario válido que cumpla estas condiciones es cualquier zona en las afueras de un núcleo urbano donde no exista actividad empresarial ni cualquier signo de tecnología humana que pueda actuar de fuente interferente. Cualquier zona cultivada o poco transitada representa el perfil ideal de entorno para el desarrollo óptimo de las comunicaciones inalámbricas.

No obstante, dicho entorno no ha sido elegido para el desarrollo de esta prueba debido a serias limitaciones de energía que sufren los dispositivos medidores. Esta limitación hace de manera imperiosa la necesidad de, al menos, una fuente de energía eléctrica disponible para realizar la prueba. Todo esto hace que el entorno requerido deba disponer de fuentes de energía accesibles y cumpla con los requisitos de ausencia total de interferencias.

Finalmente la solución adoptada fue realizar las medidas en una Iglesia ya que reúne condiciones similares a las anteriores. Es un entorno amplio y diáfano, que dispone de

fuentes de energía accesibles y donde sus amplios y gruesos muros actúan de pantalla en las posibles interferencias exteriores que se producen. Más concretamente las pruebas se desarrollaron en la Iglesia San Francisco Javier de San Javier, que data del siglo XVII. Las construcciones antiguas se caracterizan por poseer grandes muros para conseguir grandes alturas. En la imagen 4.1 se aprecian la grandes dimensiones, los muros gruesos y la posibilidad de establecer comunicación directa entre los dispositivos debido a la ausencia de muros entre los extremos más alejados de la Iglesia.



Figura 4.1: Vista interior de la Iglesia San Francisco Javier en San Javier.

4.1.2. Resultados

A continuación se describen los resultados obtenidos en el entorno especificado. Las pruebas tuvieron lugar el 28 de junio de 2005 y la campaña de medidas se llevó a cabo de las 10:30 a las 14:00 horas. La Iglesia de San Francisco Javier cuenta con una longitud de 28 metros, y la máxima distancia obtenida fue de 35 metros midiendo desde el altar hasta el coro, que está en la parte de arriba de la Iglesia y desde donde aún se dispone de visión directa entre los dispositivos.

4.1.2.1. Sin distancia entre los dispositivos.

La primera prueba se realizó sin distancia entre los dispositivos como se aprecia en la figura 4.2. En principio esta prueba es la que debe arrojar mejores resultados y la que permite conocer el límite máximo en las capacidades de comunicación de los dispositivos. En la figura 4.3 se muestran los resultados obtenidos.



Figura 4.2: Dispositivos medidores realizando la prueba sin separación entre ellas.

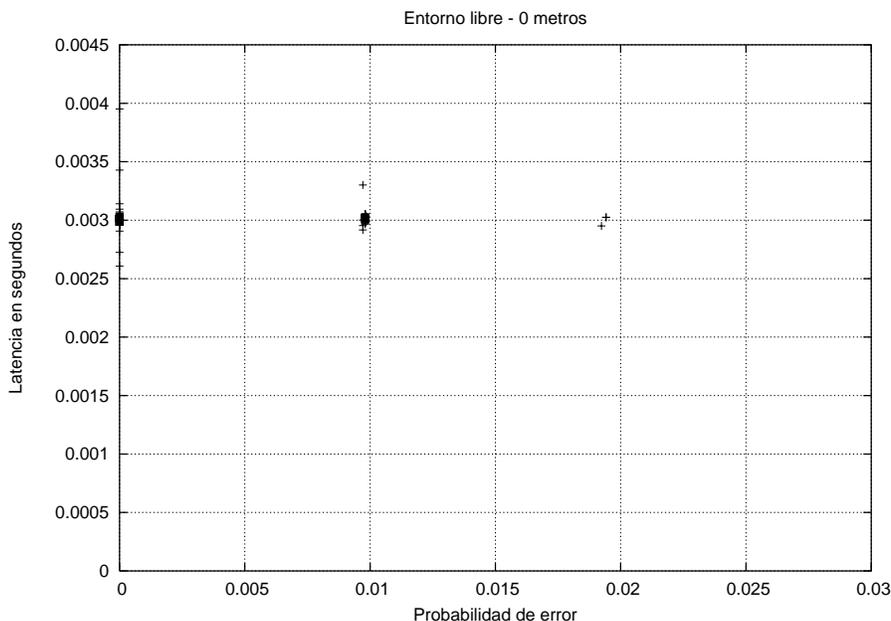


Figura 4.3: Resultados en entorno libre y sin separación.

Como se puede apreciar en los resultados mostrados en la gráfica 4.3 los valores se encuentran muy concentrados sobre los puntos que representan un retardo del orden de 3 milisegundos y en el eje x sobre probabilidad de error de paquete de 0,0009804 y probabilidad de error de paquete 0. Si se observa que las condiciones del entorno son, en teoría, las ideales para que la probabilidad de error de paquete sea cero entonces se deduce que la causa que provoca la probabilidad de error de paquete distinta de cero no debiera tener su origen en el canal de comunicación. Además, al tratarse de un punto exacto de probabilidad de error de paquete y no de un intervalo hace pensar que la causa de que se produzca dicho error es siempre la misma y además es constante en magnitud. En la tabla 4.1 se resumen los valores medios de este experimento, de los que se puede extraer que el retardo es constante para todas las probabilidades de error, como hace ver el valor de la varianza del retardo. Los posibles valores de la probabilidad de error de paquete obtenida se resumen en dos únicos valores, siendo la media del orden de 10^{-3} y el *throughput* medio alcanzado se encuentra cercano a los 4 Mbps.

Las siguientes pruebas muestran como afecta la distancia al rendimiento de estas redes en un entorno libre de interferencias, y arrojan más luz sobre el fenómeno de pérdida de paquetes que deriva en la obtención de valores constantes para dicha probabilidad de error de paquete.

Estadístico	Valor
Retardo medio	3,01176 ms.
Varianza del retardo	$6,99549 \cdot 10^{-10}$
probabilidad de error de paquete media	0,0021022
<i>Throughput</i> medio	3,94889162 Mbps.

Tabla 4.1: Valores medios para entorno libre sin distancia entre dispositivos.

4.1.2.2. Distancia de 3 metros entre dispositivos.

La siguiente prueba tuvo lugar con una separación de 3 metros entre dispositivos. En la imagen 4.4 se observa el material auxiliar para realizar dicha prueba. Al disponer de varias tomas de corriente se dispuso un cable alargador para alimentar al equipo medidor que se desplaza durante las pruebas, con lo que se evita que los dispositivos puedan quedarse sin energía mientras se realizan medidas. Los resultados obtenidos son mostrados en la figura 4.5.



Figura 4.4: Dispositivo medidor y material auxiliar utilizado para el desarrollo de la campaña de medidas.

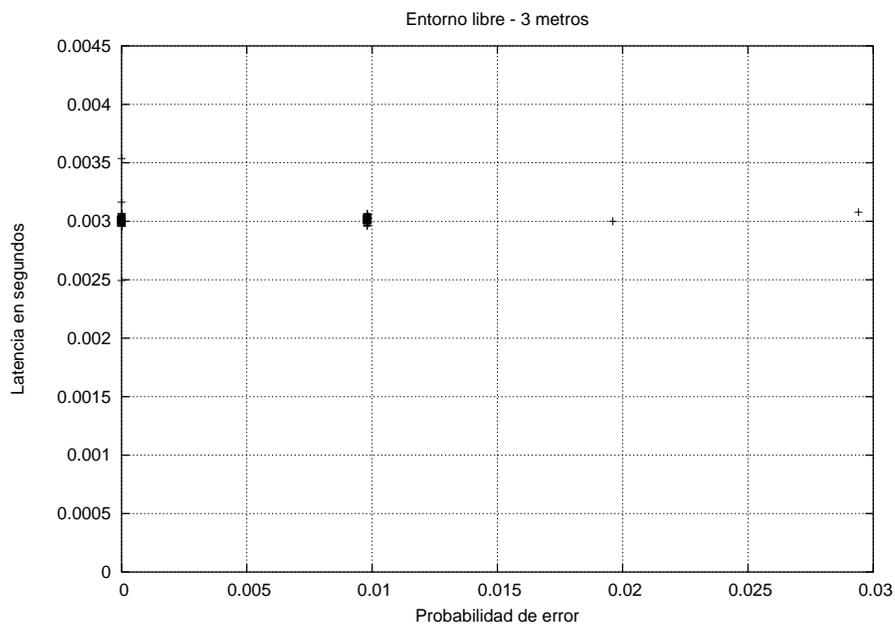


Figura 4.5: Resultados en entorno libre y distancia 3 metros.

Los resultados obtenidos coinciden con los del punto 4.1.2.1. Una visión conjunta de la figura 4.5 y el cuadro 4.2 muestran un retardo constante para dos posibles probabilidades de error, con lo que el efecto de la distancia en el rendimiento de redes 802.11b es nulo para estas magnitudes. De nuevo se observa que la mayor información sobre probabilidades de error se centran en dos únicos puntos, lo que indica que el efecto que genera errores en las pruebas vuelve a estar presente en las mismas condiciones que el experimento anterior, y además que la distancia no afecta a este fenómeno.

Estadístico	Valor
Retardo medio	3,01154 ms.
Varianza del retardo	$5,33286 \cdot 10^{-10}$
probabilidad de error de paquete media	0,00197969
<i>Throughput</i> medio	3,9492521 Mbps.

Tabla 4.2: Valores medios para entorno libre a 3 metros de distancia.

4.1.2.3. Distancia de 6 metros entre dispositivos.

En la prueba con la separación de 6 metros se hizo uso del pasillo central de la Iglesia para colocar el dispositivo medidor, ayudado de una silla para mejorar la visión directa como se puede ver en la figura 4.6.

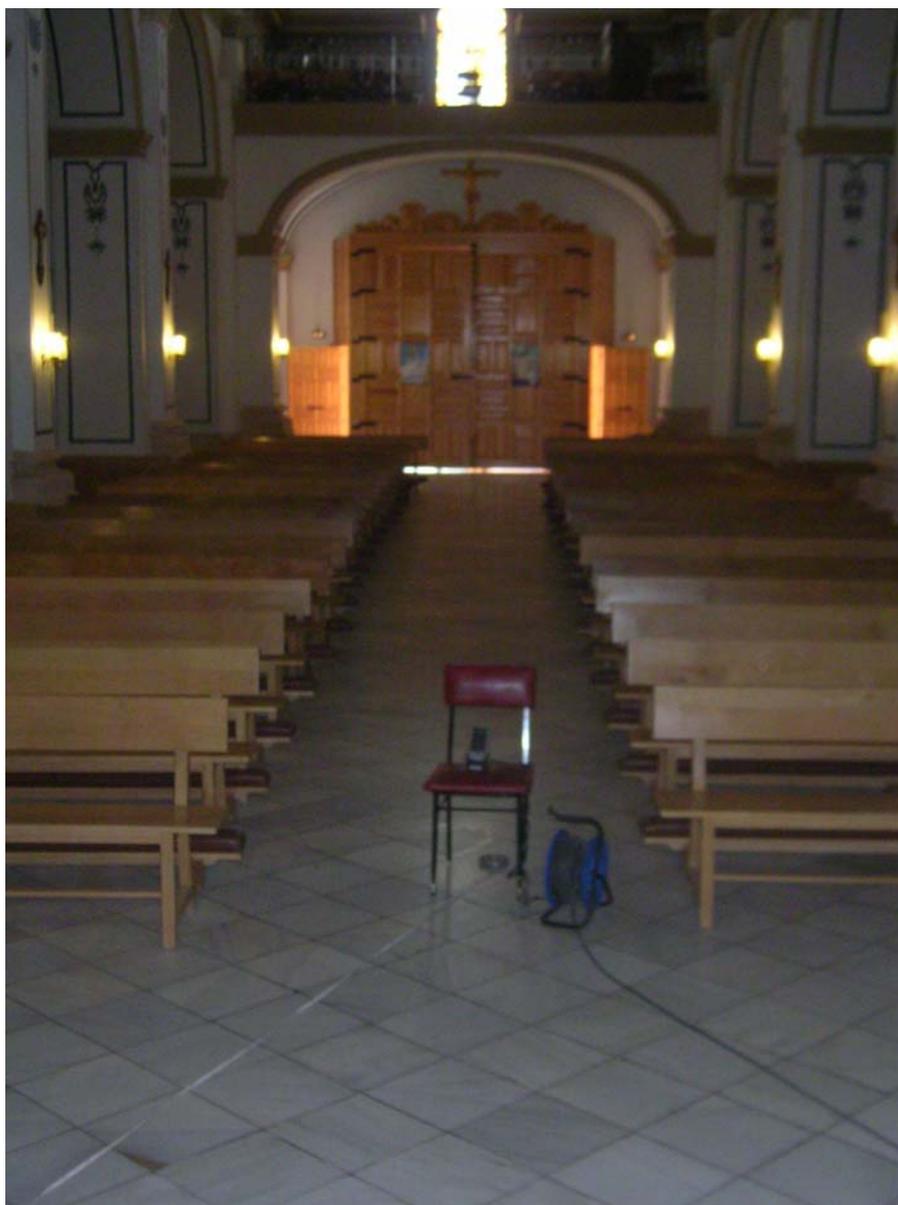


Figura 4.6: Disposición del equipo medidor en la prueba de 6 metros.

Tras juzgar los resultados de la gráfica 4.7 y la tabla 4.3 los guarismos vuelven a coincidir con los dos casos anteriores. La distancia variable en el rango en que se han realizado las pruebas hasta el momento ha resultado insignificante en los valores de las medidas tomadas. El fenómeno que acarrea la probabilidad de error de paquete constante vuelve a tener lugar durante esta prueba. Es poco probable de que se trate de una interferencia debido a la constancia de sus resultados en las medidas y a la duración de las mismas. Lo más lógico, como se apuntaba en el punto 3.2.2, es que sea una limitación sobre el *hardware* - sistema operativo - *firmware* de la tarjeta del dispositivo medidor, el cual no puede gestionar correctamente todos los paquetes. Debido a esta limitación el dispositivo descarta siempre la misma cantidad de paquetes, lo que hace que cuando se producen errores en el intervalo de medición coincida con la misma cantidad. Como se podrá com-

probar en las distintas medidas y escenarios este fenómeno se repite de la misma forma y magnitud, con lo que queda demostrado que la probabilidad de error de paquete en los experimentos que se llevan mostrados hasta el momento no depende del entorno, canal, posibles interferencias dependientes del lugar geográfico o cualquier otra razón que no apunte directamente a uno o varios factores de la terna *hardware* - sistema operativo - *firmware*. Esto nos lleva a afirmar que la probabilidad de error de paquete obtenida en los experimentos no se corresponde con la probabilidad de error de paquete en el canal, pues dicho parámetro está influenciado por la probabilidad de que el dispositivo medidor descarte paquetes. El valor obtenido se corresponde a la probabilidad de error de paquete de que este dispositivo no pueda gestionar paquetes a nivel de la capa de red. Así pues, con el retardo ocurre lo mismo. La medida tomada corresponde con el tiempo de gestión a nivel de red de los paquetes, y no al tiempo entre paquetes consecutivos que llegan a la interfaz de red.

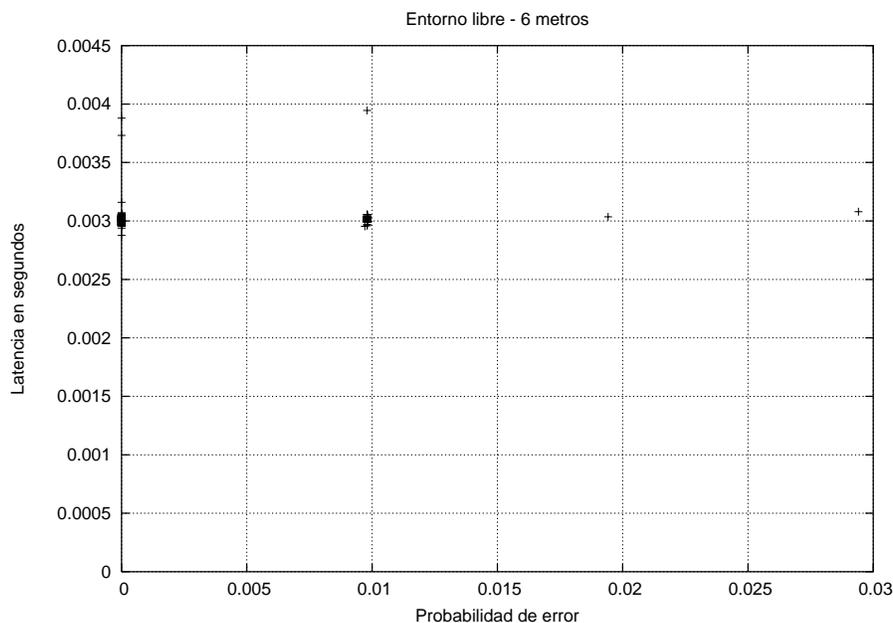


Figura 4.7: Resultados en entorno libre y distancia 6 metros.

Estadístico	Valor
Retardo medio	3,01149 ms.
Varianza del retardo	$9,57558 \cdot 10^{-10}$
probabilidad de error de paquete media	0,00200953
<i>Throughput</i> medio	3,94937303 Mbps.

Tabla 4.3: Valores medios para entorno libre a 6 metros de distancia.

4.1.2.4. Distancia de 9 metros entre dispositivos.

La distancia de esta prueba se aumenta a 9 metros y se ejecuta la prueba como en los experimentos anteriores, arrojando los resultados que se muestran a continuación:

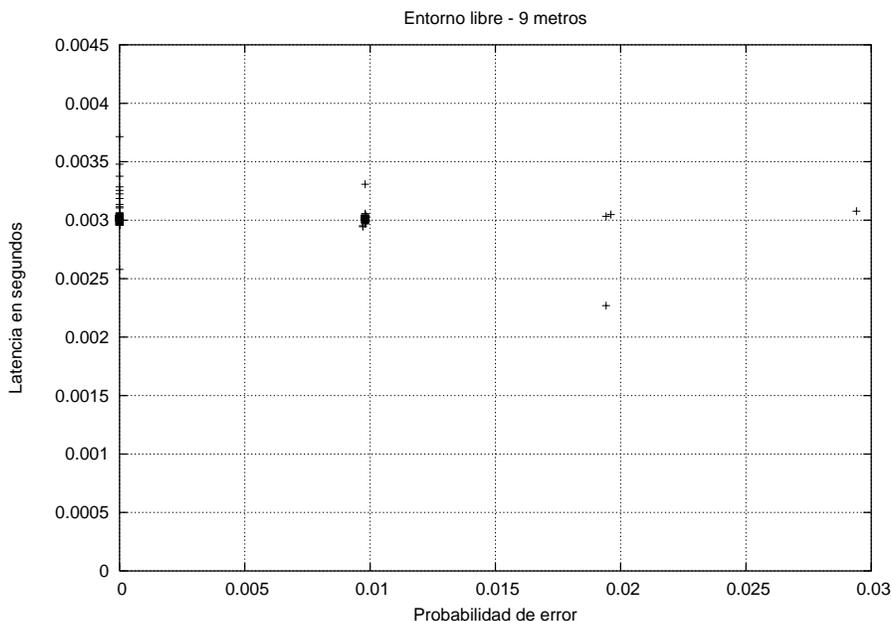


Figura 4.8: Resultados en entorno libre y distancia 9 metros.

Los efectos en esta prueba sobre los estadísticos tienen un nuevo matiz. Como se puede observar, para probabilidades de error cero el rango de los posibles valores del retardo se ensancha. Esto revela un aumento de errores a nivel de la capa de enlace que el protocolo de dicha capa es capaz de manejar con relativo éxito. La causa que origina este fenómeno es, en teoría, el aumento de la distancia entre dispositivos. Esto podrá afirmarse si en la siguiente medida este nuevo suceso se repite o acentúa aún más. El retardo medio y el *throughput* medio no aumenta con respecto a las anteriores pruebas, aunque si lo hace la varianza del retardo y la probabilidad de error de paquete, como era lógico de esperar, ya que los errores que se producen son, en su mayoría, subsanados por la capa de enlace del estándar 802.11b.

Estadístico	Valor
Retardo medio	3,01594 ms.
Varianza del retardo	$8,46791 \cdot 10^{-9}$
probabilidad de error de paquete media	0,00357047
<i>Throughput</i> medio	3,94504397 Mbps.

Tabla 4.4: Valores medios para entorno libre a 9 metros de distancia.

4.1.2.5. Distancia de 14 metros entre dispositivos.

El proceso de medidas lleva a tomar nuevos estadísticos para una longitud de 14 metros en este caso. Los resultados revelan nuevos aspectos sobre el desarrollo de las pruebas.

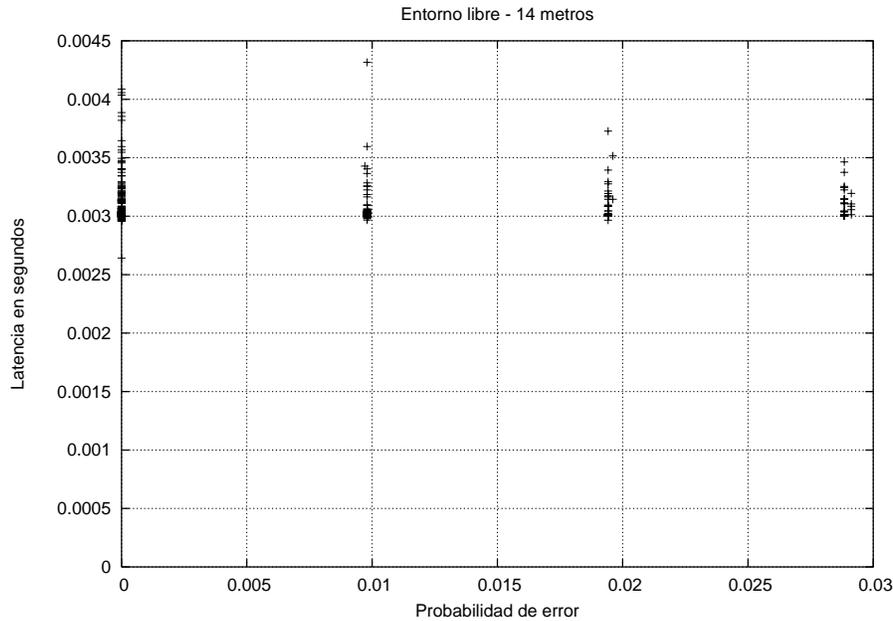


Figura 4.9: Resultados en entorno libre y distancia 14 metros.

El aumento de la distancia es en principio el factor que degrada la probabilidad media de error como muestra la tabla 4.5. Se puede observar como el rango del retardo se ha reproducido en valores de probabilidad de error de paquete, y además, éstos, han pasado a ser otros valores constantes en esta gráfica. También se aprecia como estos valores están aparentemente relacionados entre sí, siendo el segundo valor aproximadamente el doble del primero, el tercer valor el triple del primero y así sucesivamente. A pesar de que la mayoría de los datos se encuentran fuera de la gráfica puesto que el valor medio de la probabilidad de error de paquete es superior al 15 % de los paquetes transmitidos se puede destacar el hecho de la repetitividad en el descarte de paquetes debido al factor apuntado en el punto 4.7. A diferencia del caso anterior, la capa de enlace es incapaz de soportar los errores que se están produciendo. Es por esto por lo que el rango de retardos se desplaza en diferentes puntos de la probabilidad de error de paquete. Desde el punto de vista de funcionamiento del protocolo y de la interacción del dispositivo medidor lo que ocurre es que debido a los errores que se producen tienen lugar más retransmisiones conforme al estándar 802.11b en la capa MAC. En caso de poder transmitirse con éxito, el tiempo adicional de las retransmisiones repercute en el retardo, y en caso de error, si éste es bastante reiterado, los dispositivos disminuyen la velocidad de transmisión como medida compensatoria. Si el retardo aumenta, la capacidad de gestionar paquetes a nivel UDP del dispositivo medidor aumenta, con lo que parece extraño que, aumentando el retardo se sigan dando valores constantes de probabilidad de error de paquete, o lo que es lo mismo, que el dispositivo medidor descarte la misma cantidad de paquetes o un múltiplo de ésta. La explicación más lógica es que los dispositivos medidores poseen un buffer que es leído cada cierto tiempo, y este tiempo depende de la velocidad de transmisión del enlace. Si esta velocidad disminuye también lo hace el tiempo de lectura del buffer, con lo que se siguen descartando paquetes cuando el buffer se desborda. Además, esta cadencia en la velocidad de lectura debe estar relacionada con el resto de procesos que

ocurren en el dispositivo medidor. Si se necesitan más recursos para manejar el proceso de retransmisiones a nivel MAC, es posible que la lectura del buffer se retrase varios ciclos con lo que el buffer alcanza su límite en repetidas ocasiones, con lo que se descarte un múltiplo del valor anterior.

Estadístico	Valor
Retardo medio	3,51524 ms.
Varianza del retardo	$3,60296 \cdot 10^{-7}$
probabilidad de error de paquete	0,16532074
<i>Throughput</i> medio	3,47199657 Mbps.

Tabla 4.5: Valores medios para entorno libre a 14 metros de distancia.

Observando la gráfica 4.12 se descubre que la gran mayoría de errores están concentrados en la primera parte de la prueba, tras la cual se vuelve al estado de experimentos anteriores. Posiblemente esto es debido al reajuste de velocidad entre los dispositivos, lo que permite seguir conservando un *throughput* alto aunque menor que en casos óptimos. Por lo que es fácil concluir que, en caso de errores reiterados, el buffer de lectura de los dispositivos usados se desborda varias veces debido a la carga adicional que debe soportar el procesador del equipo y el *hardware* de la tarjeta para corregir la comunicación. Esto es lo que ocurre durante la primera parte de la prueba, donde se dan errores que hacen que la carga computacional del equipo restrinja los periodos de lectura del buffer, desbordándose éste y perdiendo paquetes, que en el caso de que no haya habido pérdida en el canal la probabilidad de error de paquete es proporcional a las veces que el buffer se ha desbordado. Cuando el protocolo de acceso al medio logra corregir la tasa de error entonces la probabilidad de error de paquete queda reducida a los casos anteriores. Lo anterior se corrobora mirando la gráfica 4.10 donde los valores del eje de la probabilidad de error de paquete cercanos al origen siguen un patrón constante, y es donde los efectos del buffer son los únicos responsables de los errores. Rebasado ese límite comienzan a manifestarse también los errores debidos a otras causas. En la figura 4.11 se puede advertir como, tras pasado el límite donde el dispositivo de medidas descarta paquetes se cumple la relación de que a mayor probabilidad de error de paquete le corresponde un mayor retardo.

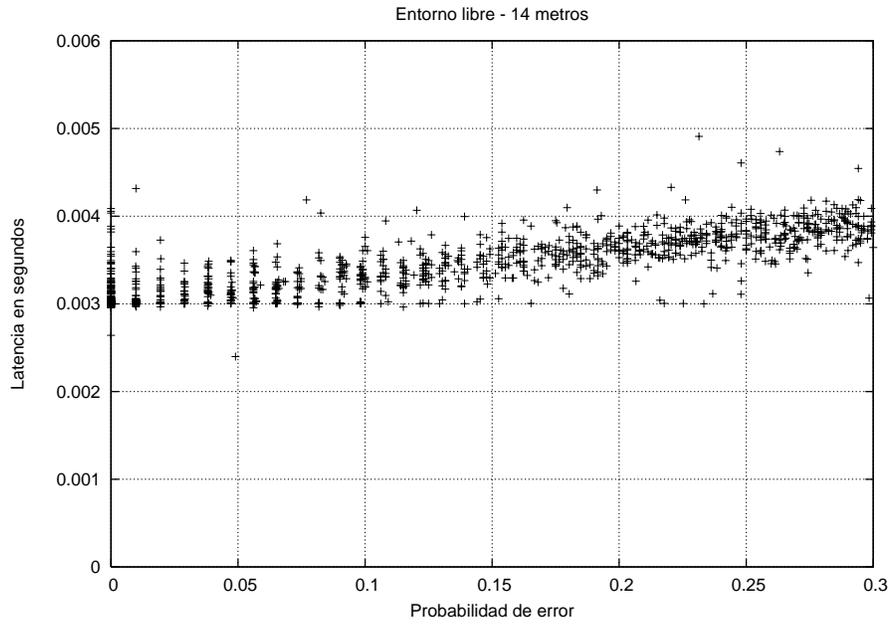


Figura 4.10: Resultados en entorno libre y distancia 14 metros.

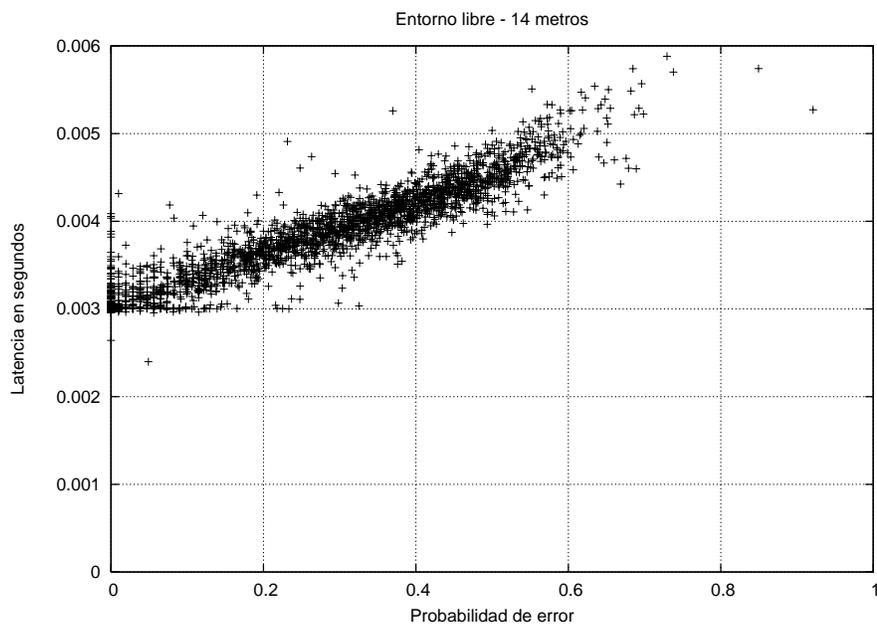


Figura 4.11: Vista reducida de resultados en entorno libre y distancia 14 metros.

