



Escola Politècnica Superior
de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

PROYECTO DE FINAL DE CARRERA

TÍTULO DEL PFC: Estudio de técnicas de *Cross-Layer* para sistemas de comunicaciones inalámbricos

TITULACIÓN: Ingeniería de Telecomunicación (segundo ciclo)

AUTORAS: Mireia Moya Román
Lorena Robles Campillo

DIRECTORES: Luís G. Alonso Zárate
Christos Verikoukis

FECHA: 30 de junio de 2005

Título: Estudio de técnicas de *Cross-Layer* para sistemas de comunicaciones inalámbricos

Autoras: Mireia Moya Román
Lorena Robles Campillo

Directores: Luís G. Alonso Zárata
Christos Verikoukis

Fecha: 30 de junio de 2005

Resumen

El presente proyecto se sitúa en uno de los ámbitos de investigación más relevantes en la actualidad, las comunicaciones inalámbricas. En concreto se centra en las redes WLAN en modo *ad-hoc* basadas en el estándar IEEE 802.11.

Los principales objetivos del proyecto son la propuesta, el estudio y el análisis de técnicas de *Cross-Layer* con el fin de mejorar la eficiencia y el rendimiento de los sistemas WLAN. Obteniendo estas mejoras potenciales se consigue optimizar el uso de los recursos radioeléctricos disponibles y se consigue un ahorro de energía que permite alargar la vida de las baterías de los terminales inalámbricos.

Las técnicas de *Cross-Layer* consisten en un intercambio de información entre las capas del modelo OSI que forman un sistema de comunicaciones. En el presente trabajo se proponen técnicas que transfieren información de la capa física a la capa MAC con el objetivo de adaptar las transmisiones al estado del canal inalámbrico. Concretamente, estas técnicas de *Cross-Layer* modifican el algoritmo de contienda del protocolo MAC clasificando y priorizando las transmisiones no recibidas según el nivel de SNR.

Para conseguir los objetivos del proyecto se ha diseñado un software de simulación por ordenador en lenguaje C++. En este software se ha desarrollado un sistema de comunicaciones de referencia sobre el que se han implementado las distintas técnicas *Cross-Layer* propuestas.

Tras el análisis de los resultados obtenidos, se puede concluir que con la implementación de las técnicas de *Cross-Layer* propuestas se ofrecen beneficios significativos en términos de caudal efectivo, retardo medio de acceso, reducción de colisiones, ahorro de energía y optimización del uso de los recursos disponibles. Por lo tanto, son interesantes para implementarlas en aplicaciones reales y para tenerlas en cuenta en diseños futuros de redes inalámbricas.

Title: Study of Cross-Layer Techniques for Wireless Communication Systems

Authors: Mireia Moya Román
Lorena Robles Campillo

Directors: Luís G. Alonso Zárata
Christos Verikoukis

Date: 30th June 2005

Overview

The presented final career project deals with wireless communication systems. To be more precise, it investigates ad-hoc WLAN systems based on IEEE 802.11 standard.

The aim of this work is to propose, to study and to analyze, by means of computer simulations, different Cross-Layer techniques in order to improve the WLAN systems' efficiency. As a consequence, the use of the available radio resources is optimised and the energy consumption of the mobile terminals is reduced.

Cross-Layer techniques consist of exchange of certain information between the traditional OSI layers in mobile communication systems. With the proposed techniques the MAC layer adapts the transmissions to the wireless channel state according to some information of the physical layer. In particular, the back-off algorithm defined in the 802.11 standard is modified in order to prioritize the non-successful transmissions based on the measured signal strength.

In order to study the proposed techniques a platform in C++ has been designed. The aforementioned platform simulates an ad-hoc wireless system where the Cross-Layer techniques have been applied in different scenarios under realistic channel conditions.

The obtained results indicate that the proposed Cross-Layer techniques improve the reference system's efficiency in terms of throughput, average delay, reduction in collisions, energy saving and available resources utilization. Therefore, they can be useful in the realization of future wireless communication systems.