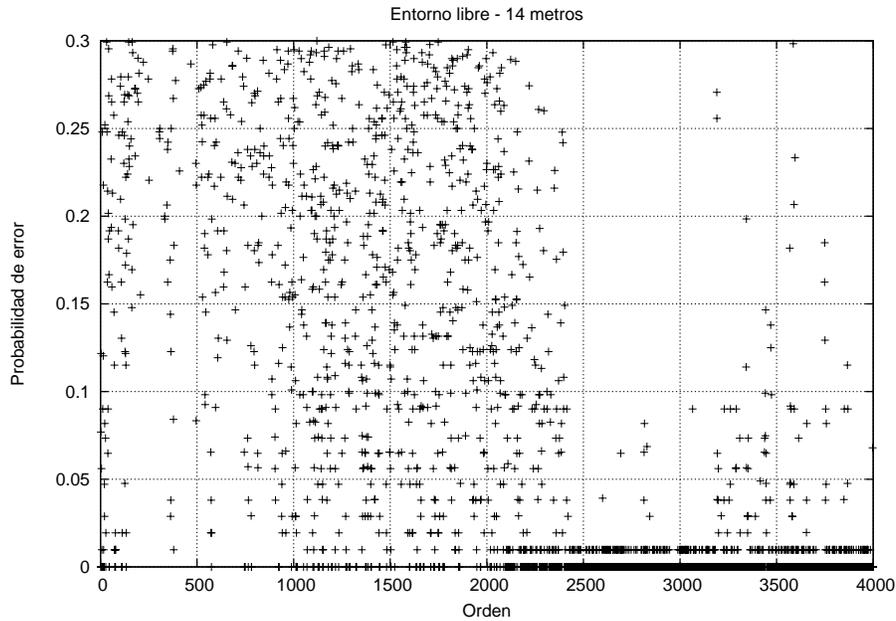


Figura 4.12: Vista reducida de resultados en entorno libre y distancia 14 metros.

4.1.2.6. Distancia de 20 metros entre dispositivos.

Este caso recogió resultados similares al anterior, salvo en la distribución temporal de errores. Se muestran los resultados obtenidos para continuar con el análisis del efecto de la distancia.

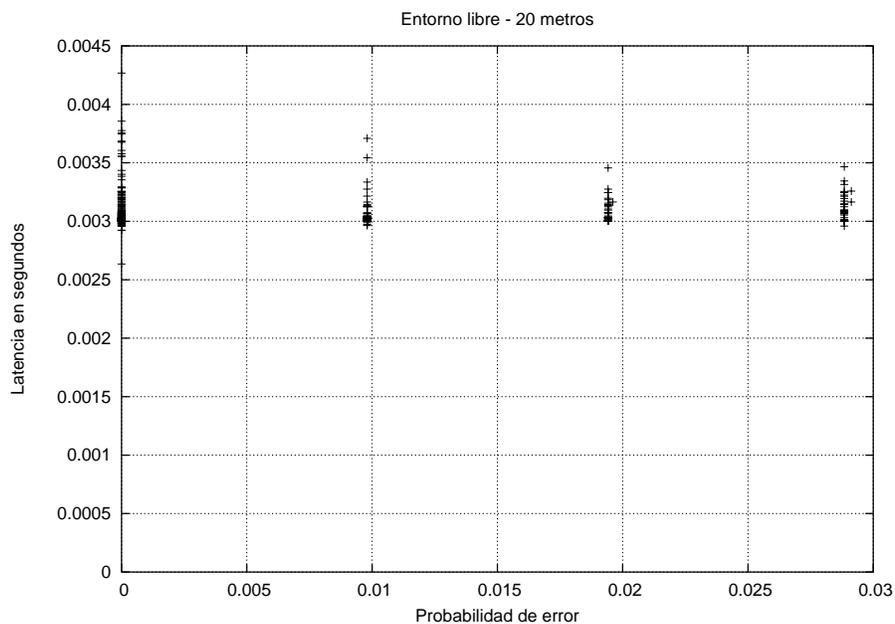


Figura 4.13: Resultados en entorno libre y distancia 20 metros.

Estadístico	Valor
Retardo medio	3,49807 ms.
Varianza del retardo	$1,56357 \cdot 10^{-7}$
probabilidad de error de paquete media	0,16028411
<i>Throughput</i> medio	3,44153474 Mbps.

Tabla 4.6: Valores medios para entorno libre a 20 metros de distancia.

Los resultados medios que se han obtenido son muy similares al caso en que la distancia fue de 14 metros, por lo que se deduce que el aumento producido en la distancia desde la prueba anterior no agrava el rendimiento de la comunicación inalámbrica.

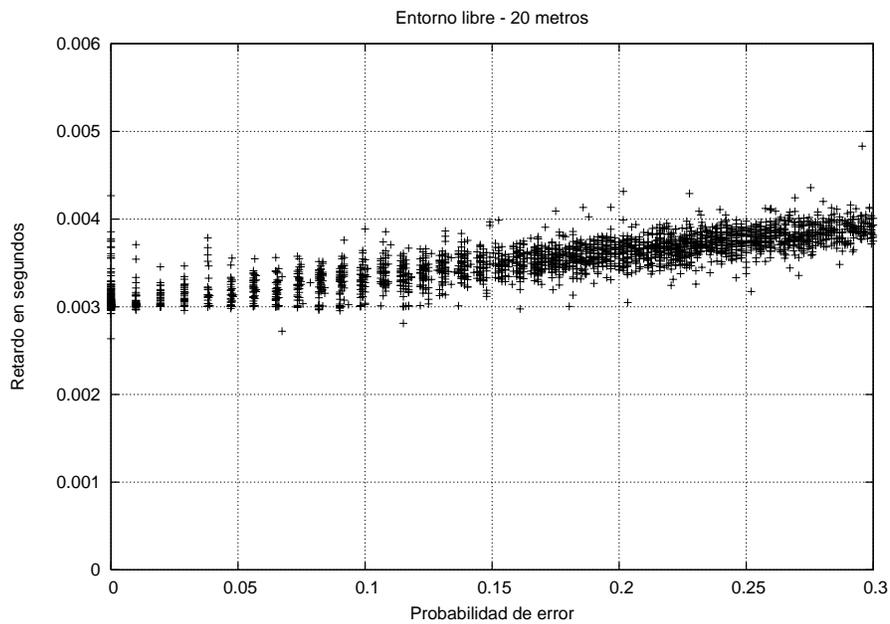


Figura 4.14: Vista reducida de resultados en entorno libre y distancia 20 metros.

La distribución de los puntos en las gráficas 4.14 y 4.15 son de un gran parecido a sus correspondientes en el caso anterior (fig. 4.10 y fig. 4.11).

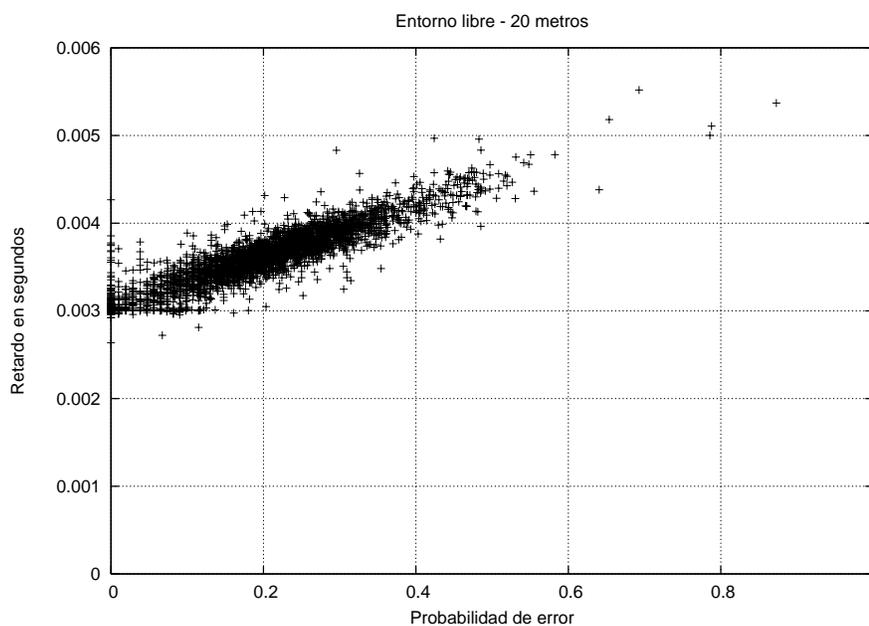


Figura 4.15: Vista reducida de resultados en entorno libre y distancia 20 metros.

La gran diferencia con respecto al caso anterior se muestra en la figura 4.16 donde la distribución de los tramos donde los errores son producidos únicamente por el dispositivo medidor y el resto de tramos están más correlados y son de un periodo más corto.

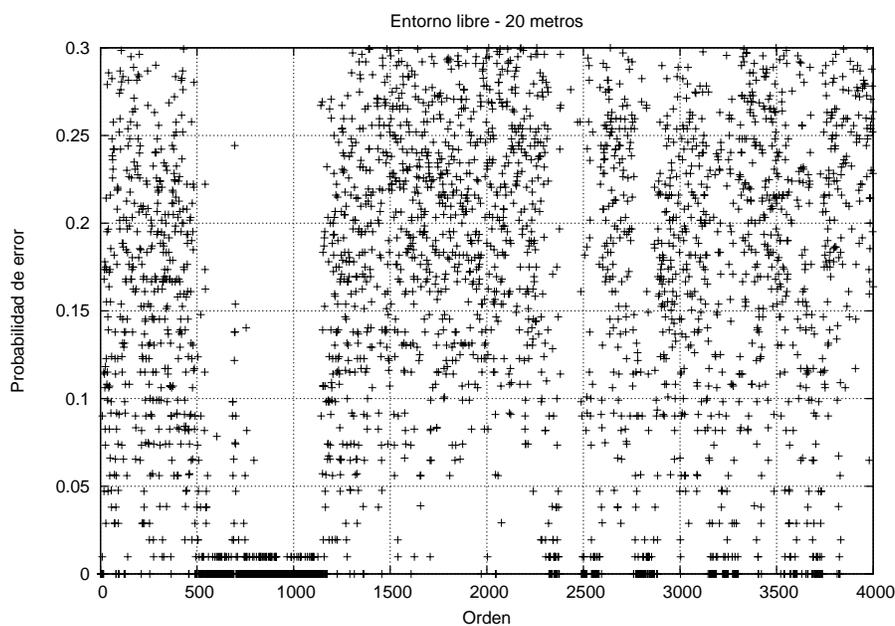


Figura 4.16: Resultados en entorno libre y distancia 20 metros.

4.1.2.7. Distancia de 28 metros entre dispositivos.

Hasta el momento los resultados obtenidos muestran un salto brusco en la degradación de las prestaciones de redes inalámbrica WiFi para entornos libres a partir de 9 - 14 metros.

La siguiente prueba debe confirmar este proceso y en que medida aumenta.



Figura 4.17: Disposición del equipo medidor para la prueba de 28 metros.

El resultado mostrado por la figura 4.18 es un nuevo paso inesperado en el proceso de medidas. La distribución es más parecida a los resultados de las primeras pruebas en los que el efecto que produce la alta probabilidad de error de paquete no se manifiesta.

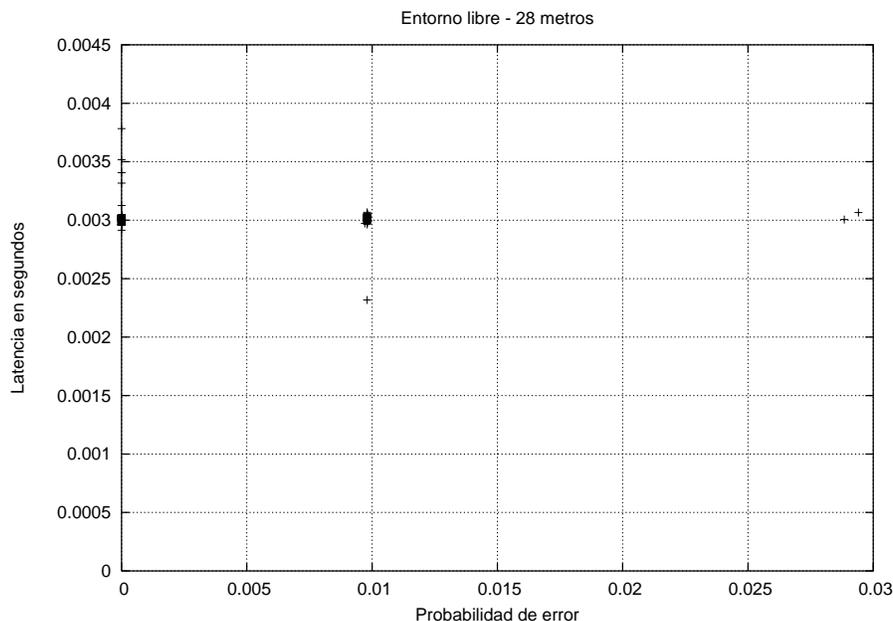


Figura 4.18: Resultados en entorno libre y distancia 28 metros.

Los valores medios corroboran lo anterior, y es que el aumento de distancia no es el factor que origina la pérdida de calidad en la transmisión inalámbrica. Surge ahora la cuestión de averiguar cual fue la causa real que produjo la disminución de las prestaciones inalámbricas en las dos pruebas anteriores. Este efecto, si no es debido a la distancia, debe tener su razón en algún tipo de interferencias. Las condiciones en que se realizaron todas las pruebas fueron idénticas, lo que hace descartar cualquier fuente de interferencias exteriores, puesto que, si las hubiera habido deberían haberse notado también en otras pruebas aparte de las anteriores. La solución a esta cuestión está en los detalles de las figuras 4.17 y 4.6 que muestran la disposición de los aparatos de medida en las pruebas.

Estadístico	Valor
Retardo medio	3,01192 ms.
Varianza del retardo	$8,62566 \cdot 10^{-10}$
probabilidad de error de paquete media	0,00218579
<i>Throughput</i> medio	3,94849482 Mbps.

Tabla 4.7: Valores medios para entorno libre a 28 metros de distancia.

Si se hace un poco de historia a través de las figuras siguientes se observa que el proceso interferente no se manifiesta en la distancia de 6 metros, y comienza a manifestarse a partir de 14 metros, para terminar su efecto en la prueba de 28 metros. Por lo tanto dicho efecto ha de ser estudiado mediante todos los detalles o aspectos de estas pruebas. Tras observar toda la información disponible se descubre que durante las pruebas de 9, 14 y 20 metros la posición del dispositivo medidor es encima de una silla en el pasillo central de la Iglesia rodeado de bancos de madera (figura 4.6), y en la prueba de 28 metros su posición se cambia, colocándolo a una altura mayor con la ayuda de una mesa para mejorar la

visión directa (figura 4.17). Es fácil suponer que las interferencias han tenido su origen en la maraña de bancos de madera que rodeaban al dispositivo medidor, y que aumentaba su densidad conforme aumentaba la separación. La madera es un componente orgánico que produce distorsión de señal como por ejemplo la propagación multicamino, la cual consiste en la reflexión de parte de la potencia de la onda transmitida por dicho material que llega al receptor con menor intensidad y mayor retardo. En la siguiente prueba en la que se aumenta de nuevo la distancia y se evita la influencia de cualquier objeto interferente se demuestra que el factor interferente no es la distancia, y que esta no afecta a las redes inalámbricas 802.11b, al menos en el escenario y con las distancias medidas.

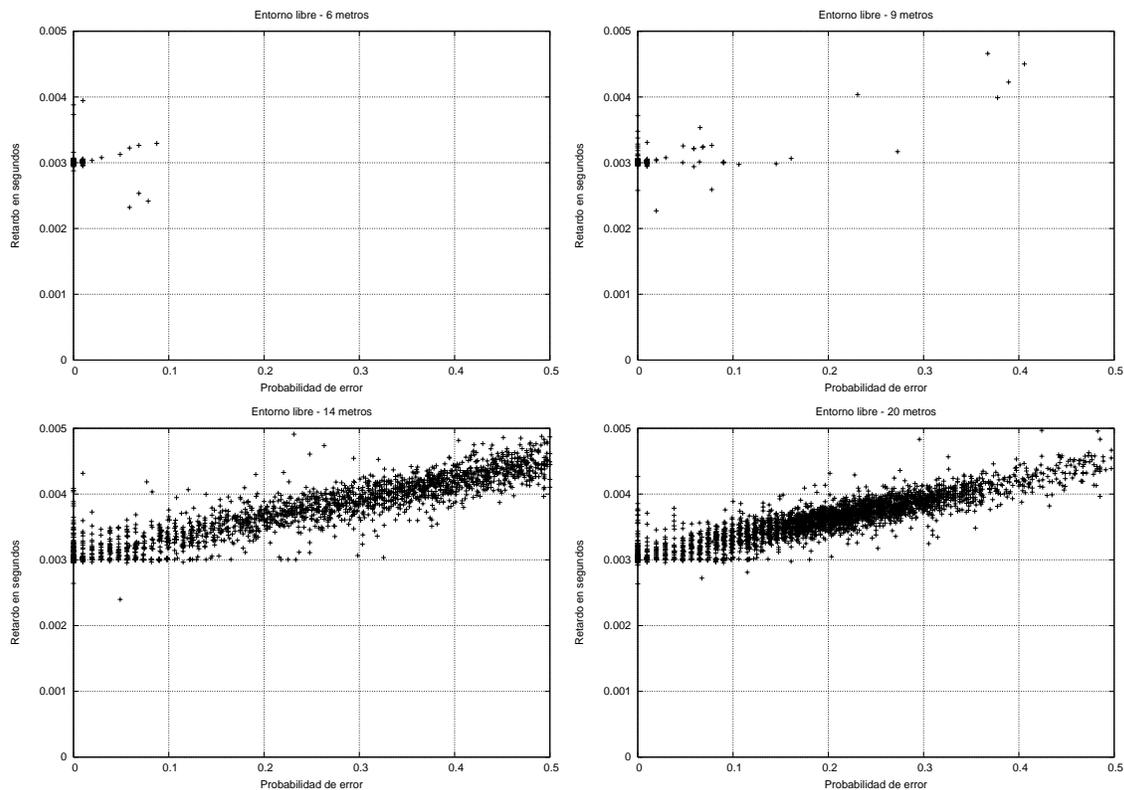


Figura 4.19: Comparativa entre las pruebas de 6, 9, 14 y 20 metros.

4.1.2.8. Distancia de 35 metros entre dispositivos.

La última medida se realizó a la mayor distancia posible dentro de las posibilidades del edificio. Se eligió la parte accesible y más alta desde donde hubiera visión directa entre los dispositivos, la cual se muestra en la figura 4.20. Ésta se corresponde con la zona destinada al coro, que está en la parte superior de la Iglesia. La distancia entre dispositivos se midió mediante triangulaciones y alturas, puesto que como se comentó el edificio tiene 28 metros de largo desde extremos que permiten tener visión directa.



Figura 4.20: Disposición del equipo medidor para la prueba de 35 metros.

Los resultados vuelven a coincidir con el caso anterior y los primeros casos. Esto hace que se concluya que la distancia en entornos libres no repercute en el rendimiento final de las comunicaciones 802.11b, al menos, hasta las distancias que cubre el presente proyecto fin de carrera. Esta prueba ha dado a conocer también hasta que punto es capaz de influir negativamente elementos pasivos en la calidad de las RAL inalámbricas usando esta tecnología. Los puntos siguientes repiten el experimento variando los entornos, lo que da una mayor aproximación al comportamiento real de los dispositivos medidores.

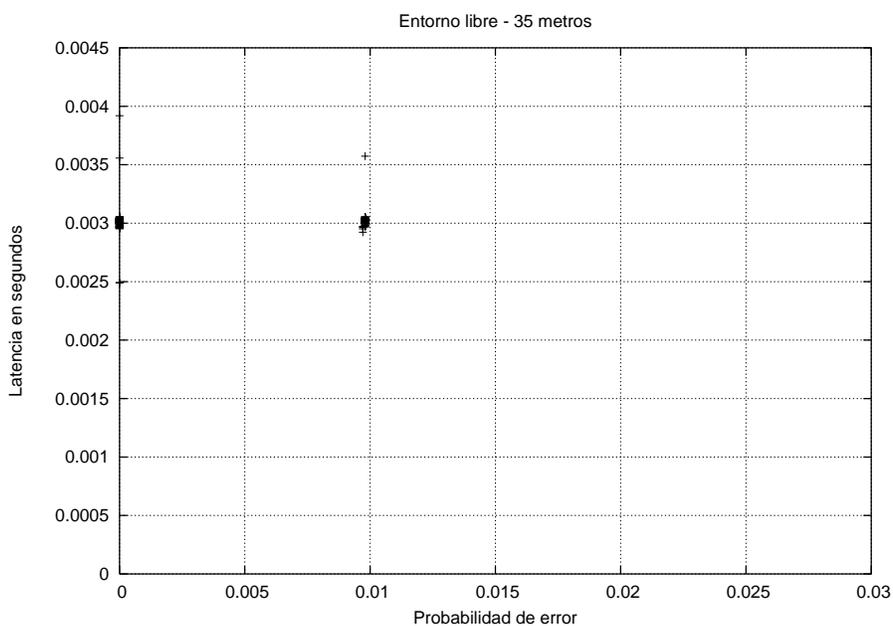


Figura 4.21: Resultados en entorno libre y distancia 35 metros.

Estadístico	Valor
Retardo medio	3,01177 ms.
Varianza del retardo	$7,77606 \cdot 10^{-10}$
probabilidad de error de paquete media	0,00207542
<i>Throughput</i> medio	3,94884878 Mbps.

Tabla 4.8: Valores medios para entorno libre a 35 metros de distancia.

4.1.3. Resumen para entorno libre.

Para obtener una idea más clara en la figura 4.22 se muestran todas las gráficas probabilidad de error de paquete - retardo obtenidas en este entorno bajo la misma escala.

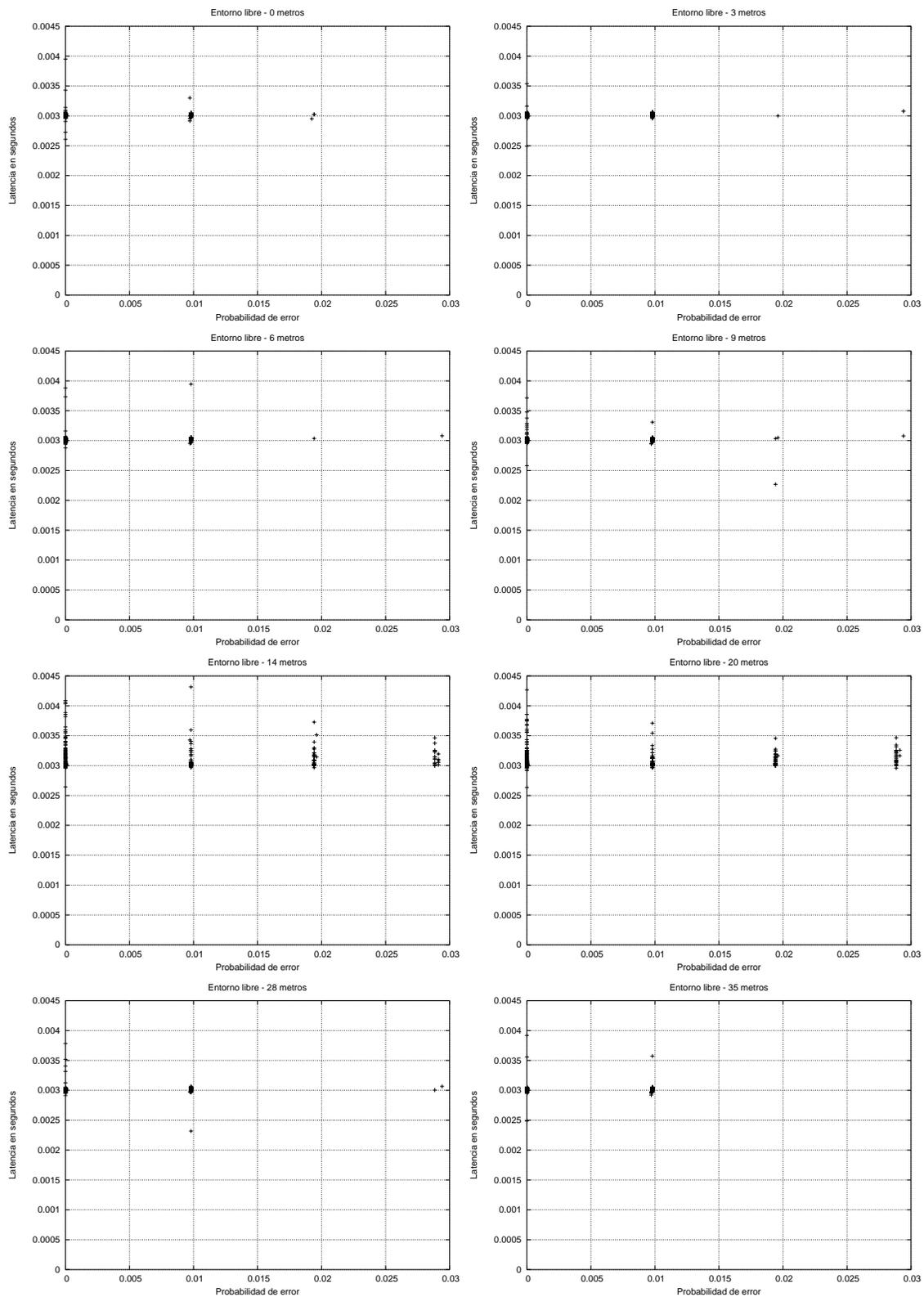


Figura 4.22: Comparativa de las gráficas probabilidad de error de paquete - retardo para todos los casos en entorno libre.

Todos los casos presentan la misma figura excepto los casos de 14 metros y 20 metros, sobre los que se muestra una gráfica independiente que compara ambos casos entre sí.

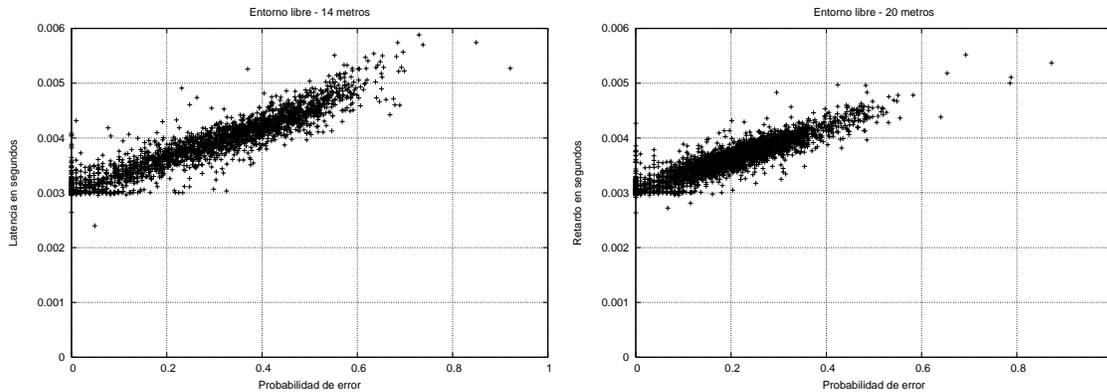


Figura 4.23: Comparativa de las gráficas probabilidad de error de paquete - retardo para los casos 14 y 20 metros en entorno libre.

Paradójicamente los peores resultados son obtenidos en una distancia entre dispositivos menor. Ambas gráficas presentan una misma pendiente, por lo que se deduce que existe cierta relación lineal entre ambas variables. Es necesario recordar que la variable probabilidad de error de paquete recoge el cociente entre los paquetes perdidos a nivel de transporte y el total de paquetes transmitidos, mientras que la variable retardo obtiene la media del retardo de dos paquetes consecutivos que llegan correctamente a nivel de transporte.

Retardo medio	Distancia	Varianza del retardo	Distancia
3,01149 ms.	6 metros	$5,33286 \cdot 10^{-10}$	3 metros
3,01154 ms.	3 metros	$6,99549 \cdot 10^{-10}$	0 metros
3,01176 ms.	0 metros	$7,77606 \cdot 10^{-10}$	35 metros
3,01177 ms.	35 metros	$8,62566 \cdot 10^{-10}$	28 metros
3,01192 ms.	28 metros	$9,57558 \cdot 10^{-10}$	6 metros
3,01594 ms.	9 metros	$8,46791 \cdot 10^{-9}$	9 metros
3,49807 ms.	20 metros	$1,56357 \cdot 10^{-7}$	20 metros
3,51524 ms.	14 metros	$3,60296 \cdot 10^{-7}$	14 metros

Tabla 4.9: Valores del retardo medio y varianza del retardo por orden ascendente para entorno libre.

probabilidad de error de paquete media	Distancia	Caudal medio	Distancia
0,00197969	3 metros	3,94937303 Mbps.	6 metros
0,00200953	6 metros	3,9492521 Mbps.	3 metros
0,00207542	35 metros	3,94889162 Mbps.	0 metros
0,0021022	0 metros	3,94884878 Mbps.	35 metros
0,00218579	28 metros	3,94849482 Mbps.	28 metros
0,00357047	9 metros	3,47199657 Mbps.	9 metros
0,16028411	20 metros	3,47199657 Mbps.	14 metros
0,16532074	14 metros	3,44153474Mbps.	20 metros

Tabla 4.10: Valores de la probabilidad de error de paquete media y caudal medio ordenados de mejor caso a peor caso para entorno libre.

Como se observa en las tablas 4.9 y 4.10 los mejores resultados se obtienen para las distancias de los extremos, mientras que los peores casos son para las distancias de 14 metros y 20 metros donde el efecto de los obstáculos se hace notar en dichos valores.

4.2. Entorno ofimático

4.2.1. Descripción

El lugar natural de desarrollo para RAL inalámbricas es sin duda el entorno ofimático. Sus prestaciones, servicios y rendimiento están bien caracterizados y su soporte e implantación en el mercado actual es una constante en crecimiento. Para seguir con el estudio propuesto se va a evaluar el rendimiento en este tipo de entornos para poder comparar los resultados y ofrecer así una idea más clara sobre las posibilidades reales de esta tecnología en los entornos hostiles. El entorno de pruebas ofimático se corresponde con la figura 4.24, el laboratorio IT-6 del Antiguo Hospital de Marina. Se compone de un armario de telecomunicaciones, un punto de acceso, 13 ordenadores personales, sillas y mesas, armarios, etc. Es necesario destacar la gran cantidad de madera que existe en el entorno puesto que las vigas estructurales que soportan el techo son de este material, y ciertas zonas del laboratorio están forradas con paneles. Las dimensiones aproximadas son 8,5 metros de largo por 7 metros de ancho. A la hora de realizar las pruebas se tuvo en cuenta únicamente los elementos pasivos sin que hubiera movimiento de personas en el proceso de medidas. A continuación se muestran los resultados obtenidos para distintas disposiciones, modos y variando la distancia entre los dispositivos en aras de conseguir una mayor comprensión del funcionamiento de los dispositivos medidores en entornos industriales. Esta campaña de medidas tuvo lugar el 27 de Junio de 2005 desde las 11:00 hasta las 19:00 horas.



Figura 4.24: Vista general del laboratorio IT6 de la Universidad Politécnica de Cartagena.

4.2.2. Resultados en modo *ad-hoc*

Antes de continuar es necesario introducir algunas definiciones implantadas por IEEE 802.11 para entender mejor el mecanismo de funcionamiento de los dispositivos medidores. Una estación IEEE 802.11 es cualquier dispositivo con funcionalidad IEEE 802.11, es decir, que dispone de un interfaz de red que cumple dicho estándar. El IEEE define dos topologías diferentes compuestas por un mismo tipo de unidad. Esta unidad es denominada como *Basic Service Set* o conjunto de servicios básicos (BSS) y está compuesta por varias estaciones. La primera de estas topologías es designada como *Independent Basic Service Set* o conjunto de servicios básicos independientes, la cual está formada por una única BSS y se corresponde con el modo *ad-hoc*, también conocida por *peer-to-peer*. Este tipo de redes provee ciertos servicios propios de cada estación como son los servicios de autenticación, deautenticación, privacidad y transporte de datos LLC, lo que conlleva cierta carga de gestión de la red en el tráfico ofrecido. Estos conceptos son de ayuda para entender los resultados obtenidos en la siguiente prueba, la cual fue realizada en modo *managed*.

Los resultados obtenidos en el entorno ofimático y en modo *ad-hoc* permiten acercarnos al estado real del rendimiento de los dispositivos y comprobar el posible efecto del entorno ofimático mediante una comparación con los resultados obtenidos para el entorno libre. A continuación se desarrollan dichos resultados.

4.2.2.1. Sin distancia entre los dispositivos.

Se repite la distancia de la prueba en entorno libre para poder observar el efecto de este cambio. La única influencia adicional son las posibles fuentes de interferencia que

suponen los equipos encendidos, el mobiliario, el punto de acceso, la luz artificial, etc.

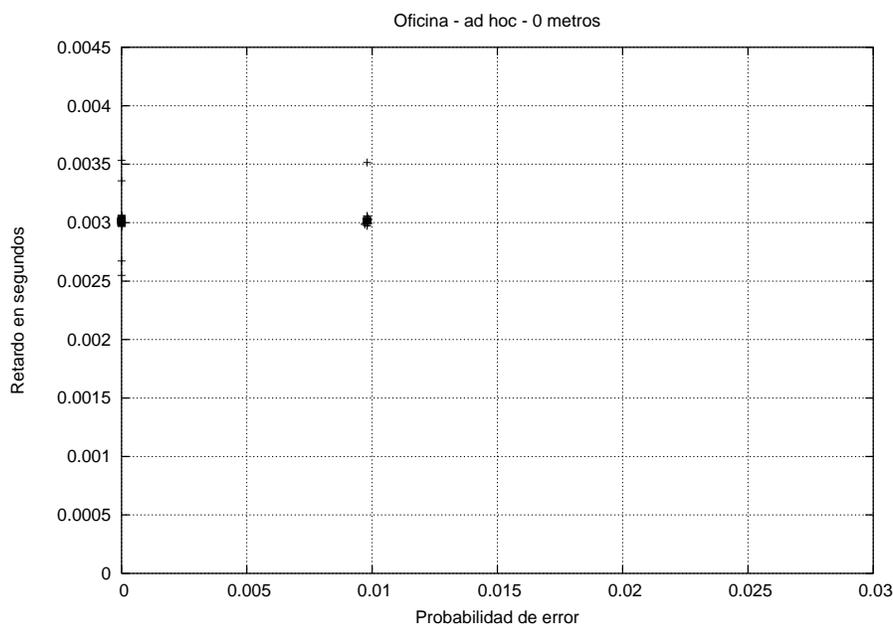


Figura 4.25: Resultados en entorno ofimático, modo *ad-hoc* y sin separación.

La figura 4.25 muestra resultados similares a los obtenidos en la prueba sin distancia en entorno libre. De nuevo todas las muestras se concentran en los mismos puntos, lo que aporta mayor credibilidad a la teoría sobre el desbordamiento del buffer, ya que en otro entorno y bajo otras condiciones vuelve a repetirse dicho efecto. Lo que si se puede afirmar es que el dispositivo medidor influye en dicha probabilidad de error de paquete, bien sea por el *hardware* de la tarjeta o del propio dispositivo, por el sistema operativo o por la implementación del *driver* de la tarjeta.

Estadístico	Valor
Retardo medio	3,01143 ms.
Varianza del retardo	$3,81793 \cdot 10^{-10}$
probabilidad de error de paquete media	0,00192382
<i>Throughput</i> medio	3,9493678 Mbps.

Tabla 4.11: Valores medios para entorno ofimático, modo *ad-hoc* y sin distancia entre dispositivos.

El cuadro 4.11 resume los resultados obtenidos y muestra que cuando los dispositivos están juntos se comportan igual que en un entorno libre y en un entorno ofimático.

4.2.2.2. Distancia de 3 metros entre dispositivos.

El proceso de medidas lleva a variar la distancia de los dispositivos en la misma magnitud que la prueba anterior. Esto permite comprobar como afecta la distancia en estos

entornos respecto al caso en que los dispositivos estaban juntos y también respecto al caso homólogo al entorno libre.

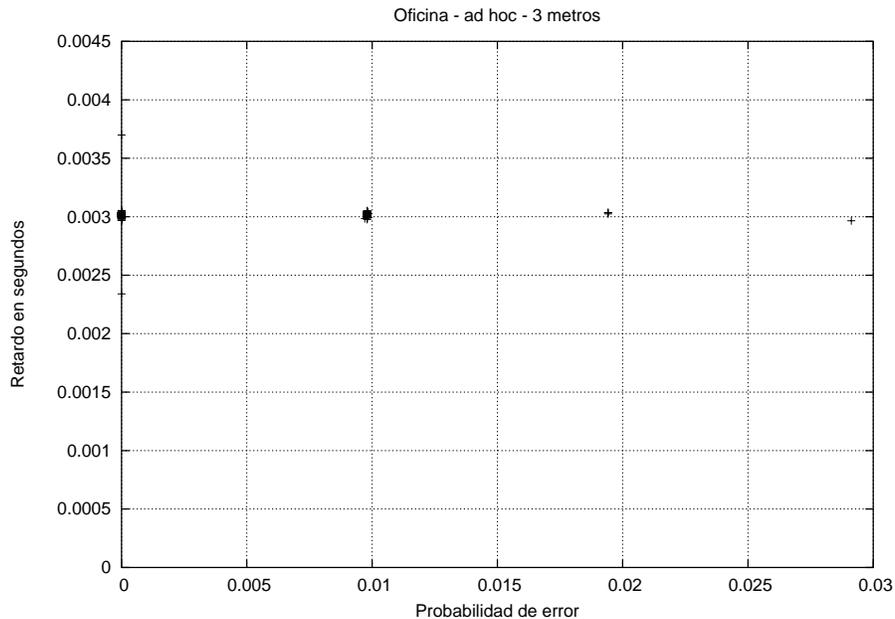


Figura 4.26: Resultados en entorno ofimático, modo *ad-hoc* y distancia 3 metros.

Como se puede observar, los resultados siguen el mismo patrón que en el entorno libre.

Estadístico	Valor
Retardo medio	3,01199 ms.
Varianza del retardo	$3,56714 \cdot 10^{-10}$
probabilidad de error de paquete media	0,00217135
<i>Throughput</i> medio	3,94832081 Mbps.

Tabla 4.12: Valores medios para entorno ofimático, modo *ad-hoc* y sin distancia entre dispositivos.

Hasta el momento se puede concluir que las variaciones de la distancia no tienen efectos negativos sobre el rendimiento de RAL inalámbricas.

4.2.2.3. Distancia de 6 metros entre dispositivos.

A continuación se muestra la gráfica con los resultados obtenidos:

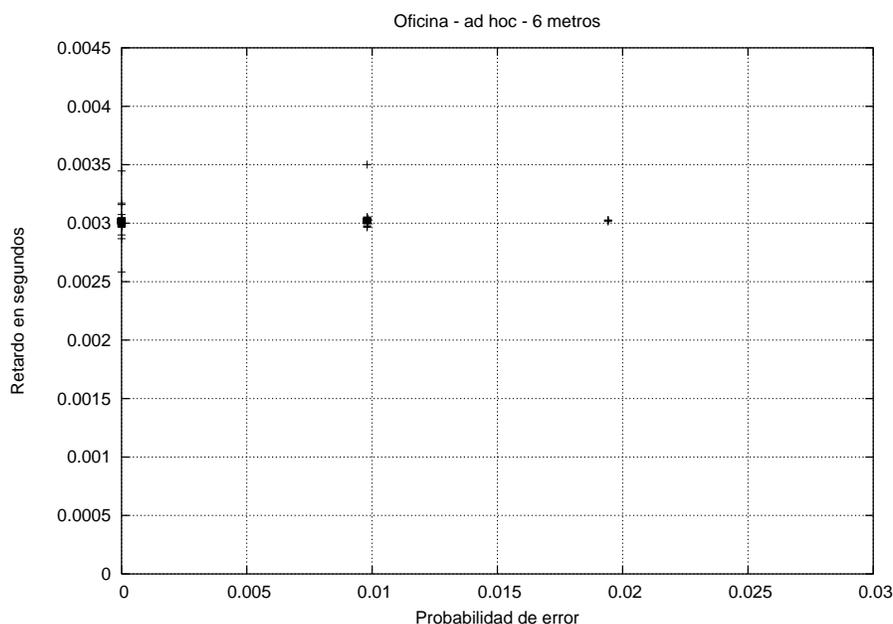


Figura 4.27: Resultados en entorno ofimático, modo *ad-hoc* y distancia 6 metros.

La tónica general es la repetición de los resultados obtenidos en las pruebas en espacio libre. Se puede adelantar que los resultados son idénticos para todas las medidas.

Estadístico	Valor
Retardo medio	3,01248 ms.
Varianza del retardo	$3,16867 \cdot 10^{-10}$
probabilidad de error de paquete media	0,00234753
<i>Throughput</i> medio	3,94770907 Mbps.

Tabla 4.13: Valores medios para entorno ofimático, modo *ad-hoc* y distancia 6 metros.

4.2.2.4. Distancia de 9 metros entre dispositivos.

Las dimensiones del laboratorio no permiten hacer medidas mayores de 8,5 metros de longitud. Para realizar esta prueba y las sucesivas se colocó el dispositivo medidor en el pasillo exterior al laboratorio, desde donde hay visión directa. Este pasillo dispone de otra puerta para acceder a él, por lo que se cerró para no añadir otras variables al entorno que puedan influir en los resultados finales.

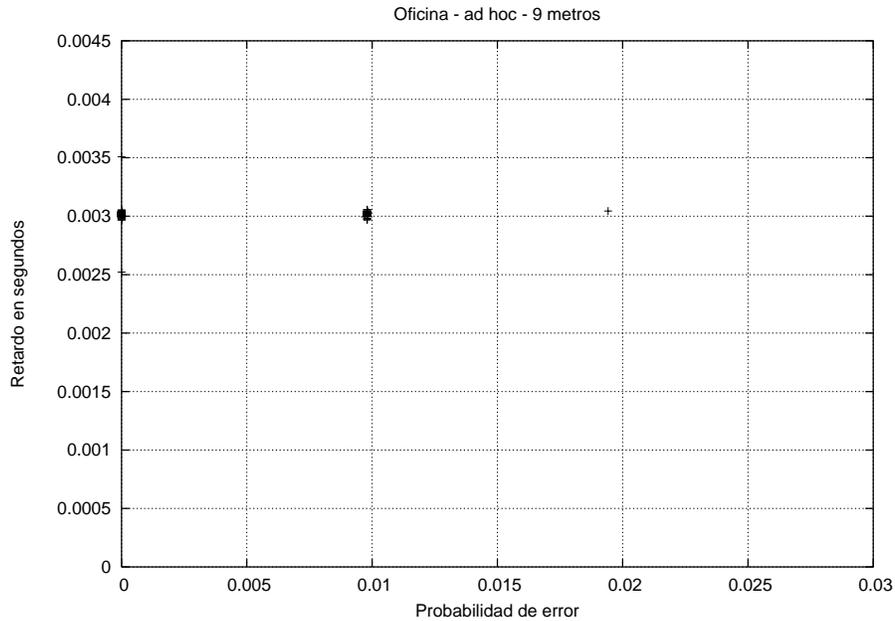


Figura 4.28: Resultados en entorno ofimático, modo *ad-hoc* y distancia 9 metros.

Tanto la figura como el cuadro vuelven a mostrar resultados similares.

Estadístico	Valor
Retardo medio	3,01173 ms.
Varianza del retardo	$2,57471 \cdot 10^{-10}$
probabilidad de error de paquete media	0,00213213
<i>Throughput</i> medio	3,94854995 Mbps.

Tabla 4.14: Valores medios para entorno ofimático, modo *ad-hoc* y sin distancia entre dispositivos.

4.2.2.5. Distancia de 14 metros entre dispositivos.

En la figura 4.29 se muestra la disposición del pasillo exterior del laboratorio para la realización de la prueba actual.



Figura 4.29: Vista del dispositivo medidor en el pasillo exterior para la prueba de 14 metros.

Los resultados siguen mostrando una total similitud entre las distintas distancias probadas.

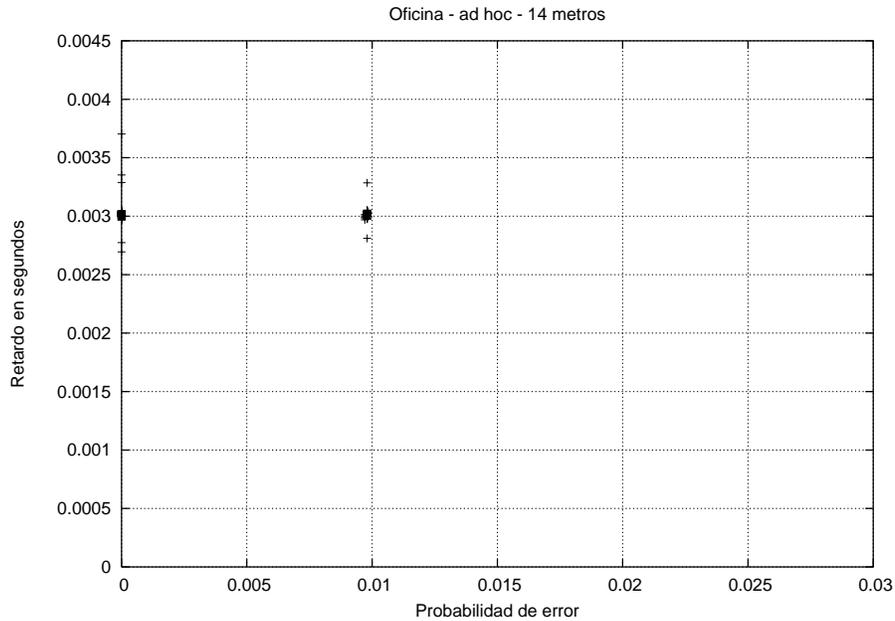


Figura 4.30: Resultados en entorno ofimático, modo *ad-hoc* y distancia 14 metros.

En este caso, al contrario de lo que ocurría en el entorno libre, las medidas sobre esta distancia siguen la misma distribución que en casos anteriores. Esto hace afirmar con rotundidad que la causa que provocó la subida de la probabilidad de error de paquete para la distancia de 14 metros y 20 metros en el entorno libre no fue el aumento de distancia.

Estadístico	Valor
Retardo medio	3,01171 ms.
Varianza del retardo	$4,19671 \cdot 10^{-10}$
probabilidad de error de paquete media	0,0020048
<i>Throughput</i> medio	3,94875483 Mbps.

Tabla 4.15: Valores medios para entorno ofimático, modo *ad-hoc* y sin distancia entre dispositivos.

Los valores medios no sufren distorsión alguna con respecto a los resultados anteriores.

4.2.2.6. Distancia de 14 metros entre dispositivos y sin visión directa.

La siguiente prueba introduce un nuevo factor a priori interferente para comprobar el efecto que tiene y compararlo con el aumento de distancia. Como se puede apreciar en la figura 4.29 existe una puerta entre el dispositivo receptor y el emisor. Esta puerta se cerró y se procedió a tomar medidas.

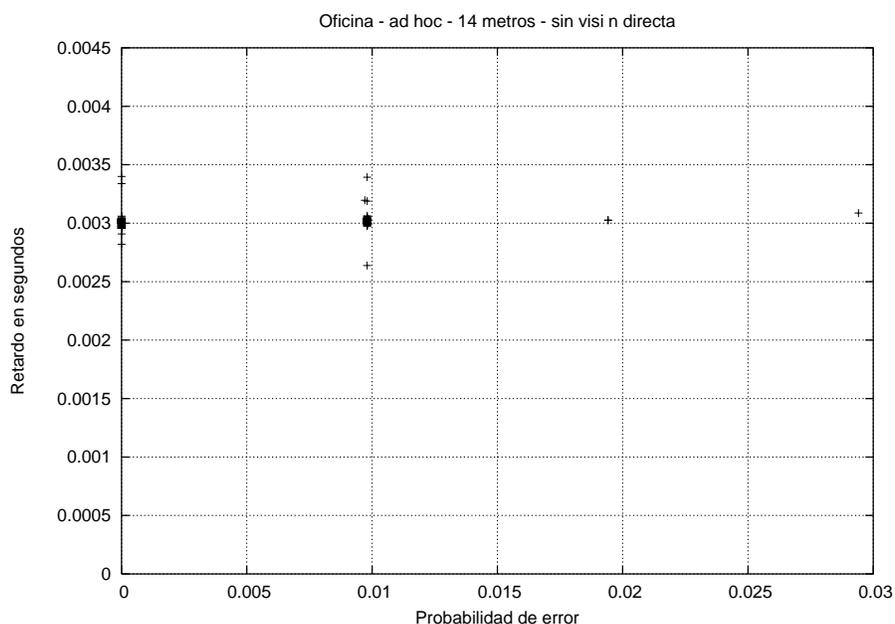


Figura 4.31: Resultados en entorno ofimático, modo *ad-hoc*, distancia 14 metros y sin visión directa.

Según los resultados de la prueba se puede afirmar que la visión directa interrumpida mediante una puerta de madera a la distancia de 14 metros no tiene efecto alguno sobre el rendimiento final.

Estadístico	Valor
Retardo medio	3,01164 ms.
Varianza del retardo	$3,25135 \cdot 10^{-10}$
probabilidad de error de paquete media	0,00219062
<i>Throughput</i> medio	3,94860818 Mbps.

Tabla 4.16: Valores medios para entorno ofimático, modo *ad-hoc*, distancia de 14 metros y sin visión directa.

El cuadro anterior es un calco de los demás cuadros para las distintas pruebas.

4.2.2.7. Distancia de 19 metros entre dispositivos.

El hecho de que la distancia escogida sea 19 metros y no 20 metros como en el caso anterior tiene su fundamento a la ubicación a esa distancia de una toma de corriente, la cual es necesaria debido a la limitación de los dispositivos comentada con anterioridad.

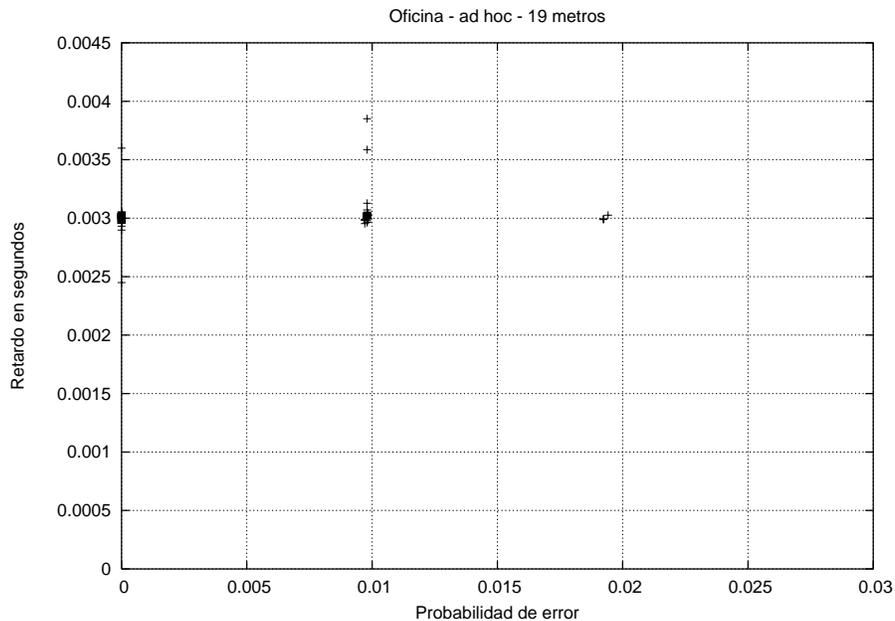


Figura 4.32: Resultados en entorno ofimático, modo *ad-hoc* y distancia 19 metros.

Los datos obtenidos son, de nuevo, prácticamente iguales a todos los que se han producido durante los experimentos en este entorno y bajo estas condiciones.

Estadístico	Valor
Retardo medio	3,01199 ms.
Varianza del retardo	$3,56714 \cdot 10^{-10}$
probabilidad de error de paquete media	0,00217135
<i>Throughput</i> medio	3,94832081 Mbps.

Tabla 4.17: Valores medios para entorno ofimático, modo *ad-hoc* y distancia 19 metros.

Se puede concluir que la distancia, al menos hasta las magnitudes medidas en esta prueba, no tiene efecto alguno en entornos ofimáticos y conexión en modo *ad-hoc*. Incluso si existen obstáculos de la misma naturaleza interferente que una puerta y que dificultan la visión directa el rendimiento no se ve afectado. Es más, los resultados son similares a los obtenidos en un entorno libre de interferencias. Lo único reseñable es la repetitividad en todas las pruebas ejecutadas hasta el momento del fenómeno de desbordamiento del buffer.

4.2.3. Resumen para entorno ofimático en modo *ad-hoc*

Se resume los resultados obtenidos en las gráficas para poder observar el efecto de la distancia en el rendimiento de los enlaces inalámbricos en entornos ofimáticos y modo *ad-hoc*.

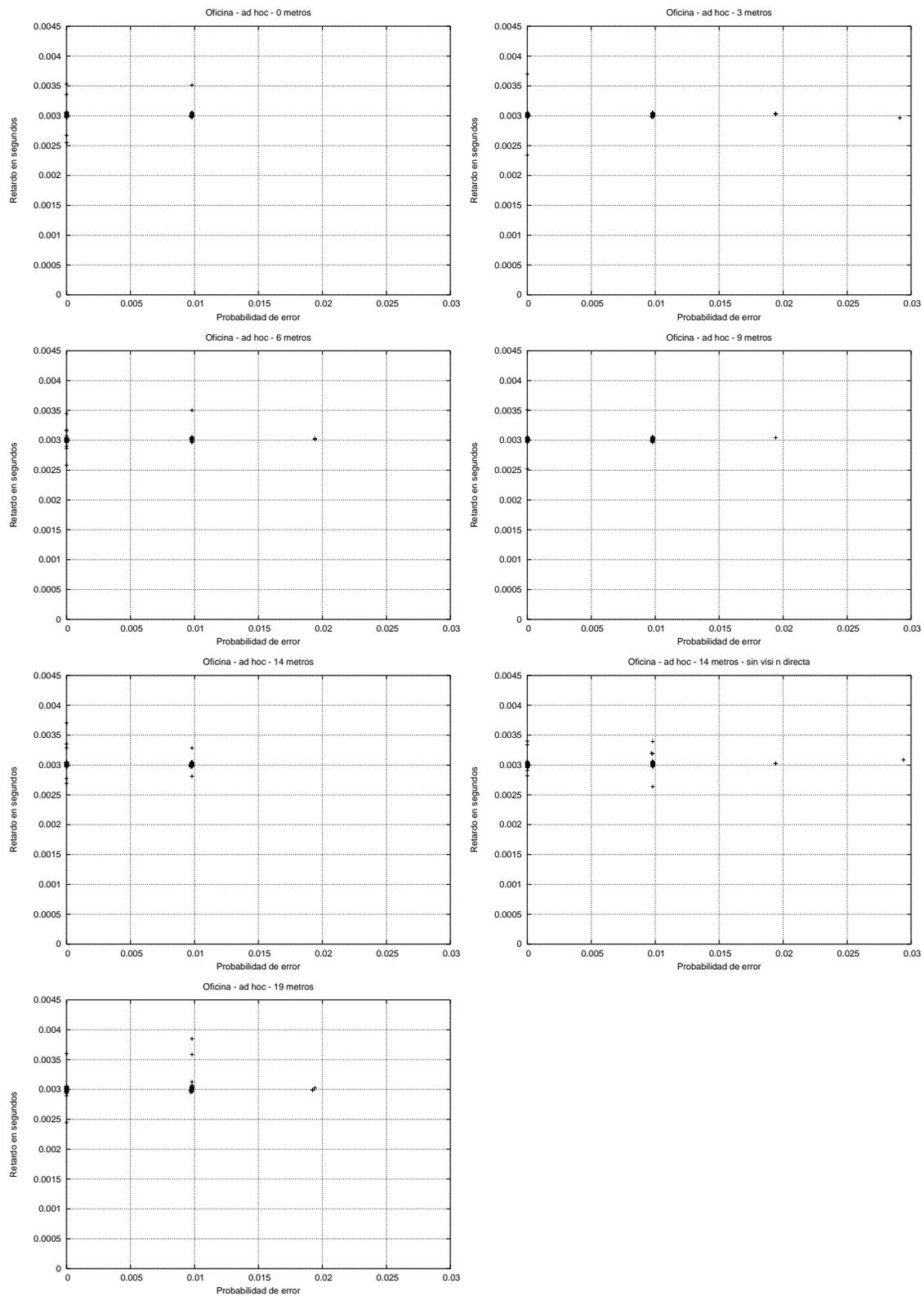


Figura 4.33: Comparativa de las gráficas probabilidad de error de paquete - retardo para todos los casos en entorno ofimático y modo *ad-hoc*.

Se observa como la distancia, e incluso la inclusión de objetos que eliminan la visión directa, no tienen efectos sobre la calidad de los valores finales obtenidos.

Retardo medio	Distancia	Varianza del retardo	Distancia
3,01143 ms.	0 metros	$2,57471 \cdot 10^{-10}$	9 metros
3,01164 ms.	14 metros sin visión	$3,16867 \cdot 10^{-10}$	6 metros
3,01171 ms.	14 metros	$3,25135 \cdot 10^{-10}$	14 metros sin visión
3,01173 ms.	9 metros	$3,56714 \cdot 10^{-10}$	3 metros
3,01189 ms.	19 metros	$3,81793 \cdot 10^{-10}$	0 metros
3,01199 ms.	3 metros	$4,19671 \cdot 10^{-10}$	14 metros
3,01248 ms.	6 metros	$6,79918 \cdot 10^{-10}$	19 metros

Tabla 4.18: Valores del retardo medio y varianza del retardo por orden ascendente para entorno ofimático y modo *ad-hoc*.

probabilidad de error de paquete media	Distancia	Caudal medio	Distancia
0,00192382	0 metros	3,9493678 Mbps.	0 metros
0,0020048	14 metros	3,94891643 Mbps.	14 metros sin visión
0,00213189	14 metros sin visión	3,94875483 Mbps.	14 metros
0,00213213	9 metros	3,94860818 Mbps.	19 metros
0,00217135	3 metros	3,94854995 Mbps.	9 metros
0,00219062	19 metros	3,94832081 Mbps.	3 metros
0,00234753	6 metros	3,94770907 Mbps.	6 metros

Tabla 4.19: Valores de la probabilidad de error de paquete media y caudal medio ordenados de mejor caso a peor caso para entorno libre.