Queremos agradecer todo el apoyo prestado por parte de nuestros tutores de final de proyecto, Luís Alonso Zárate y Christos Verikoukis, que con su orientación y ayuda han hecho posible este trabajo.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN, MOTIVACIONES Y OBJETIVOS	1
CAPÍTULO 1. ASPECTOS TEÓRICOS.....	3
1.1. Las comunicaciones inalámbricas	3
1.1.1. Tipos de redes inalámbricas.....	3
1.1.2. Arquitectura de las redes inalámbricas	4
1.1.2.1. Redes inalámbricas centralizadas	4
1.1.2.2. Redes inalámbricas distribuidas o ad-hoc	4
1.2. El estándar IEEE 802.11	5
1.3. La capa física	6
1.3.1. Tecnología de infrarrojos.....	6
1.3.2. Tecnologías de espectro ensanchado	7
1.4. La capa de enlace	8
1.4.1. La subcapa LLC	8
1.4.2. La subcapa MAC	8
1.5. Introducción a las técnicas <i>Cross-Layer</i>	10
1.5.1. Estado del arte	11
CAPÍTULO 2. EL ESCENARIO DEL ESTUDIO	13
2.1. Introducción	13
2.2. Descripción de los parámetros del sistema	13
2.2.1. Área de simulación	13
2.2.2. Frecuencia de transmisión	14
2.2.3. Modelo de la capa física.....	14
2.2.4. Nodos	14
2.2.4.1. Posición inicial.....	14
2.2.4.2. Modelo de movilidad	14
2.2.4.3. Tamaño de la cola.....	15
2.2.5. Modelo de tráfico	15
2.2.6. Elección del destino de las transmisiones.....	16
2.2.7. Modelo de propagación	16
2.2.7.1. Atenuación por distancia	16
2.2.7.2. Atenuación por obstáculos o shadowing.....	17
2.2.7.3. Variación del canal en el tiempo	17
2.2.8. Cálculo de la potencia de recepción	18
2.2.9. Cálculo del PER	19
2.3. Protocolo de acceso al medio.....	20
2.3.1. Procedimiento de las transmisiones en el sistema	21
CAPÍTULO 3. TÉCNICAS <i>CROSS-LAYER</i> PROPUESTAS	24
3.1. Introducción	24

3.2. Descripción de las técnicas propuestas	25
3.2.1. Técnica <i>Cross-Layer</i> 1A.....	27
3.2.2. Técnica <i>Cross-Layer</i> 2A.....	28
3.2.3. Técnica <i>Cross-Layer</i> 3A.....	29
3.2.4. Técnica <i>Cross-Layer</i> 1B.....	30
3.2.5. Técnica <i>Cross-Layer</i> 2B.....	31
3.2.6. Técnica <i>Cross-Layer</i> 3B.....	31
3.2.7. Técnica <i>Cross-Layer</i> 4B.....	32

CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN DEL SIMULADOR 34

4.1. Introducción	34
4.2. Estructura del programa	34
4.2.1. El programa principal.....	36
4.2.1.1. Variables globales.....	36
4.2.1.2. Funciones y estructura del programa principal.....	36
4.2.2. Clase CNodo.....	39
4.2.2.1. Atributos de la Clase CNodo.....	39
4.2.2.2. Funciones de la Clase CNodo.....	39
4.2.3. Clase CCola.....	41
4.2.3.1. Atributos de la Clase CCola.....	41
4.2.3.2. Funciones de la Clase CCola.....	41
4.2.4. Clase CCanal.....	41
4.2.4.1. Atributos de la Clase CCanal.....	41
4.2.4.2. Funciones de la Clase CCanal.....	42
4.2.5. Clase CTransmisión.....	43
4.2.5.1. Atributos de la Clase CTransmisión.....	43
4.2.6. Clase CEscenario.....	44
4.2.6.1. Atributos de la Clase CEscenario.....	44
4.2.6.2. Funciones de la Clase CEscenario.....	44
4.3. Programación de las técnicas <i>Cross-Layer</i>	44
4.3.1. Modificaciones comunes a todas las técnicas.....	44
4.3.1.1. Clase CNodo.....	44
4.3.1.2. Clase CCanal.....	45
4.3.2. Modificaciones de las técnicas tipo B.....	45
4.3.2.1. Clase CNodo.....	45
4.3.3. Modificaciones de la técnica 4B.....	46
4.3.3.1. Clase CNodo.....	46