Los cuadros 4.18 y 4.19 no aportan mucha información relevante, debido a que los valores en todos los casos son tan similares que en cada clasificación ocupan puestos muy dispares. Lo único reseñable es la gran igualdad para cada una de las distancias medidas.

4.2.4. Resultados en modo *managed*

En el punto 4.2.2 se introdujo la primera topología definida por el IEEE. La segunda topología se denomina *Extended Service Set* o conjunto de servicios extendidos, y está formada por varias BSS interconectadas por un sistema de distribución. La conexión a este sistema de distribución se realiza mediante el punto de acceso y todo este conjunto es visto por las capas superiores como una única unidad. Este tipo de topología se denomina Infraestructura.



Figura 4.34: Disposición del punto de acceso y del dispositivo medidor emisor.

Como se ha visto el punto de acceso es el encargado de interconectar la BSS con el sistema de distribución. Los dispositivos funcionando en modo *managed* se conectan al punto de acceso para obtener servicios de éste. Estos servicios son los servicios del sistema de distribución (asociación, disociación, reasociación, integración con redes distintas de 802.11 y distribución) y los servicios propios de cada estación (autenticación, deautenticación, privacidad y transporte de datos LLC). Este modo de conexión aumenta la cobertura puesto que la conexión se establece entre cada terminal y el punto de acceso. Los servicios anteriores requieren de tráfico adicional para gestionarlos, por lo que en principio el *throughput* de la red se ve reducido a cambio de aumentar las prestaciones de la red. Un terminal puede conectarse en modo *managed* si establece comunicación con el punto de acceso, o bien en modo *master* que es el modo en el que funciona los puntos de acceso. Para conectarse de esta segunda manera los terminales deben implementar un *firmware* adicional y apropiado para ello. Se muestran a continuación los datos obtenidos para este escenario con esta topología y modo de conexión.

4.2.4.1. Sin distancia entre los dispositivos.

La distancia entre dispositivos medidores es nula, pero no así la distancia con el punto de acceso, que es de dos metros como se puede apreciar en la figura 4.35. La disposición en toda la prueba del dispositivo emisor y del punto de acceso es la mostrada por dicha figura. Se tuvo bastante cuidado de que el dispositivo medidor y el punto de acceso estuvieran lo bastante cerca como para no influir en los resultados finales.

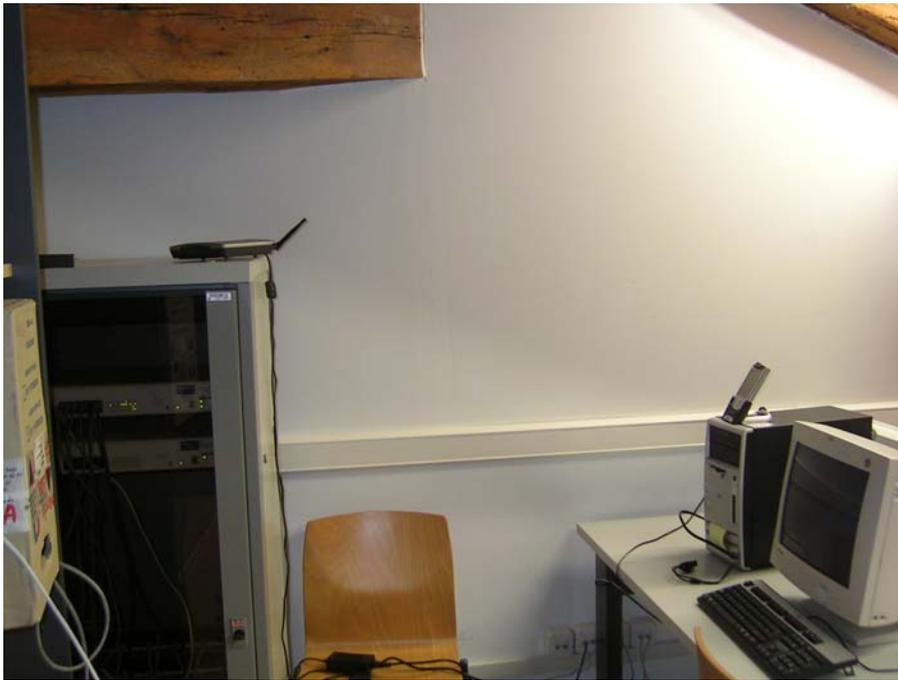


Figura 4.35: Disposición del punto de acceso y del dispositivo medidor emisor.

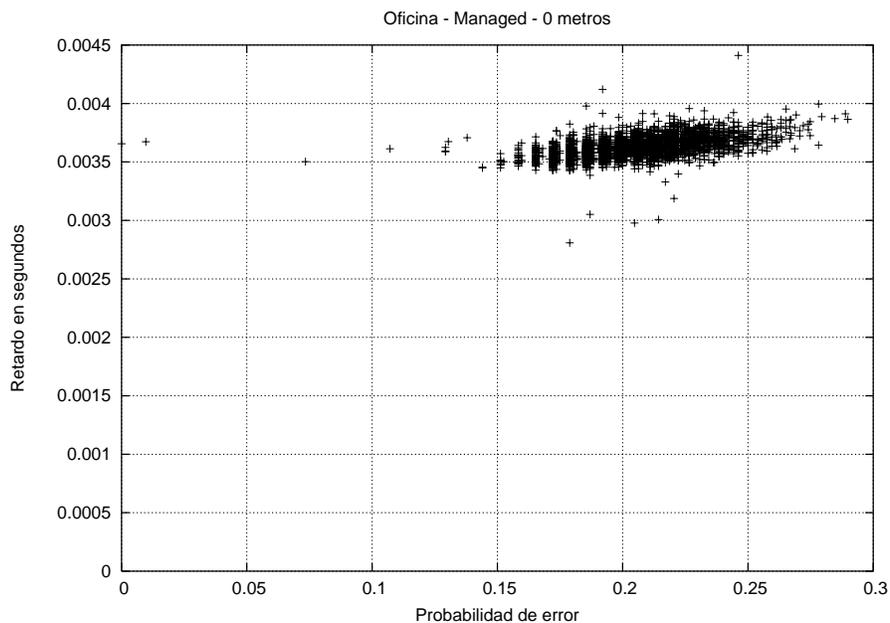


Figura 4.36: Resultados en entorno ofimático, modo *managed* y sin separación.

Estos datos muestran diferencias y similitudes con el mismo entorno en modo *ad-hoc* y con el entorno libre. Las muestras están mucho más espaciadas y alejadas entre sí. En este caso no se puede hablar de dos valores únicos donde se concentran las muestras, sin embargo se aprecia como la probabilidad de error de paquete sigue estando cuantificada, debido a la poca capacidad computacional del dispositivo medidor. Se aprecia un ligero

aumento del retardo y un aumento bastante mayor en la probabilidad de error de paquete con respecto al mismo caso mediante la conexión en modo *ad-hoc*. Esto, quizá, pueda ser debido al aumento de paquetes de gestión de la red que se produce en modo *managed*, y que, a diferencia del caso en *ad-hoc*, para la transmisión de un paquete entre dos nodos hace falta, al menos, dos envíos de paquetes. Todo ésto, junto con la poca capacidad computacional de los dispositivos medidores, hace que se obtengan los resultados anteriores, en los que, además, no existen muestras con probabilidad de error de paquete cero. Es necesario hacer notar que los ejes de las gráficas de esta prueba son distintos a los usados en la prueba en modo *ad-hoc*.

Estadístico	Valor
Retardo medio	3,62026 ms.
Varianza del retardo	$7,25343 \cdot 10^{-9}$
probabilidad de error de paquete media	0,20252924
<i>Throughput</i> medio	3,27912679 Mbps.

Tabla 4.20: Valores medios para entorno ofimático, modo *managed* y sin distancia entre dispositivos medidores.

La tabla de valores medios reafirma las observaciones deducidas de la gráfica. Se ha producido un aumento de aproximadamente medio milisegundo en el retardo medio, la varianza ha aumentado, la probabilidad de error de paquete es cien veces mayor y el *throughput* ha disminuido considerablemente. Las condiciones de rendimiento caen considerablemente si se comparan con los casos anteriores para esta misma distancia.

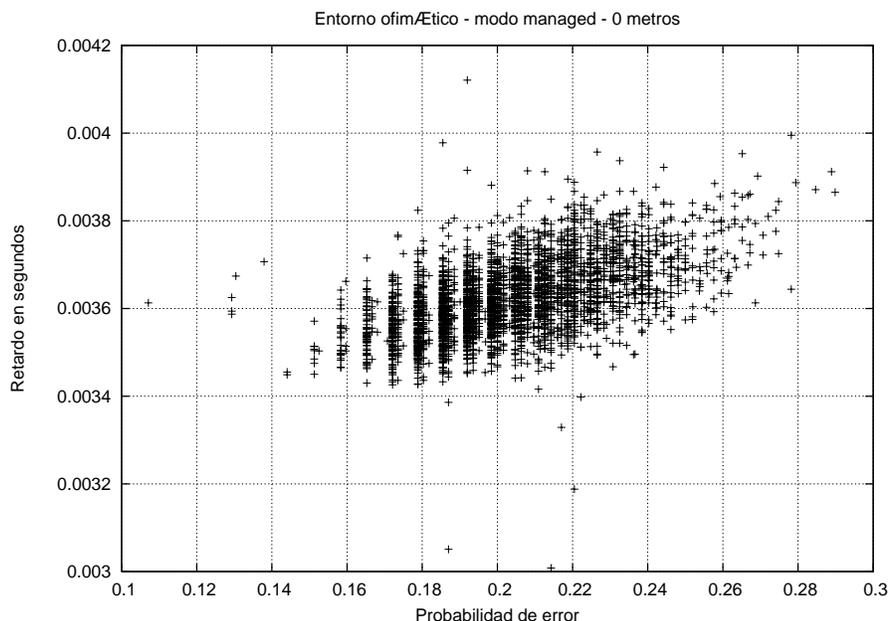


Figura 4.37: Resultados en entorno ofimático, modo *managed* y sin distancia entre dispositivos medidores.

La figura 4.37 muestra aumentado la zona de ocurrencias de las muestras para poder

apreciar mejor el resultado obtenido. El aumento producido en el retardo tiene su justificación en el proceso de transmisión en modo *managed*. Éste tiene lugar entre cada terminal y el punto de acceso, por lo que éste se convierte en un punto intermedio en la comunicación entre terminales. Las pruebas para el entorno ofimático se realizaron intercalando los dos modos de conexión para una misma distancia. Esto descarta que el aumento de la probabilidad de error de paquete se deba a influencias del entorno, ya que si así fuera, hubiera mostrado sus efectos también en modo *ad-hoc*. Conforme se avanza por el eje de la probabilidad de error de paquete se puede apreciar que los valores tomados están cuantificados y son prácticamente constantes, y además el intervalo de retardo para cada uno de ellos aumenta conforme aumenta la probabilidad de error de paquete, hasta llegar a un valor en el que la cuantificación de la probabilidad de error de paquete parece difuminarse. Además, al contrario que ocurre en modo *ad-hoc* la probabilidad de error de paquete cero no llega a alcanzarse. Todo esto hace suponer que los dispositivos medidores en modo *ad-hoc* degradan considerablemente su rendimiento debido a sus restricciones de *hardware* - sistema operativo - *firmware* de la tarjeta. El hecho de que la probabilidad de error de paquete esté cuantificada denota que siempre se descartan la misma relación de paquetes. El desbordamiento del buffer cuando se llena puede ser la razón. El aumento del retardo para cada valor de la probabilidad de error de paquete puede ser debido a que el dispositivo receptor, tras recibir correctamente los paquetes y alojarlos en el buffer, tarde en responder mediante el paquete de reconocimiento. Además, en modo *managed* existen más paquetes de gestión de la red que en modo *ad-hoc*, y es el punto de acceso el encargado de variar la tasa de transmisión. Todo esto hace que, debido a que los recursos de que dispone el dispositivo medidor parecen ser escasos para controlar todo el tráfico que le llega, gestiona correctamente paquetes a nivel de la capa de enlace que luego a nivel de la capa de red descarta, hasta que este curioso control de la congestión se muestra ineficaz y también empieza a descartar paquetes a nivel de la capa de enlace. Los valores cuantificados de la probabilidad de error de paquete se corresponden con el descarte de la misma relación de paquetes a nivel de la capa de red y los valores de probabilidad de error de paquete no cuantificados que se dan en los valores más altos de toda la muestra se corresponden con los descartes a nivel de la capa de enlace y a nivel de la capa de red. Es lógico que ocurra esto, ya que en las pruebas anteriores en modo *ad-hoc* se observó este hecho a un nivel menor. En modo *managed* el canal está ocupado más veces puesto que transmiten tres equipos, lo que hace que se agoten antes los recursos del dispositivo receptor, y que la probabilidad de error de paquete aumente de una manera más marcada que en anteriores pruebas. En la siguiente toma de medidas con una distancia de 3 metros se comprueba que el comportamiento anterior se vuelve a repetir.

4.2.4.2. Distancia de 3 metros entre dispositivos.

A continuación se muestran los resultados para esta prueba.

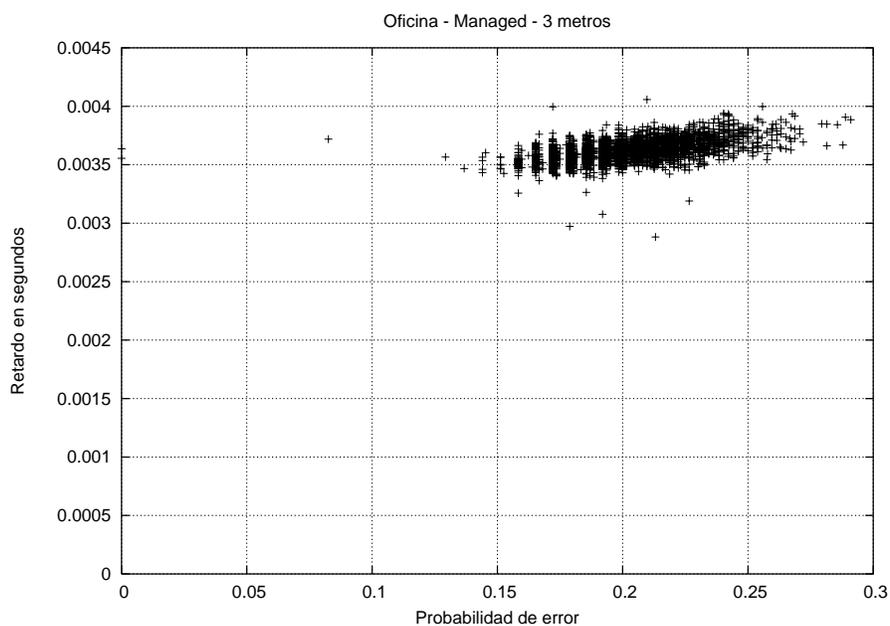


Figura 4.38: Resultados en entorno ofimático, modo *managed* y distancia 3 metros.

Se obtienen datos muy similares a la prueba sin distancia entre dispositivos.

Estadístico	Valor
Retardo medio	3,61374 ms.
Varianza del retardo	$7,29137 \cdot 10^{-9}$
probabilidad de error de paquete media	0,20002058
<i>Throughput</i> medio	3,28640797 Mbps.

Tabla 4.21: Valores medios para entorno ofimático, modo *managed* y distancia 3 metros.

Los valores medios afianzan la sentencia anterior. No se produce cambio alguno en el rendimiento de redes inalámbricas en modo *managed* tras aumentar la distancia a 3 metros. La tónica general es la misma para todas las distancias.

4.2.4.3. Distancia de 6 metros entre dispositivos.

Los resultados obtenidos para esta prueba se muestran a continuación.

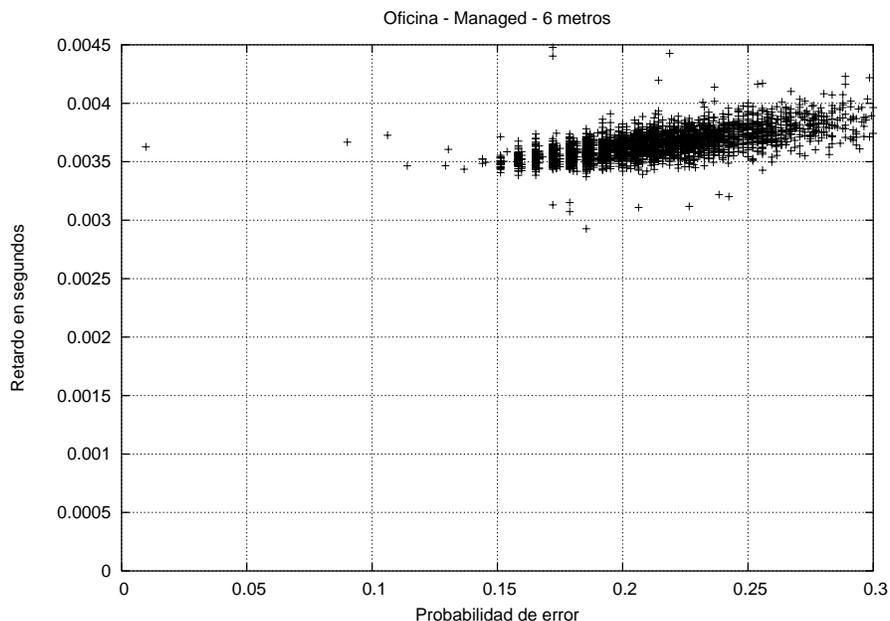


Figura 4.39: Resultados en entorno ofimático, modo *managed* y distancia 6 metros.

Las muestras siguen la misma pauta. La única diferencia es que se ha producido una mayor dispersión de las muestras para valores grandes de la probabilidad de error de paquete.

Estadístico	Valor
Retardo medio	3,64161 ms.
Varianza del retardo	$2,75844 \cdot 10^{-8}$
probabilidad de error de paquete media	0,20946237
<i>Throughput</i> medio	3,2620527 Mbps.

Tabla 4.22: Valores medios para entorno ofimático, modo *managed* y distancia 6 metros.

La varianza del retardo ha aumentado con respecto a las pruebas anteriores. El resto de valores siguen prácticamente constantes.

4.2.4.4. Distancia de 9 metros entre dispositivos.

La prueba sobre 9 metros tiene lugar con el dispositivo medidor receptor fuera del laboratorio, en el pasillo que comunica con éste. Ofrece los siguientes resultados.

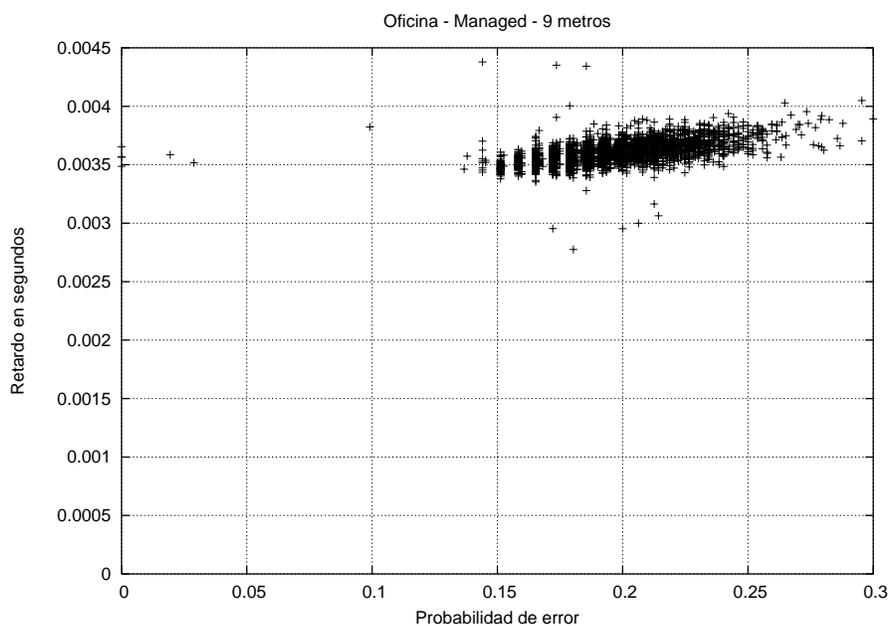


Figura 4.40: Resultados en entorno ofimático, modo *managed* y distancia 9 metros.

La evolución sobre la dispersión de muestras que se puede apreciar en el caso anterior no tiene constancia en éste. La figura 4.40 muestra los resultados más concentrados.

Estadístico	Valor
Retardo medio	3,60954 ms.
Varianza del retardo	$5,99462 \cdot 10^{-8}$
probabilidad de error de paquete media	0,19739223
<i>Throughput</i> medio	3,29401528 Mbps.

Tabla 4.23: Valores medios para entorno ofimático, modo *managed* y distancia 9 metros.

Todos los valores medios son sumamente parecidos. La distancia hasta el momento no tiene ninguna influencia en el rendimiento de RAL inalámbricas para sus distintas topologías.

4.2.4.5. Distancia de 14 metros entre dispositivos.

Este caso es el único que obtiene datos distintos a todos los anteriores.

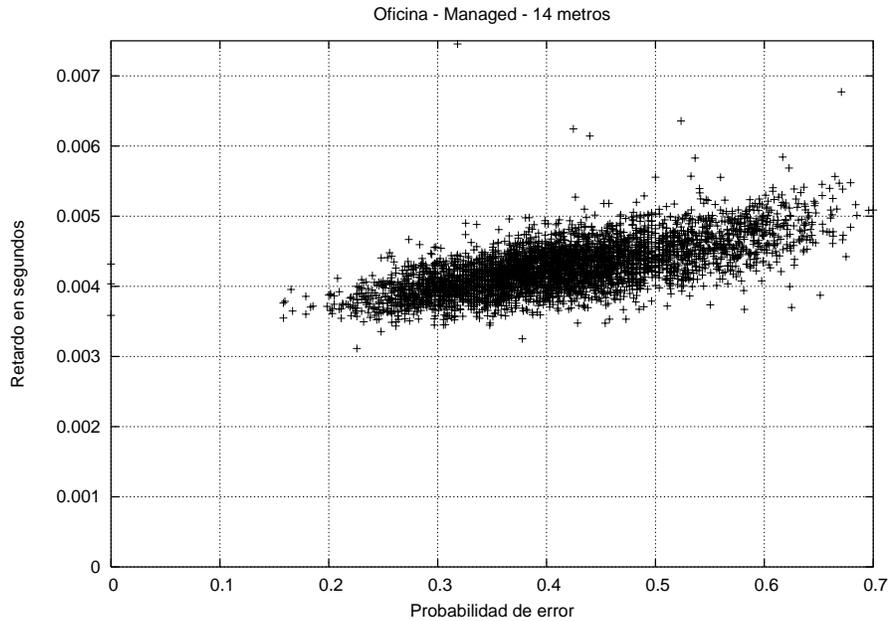


Figura 4.41: Vista reducida de resultados en entorno ofimático, modo *managed* y distancia 14 metros.

Si se usan los mismos límites para los ejes se comprueba que el espacio de muestras es más extenso para esta prueba. Esta gráfica muestra que los datos obtenidos esta vez son distintos a los anteriores. Los ejes para la probabilidad de error de paquete y para el retardo han aumentado para recoger todas las muestras.

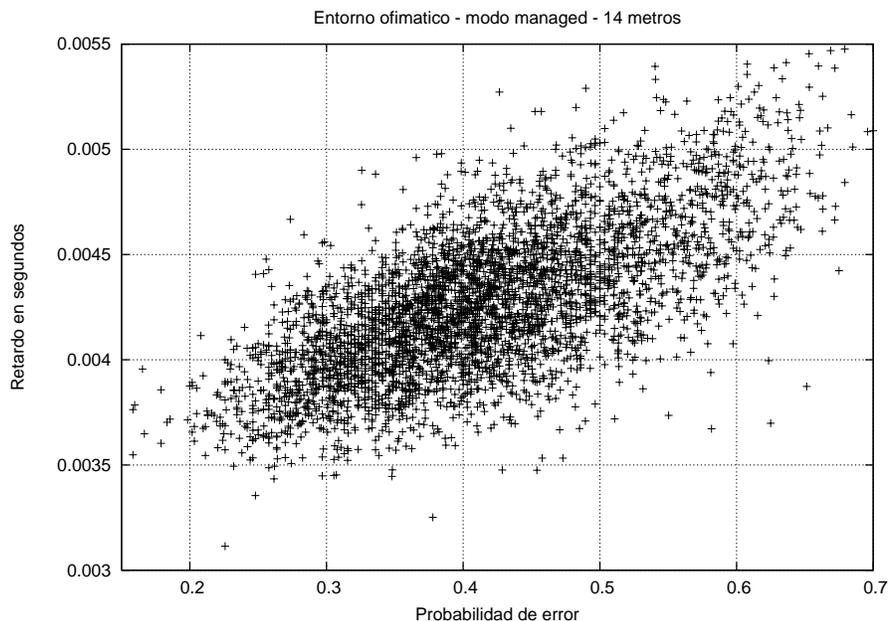


Figura 4.42: Vista reducida de resultados en entorno ofimático, modo *managed* y distancia 14 metros.

Esta gráfica muestra aumentada la zona de influencia de los valores obtenidos. Esta

vez no se aprecia cuantificación en la probabilidad de error de paquete, aunque los valores de ésta son mayores que en los casos en los que si se aprecia. Luego es posible afirmar que la cuantificación en la probabilidad de error de paquete se manifiesta claramente en las gráficas en ausencia de otro tipo de errores, aunque es más que probable que su efecto esté presente en la gran mayoría de muestras.

Estadístico	Valor
Retardo medio	4,29245 ms.
Varianza del retardo	$3,43141 \cdot 10^{-7}$
probabilidad de error de paquete media	0,41642881
<i>Throughput</i> medio	2,78795204 Mbps.

Tabla 4.24: Valores medios para entorno ofimático, modo *managed* y distancia de 14 metros.

El retardo y su varianza han aumentado considerablemente. La probabilidad de error de paquete media ha doblado su valor y el *throughput* ha caído un 15 %. La figura 4.43 ofrece una comparativa de la distribución temporal de la probabilidad de error de paquete para el caso normal y para este caso.

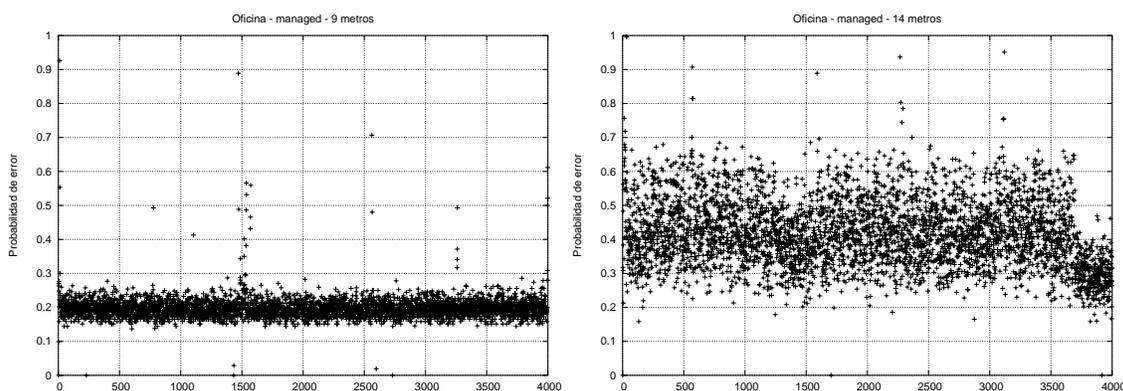


Figura 4.43: Comparativa de la distribución temporal de la probabilidad de error de paquete para los casos de 9 metros y 14 metros.

Así pues, los efectos interferentes tuvieron lugar durante todo el desarrollo de la prueba con 14 metros. La siguiente prueba esclarece si los efectos manifestados son debidos al aumento de distancia.

4.2.4.6. Distancia de 19 metros entre dispositivos.

Ésta es la última distancia medida para esta campaña de medidas. Los datos obtenidos podrán concluir los efectos de la distancia sobre el rendimiento de redes inalámbricas 802.11b.

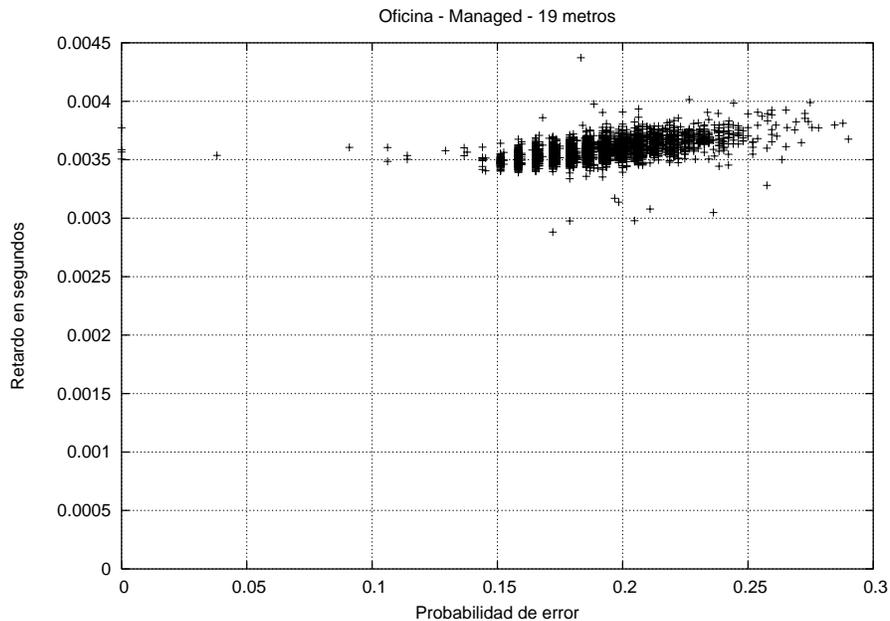


Figura 4.44: Resultados en entorno ofimático, modo *managed* y distancia 19 metros.