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS 47

5.1. Introducción	47
5.2. Estadísticas extraídas	47
5.2.1. Paquetes Generados.....	48
5.2.2. Paquetes no recibidos correctamente.....	48
5.2.2.1. Paquetes que sobrepasan el nº de reintentos.....	48
5.2.2.2. Paquetes que se han quedado en cola.....	49
5.2.2.3. Paquetes desbordados de la cola.....	49
5.2.3. Paquetes recibidos correctamente o caudal efectivo.....	49
5.2.3.1. Número medio de intentos.....	49
5.2.3.2. Retardo medio de acceso.....	50
5.2.4. Transmisiones y Retransmisiones.....	51
5.2.4.1. Transmisiones.....	51
5.2.4.2. Retransmisiones.....	51
5.2.5. Control de admisión.....	52

5.3. Rendimiento del sistema de referencia.....	52
5.4. Rendimiento del sistema con las técnicas 1A, 2A y 3A	53
5.4.1. Conclusiones del rendimiento de las técnicas 1A, 2A y 3A	59
5.5. Rendimiento del sistema con las técnicas 1B, 2B, 3B y 4B.....	60
5.5.1. Rendimiento del sistema con las técnicas 1B, 2B, 3B	60
5.5.2. Rendimiento del sistema con la técnica 4B.....	67
5.5.3. Conclusiones de la técnica 1B, 2B, 3B y 4B	73
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES	75
6.1. Impacto medio ambiental	76
6.2. Líneas futuras de investigación.....	76
REFERENCIAS.....	77
ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS	79

INTRODUCCIÓN, MOTIVACIONES Y OBJETIVOS

Introducción

En los últimos años las redes inalámbricas están ganando terreno a las redes convencionales cableadas. El usuario actual tiene, tanto en la vida personal como en la vida profesional, nuevas necesidades que las redes convencionales no pueden proporcionar. Necesita acceder a la información en cualquier lugar y a cualquier hora, y cada vez a un más amplio abanico de aplicaciones: la videoconferencia, el *mailing*, la transferencia de datos, etc. Por ello, las redes inalámbricas se presentan como la mejor opción para cubrir estas necesidades.

Dentro de las redes inalámbricas, se destacan las redes de área local inalámbrica o WLAN. Estas redes se basan principalmente en el estándar IEEE 802.11 que especifica las normas y regulaciones para la comunicación entre los dispositivos de diferentes fabricantes y que es el más extendido en la actualidad. Unas de las arquitecturas más utilizadas para redes WLAN son las redes distribuidas o *ad-hoc*. Éstas no necesitan de ninguna infraestructura fija, por lo que permiten un rápido despliegue, así como variar fácilmente la topología de red y admiten una gran variedad de dispositivos, como PDAs, ordenadores portátiles, teléfonos móviles, etc.

Debido a las características que presentan este tipo de redes, son ideales en escenarios en los que se necesita una gran movilidad y donde hay un número variable de usuarios:

- Redes inalámbricas en flotas de transporte o en vehículos para el intercambio de datos de tráfico, ocio, etc.
- Comunicaciones en alta mar para llevar a cabo comunicaciones entre barcos sin utilizar enlaces terrestres o vía satélite.
- En misiones de seguridad y rescate en zonas sin infraestructura o en zonas donde la infraestructura no está operativa debido a un desastre natural, etc.
- En aeropuertos, educación: campus universitarios, aulas virtuales, etc.

Pero, al mismo tiempo, estas redes también deben afrontar retos técnicos y funcionales muy exigentes.

Motivaciones del presente proyecto

En los últimos años, las redes de comunicaciones han sufrido una evolución incesante. La aparición de las redes WLAN y la creación de nuevas aplicaciones, como la videoconferencia y la voz sobre IP, han hecho que se requieran distintos niveles de calidad de servicio (QoS) según el tipo de tráfico. Además, el uso de estas aplicaciones hace que la transmisión en modo paquete adquiera gran importancia, concentrando todas las investigaciones en estrategias que tengan en cuenta este modo de transmisión.