Tras examinar la gráfica se puede concluir que los valores obtenidos se parecen más a las gráficas extraídas de las primeras pruebas que a la gráfica con 14 metros de separación. Por lo tanto, la distancia en estas magnitudes no tiene efecto en las RAL inalámbricas en modo *managed*. Cabe ahora preguntarse la causa que produjo el aumento de errores para la prueba con la distancia de 14 metros. En la misma prueba de distancia pero en conexión *ad-hoc* no se observó ningún aumento de la probabilidad de error de paquete. Sin embargo, en modo *ad-hoc* la conexión se realiza entre los dispositivos medidores, y en modo *managed* la conexión es entre dispositivos y punto de acceso. Esto lleva a pensar que en la conexión del punto de acceso y el dispositivo receptor está la causa de el aumento de errores. Es posible que bajo dicha distancia y en dicha posición los efectos de distorsión de señal se hayan amplificado, con lo que a la hora de evaluar el rendimiento tenga una mayor influencia la posición del dispositivo que la distancia. Todo esto fue corroborado al realizar esta misma prueba con la puerta cerrada, es decir, sin visión directa entre los dispositivos. Los resultados no se muestran porque no se pudo realizar tal prueba. Tras una espera de tres veces el tiempo normal de duración de una prueba los dispositivos no recogieron ni una sola muestra, es decir, el enlace entre el punto de acceso y el dispositivo receptor era nulo.

Estadístico	Valor
Retardo medio	3,57965 ms.
Varianza del retardo	$1,22087 \cdot 10^{-8}$
probabilidad de error de paquete media	0,18909563
<i>Throughput</i> medio	3,31706736 Mbps.

Tabla 4.25: Valores medios para entorno ofimático, modo *managed* y distancia de 19 metros.

Curiosamente los mejores resultados para esta campaña, dentro de la gran similitud que existe, fueron los obtenidos con la distancia mayor. Por lo tanto, se presupone que la distancia no es en principio un factor tan influyente como la posición y que en modo *managed* el rendimiento de los dispositivos disminuye considerablemente. Estas conclusiones sirven para analizar en mayor profundidad el caso de redes inalámbricas en entornos industriales.

4.2.5. Resumen para entorno ofimático en modo *managed*

Se resume los resultados obtenidos en las gráficas para poder observar el efecto de la distancia en el rendimiento de los enlaces inalámbricos en entornos ofimáticos y modo *ad-hoc*.

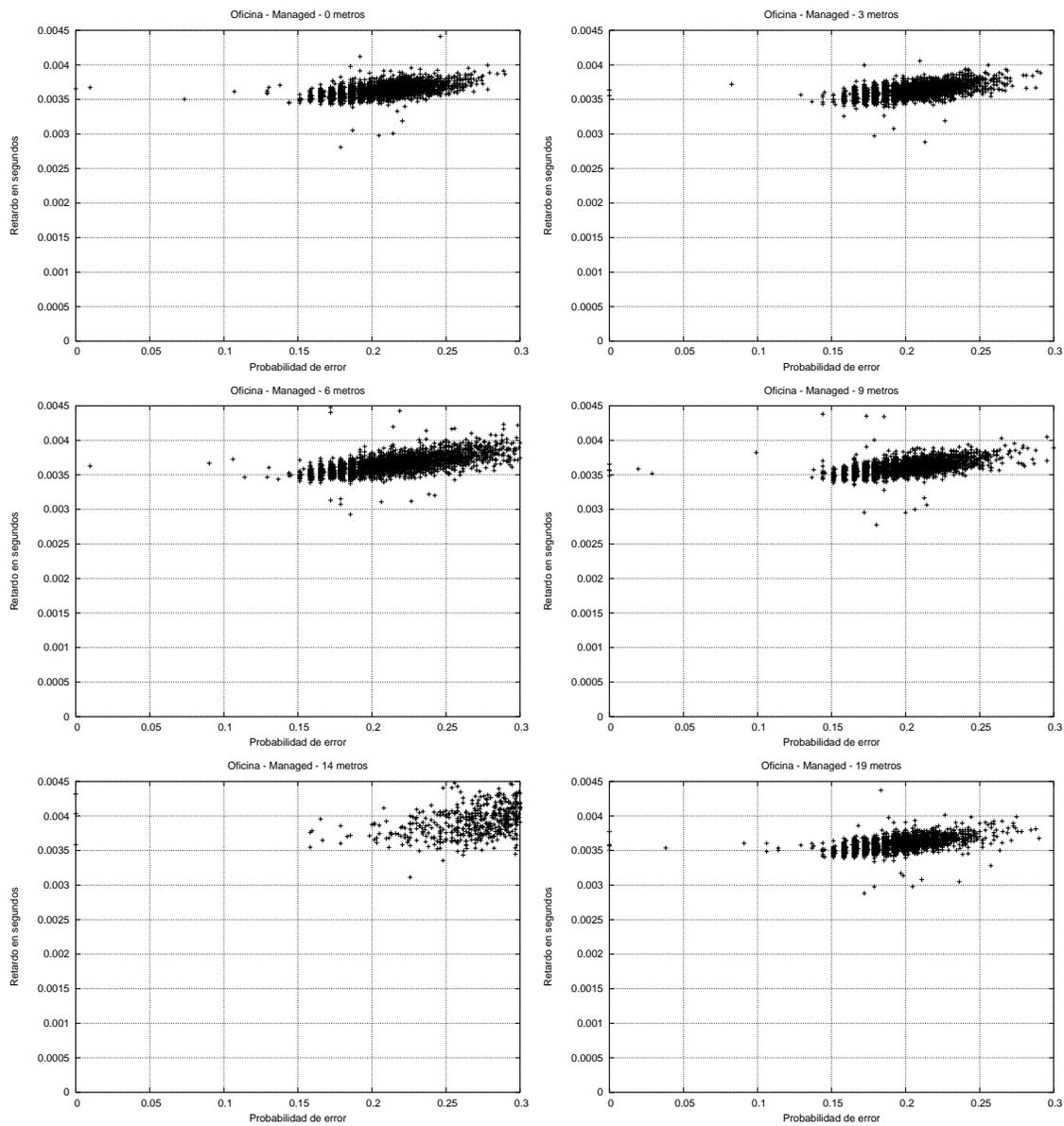


Figura 4.45: Comparativa de las gráficas probabilidad de error de paquete - retardo para todos los casos en entorno ofimático y modo *managed*.

Salvo el caso de separación de 14 metros el resto se muestra inmutable a los efectos de la distancia. Los peores casos para el rendimiento durante toda la campaña de medidas fueron obtenidos con la configuración de esta prueba. Las pendientes son similares en todos los casos, salvo para el caso de 14 metros que presenta características propias. La dispersión y la concentración de las muestras son quizá el rasgo más identificativo para cada prueba, sin embargo no existe una correlación entre ésta y la distancia entre dispositivos.

Retardo medio	Distancia	Varianza del retardo	Distancia
3,57965 ms.	19 metros	$7,25343 \cdot 10^{-9}$	0 metros
3,60954 ms.	9 metros	$7,29137 \cdot 10^{-9}$	3 metros
3,61374 ms.	3 metros	$1,22087 \cdot 10^{-8}$	19 metros
3,62026 ms.	0 metros	$2,75844 \cdot 10^{-8}$	6 metros
3,64161 ms.	6 metros	$5,99462 \cdot 10^{-8}$	9 metros
4,29245 ms.	14 metros	$3,43141 \cdot 10^{-7}$	14 metros

Tabla 4.26: Valores del retardo medio y varianza del retardo por orden ascendente para entorno ofimático y modo *managed*.

probabilidad de error de paquete media	Distancia	Caudal medio	Distancia
0,18909563	19 metros	3,31706736 Mbps.	19 metros
0,19739223	9 metros	3,29401528 Mbps.	9 metros
0,20002058	3 metros	3,28640797 Mbps.	3 metros
0,20252924	0 metros	3,27912679 Mbps.	0 metros
0,20946237	6 metros	3,2620527 Mbps.	6 metros
0,41642881	14 metros	2,78795204 Mbps.	14 metros

Tabla 4.27: Valores de la probabilidad de error de paquete media y caudal medio ordenados de mejor caso a peor caso para entorno ofimático y modo *managed*.

En este caso también se detecta que el incremento de la distancia no tiene efectos perjudiciales para las comunicaciones inalámbricas 802.11b. Sin embargo, si se observa el orden de los cuadros 4.26 y 4.27 en cuanto a retardo medio, caudal medio y probabilidad de error de paquete media se observa que este es el mismo, por lo que, para esta configuración las condiciones para cada caso se degradan en el mismo orden. Esta degradación depende de la posición relativa, ya que para los mismos casos en configuración *ad-hoc* no se ha observado ningún otro posible fenómeno interferente.

4.3. Entorno industrial

Este punto es la principal motivación de este proyecto fin de carrera. Los resultados muestran la influencia de entornos hostiles en las redes inalámbricas y así se podrá obtener una visión realista del estado actual de la tecnología a la hora de satisfacer las posibles demandas para este tipo de entornos.

4.3.1. Descripción

Tras haber realizado campañas de pruebas en entornos ideales y ofimáticos es el turno de analizar el rendimiento de dispositivos inalámbricos en entornos hostiles. Este tipo de entorno debe potenciar los puntos débiles de la tecnología 802.11b, y poner de manifiesto

que posibilidades reales y que servicios son factibles. El tipo de entorno debe provocar los fenómenos físicos de distorsión de señal y debe incluir factores externos que introduzcan interferencias en el enlace. Un entorno que reúna todas estas condiciones es el que se eligió para el desarrollo de esta campaña de medidas. Como se observa en la figura 4.46 la industria manufactura acero y otros metales, realizando vigas estructurales metálicas para la construcción. La gran cantidad de acero genera una muy alta atenuación (tabla (3.2))y distorsiona la señal mediante fenómenos como la propagación multicamino.



Figura 4.46: Vista general de estructuras Mar Menor realizada desde la oficina.

La empresa Estructuras Mar Menor cuenta con tres aparatos fijos de soldadura metálica y cinco móviles. Posee herramientas especializadas para el manejo de estructuras metálicas como son herramientas de oxicorte, dobladoras, cortadoras, pistolas de pintura, puentes grúa o compresores entre otros. Estas herramientas, en distinta medida, generan multitud de interferencias en la banda de funcionamiento 802.11b. Por lo tanto, el entorno es ideal para realizar el estudio sobre el comportamiento de redes WiFi bajo condiciones adversas.



Figura 4.47: Trabajador realizando soldadura durante las medidas.

Es necesario destacar que la duración de cada tarea no es igual para todas las medidas, es decir, existen medidas donde el proceso de soldadura estuvo más presente que en otras, o el proceso de pintura, etc. Por ello se tendrá especial cuidado en describir qué procesos y en qué medida se dieron para cada prueba con el objeto de conseguir un acercamiento mayor a la realidad.

4.3.2. Resultados

La toma de medidas tuvo lugar en Estructuras Metálicas Mar Menor, empresa sita en el municipio de San Javier, Murcia. Esta empresa posee una planta de dimensiones 48 metros de largo por 16 metros de ancho en la zona de trabajo. Cuenta con una pequeña oficina donde trabajan los ingenieros desarrollando planos y cálculos. En la actualidad la oficina dispone de dos puestos de trabajo, con ordenadores personales, sillas, mesas, armarios, papeles, carpetas y en general cualquier material típico de una oficina. Dispone también de una red inalámbrica en modo *managed* para compartir el acceso a Internet y a recursos compartidos como impresora, escáner y fax.

La campaña de medidas tuvo lugar el día 30 de junio de 2005 desde las 10:00 hasta las 13:30 horas. Las distancias elegidas para medir no se corresponden con las de las otras pruebas. Esto es debido a que esta prueba tuvo que ser la última en realizarse ya que hasta ese día los trabajadores de la empresa estaban realizando sus tareas a pie de obra. Además, para no interrumpir el desarrollo normal de su trabajo hubo que buscar, junto con el ingeniero jefe de la empresa, los lugares ideales para colocar el dispositivo medidor sin que se interrumpiera el trabajo normal de sus operarios. De todas maneras esto no es impedimento para interpretar el desempeño obtenido, ya que como se ha visto

en las campañas anteriores la distancia no es un factor influyente en la calidad de la red, aunque si lo es la posición.

4.3.2.1. Sin distancia entre los dispositivos.

La primera prueba tuvo lugar en las oficinas de la empresa. En la figura 4.48 se tiene una instantánea del momento de la toma de medidas. Para todo el desarrollo de campaña el dispositivo medidor estuvo en la oficina, mientras que el dispositivo receptor iba cambiando de lugar dentro de la zona de trabajo.



Figura 4.48: Disposición de los dispositivos en la oficina de estructuras Mar Menor.

Se tuvo especial cuidado en que siempre hubiera visión directa entre los dispositivos, salvo la pérdida lógica debida al trabajo ordinario desarrollado en el entorno industrial. A continuación se muestran los resultados para la primera prueba.

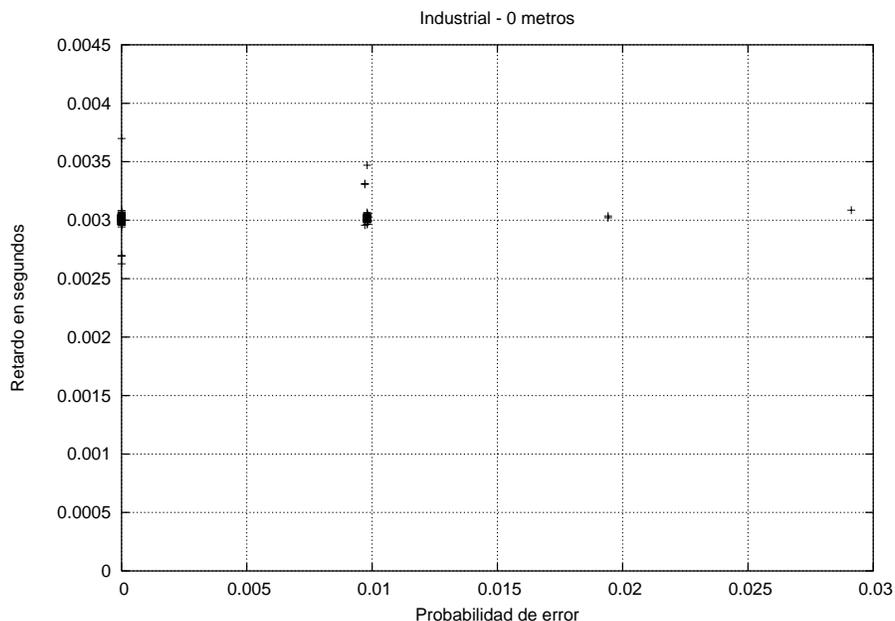


Figura 4.49: Vista ampliada de resultados en entorno industrial y sin separación.

Durante esta primera prueba el trabajo realizado por los operarios se limitó al uso de herramientas manuales como martillos y pistolas de pintura. Además, coincidió con el descanso de éstos, dejando sus puestos de trabajo. Los resultados muestran que el comportamiento es similar a los entornos libre y ofimático vistos anteriormente.

Estadístico	Valor
Retardo medio	3,0119 ms.
Varianza del retardo	$5,85481 \cdot 10^{-10}$
probabilidad de error de paquete media	0,00193329
<i>Throughput</i> medio	3,9487983 Mbps.

Tabla 4.28: Valores medios para entorno industrial y sin distancia entre dispositivos.

Así pues, dentro de la oficina los efectos que pueden degradar la comunicación no se dieron en toda su magnitud, y esto hace que los resultados sean los normales.

4.3.2.2. Distancia de 4 metros entre dispositivos.

En la figura 4.50 se muestra la posición del dispositivo receptor. En esta ocasión no existe mucho material reflectante entre los dispositivos, aunque los trabajadores comenzaron a trabajar moviendo estructuras con los puentes grúa y cortando vigas. También hubo momentos en que se realizó soldaduras, aunque fueron escasos.



Figura 4.50: Detalle del dispositivo medidor en la prueba de 4 metros.

Como se comentó antes se cuidó la visión directa entre dispositivos puesto que la oficina cuenta con una ventana que permite la visión directa con la zona de trabajo. Ésta estuvo abierta para realizar las pruebas, de tal manera que los dispositivos contaban con visión directa y las interferencias propias del entorno industrial, que se exponen a continuación en la siguiente gráfica.

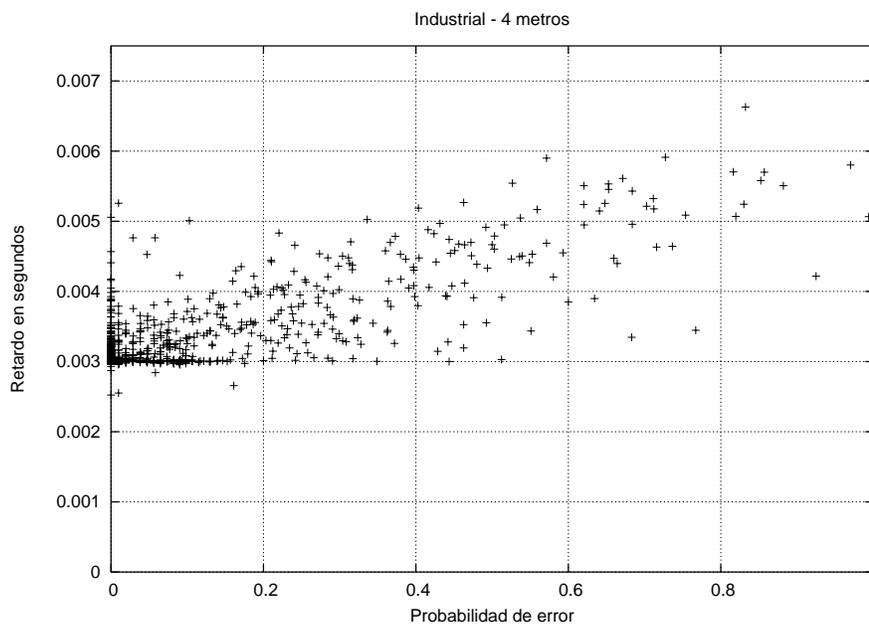


Figura 4.51: Resultados en entorno industrial y distancia 4 metros.

Los resultados muestran una mayor dispersión de las muestras, y un aumento considerable de la probabilidad de error de paquete y el retardo. En la siguiente figura se muestra la zona ampliada para su posterior estudio y análisis.

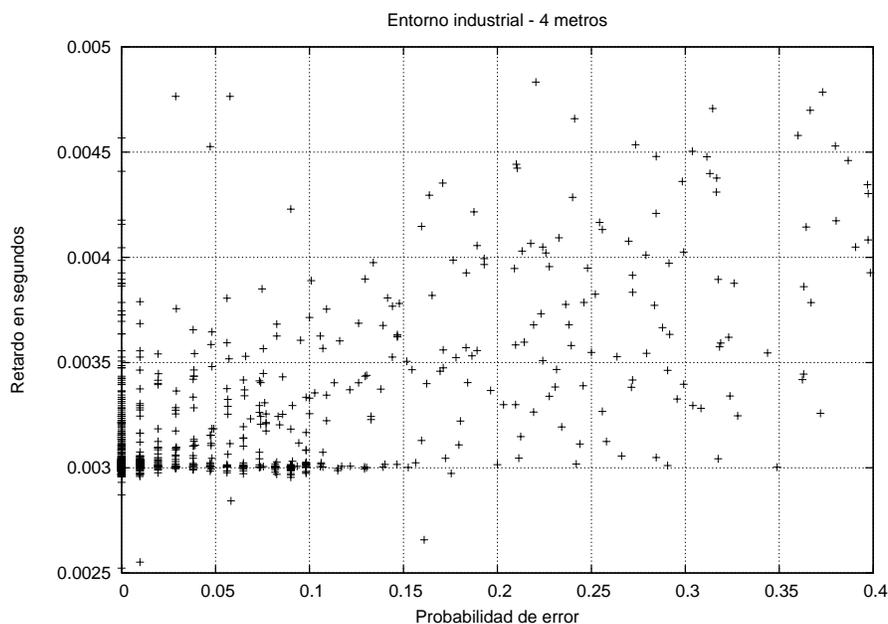


Figura 4.52: Vista ampliada de resultados en entorno industrial y distancia 4 metros.

De nuevo se observa el efecto de cuantificación sobre la probabilidad de error de paquete. Además, para probabilidad de error de paquete cero el intervalo de retardo es mayor que en los resultados donde se obtuvieron interferencias. Es curioso observar que las probabilidades de error cuantificadas se dan para valores de retardo pequeño, del orden de 3 milisegundos. Esto pudiera ser debido a que, si durante el proceso normal de envío de un paquete necesita más tiempo es más susceptible de recibir interferencias y ruido del exterior, con lo que los errores dejan de estar cuantificados a un valor constante. En el figura 4.51, la cual no se encuentra escalada, se observa la gran dispersión de muestras y la gran variedad de puntos que se obtienen. La siguiente gráfica muestra la probabilidad de error de paquete en función del orden obtenido. Esta gráfica nos ayuda a detectar el origen y la naturaleza de los errores.

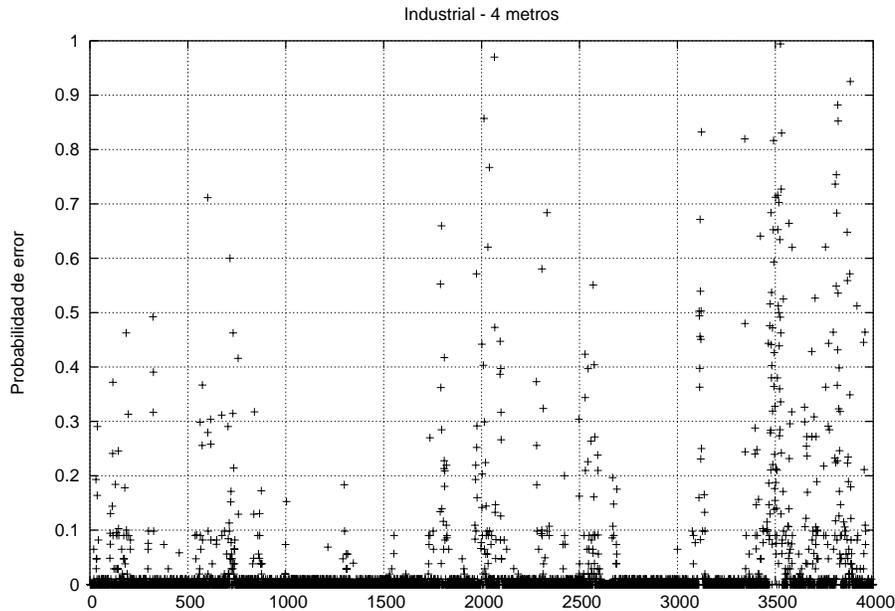


Figura 4.53: Resultados en entorno industrial y distancia 4 metros.

En la figura 4.53 se puede deducir que los mayores aumentos en la probabilidad de error de paquete tienen lugar en momentos puntuales, pasando de probabilidades de error cercanas o iguales a cero a probabilidades de error cercanas a la unidad. Esto implica que las mayores interferencias fueron producidas por procesos temporales como pudieran ser el uso del puente grúa, la máquina de soldar o la máquina de cortar. Los efectos producidos por la propagación multicamino no parecen ser muy acusados.

Estadístico	Valor
Retardo medio	3,09227 ms.
Varianza del retardo	$1,03819 \cdot 10^{-7}$
probabilidad de error de paquete media	0,02762081
<i>Throughput</i> medio	3,87302324 Mbps.

Tabla 4.29: Valores medios para entorno industrial y 4 metros de distancia entre dispositivos.

Para resumir cada prueba se ofrece la tabla de valores medios. Ésta nos indica que el retardo medio ha aumentado ligeramente, la varianza del retardo ha aumentado en gran medida como se pudo apreciar en la figura 4.51, la probabilidad de error de paquete se ha multiplicado por 14, y el *throughput* se mantiene casi invariable. En resumen esta prueba muestra como los elementos pasivos y activos empiezan a atenuar el rendimiento del enlace, sin embargo el funcionamiento en líneas generales ha variado muy poco y la red sigue ofreciendo unos resultados aceptables.

4.3.2.3. Distancia de 8 metros entre dispositivos.

En la figura 4.54 se puede ver la situación del dispositivo medidor para esta prueba. Como se observa está rodeado de vigas de acero, con lo que las interferencias deben aumentar respecto al caso anterior.



Figura 4.54: Disposición del dispositivo medidor en la prueba de 8 metros.

Durante el desarrollo de esta prueba se hizo necesario retirar el dispositivo del lugar original y sujetarlo con la mano a una distancia de medio metro para que los trabajadores pudiesen colocar unas vigas en ese lugar, es decir, un uso real en un entorno industrial. La prueba se ejecutó de todas maneras, y dió los siguientes resultados.

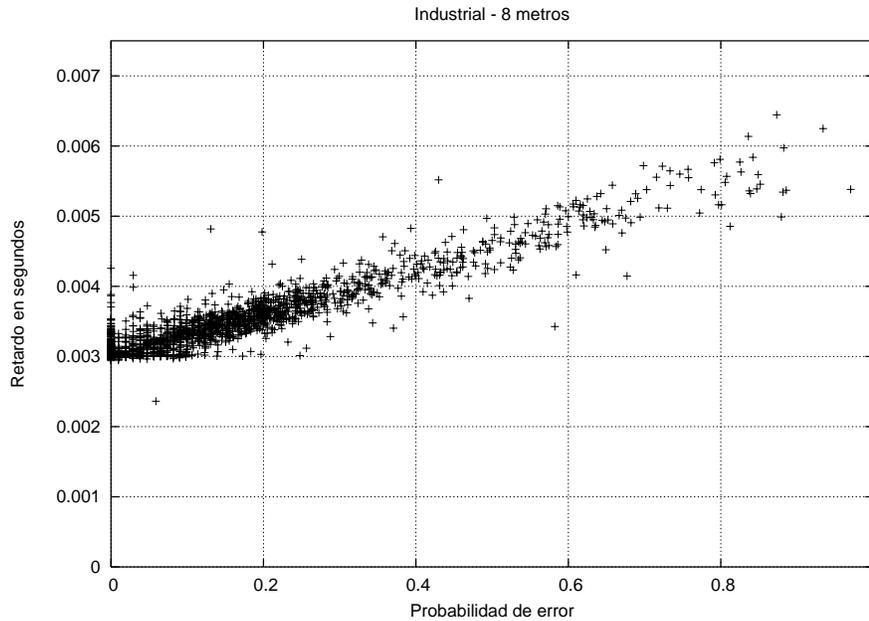


Figura 4.55: Resultados en entorno industrial y distancia 8 metros.

Al igual que el caso anterior las muestras se encuentran más distribuidas que en los entornos libre y ofimático, pero con la diferencia respecto al caso anterior de que ahora el número de ocurrencias de muestras distribuidas es mayor. Una ampliación sobre la zona donde existe más concentración de muestras nos ayuda en el posterior análisis.

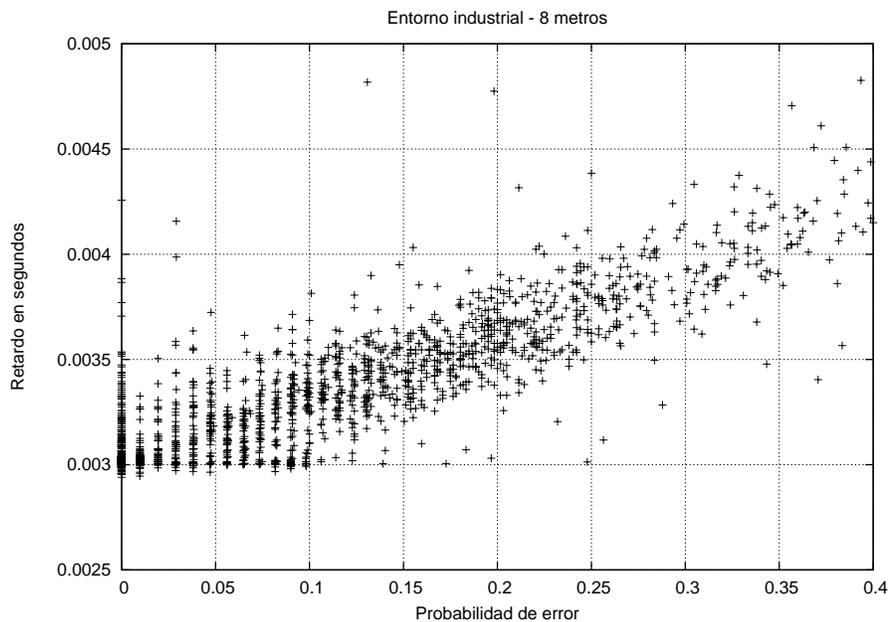


Figura 4.56: Vista ampliada de resultados en entorno industrial y distancia 8 metros.