Por otro lado, las distintas versiones del estándar para WLAN (IEEE 802.11x) pretenden mejorar la eficiencia de los sistemas inalámbricos y alcanzar tasas de transmisión superiores modificando la capa física. Todas estas versiones mantienen la estructura del modelo OSI como un conjunto de capas estáticas que no presentan interoperabilidad entre ellas. Sin embargo, en recientes investigaciones se ha demostrado que es posible mejorar el rendimiento de los sistemas de comunicaciones modificando la capa MAC y con la interacción entre las capas del sistema, a estos nuevos sistemas se les denomina *Cross-Layer*, puesto que permiten la comunicación entre capas (ver [1 y 2]).

Esta situación de las redes inalámbricas, además del desarrollo de las nuevas aplicaciones para cubrir las necesidades del usuario, se convierten en las principales motivaciones que ha llevado a desarrollar el presente proyecto dentro de este ámbito.

Objetivos

El principal objetivo de este proyecto es conseguir mejorar la eficiencia y el rendimiento de los sistemas WLAN en modo *ad-hoc*. Para llevar a cabo este objetivo se proponen, se estudian y se analizan diferentes técnicas *Cross-Layer*. Con la obtención de dichas mejoras potenciales, se consigue optimizar el uso de recursos radioeléctricos disponibles y reducir el consumo energía, consiguiendo prolongar la vida de las baterías de los terminales inalámbricos.

Para conseguir estos objetivos el trabajo se ha organizado en diferentes capítulos.

En el 1^{er} capítulo se realiza el estudio teórico de los sistemas WLAN basados en el estándar IEEE 802.11, así como las diferentes arquitecturas implementadas. Además, se presenta una primera aproximación al concepto de *Cross-Layer* y del estado actual de éste. En el 2^o capítulo se define el escenario de referencia significativo para el desarrollo de un sistema WLAN en modo *ad-hoc*, y en el cual se aplicarán las diferentes técnicas *Cross-Layer*. A continuación, en el 3^{er} capítulo se detallan las diferentes propuestas de técnicas *Cross-Layer* con las que se intenta conseguir beneficios significativos en los sistemas de comunicaciones inalámbricos actuales. En el 4^o capítulo, se realiza una breve explicación de programa software en C++ que se ha desarrollado, con el fin de analizar y cuantificar los beneficios obtenidos gracias al diseño de las diferentes técnicas *Cross-Layer* sobre el sistema de referencia definido. Una vez creado el simulador como herramienta de estudio del sistema, en el 5^o capítulo, se presentan los resultados obtenidos en las diferentes pruebas realizadas, sobre los cuales se ha hecho el análisis y evaluación de las técnicas *Cross-Layer* propuestas. Para finalizar el proyecto, en el último y 6^o capítulo, se presentan las conclusiones que se han obtenido a partir de los resultados extraídos con las técnicas *Cross-Layer*. Además, se realiza una propuesta de futuras líneas de investigación sobre este campo.

CAPÍTULO 1. ASPECTOS TEÓRICOS

1.1. Las comunicaciones inalámbricas

Una red inalámbrica consiste en una serie de equipos o dispositivos con adaptadores inalámbricos que utilizan ondas electromagnéticas como medio de transmisión de la información que viaja a través del canal. Los enlaces de estas redes se implementan con tecnologías de microondas o de infrarrojos.

Este tipo de redes presentan algunas ventajas frente a las tradicionales redes cableadas. Ofrecen movilidad a los usuarios, flexibilidad en la topología de la red y escalabilidad. Sin embargo, también presentan algunos inconvenientes que limitan, de momento, sus posibilidades. Como son el menor ancho de banda, problemas de seguridad y dificultad de garantizar ciertos niveles de QoS.

1.1.1. Tipos de redes inalámbricas

Existen diferentes tipos de redes inalámbricas que se pueden clasificar según el criterio de alcance. En la tabla 1.1 se realiza esta clasificación y se dan algunos ejemplos de cada tipo de red (ver [3]).