En esta gráfica se aprecia que la cuantificación en la probabilidad de error de paquete sigue manifestándose en la forma que lo hacía anteriormente. El intervalo de retardo, al

igual que ocurría en el caso anterior, es mayor que en los entornos libre y ofimático. A partir de la una probabilidad de error de paquete en torno a 0,15 es cuando empieza a manifestarse otro tipo de error distinto al de desbordamiento del buffer. También se aprecia que, después de este valor, conforme aumenta la probabilidad de error de paquete aumenta el retardo.

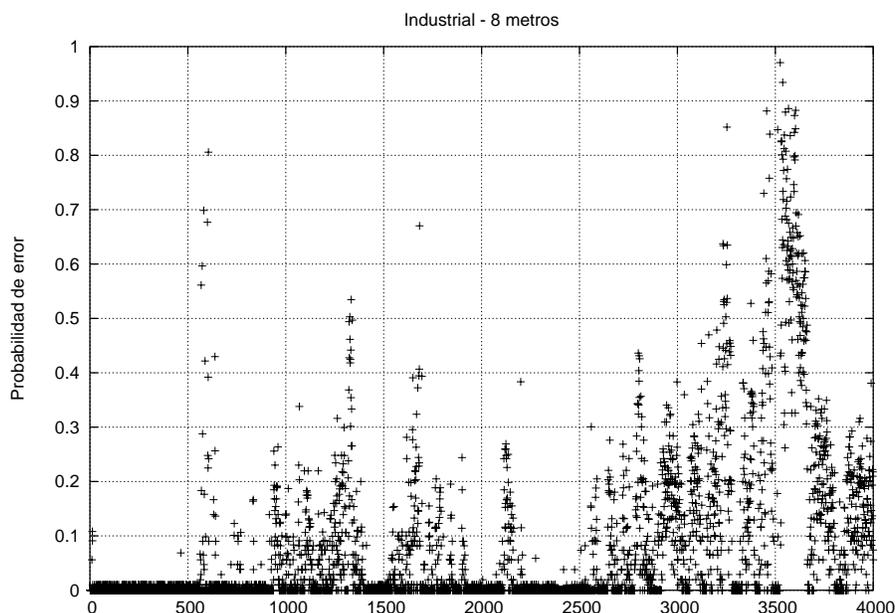


Figura 4.57: Resultados en entorno industrial y distancia 8 metros.

Esta gráfica muestra que la mayoría de los errores, al igual que ocurría en el caso anterior, tienen su origen en efectos dinámicos. De hecho, se produjo un mayor ritmo de trabajo tanto de soldadura como de movimiento durante el desarrollo de esta prueba. Como se observa en la gráfica, al principio únicamente existen errores debidos a elementos estáticos que son subsanados por los mecanismos 802.11b, y conforme se avanza se observan varios picos en la probabilidad de error de paquete, que coinciden con los momentos en los que se desarrollaban trabajos con máquina que producen grandes interferencias.

Estadístico	Valor
Retardo medio	3,24611 ms.
Varianza del retardo	$2,11289 \cdot 10^{-7}$
probabilidad de error de paquete media	0,07733829
<i>Throughput</i> medio	3,71918865 Mbps.

Tabla 4.30: Valores medios para entorno industrial y 8 metros de distancia entre dispositivos.

Los valores medios apuntalan la tendencia que se está produciendo en el proceso de medidas. Se produce un aumento mayor en el retardo medio, la dispersión aumenta el doble que la del caso anterior, al igual que la probabilidad de error de paquete y el caudal disminuye 0,1 Mbps. De momento, parece lógico pensar que la distancia en entornos

industriales está teniendo efectos negativos sobre la calidad del enlace, aunque no es el único factor en esta degradación de prestaciones.

4.3.2.4. Distancia de 16 metros entre dispositivos.

Como se aprecia en la figura 4.35, el dispositivo medidor en esta prueba estuvo encima de una mesa, sin duda, el lugar y la prueba más segura que se realizó, sin riesgo físico para el que escribe.



Figura 4.58: Disposición del dispositivo medidor en la prueba de 16 metros.

Durante esta prueba y la anterior, los procesos de soldadura y corte alcanzaron su punto máximo de funcionamiento de toda la campaña de medidas. Sin duda, fue la prueba más castigada por estos fenómenos, y así se muestra en la gráfica de resultados.



Figura 4.59: Trabajador realizando soldadura en el equipo a la izquierda del dispositivo medidor.

El punto mostrado por la figura 4.58 se encuentra aproximadamente en el centro de los aparatos de soldadura fijos. Durante esta prueba estuvieron trabajando simultáneamente los trabajadores con los tres equipos de soldadura anteriores. La figura 4.47 muestra el equipo que se encontraba a la derecha del dispositivo, y en la figura 4.59 se observa el equipo que se encontraba a la izquierda. Detrás de éste último se encontraba el tercero.

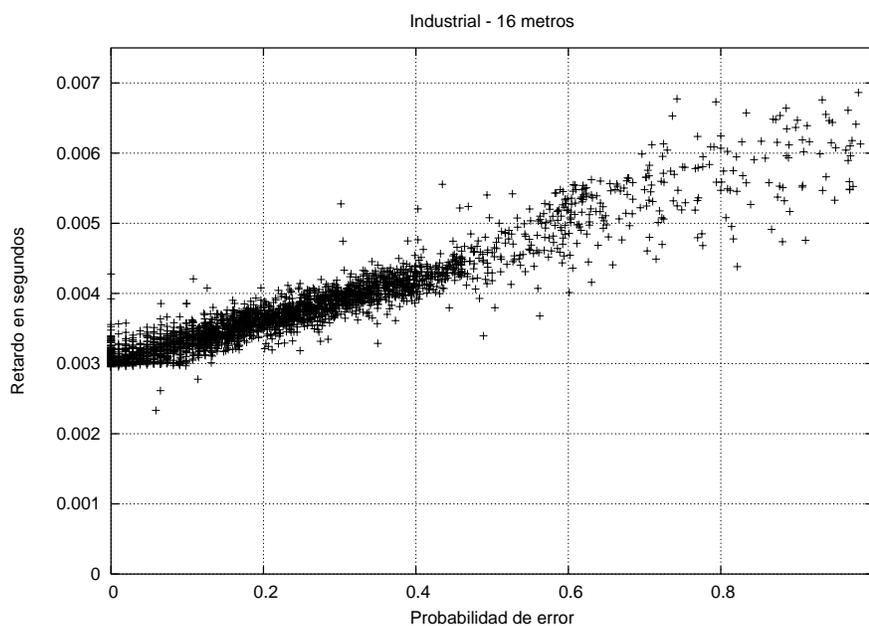


Figura 4.60: Resultados en entorno industrial y distancia 16 metros.

La mayor concentración de muestras se encuentra dispersa en el intervalo de 0 a 0,5 para la probabilidad de error de paquete y de 3 a 5 milisegundos para el retardo. Se observa como el efecto de la soldadura y de la distancia comienzan a tomar un valor significativo. Ampliada la gráfica se profundiza en el análisis.

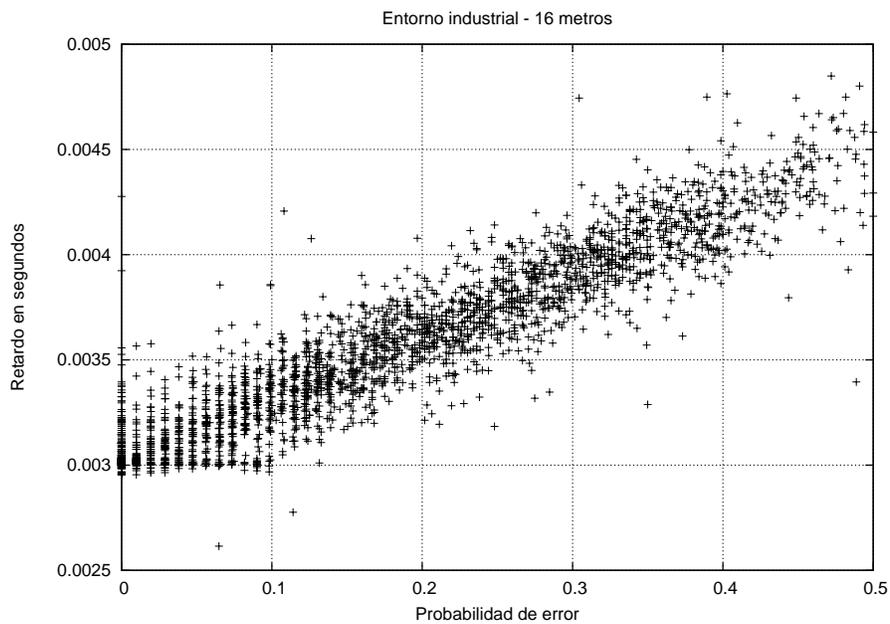


Figura 4.61: Vista ampliada de resultados en entorno industrial y distancia 16 metros.

En esta gráfica se observa para valores pequeños de la probabilidad de error de paquete el efecto del desbordamiento de buffer. Para valores altos se observa la misma tónica que en casos anteriores. Sin embargo, este caso muestra un aumento de los máximos alcanzados tanto para la probabilidad de error de paquete como para el retardo.

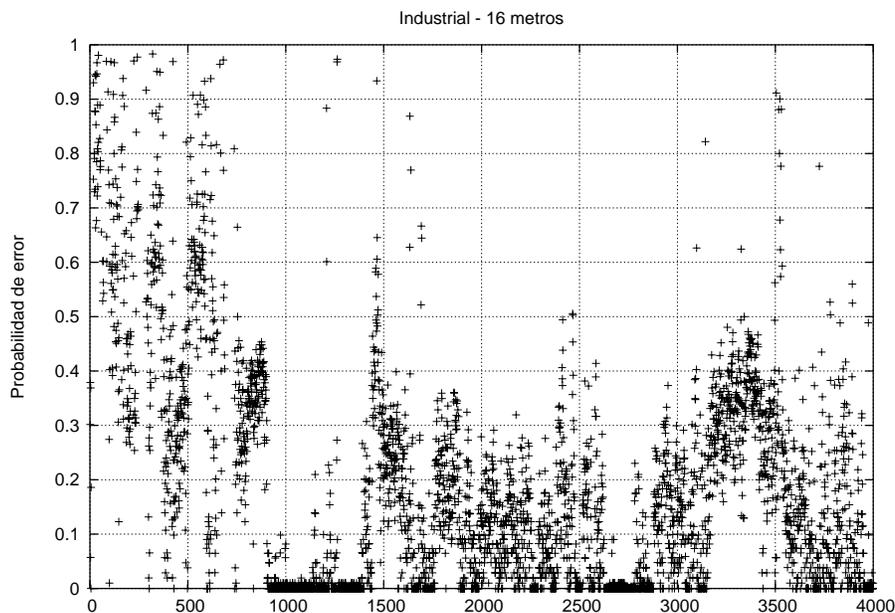


Figura 4.62: Resultados en entorno industrial y distancia 16 metros.

Los procesos de soldadura y corte tienen su reflejo en la gráfica anterior, en la que durante todo el tiempo que se llevó a cabo hubo elementos generadores de interferencias. Se puede observar los distintos máximos para cada pico de la gráfica, lo que supone más o menos efectos interferentes que han actuado al mismo tiempo.

Estadístico	Valor
Retardo medio	3,58067 ms.
Varianza del retardo	$4,5733 \cdot 10^{-7}$
probabilidad de error de paquete media	0,1828282
<i>Throughput</i> medio	3,42100727 Mbps.

Tabla 4.31: Valores medios para entorno industrial y 16 metros de distancia entre dispositivos.

El retardo medio ha vuelto a aumentar, y la varianza de éste ha doblado el valor anterior. La probabilidad de error de paquete media ha superado el doble de la anterior y el *throughput* ha disminuido 0,3 Mbps. En la siguiente prueba se confirma que la distancia, como parece, tiene efectos negativos en entornos industriales sobre el rendimiento del enlace inalámbrico.

4.3.2.5. Distancia de 32 metros entre dispositivos.

Debido a la imposibilidad de contar con una fuente de alimentación y del peligro inminente que corría el dispositivo medidor al estar colocado en la zona de influencia de la pintura de las vigas se optó por reducir el número de muestras para el experimento a la mitad. Además, se protegió el dispositivo con papel higiénico de tal manera que permitiera

la visión directa con el dispositivo emisor y ofreciera protección a la pintura que pudiera dañar el dispositivo permanentemente.

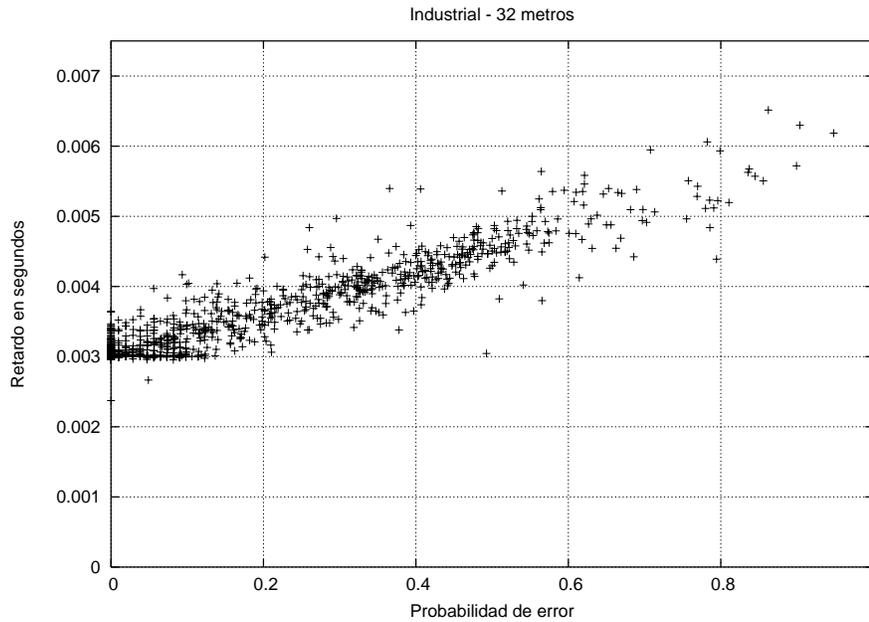


Figura 4.63: Resultados en entorno industrial y distancia 32 metros.

A pesar de haber obtenido menos muestras se puede comprobar que los máximos de ambos ejes han vuelto a aumentar, aunque se da menos concentración en las muestras alejadas. Para comprobar lo anterior se ha ampliado la zona donde se dan los resultados.

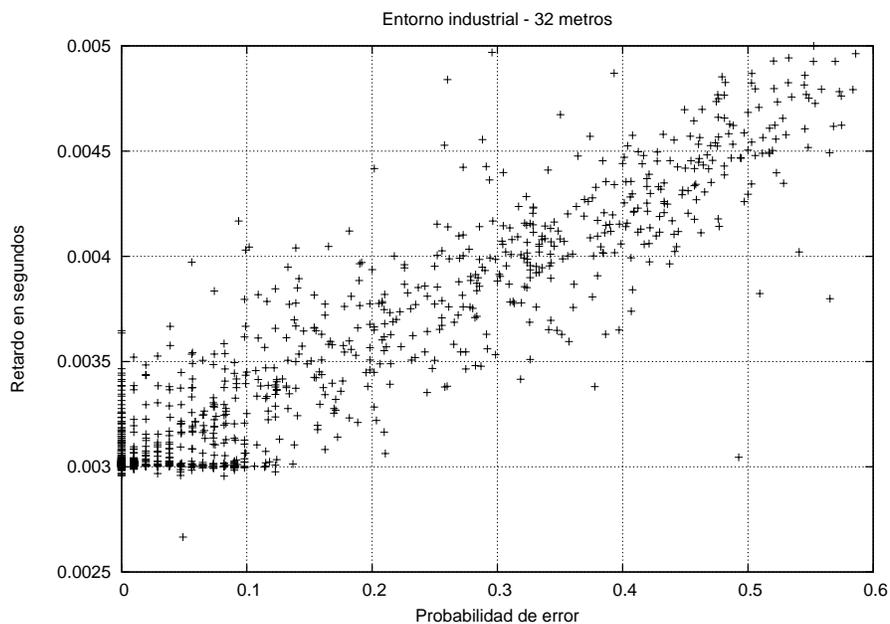


Figura 4.64: Vista ampliada de resultados en entorno industrial y distancia 32 metros.

Se comprueba que para la probabilidad de error de paquete cero existe un gran intervalo en el retardo. Para las probabilidades de error cuantificadas se dan menos casos en el intervalo de retardo anterior, para el resto de probabilidades de error el retardo aumenta conforme aumenta éste. La siguiente gráfica muestra la probabilidad de error de paquete en función del orden en que se ha dado durante la prueba.

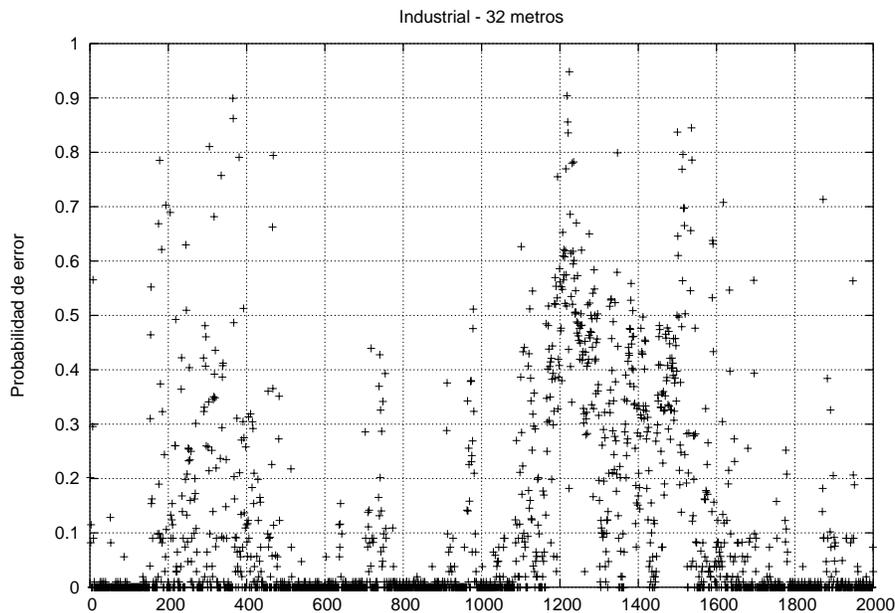


Figura 4.65: Resultados en entorno industrial y distancia 32 metros.

Como puede observarse existen picos dentro de la gráfica aunque los valores están más difuminados que en los casos anteriores. Esto implica que la actividad de los trabajadores con las máquinas que generan interferencias fue menor, y que conforme se aumenta la distancia los efectos de distorsión de señal causados por el acero y otros elementos presentes se muestra en mayor magnitud.

Estadístico	Valor
Retardo medio	3,3398 ms.
Varianza del retardo	$3,40365 \cdot 10^{-7}$
probabilidad de error de paquete media	0,10770799
<i>Throughput</i> medio	3,64606387 Mbps.

Tabla 4.32: Valores medios para entorno industrial y 32 metros de distancia entre dispositivos.

Los valores medios son mejores de cara a mejorar el rendimiento. Esto puede deberse a que se produjeron menos operaciones de soldadura y corte, que se corresponden con las operaciones más perjudiciales en el rendimiento final. Sin embargo, la gran cantidad de acero entre los dos dispositivos medidores hace que el rendimiento sea peor que en el caso en que había 8 metros de distancia.

4.3.2.6. Distancia de 48 metros entre dispositivos.

Esta última prueba fue realizada desde el exterior de la nave industrial. El objetivo es comprobar el efecto total de todos los elementos pasivos y activos en el enlace inalámbrico. Como se comentó anteriormente las muestras tomadas fueron la mitad que en el resto de experimentos.



Figura 4.66: Detalles sobre la longitud total y la cantidad de material almacenado.

Los resultados obtenidos sirven para concluir las afirmaciones sobre el comportamiento de este tipo de entornos sobre redes 802.11b.

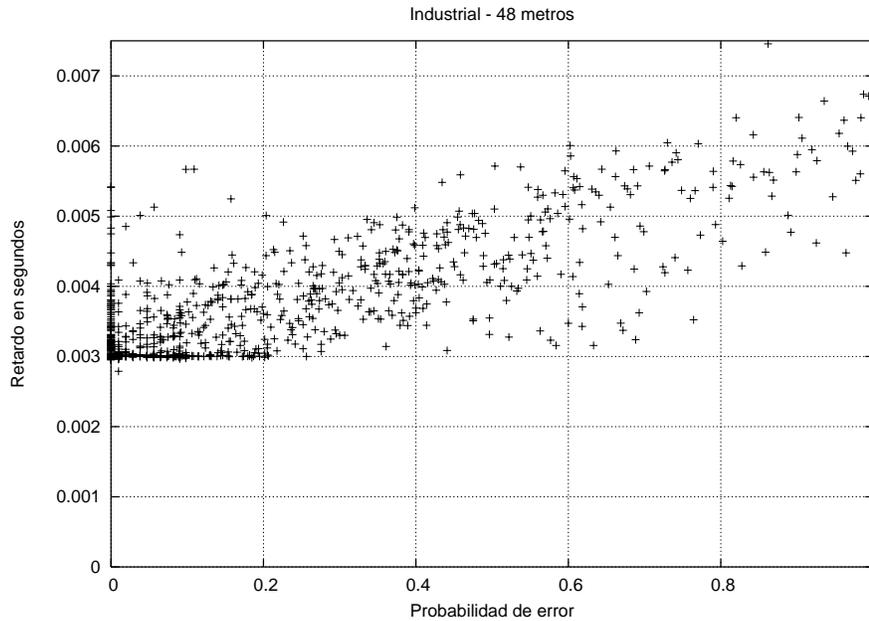


Figura 4.67: Resultados en entorno industrial y distancia 48 metros.

La similitud con el caso anterior es evidente, y de nuevo los máximos son superados. La distribución de las muestras es más acusada en esta prueba.

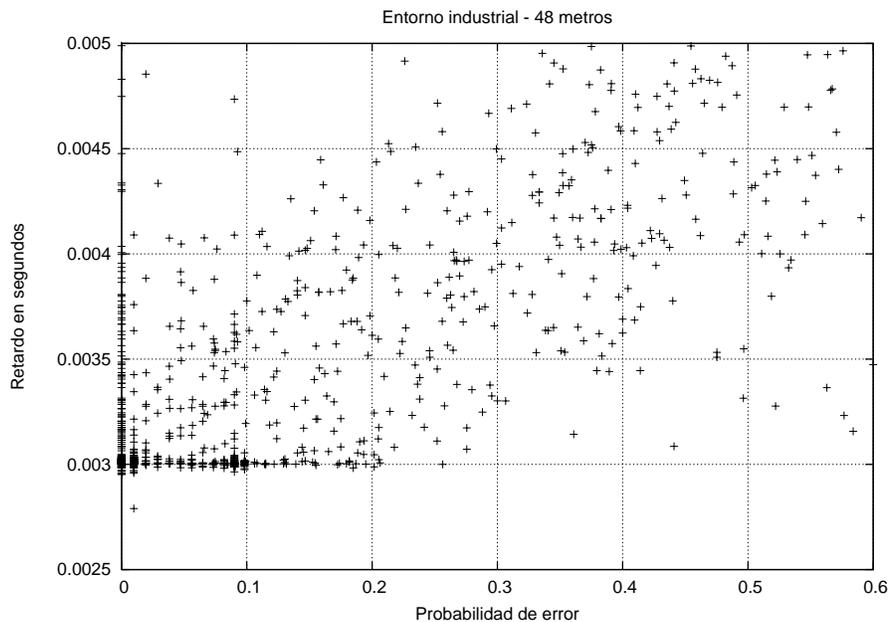


Figura 4.68: Vista ampliada de resultados en entorno industrial y distancia 48 metros.

Para probabilidad de error de paquete cero el intervalo del retardo vuelve a aumentar. Los valores de probabilidad de error de paquete cuantificados tienen la mayoría de sus muestras para retardos pequeños. El resto de valores está muy difuminado, confirmando la regla de que a mayor probabilidad de error de paquete se tiene un mayor retardo.

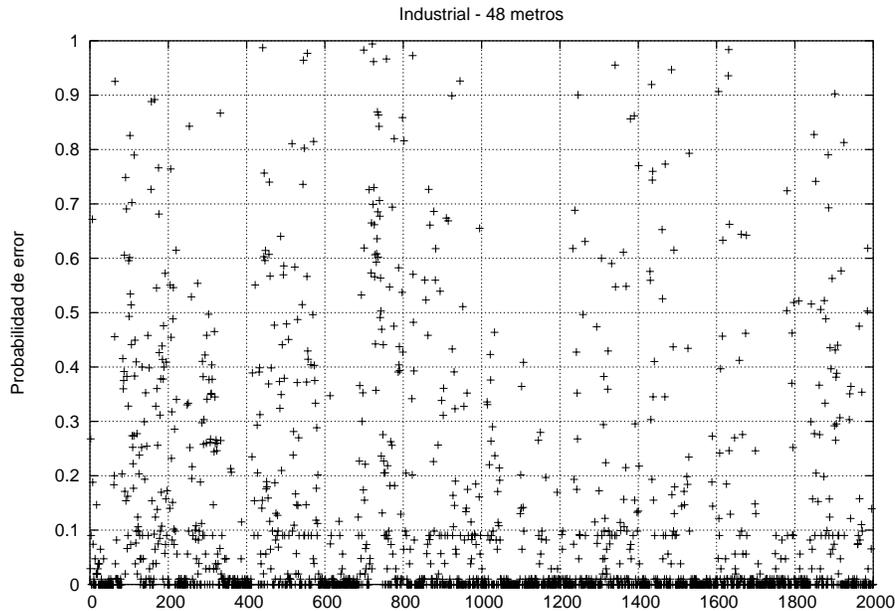


Figura 4.69: Resultados en entorno industrial y distancia 48 metros.

Los picos que antes se apreciaban están mucho más difuminados en esta gráfica. Los trabajadores apenas soldaban y cortaban. Su trabajo se resumía en pintar y lijar las vigas. Se obtienen probabilidades de error altas pero bastante difuminadas respecto a las anteriores, lo que supone que el origen mayoritario de los errores es a causa de la distorsión de señal producida por los metales.

Estadístico	Valor
Retardo medio	3,36119 ms.
Varianza del retardo	$4,72249 \cdot 10^{-7}$
probabilidad de error de paquete media	0,10989597
<i>Throughput</i> medio	3,64590214 Mbps.

Tabla 4.33: Valores medios para entorno industrial y 48 metros de distancia entre dispositivos.

Como se puede apreciar la varianza del retardo ha aumentado, sin embargo el resto de valores disminuye sensiblemente. Se puede afirmar que, en entornos industriales existen elementos activos que provocan interferencias puntuales y que son las más perjudiciales. Los elementos pasivos degradan la calidad de la señal conforme aumenta su presencia en el enlace de los dispositivos inalámbricos.

4.3.3. Resumen para entorno industrial

Esta sección pretende ofrecer una visión general de todos los resultados de las pruebas en el entorno industrial para facilitar el estudio profundo sobre los fenómenos que se han recogido en la toma de muestras.

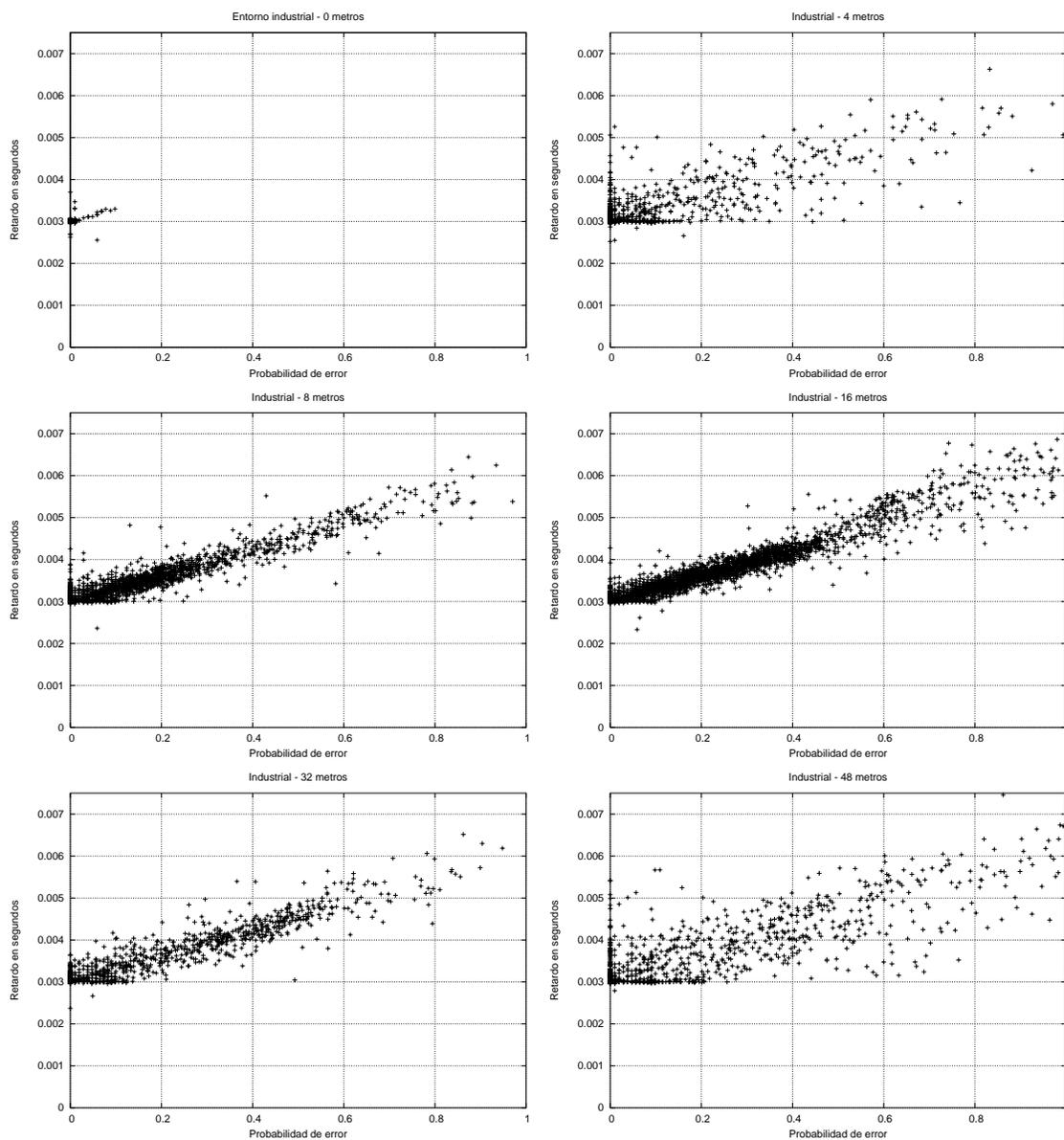


Figura 4.70: Comparativa de las gráficas probabilidad de error de paquete - retardo para todos los casos en entorno industrial.