Tabla 1.1. Clasificación de redes inalámbricas según alcance

WPAN	WLAN		WMAN		Celular
< 10 metros	Edificio	Campus	Ciudad	Región	Global
Bluetooth	Wi-Fi		LMDS		GSM (2G)
Infrarrojos	HomeRF		MMDS		GPRS (2.5G)
802.15	HiperLAN		WiMAX		UMTS (3G)

- **WPAN** (*Wireless Personal Area Network*) o redes inalámbricas de área personal. Cubren distancias menores de 10 metros y se utilizan para interconectar diferentes dispositivos personales; es decir equipos que lleva la misma persona, por ejemplo: el reloj, la PDA, el móvil, etc.
- **WLAN** (*Wireless Local Area Network*) o redes inalámbricas de área local. Cubren alrededor de 100 metros y suelen ser utilizadas para crear redes de ámbito local entre ordenadores o terminales ubicados en un mismo lugar, en edificios donde el cableado sea inviable, como posibilidad de reconfiguración de la topología de una red ya existente sin costes adicionales, para crear pico-celdas y para proporcionar conectividad entre las redes WPAN.

- **WMAN** (*Wireless Metropolitan Area Network*) o redes inalámbricas metropolitanas. Pretenden cubrir un área similar a una ciudad o población.
- **Redes globales.** Tienen la posibilidad de cubrir toda una región o país. Basadas en tecnología celular y han aparecido como evolución a las redes de comunicaciones de voz.

1.1.2. Arquitectura de las redes inalámbricas

La arquitectura determina cómo se realiza la estructura de la red y dónde reside su inteligencia. Según el tipo de red y su utilidad, se pueden diferenciar entre dos tipos de arquitectura: centralizada y distribuida (ver [4]).

1.1.2.1. Redes inalámbricas centralizadas

Esta arquitectura es la utilizada en redes del tipo WMAN, en redes globales y en redes WLAN normalmente como extensión de las redes cableadas. Está formada por dispositivos inalámbricos y un equipo que funciona como punto de acceso o estación base (ver figura 1.1a). Este último coordina y controla todas las transmisiones que se realizan dentro de su área de cobertura y actúa como interfaz entre las redes inalámbricas y cableadas. Además, éste es el único elemento de la red que tiene acceso al canal de bajada (de la estación base o punto de acceso a los terminales) mientras que el canal de subida (de los terminales a la estación base o punto de acceso) está compartido por todos los demás dispositivos.

En este tipo de arquitectura de red la inteligencia se concentra en la estación base o punto de acceso por lo que el resto de dispositivos son más simples. Además al tener un control centralizado el diseño del protocolo MAC (*Medium Access Control*) es mucho más sencillo y se simplifica el soporte de QoS (calidad de servicio) y la gestión del ancho de banda.

Además, para extender el área de cobertura de la red se pueden interconectar varias estaciones base o puntos de acceso tanto con cableado como de forma inalámbrica.

1.1.2.2. Redes inalámbricas distribuidas o ad-hoc

Esta arquitectura es la utilizada en las redes de tipo WPAN y WLAN y su principal característica es la falta de infraestructura. En esta configuración la red consta de dispositivos inalámbricos que se comunican unos con otros directamente sin una administración central. Estos dispositivos tienen el control de la red y actúan como enrutadores para facilitar la comunicación entre nodos alejados. La figura 1.1b muestra un ejemplo de una red *ad-hoc*.

Las redes con esta arquitectura presentan un rápido desarrollo y una reconfiguración dinámica además de ser más robustas ya que el fallo de un dispositivo no afecta a los servicios de la red. Por el contrario, los protocolos MAC de redes con esta estructura tienen un alto nivel de sofisticación y los dispositivos son más complejos ya que han de almacenar información importante para el funcionamiento de la red tal como la topología. Además, todos funcionan en la misma banda de frecuencias puesto que no existe ningún dispositivo especial que traduzca la transmisión de una frecuencia a otra.



Fig. 1.1a Red centralizada



Fig. 1.1b Red distribuida

1.2. El estándar IEEE 802.11

El IEEE 802.11 (ver [5]) es el estándar de las redes locales inalámbricas (WLAN). Este estándar apareció para resolver el problema de comunicación entre los diferentes dispositivos de red inalámbrica propiedad de fabricantes diferentes. La primera propuesta del estándar proporciona tasas de transmisión de 1 Mbps y 2 Mbps en la banda frecuencial ISM, de los 2,4 GHz y especifica tres posibles tecnologías de capa física: infrarrojos, FHSS (*Frequency Hopping Spread Spectrum*) y DSSS (*Direct-Sequence Spread Spectrum*).