La progresión mostrada por la figura 4.70 muestra un proceso de desplazamiento de las muestras sobre una recta con pendiente constante, y que se puede adivinar en cada una de las gráficas, salvo para el caso de distancia nula. Esta progresión supone un mayor número de muestras con mayor retardo y mayor probabilidad de error de paquete. Esta tendencia finaliza, como se puede observar en la gráfica para 48 metros, en una distribución mayor de las muestras, al contrario del resto de casos donde las muestras se encuentran en zonas del gráfico mucho más concentradas. En este entorno la distancia tiene efecto sobre el rendimiento de los dispositivos WiFi. Sin embargo la cantidad de metal, que actúa como interferente para la banda de trabajo de los dispositivos, también aumenta con la distancia. Por lo que, tras observar las campañas de medidas para los entornos libre y ofimático resulta lógico atribuir dicha degradación a la cantidad de material que se encuentra entre

los dispositivos antes que a la distancia que los separa.

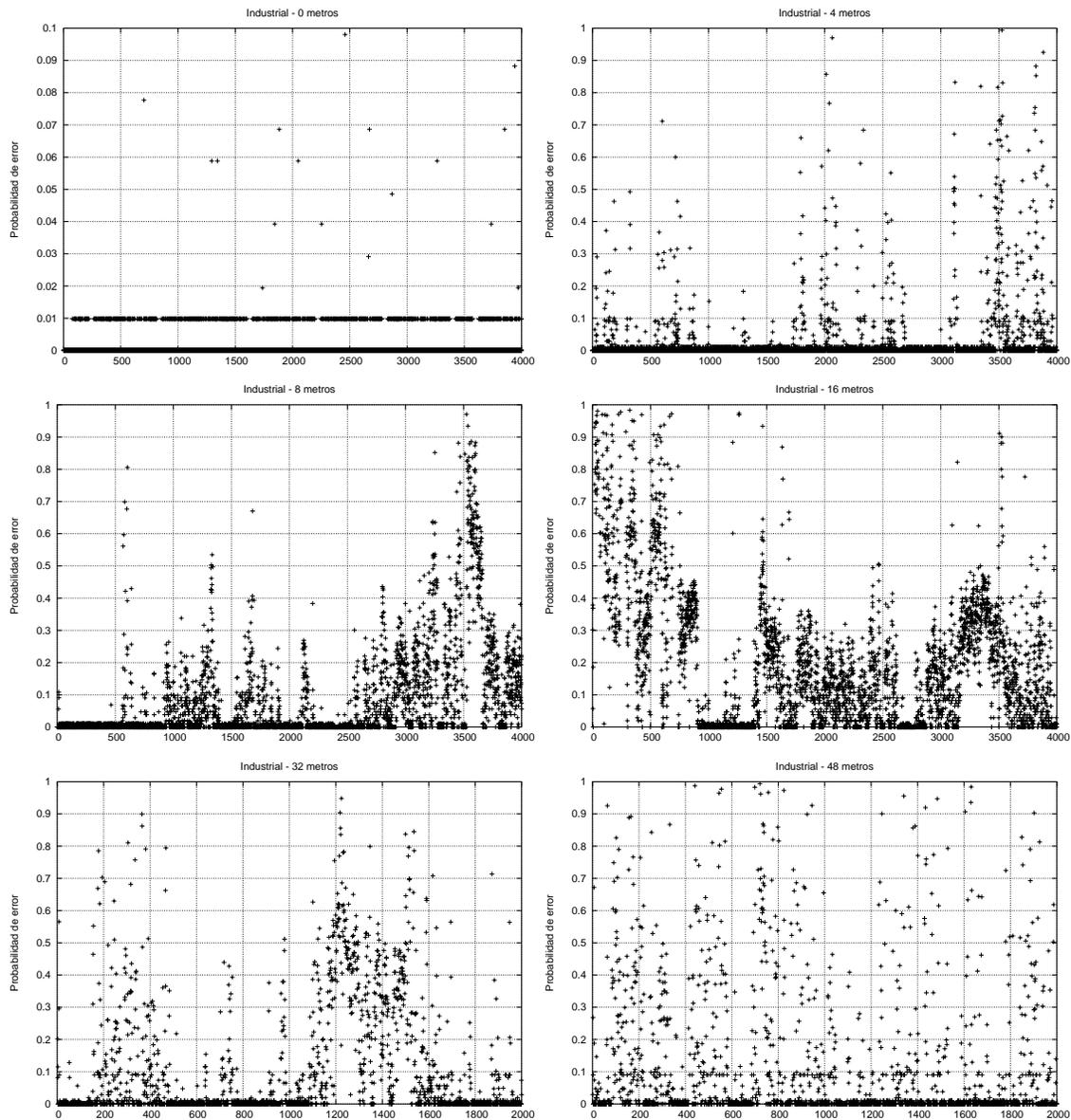


Figura 4.71: Comparativa de la distribución temporal de la probabilidad de error de paquete para todos los casos en entorno industrial.

La figura 4.71 muestra la naturaleza de los errores producidos en el tiempo. Es evidente como para los casos de 4, 8 y 16 metros los datos están más correlados y agrupados que en el resto, salvo para el caso de 0 metros. En los casos más alejados los errores producidos por los efectos pasivos son más evidentes y de mayor efecto, mientras que en los casos anteriores los picos que se producen en las gráficas están producidos por las máquinas en funcionamiento.

Retardo medio	Distancia	Varianza del retardo	Distancia
3,0119 ms.	0 metros	$5,85481 \cdot 10^{-10}$	0 metros
3,09227 ms.	4 metros	$1,03819 \cdot 10^{-7}$	4 metros
3,24611 ms.	8 metros	$2,11289 \cdot 10^{-7}$	8 metros
3,3398 ms.	32 metros	$3,40365 \cdot 10^{-7}$	32 metros
3,36119 ms.	48 metros	$4,5733 \cdot 10^{-7}$	16 metros
3,58067 ms.	16 metros	$4,72249 \cdot 10^{-7}$	48 metros

Tabla 4.34: Valores del retardo medio y varianza del retardo por orden ascendente para entorno industrial

probabilidad de error de paquete media	Distancia	Caudal medio	Distancia
0,00193329	0 metros	3,9487983 Mbps.	0 metros
0,02762081	4 metros	3,87302324 Mbps.	4 metros
0,07733829	8 metros	3,71918865 Mbps.	8 metros
0,10770799	32 metros	3,64606387 Mbps.	32 metros
0,10989597	48 metros	3,64590214 Mbps.	48 metros
0,41642881	16 metros	2,78795204 Mbps.	16 metros

Tabla 4.35: Valores de la probabilidad de error de paquete media y caudal medio ordenados de mejor caso a peor caso para entorno industrial

Al igual que en el entorno ofimático y modo *managed* el orden de las medidas se repite, incluso en la de variación del retardo. La diferencia en este caso, como se puede observar en 4.34 y 4.35 es que esta atenuación va en correspondencia con la separación de los dispositivos, excepto para el caso de 16 metros. Como se comentó anteriormente el caso de 16 metros fue el más castigado por las interferencias originadas por los equipos de trabajo, por lo que el orden apreciado corresponde con la suposición de que a mayor cantidad de metal entre los dispositivos se produce mayor probabilidad de error de paquete y retardo. En el caso de la varianza del retardo se aprecia en la figura 4.70 que en el caso de 48 metros es cuanto más dispersas están las muestras, y cuyo valor está cercano al producido en el peor caso de la campaña de medidas en el entorno industrial

4.4. Resumen para todos los entornos

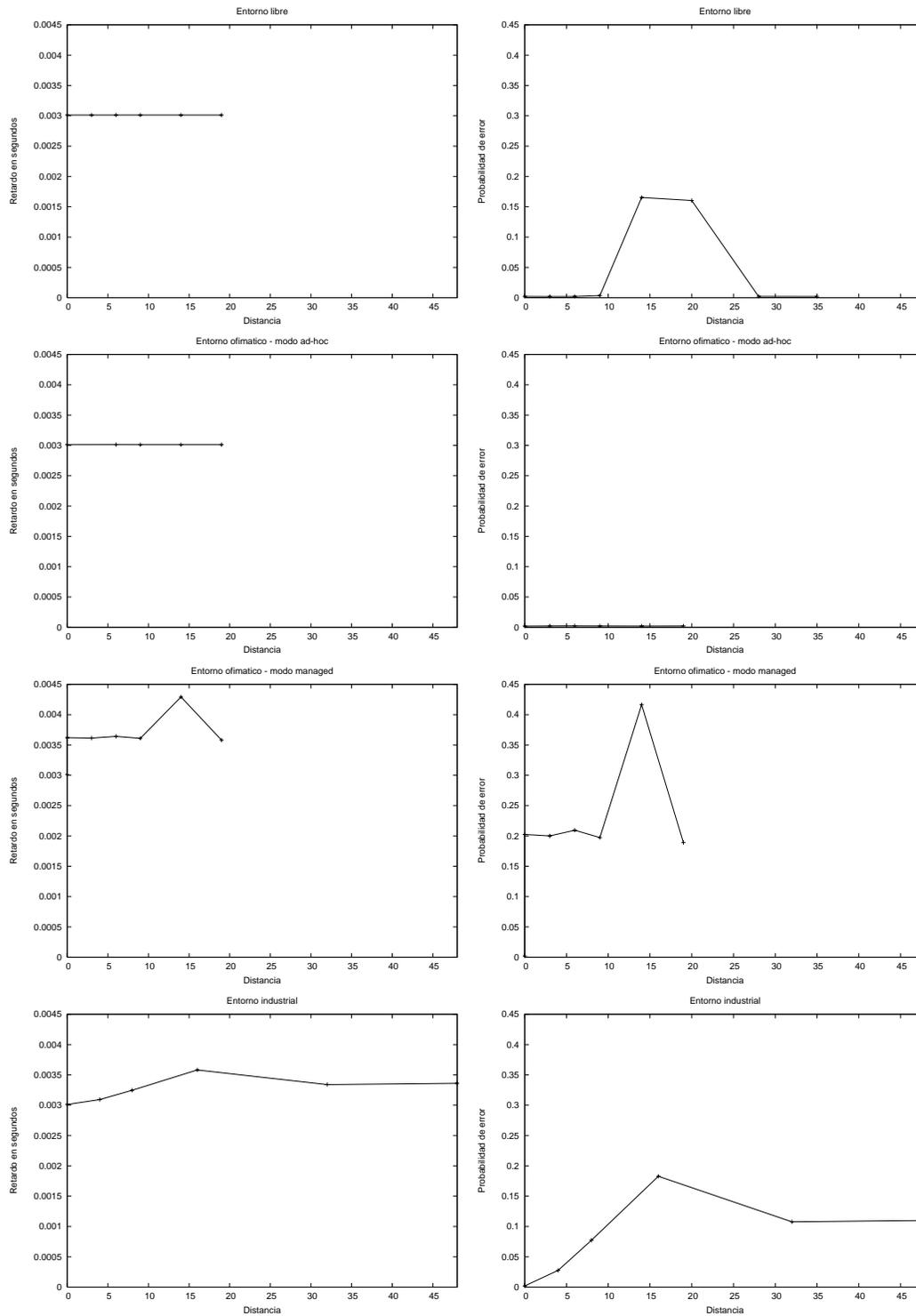


Figura 4.72: Comparativa de valores medios de retardo y probabilidad de error de paquete en función de la distancia para todos los entornos.

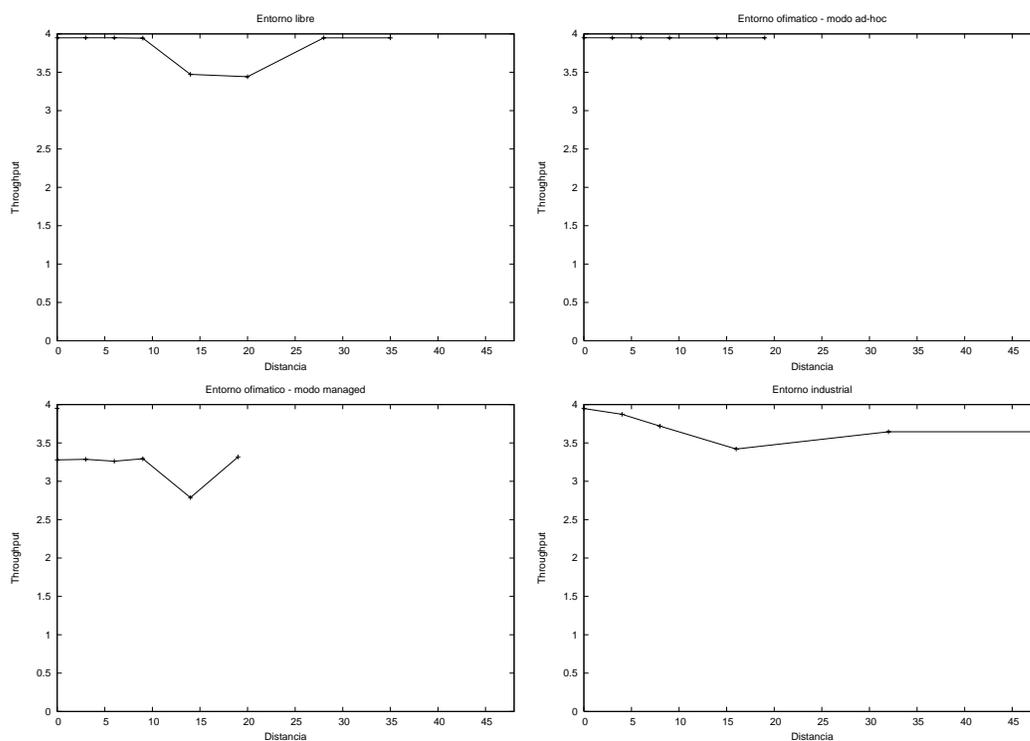


Figura 4.73: Comparativa de caudal medio en función de la distancia para todos los entornos.

Las gráficas anteriores muestran la tendencia de los valores medios para cada entorno en función de la distancia. Se reafirma el hecho de la dependencia del rendimiento del enlace inalámbrico frente a la distancia únicamente para el entorno industrial. El resto muestra las excelentes condiciones en entorno ofimático y modo *ad-hoc* y para el entorno libre en algunas distancias.

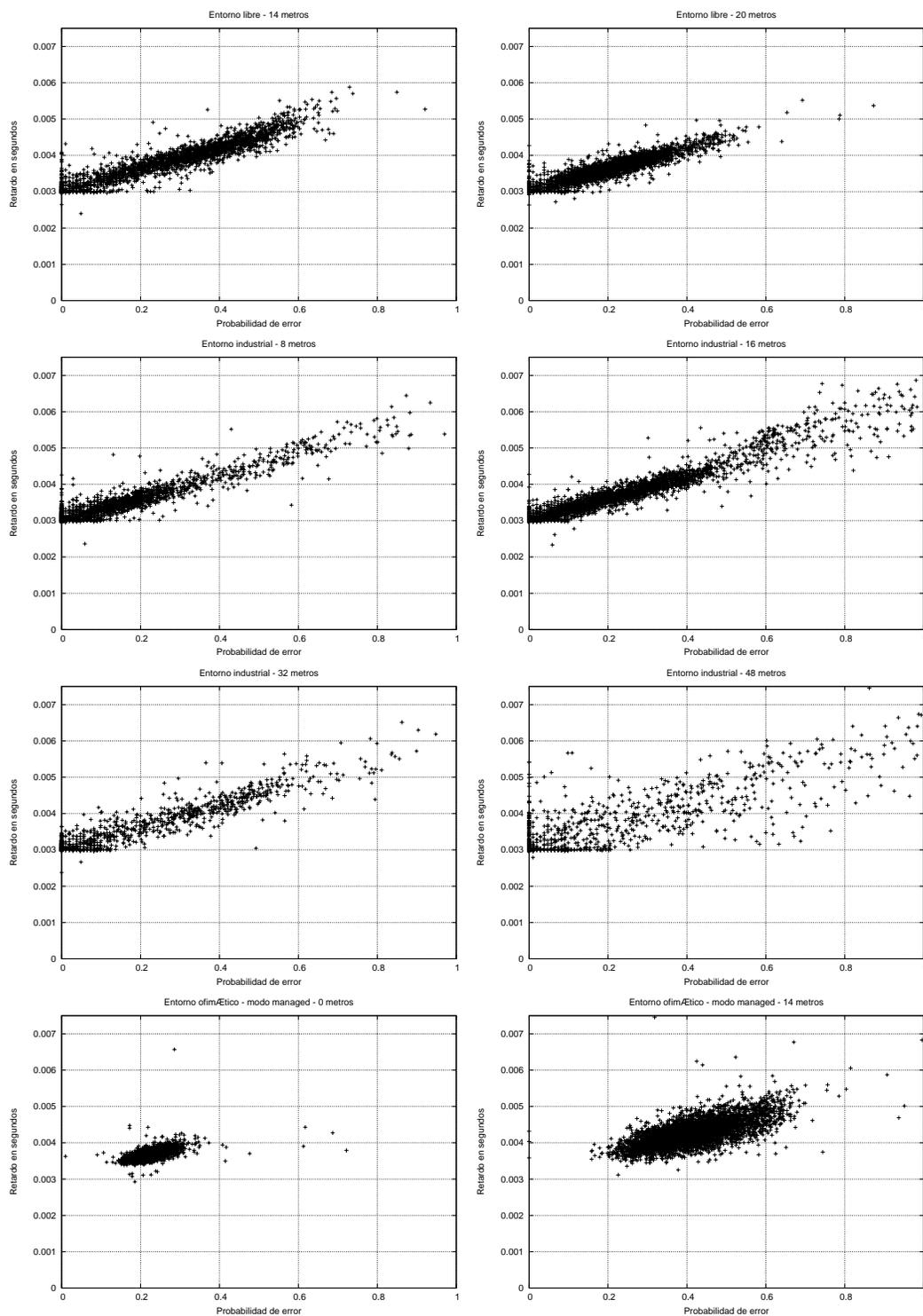


Figura 4.74: Comparativa de las gráficas probabilidad de error de paquete - retardo para los peores casos en entorno todos los entornos.

Tras haber analizado cada escenario por separado, a continuación se resumen los casos más desfavorables de toda la campaña de medidas para poder obtener resultados sobre el comportamiento general de redes inalámbricas. La figura 4.74 muestra los casos con

peor rendimiento en los entornos libre, ofimático en modo *managed* e industrial. Éstos se corresponden específicamente y en el siguiente orden a: entorno libre 14 metros, entorno libre 20 metros, entorno industrial 8 metros, entorno industrial 16 metros, entorno industrial 32 metros, entorno industrial 48 metros, entorno ofimático-*managed* 6 metros y entorno ofimático-*managed* 14 metros. Las gráficas muestran la misma pendiente para para casos que se corresponden a medidas en modo *ad-hoc*. Si se observan los casos de entorno libre 14 metros y entorno industrial 16 metros se pueden deducir algunas conclusiones interesantes. En modo libre la interferencia causada está provocada por elementos estáticos mientras que en modo industrial las interferencias se originan por los elementos estáticos y elementos que generan interferencias por si solos. Los datos en la gráfica en entorno libre estan más concentrados que en el entorno industrial. Sin embargo, el área donde se concentran la mayoría de muestras en ambos casos es más extenso y alcanza peores valores en el caso libre que en el caso industrial. La principal conclusión que se obtiene es que es más influyente la posición relativa que la distancia. En el entorno industrial, a pesar de ser mayor la distancia entre los dispositivos y de encontrarse en el entorno elementos pasivos con mayor naturaleza interferente la mayoría de las muestras obtienen un mejor rendimiento que en el caso de entorno libre.

El modo *managed* es completamente distinto y por esto debe tratarse de manera independiente. Se observa que cuando se dan condiciones no favorables en el entorno la evolución de las muestras hace que se agrande el espacio posible de ocurrencias y que se desplace según la recta pendiente observada en las gráficas en modo *ad-hoc*. Los elementos pasivos interferentes tienen el efecto de escalar el espacio de las muestras y de desplazar dicho espacio según se ha observado para el modo *ad-hoc*.

Retardo medio	Distancia	Varianza del retardo	Distancia
3,24611 ms.	Industria 8 metros	$2,75844 \cdot 10^{-8}$	Managed 4 metros
3,3398 ms.	Industrial 32 metros	$1,56357 \cdot 10^{-7}$	Libre 20 metros
3,36119 ms.	Industrial 48 metros	$2,11289 \cdot 10^{-7}$	Industrial 8 metros
3,49807 ms.	Libre 20 metros	$3,40365 \cdot 10^{-7}$	Industrial 32 metros
3,51524 ms.	Libre 14 metros	$3,43141 \cdot 10^{-7}$	Managed 14 metros
3,58067 ms.	Industrial 16 metros	$3,60296 \cdot 10^{-7}$	Libre 14 metros
3,64161 ms.	Managed 6 metros	$4,5733 \cdot 10^{-7}$	Industrial 16 metros
4,29245 ms.	Managed 14 metros	$4,72249 \cdot 10^{-7}$	Industrial 48 metros

Tabla 4.36: Valores del retardo medio y varianza del retardo por orden ascendente para los peores casos obtenidos.

probabilidad de error de paquete media	Distancia	Caudal medio	Distancia
0,07733829	Industrial 8 metros	3,71918865 Mbps.	Industrial 8 metros
0,10770799	Industrial 32 metros	3,64606387 Mbps.	Industrial 32 metros
0,10989597	Industrial 48 metros	3,64590214 Mbps.	Industrial 48 metros
0,16028411	Libre 20 metros	3,47199657 Mbps.	Libre 14 metros
0,16532074	Libre 14 metros	3,44153474 Mbps.	Libre 20 metros
0,1828282	Industrial 16 metros	3,42100727 Mbps.	Industrial 16 metros
0,20946237	Managed 6 metros	3,2620527 Mbps.	Managed 6 metros
0,41642881	Managed 14 metros	2,78795204 Mbps.	Managed 14 metros

Tabla 4.37: Valores de la probabilidad de error de paquete media y caudal medio ordenados de mejor caso a peor caso para los peores casos obtenidos

Los cuadros 4.36 y 4.37 muestra la tendencia adivinada anteriormente. En el entorno industrial tiene efecto la distancia en cuanto que añade cantidad de material interferente pasivo. El entorno libre en sus casos más desfavorables ofrece peores resultados que en el entorno industrial, esto denota la importancia de la posición relativa y de la imposibilidad de establecer una ley general sobre el rendimiento en función de la posición absoluta. Los peores casos son obtenidos en modo *managed*, debido, quizá, a las limitaciones *hardware* de los dispositivos medidores.

Conclusiones y líneas futuras

En este proyecto fin de carrera el objetivo de caracterizar los fenómenos interferentes y el efecto de la distancia en entornos hostiles ha sido cumplido mediante la realización de experimentos en distintos entornos tipo y el posterior análisis de las mismas. Se ha justificado la necesidad de investigar la implantación de este tipo de redes en entornos industriales y se han marcado las pautas para dicha investigación. La planificación de la investigación y la toma de resultados experimentales ha sido la parte cubierta por este proyecto, en donde las conclusiones más relevantes se exponen a continuación.

1. Existen un gran abanico de simuladores de red, con un alto grado de aceptación y diferentes características. Para la simulación de redes inalámbricas existen trabajos realizados sobre éstos, destacando los simuladores ns-2, OPNET y NTCUns por su flexibilidad y capacidad para simular entornos bajo distintas variables.
2. Las medidas obtenidas no son independientes del *hardware* utilizado, por lo tanto no caracterizan al entorno en sí, sino al sistema formado por entorno-*hardware*. En caso de intentar simular usando como fuente los datos obtenidos se debería tener en cuenta este hecho. Dicha limitación tiene consecuencias observables en el rango de probabilidades de error cero en el entorno, puesto que los valores que se han tomado son valores constantes y relacionados entre sí.
3. La limitación energética sobre un equipo de medida conlleva implicaciones y suposiciones que quizá no sean ciertas. El hecho de medir en un entorno cerrado y amplio suponiendo que ese entorno es ideal puede llevar al error de omitir fenómenos de distorsión de señal o de otro tipo que degraden el rendimiento de las redes inalámbricas. Quizá, por esto se han obtenido valores similares en el entorno libre y el entorno ofimático.
4. Los mejores caudales fueron obtenidos en el entorno libre y en el entorno ofimático en modo *ad-hoc*. Éstos suponen un 36 % del caudal de 11 Mbps disponible según el estándar. El mejor retardo medio se ha producido también para el entorno libre y ofimático en modo *ad-hoc* siendo del orden de 3,011 ms. La media de la probabilidad de error de paquete también es mínima en estos entornos y alcanza valores

inferiores a 0,0019. Por orden el segundo entorno con mejores valores en esta variable ha sido el entorno libre con un varianza del retardo de aproximadamente el doble.

5. Los peores valores en cuanto al rendimiento de caudal, retardo y probabilidad de error de paquete se obtuvieron en el entorno ofimático en modo *managed*. A los dispositivos medidores les afecta más el modo de funcionamiento y la topología que el entorno y el nivel de ruido que exista. Los peores valores para la varianza del retardo se obtuvieron para el entorno industrial. Esto implica que se consiguen valores más dispersos de retardo debido a las fuentes interferentes, aunque el rendimiento de caudal, retardo y probabilidad de error de paquete sea mejor.
6. Se obtuvieron peores resultados en entorno libre para las distancias de 14 metros y 20 metros en cuanto a retardo, probabilidad de error de paquete y caudal que en el entorno industrial para todas las pruebas salvo para la prueba de 16 metros. Esto lleva a concluir que los efectos sobre el rendimiento del enlace inalámbrico están más relacionados con la posición relativa de los dispositivos inalámbricos que de la distancia absoluta entre ellos o que de la calidad interferente de los materiales del entorno.
7. Las distancias manejadas en este proyecto no tienen influencia sobre el rendimiento de redes inalámbricas 802.11b en los entornos libre y ofimático en modo *ad-hoc* y en modo *managed*.
8. Para el entorno industrial, las máquinas que generan un alto ruido electromagnético provocan en los enlaces inalámbricos un aumento brusco en la pérdida de paquetes mientras están funcionando. Por lo tanto, el rendimiento final depende del tiempo en que se han usado. La distorsión a causa de los materiales metálicos provoca una degradación progresiva en el rendimiento de redes inalámbricas 802.11b, por lo que a mayor distancia entre dispositivos se produce una mayor atenuación.
9. Asimismo, es de destacar el buen funcionamiento de redes inalámbricas en entornos ofimáticos dentro de plantas industriales, puesto que una de las mejores medidas en cuanto al rendimiento fue en el entorno industrial dentro de la oficina, que está adyacente y separada de un pequeño muro con cristalera de la zona de trabajo.
10. La garantía de que aplicaciones que requieran una baja probabilidad de error de paquete y una latencia pequeña como pueda ser la transmisión de voz y vídeo o aplicaciones en tiempo real funcionen adecuadamente en condiciones similares a las estudiadas en este proyecto fin de carrera dependen de un estudio *in situ*, para conocer las características de ruido e interferencias de cada entorno. Sin embargo, es fácil augurar que el rendimiento que ofrezcan no será ni óptimo, ni constante.

Todas estas conclusiones junto con el análisis detallado de los datos obtenidos visto en el capítulo 4 hacen que se propongan las siguientes líneas de actuación para conseguir los objetivos marcados y avanzar en el estudio del comportamiento y rendimiento de redes inalámbricas en entornos hostiles.

1. Para realizar una simulación independiente del *hardware* empleado para la toma de muestras se hace necesario usar otra tecnología distinta a la usada para este proyecto fin de carrera. En [10] se hace uso de un radio módem que implementa únicamente la capa física del estándar 802.11 de manera que permita libertad para implementar la capa MAC con las características de recogida de estadísticos que se desee. Otra solución más compleja es la adoptada en [36], donde se modifica el *driver* de código abierto disponible para Linux. Por último en [37] se usan interfaces de red con controladores disponibles en el mercado capaces de ofrecer más estadísticos que los comunes. En este mismo trabajo se propone la solución de contar con un sistema autónomo de análisis denominados *sniffer wireless* a nivel *hardware*.
2. Se hace necesario para una posterior simulación el estudio en profundidad de las características más relevantes de los distintos lenguajes y programas de simulación de redes. Esto permitirá una elección acertada sobre el simulador más conveniente para poder definir los distintos aspectos que caracterizan un entorno industrial. Además, permitirá definir con mayor exactitud qué estadísticos es necesario recoger en los sucesivos experimentos para caracterizar correctamente la simulación.
3. Es conveniente realizar diversas campañas de medidas variando los escenarios y la tecnología usada. Como se ha visto en este proyecto la tecnología puede llegar a ser influyente en los resultados finales. Por ello, es bueno analizar los efectos sobre el rendimiento final de la topología, el *hardware* de medida, distancias mayores que las recogidas en este proyecto, la disposición de materiales en los entornos, del número de nodos de la red, del modo de conexión, del rendimiento de otro tipo de protocolo de red sobre enlaces 802.11, de los efectos de la movilidad de los nodos, de la convivencia con otros dispositivos 802.11, de los efectos interferentes que cada material produce por separado, del uso de distintas QoS, del uso de distintos servicios, del uso de seguridad, cifrado, fragmentado, potencia transmitida, antenas, etc.
4. Existe una amplia bibliografía y estudios sobre implantación de servicios y mejora de rendimiento de redes inalámbricas bajo ciertas condiciones, pero a cambio de varias parámetros en el estándar. Esto hace romper la filosofía implantada por WECA al crear la marca WiFi para la interoperabilidad de distintos dispositivos. Por lo que se debe hacer resaltar sobre todo que los futuros estudios cumplan con esta norma de calidad que asegura el buen funcionamiento, la integración y la escalabilidad de soluciones inalámbricas en entornos hostiles con otro tipo de redes ya implantadas o que se implantarán en el futuro.

Instalación de Linux *Familiar* sobre *PDA*s

Este apéndice trata sobre la instalación de Linux *Familiar* v0.8.2 en el dispositivo HP iPAQ Pocket PC serie h5500 partiendo de un sistema operativo Windows.

1. Prerrequisitos. Debido a limitaciones de este dispositivo la instalación de las imágenes deben ser necesariamente a través del puerto serie, por lo que a parte de disponer del cable de conexión serie (viene de fábrica en este modelo), es necesario contar con otro ordenador en el que se ejecute un emulador terminal y que esté conectado al dispositivo iPAQ a través del puerto serie. Es conveniente poder tener acceso a Internet para la posterior actualización del sistema tras su instalación. En este dispositivo es posible usar la tarjeta inalámbrica si se dispone de acceso a una red inalámbrica de área local, o conectar el dispositivo a través del puerto USB a un ordenador con acceso a Internet, mediante una red de área personal usando el módem *Bluetooth* o bien mediante una conexión PPP a través del puerto serie.
2. Descarga. El siguiente paso es descargar los archivos necesarios. Desde [34] se accede a la página de descargas de la versión v0.8.2, donde hay que seleccionar distintos aspectos. El primero es la elección entre la versión estable o la versión de prueba, después se elige el modelo de iPAQ del que se dispone y finalmente el entorno gráfico que se desea. Existen tres entornos disponibles, bootstrap, GPE y Opie. El entorno bootstrap es un entorno con las herramientas justas y necesarias para permitir el desarrollo de aplicaciones para los otros dos entornos. El entorno GPE es parecido a un sistema Linux de sobremesa y el entorno Opie está enfocado para el usuario final de *PDA*s. En este proyecto se eligió la versión estable con el modelo h5500 y el entorno Opie. Se obtuvo el fichero bootopie-h3900.tar.
3. Instalar el nuevo gestor de arranque. A continuación se instala el nuevo gestor de arranque llamado bootloader. Para ello, necesitaremos una utilidad que permita instalar dicho gestor, el *BootBlaster*. Este programa, además permite hacer una copia de seguridad de nuestro sistema operativo actual Windows CE. Ambos archivos se encuentran en el archivo descargado anteriormente y se corresponden con el archivo bootldr-pxa-2.21.12.bin y BootBlaster3900-2.6.exe respectivamente. Para pasar estos archivos a la *PDA* podremos usar varios métodos, entre ellos la descarga de los

archivos mediante PocketIE si se tiene acceso a Internet, usando un gestor de descarga FTP, mediante Synce si se tiene una máquina Linux o mediante ActiveSync si se tiene un sistema operativo Windows con dicha utilidad instalada. Esta última opción fue la usada para este proyecto. La utilidad ActiveSync viene con el *software* de casa de la PDA. El proceso de instalación consta de los siguientes pasos:

- Conectar la PDA al ordenador mediante el cable USB. El programa ActiveSync reconoce la conexión y nos permite mover archivos entre los dispositivos. Movemos o copiamos el archivo *bootldr-pxa-2.21.12.bin* y el archivo *BootBlaster3900-2.6.exe* a una carpeta del sistema de directorios de la PDA.
- Hacer una copia de seguridad del sistema operativo y del gestor de arranque actual. En primer lugar es conveniente hacer una copia de seguridad usando la utilidad del sistema operativo Windows, ya que los archivos anteriores nos permiten realizar una copia de seguridad del sistema operativo únicamente. Tras hacer la copia de seguridad ejecutamos el programa *BootBlaster* y pulsamos en la opción *Flash* que esta situada en la parte de abajo de la pantalla. Se despliega un menú y pulsamos en *Save Bootldr.gz Format* para hacer la copia de seguridad del gestor de arranque primitivo, lo que lleva unos segundos. Después haremos la misma operación pero haciendo la copia de seguridad del sistema operativo Windows pulsando en la opción *Save Wince.gz Format*. El tiempo de esta última operación está en torno a los dos o tres minutos. Una vez terminado el proceso de creación de imágenes copiaremos los archivos creados *saved_bootldr.gz* y *wince_image.gz* en un lugar seguro, puesto que estos archivos permiten volver al sistema operativo anterior.
- Instalar el nuevo gestor de arranque. Antes de continuar se hace necesario realizar dos observaciones de vital importancia. La primera observación es que durante el proceso de reprogramación del gestor de arranque es indispensable evitar cualquier falta de alimentación sobre el dispositivo puesto que podría traer un falta desenlace. Es por esto que se hace imprescindible colocar el dispositivo en su fuente de alimentación y comprobar que la batería está totalmente cargada. La segunda observación es recordar el uso de la opción *Verify* del programa *BootBlaster* antes de pulsar el botón de alimentación o el botón de *reset* y después de haber instalado el bootldr, puesto que si ocurriera algún problema durante la instalación del bootldr y no actuáramos en consecuencia podríamos obtener una bonita PDA sin funcionalidad ninguna. Tras haber hecho las observaciones pertinentes el proceso de instalación del nuevo gestor de arranque comienza ejecutando la opción *Flash* y seleccionando *Program*. Se abre un cuadro de diálogo para seleccionar el bootldr que vamos a instalar, y en nuestro caso es *bootldr-pxa-2.21.12.bin*. Durante este proceso que suele durar en torno a 15 segundos es conveniente no hacer nada ni tocar ningún botón, y así nos lo avisa el programa con un mensaje de advertencia. Tras terminar la barra de proceso de completarse aparece un mensaje que el bootldr instalado es correcto si todo ha ido bien. Es conveniente ejecutar al opción *Verify* y comprobar que todo está correcto. En este punto se tiene instalado el gestor de arranque de Linux que puede arrancar tanto en Linux como en Win-

dows, pero como sólo está instalada la imagen de Windows, si reiniciamos, arrancaremos en Windows.

- Instalar el sistema operativo Linux *Familiar* 0.8.2. Desconectamos la *PDA* del puerto USB y la conectamos al puerto serie del ordenador. Pulsamos el botón más grande que está en el centro de la *iPAQ* a la vez que pulsamos el botón de *reset* con lo que la *PDA* vibra. Cuando termine de vibrar la colocaremos en su fuente de alimentación y pulsaremos el botón del calendario, que es el botón más a la izquierda y abajo. La pantalla que nos aparece es la misma que se haya quedado en el momento en que se haya reseteado. Arrancar el programa HyperTerminal y configurarlo con 115200 bits por segundo, 8 bits de datos y 1 bit de parada, con paridad ninguna y sin control del flujo. Tras conectar obtendremos el prompt *boot* donde teclearemos la orden *load root*. Después de esto nos dispondremos a enviar el archivo *opie-image-h3900-20050407140814.rootfs.jffs2* mediante la opción *ymodem* (figura A.1). Este proceso suele tardar del orden de media hora y tras terminarlo teclearemos la opción *boot* para que arranque nuestro nuevo sistema operativo Linux *Familiar* 0.8.2 *Opie* 1.2.

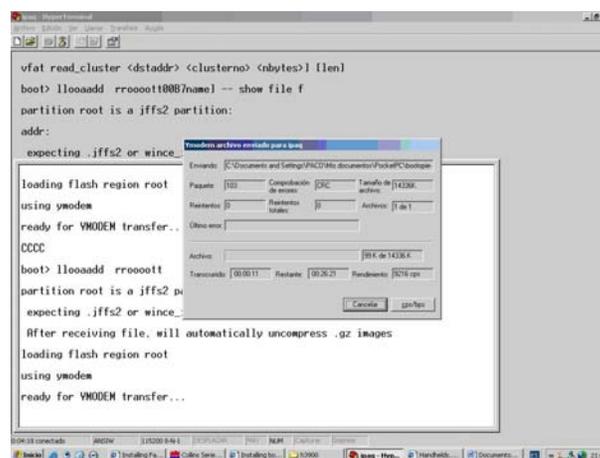


Figura A.1: Vista del programa HyperTerminal enviando el archivo *jffs2*.

- Actualizar sistema operativo. La contraseña por defecto de root está en blanco, por lo que hay que introducirle una para poder trabajar como root. Una vez arrancado hemos de proporcionar acceso a Internet a la *PDA* y ejecutar:
 - `ntpdate -b time.handhelds.org`
 - `ipkg update`
 - `ipkg upgrade`

Esto es necesario para poder usar las correcciones y actualizaciones hechas que permiten un mejor uso del nuevo sistema operativo Linux *Familiar*. Por último, es conveniente leer los comentarios en la página web sobre distintos aspectos que puedan afectar al funcionamiento y rendimiento general de nuestro nuevo sistema. La herramienta *ipkg* nos permite instalar aplicaciones

ya compiladas para nuestro dispositivo. En la imagen A.2 se observa el funcionamiento del navegador konqueror tras ejecutar `ipkg install konqueror-embedded`.



Figura A.2: Navegador *web* konqueror para *Familiar Opie 1.2*.

Instalación de un compilador cruzado

Debido a que el *hardware* es distinto en dispositivos iPAQ que en ordenadores de sobremesa es conveniente poder contar con un compilador cruzado capaz de generar código para dichas plataformas. La solución más fácil es usar la herramienta `gcc` que es gratuita y de código abierto. En este apéndice se va a tratar la instalación de un conjunto de herramientas denominadas *toolchains* que permiten desarrollar dicho código ejecutable en un ordenador de sobremesa con sistema operativo Linux Debian.

Esiten distintas alternativas para instalar un compilador cruzado. Una de ellas es obtener el código fuente y compilarlo para cada arquitectura. Otra es usar las facilidades del sistema operativo Linux *Debian* para la instalación de paquetes mediante la herramienta `dpkg`, y la última de ellas, la que se utilizó en este proyecto y que se va a tratar ahora, es bajar un compilador ya precompilado para una arquitectura determinada.

El código binario usado fue descargado desde [38], válido para arquitecturas i386 con juego de instrucciones *Armv4 little endian*. Los pasos necesarios se detallan a continuación:

1. Descargar el archivo `arm-linux-gcc-3.3.2.tar.bz2` desde [38].
2. Descomprimir el archivo mediante `tar -fxvz arm-linux-gcc-3.3.2.tar.bz2`.
3. Copiar la carpeta extraída en el directorio `/skiff/local`. Este paso es importante puesto que no funcionará en otra ruta.
4. Determinadas cabeceras no están disponibles para este compilador desde el archivo original, por lo que se necesita copiarlas o realizar un enlace simbólico a ellas. Este compilador fue compilado con la versión 2.2.14 del kernel de Linux. Para nuestro caso se realizaron los enlaces simbólicos mediante

```
ln -s /usr/src/linux2.4.18/include/asm /skiff/local/arm-linux/include/asm
```

```
ln -s /usr/src/linux2.4.18/include/linux /skiff/local/arm-linux/include/linux.
```

5. Incluir el directorio `/skiff/local/bin` a la variable de entorno `PATH`.

6. Todas las herramientas ya instaladas funcionan con el prefijo *arm-linux-*, por ejemplo, para el compilador la sentencia es *arm-linux-gcc nombre.c -o nombre*. El archivo *nombre* es un binario que se ejecuta correctamente en la arquitectura de los dispositivos *PDA*.
7. En nuestro casos se obtuvieron problemas para indicar al compilador la ruta donde están disponibles las cabeceras necesarias. Se solventó indicando al compilador la ruta mediante la siguiente orden:

```
/skiff/local/arm/3.3.2/bin/arm-linux-gcc nombre.c -o nombre
```

```
-I/skiff/local/arm/3.3.2/include/.
```

Algoritmo de Cristian

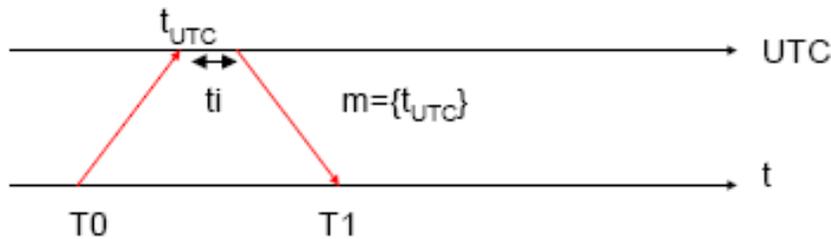


Figura C.1: Algoritmo de Cristian para sincronización de sistemas síncronos.

El algoritmo de Cristian tiene por objetivo la sincronización de relojes para su uso en sistemas síncronos. En la figura C.1 se observa su funcionamiento.

La estación que quiere sincronizarse manda un mensaje a una fuente de tiempo UTC (*Universal Time Coordinated*). La fuente de tiempo procesa la información en t_i y responde con un mensaje incluyendo su tiempo. El algoritmo de Cristian propone ajustar el tiempo a $t_{UTC} + (T1 - T0)/2 + t_i$. Si se considera el tiempo de procesado t_i como cero, y si se conoce el tiempo mínimo de transmisión del mensaje (min) entonces puede determinarse la precisión como $(T1 - T0)/2 - min$. Para aumentar la precisión se repiten las medidas varias veces, espaciándolas para eliminar la congestión transitoria, y se toma el mínimo valor de $T1 - T0$.

La adaptación al protocolo inalámbrico para implementar el anterior algoritmo consiste en una realización del mismo por etapas. Utiliza el socket UDP creado por el *software* de medida usado en este proyecto fin de carrera. A continuación se expone dicha implementación:

1. Es indiferente que un dispositivo actúe como fuente de tiempo, pues lo que se busca es que ambos dispositivos tengan el mismo origen de tiempos. El extremo A (cliente) envía paquetes vacíos al extremo B (servidor) obteniendo el tiempo transcurrido. Hay que recordar que las medidas de tiempo se toman a nivel *software*, que corresponde al nivel de la capa de transporte. Por lo que en este tiempo está incluido el tiempo de procesado en ambos extremos, el tiempo de transmisión del paquete UDP y el tiempo de transmisión del paquete ACK a nivel de la capa de enlace. Si se

toman suficientes medidas espaciándolas en el tiempo es probable que algún caso se produzca bajo condiciones ideales en las que no haya habido ningún error y por lo tanto no se haya necesitado ninguna retransmisión.

2. Se asume que los tiempos de procesado son despreciables. Si se observa que un mensaje UDP vacío tiene una longitud de 65 *bytes* y un paquete ACK tiene una longitud de 14 *bytes*, la relación de cantidad de *bytes* está en un 82,28 %. Por lo tanto, el tiempo mínimo necesitado para enviar un mensaje es el 82,28 % del tiempo mínimo recogido en la prueba anterior. Este tiempo se envía al servidor para la futura sincronización.
3. El cliente manda una tanda de mensajes espaciados en el tiempo para evitar la congestión. En estos mensajes incluye la hora local del cliente. El servidor recibe el primer paquete con el tiempo del servidor, y establece su tiempo local a esta hora, pero retrasándola un tiempo considerable. Esto es así porque para el funcionamiento del algoritmo modificado para 802.11b es necesario que la hora del servidor esté, en este punto, retrasada respecto a la del cliente. Los siguientes mensajes que reciba con el tiempo del cliente sirven para calcular la diferencia entre el tiempo recibido y el tiempo local. Aquel mensaje que produzca una diferencia mayor es el que se ha producido en mejores condiciones de transmisión. Entonces se establece la hora local del servidor con un adelanto de la diferencia mayor conseguida más el tiempo de transmisión que envió el cliente anteriormente.
4. Esta implementación no garantiza la sincronización ni la precisión propuestas por Cristian, ya que es dependiente de que, cada vez que existe una tanda de envío de mensajes, se produzca al menos una vez una transmisión en condiciones ideales, es decir, que no exista ruido, que se de con la máxima tasa de transferencia y que no existan retransmisiones a nivel de la capa de enlace. Por lo tanto, cuantos más mensajes se envíen en cada tanda existirá una mayor probabilidad de que ocurra dicho caso.

Apéndice **D**

Especificaciones del dispositivo de medidas

Para la realización de este proyecto se usaron dos dispositivos modelo HP iPAQ Pocket PC serie h5500 cuyas características se detallan en los siguientes cuadros.

Especificaciones físicas	Descripción
Longitud	133,0 mm.
Anchura	77,0 mm. (84,0 en la parte superior).
Profundidad	15,9 mm.
Peso	186,9 g.

Entorno operativo	Descripción	
Temperatura	En funcionamiento	De 0° a 40°C
	Sin funcionar	De -20° a 60°C
Humedad relativa	En funcionamiento	Del 10 al 90 %
	Sin funcionar	Del 10 al 90 %
Altitud máxima	En funcionamiento	De 0 a 4.572 m.
	Sin funcionar	De 0 a 4.572 m.

Especificaciones del sistema	Descripción
Procesador	Intel Xcale a 400 MHz.
RAM (memoria de acceso aleatorio)	SDRAM de 128 MB.
ROM (memoria de sólo lectura)	ROM de 48 MB.
Ranura SDIO	Memoria SD y soporte de tarjetas SDIO.
Pantalla	TFT en color transreflectiva, 240 x 320 píxeles, admite 64.000 colores, punto de 0,24 mm.
Sensor de luz de fondo	Ajuste de brillo con varios niveles.
Audio	Micrófono, altavoz, toma de auriculares estéreo de 3,5 mm., MP3 estéreo a través de toma de audio.
Wireless	802.11b que permite conectar a otros dispositivos compatibles.
Infrarrojos	IrDA, transferencia de datos de hasta 115,2 Kb por segundo.
<i>Bluetooth</i>	Dispositivo de clase II; transmisión de hasta 4 dBm, rango normal de 10 metros.
Lector de huellas digital	Tecnología de gradiente térmico.
Comunicaciones	Puerto de comunicaciones, conector de módulo de expansión.
Indicadores	3 modos de notificación de alarma: Indicador intermitente de color verde, tono, mensaje emergente. En carga: indicador intermitente de color ambar. Cargado: indicador fijo color ambar. <i>Bluetooth</i> activo: indicador intermitente de color azul.
Batería	Batería extraíble/recargable de polímero de ión-litio de 1.250 mAh con batería puente interna de 10 minutos para conservar los datos durante la sustitución de la batería principal.

Apéndice **E**

Especificaciones del punto de acceso

El punto de acceso usado se muestra en la figura E.1 y se corresponde con el modelo *Cisco Aironet 1200 Series Access Point -Air - AP1220B - E - K9*. Este fue usado únicamente para la campaña de medidas en entorno ofimático.



Figura E.1: Punto de acceso utilizado para la campaña de medidas en modo *managed*.

Entorno operativo	Descripción	
Temperatura	En funcionamiento	De -20° a 55°C
	Sin funcionar	De -40° a 85°C
Rango	Interior	45 m. a 11 Mbps. 100 m. a 1 Mbps.
	Exterior	250 m. a 11 Mbps. 600 m. a 1Mbps.
Conforme a	Generales	UL 2043
	Seguridad	UL 1950 Tercera Edición. CSA 22.2 No. 950-95. IEC 60950 Segunda Edición. EN 60950 Segunda Edición.
	Seguridad	UL 1950 Tercera Edición.
	Espectro radioeléctrico	FCC Parte 15.247. Canada RSS-210. Japon Telec. 33B EN 300.328.
	Emisiones y susceptibilidad	FCC Parte 15.107 y 15.109 Clase B ICES-003 Clase B (Canadá) EN 55022 B AS/NZS 3548 Clase B VCCI Clase B EN 55024 EN 301.489-1 EN 301.489-17
	Exposiciones a RF	OET-65C RSS-102 ANSI C95.1

Especificaciones del sistema	Descripción
Frecuencia	2,400 a 2,497 GHz.
Modulación	<i>Direct Sequence Spread Spectrum</i> DSSS
Tasas de transmisión	1, 2, 5.5 y 11 Mbps.
Antena	Sistema con dos conectores TNC.
Módulo de radio	AIR-MP20B-E-K9, configuración para entorno geográfico europeo.
Conectores	Panel trasero (de izquierda a derecha): conector TNC de antena para 2,4 GHz., alimentación (para transformador de AC), RJ45 para <i>Ethernet</i> 10 Mbps. y 100 Mbps., RJ45 para configuraciones mediante consola y segundo conector TNC de antena para 2,4 GHz.
Indicadores	Tres indicadores en la parte de arriba: Tráfico <i>ethernet</i> , estado y tráfico inalámbrico.
Voltaje de trabajo	48 VDC nominales. Voltajes mayores de 60 pueden dañar la unidad.
Corriente de trabajo	125 mA. Es capaz de manejar corrientes de 380 mA. dependiendo del futuro <i>hardware</i> que se instale

Especificaciones físicas	Descripción
Longitud	4,22 mm.
Anchura	16,67 mm.
Profundidad	18,36 mm.
Peso	730 g.

Bibliografía

- [1] J. del Prado Pavón y S. Choi (2003). *Link Adaptation Strategy for IEEE 802.11 WLAN via Received Signal Strength Measurement*. Wireless Communication and Networking Philips Research USA & Multimedia and Wireless Networking Laboratory School of Electrical Engineering Seoul National University.
- [2] D. Qiao, S. Choi y K. G. Shin (2002). *Goodput Analysis and Link Adaptation for IEEE 802.11a Wireless LANs*. IEEE Trans. on Mobile Computing, vol. 1, no. 4, pp. 278-292.
- [3] J. C. Wu, H. Liu y Y. Lung (2001). *An Adaptive Multirate IEEE 802.11 Wireless LAN*. in Proc. 15th International Conference on Information Networking, 2001, pp. 411-418.
- [4] G. Holland, N. Vaidya y P. Bahl, (2001). *A Rate-Adaptive MAC Protocol for Multi-Hop Wireless Networks*. in Proc. ACM SIGMOBILE'01, Julio 2001, pp. 236-251.
- [5] A. Kamerman y L. Monteban, 1997. *WaveLAN-II: A High-Performance Wireless LAN for the Unlicensed Band*. Bell Labs Technical Journal, pp. 118-133, Verano 1997.
- [6] J. del Prado Pavón y S. Choi (2001). *Experimental Study on Co-existence of 802.11b with Alien Devices*. Wireless Communication and Networking Philips Research USA.
- [7] C. Röhl, H Woesner, A. Wolisz (1996). *A Short on Power Saving Mechanisms in the Wireless LAN Standard Draft IEE 802.11*. Technical University Berlin Telecommunication Networks Group
- [8] <http://www.ptolemy.eecs.berkeley.edu> Copyright 1990-96 The Regents of the University of California.
- [9] D. Aguayo, J. Bicket, S. Biswas, G. Judd y R. Morris (2004). *Link-Level Measurements from an 802.11b Mesh Network*. Carnegie Mellon University.

- [10] A. Willing, M. Kubisch, C. Hoene y A. Wolisz, Diciembre 2002. *Measurements of a Wireless Link in an Industrial Environment Using an IEEE 802.11-Compliant Physical Layer*. IEEE Trans. of Industrial Electronics, vol. 49, no. 6, Diciembre 2002.
- [11] <http://uluru.ee.unsw.edu.au/tim/measure.11> *IEEE 802.11 Measurements Project*. Tim Moors, Robert Malaney. Mahbub Hassan.
- [12] J. Jun, P. Peddabachagari y M. Sichitiu (2003). *Theoretical Maximum Throughput of IEEE 802.11 and its Applications*. Department of Electrical and Computer Engineering North Carolina State University
- [13] Y.C. Tay y K.C. Chua (1997). *A Capacity Analysis for the IEEE 802 MAC Protocol* National University of Singapore
- [14] C. Sweet, V. Devarapalli y D. Sidhu (1998). *IEEE 802.11 Performance in an Ad-Hoc Environment*. Maryland Center for Telecommunications Research. Department of Computer Science and Electrical Engineering.
- [15] C. Sweet, V. Devarapalli y D. Sidhu (1998). *IEEE 802.11 Performance Analysis of the IEEE 802.11 Wireless LAN Standard*. Maryland Center for Telecommunications Research. Department of Computer Science and Electrical Engineering.
- [16] X. J. Dong, M. Ergen, P. Varaiya y A. Puri (2003). *Improving the Aggregate Throughput of Access Point in IEEE 802.11 Wireless LANs*. Department of Electrical Engineering & Computer Science, University of California at Berkeley.
- [17] K. K. Leung, B. McNair, L. J. Cimini y J.H Winters (2002). *Outdoor IEEE 802.11 Cellular Networks: MAC Protocol Design and Performance*. AT&T Labs - Research.
- [18] K. K. Leung, B. McNair, L. J. Cimini y J.H Winters (2002). *Outdoor IEEE 802.11 Cellular Networks: Radio Link Performance*. AT&T Labs - Research.
- [19] M. Balazinska y P. Castro (2003). *Characterizing Mobility and Network Usage in a Corporate Wireless Local-Area Network*. MIT Laboratory for Computer Science & IMB T.J. Watson Research Center.
- [20] C. Steger, P. Radosavljevic y J. P. Frantz (2002). *Performance of IEEE 802.11b Wireless LAN in an Emulated Mobile Channel*. Department of Electrical and Computer Engineering Rice University - Houston, Texas.
- [21] J. Pal Singh, N. Bambos, B. Srinivasan y D. Clawin (2001). *Wireless LAN Performance Under Varied Stress Conditions in Vehicular Traffic Scenarios*. Department of Electrical Engineering Stanford University & Robert Boch Corporation Research and Technology Center, Palo Alto.
- [22] M. Heusse, F. Rousseau, G. Berger-Sabbatel y A. Duda (2003). *Performance Anomaly of 802.11b*. LSR-IMAG Laboratory Grenoble, France.

- [23] S. Sharma (2003). *Analisis of 802.11b MAC: A QoS, Fairness, and Performance Perspective*. Department of Computer Science Stony Brook University.
- [24] M. Veeraraghavan, N. Cocker y T. Moors (2000). *Support of voice services in IEEE 802.11 wireless LANs*. Department of Electrical and Computer Engineering School of Engineering and Applied Science University of Virginia.
- [25] G. Xylomenos, G. Polyzos, P. Mähönen y M. Saaranen (2001). *TCP Performance Issues over Wireless Link*. University of Oulu, Finland.
- [26] Y. Peng, H. Wu, K. Long y S. Cheng (2001). *Simulation Analisys of TCP Performance on IEEE 802.11 Wireless LAN*. National Laboratory of Switching Technology & Telecommunication Network Beijing University
- [27] R. Jiang, V. Gupta y C. V. Ravishankar (2001). *Interactions Between TCP and the IEEE 802.11 MAC Protocol*. Computer science and engineering department, University of California, Riverside
- [28] G. Iannello, A. Pescapè, G. Ventre y L. Vollero (2004). *Experimental analysis of heterogeneous wireless networks*. Università di Napoli Federico II; Italia.
- [29] V. Gupta, S. V. Krishnamurthy y M. Faloutsos (2003). *Improving the performance of TCP in the presence of interacting UDP flows in ad-hoc networks*. Department of Computer Science and Engineering, University of California, Riverside
- [30] W. Wang, S. C. Liew y V. Li (2003). *Solutions to Performance Problems in VoIP over 802.11 Wireless LAN*. Department of Information Engineering The Chinese University of Hong Kong.
- [31] K. Ban y H. Gharavi (2002). *Video Transmission for Multi-hop Networks using 802.11 FHSS*. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg.
- [32] M. W. Subbarao (1999). *Ad-hoc Networking Critical Features and Performance Metrics*. Wireless Communications Technology Group, NIST.
- [33] Handhelds.org - Open source for handheld devices <http://handhelds.org/moin/moin.cgi/DevelopmentToolchains>.
- [34] (Familiar Download desde el proyecto handhelds.org). <http://familiar.handhelds.org/releases/v0.8.2/install/download.html>.
- [35] J. Geier (2001). *Implementing High Performance IEEE 802.11 Networks*. Wireless LANs, Second Edition by Sams Publishing.
- [36] P. Lo y S. Nigai (2004). *Characterising Errors in Wireless LANs*. The University of New South Wales.

- [37] F. Ponce (2003). *Diseño y evaluación de un protocolo de caracterización para redes IEEE 802.11*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación. Universidad Politécnica de Cartagena.
- [38] <ftp://ftp.handhelds.org/projects/toolchain/> (2005). *Servidor ftp de <http://www.handhelds.org>*. Código binario para arquitecturas i386 con juego de instrucciones Armv4 *little endian*.