A causa de la evolución de las WLAN se han generado distintas versiones del estándar 802.11. A continuación se describen las más extendidas:

- **IEEE 802.11b**: las tasas de transmisión que consigue esta versión del estándar son de 1Mbps, 2Mbps, 5,5Mbps y 11 Mbps en la banda frecuencial ISM 2,4 GHz. Utiliza la tecnología DSSS en la capa física.
- **IEEE 802.11a**: esta versión trabaja en la banda de frecuencias de los 5 GHz y proporciona una tasa de transmisión máxima de 54 Mbps utilizando la tecnología de capa física OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*). Esta nueva versión del estándar es incompatible a la norma, IEEE 802.11b.
- **IEEE 802.11g**: trabaja en la banda frecuencial de los 2,4 GHz, ISM. Soporta tanto la tecnología OFDM como DSSS por lo que es compatible con las versiones 802.11a y 802.11b. Consigue una tasa de transmisión máxima de 22 Mbps (teóricamente hasta 54 Mbps) y consume menor potencia.

Igual que todos los estándares IEEE 802.X, éste cubre las capas bajas del modelo OSI y especifica la capa física y los protocolos del control de acceso al medio (MAC). El control de enlace (LLC – *Logical Link Control*) y las capas

superiores no se modifican con respecto otro tipo de redes LAN permitiendo una interconexión simple entre las redes inalámbricas y las redes cableadas.

A continuación, en la figura 1.2, se muestra la pila de protocolos definida por los estándares IEEE 802.11.

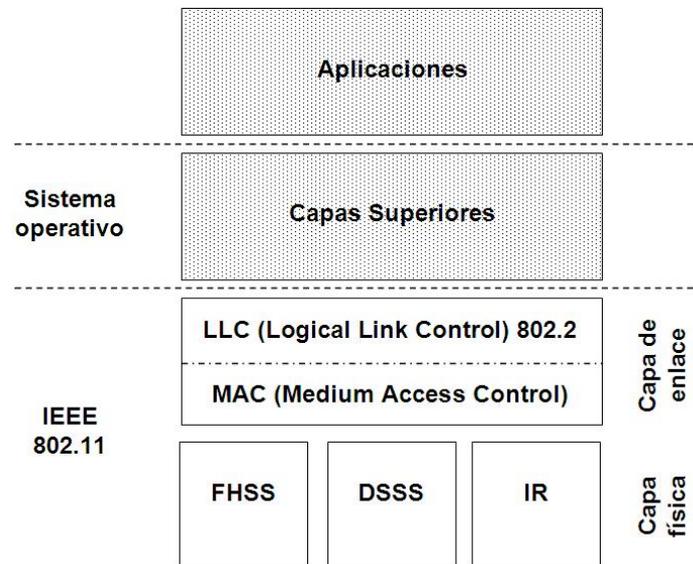


Fig. 1.2 Pila de protocolos del estándar IEEE 802.11

1.3. La capa física

La capa física es la capa más baja de la pila de protocolos según el modelo OSI y es la responsable de enviar y recibir los datos a través del medio, inalámbrico o cableado. Además, proporciona los servicios necesarios para la siguiente capa, la capa de acceso al medio.

Existen varias tecnologías para la capa física que ofrecen características diferentes y pueden trabajar en distintos rangos de frecuencia. Las técnicas definidas para redes WLAN son las descritas a continuación.

1.3.1. Tecnología de infrarrojos

Esta tecnología de la capa física no es muy utilizada en el mercado para implementar redes inalámbricas, aunque está especificada en la primera versión del estándar IEEE 802.11. Las frecuencias que utiliza son altas, situándose justo por debajo del rango frecuencial de la luz visible, lo que hace que los infrarrojos no puedan atravesar objetos opacos. En [6] se dan más detalles de esta tecnología de la capa física.

1.3.2. Tecnologías de espectro ensanchado

Esta tecnología (ver [7]) consiste en modular una señal consiguiendo que la resultante tenga un ancho de banda mucho mayor a la original y ocupe todo el ancho de banda disponible (ver figura 1.3). Además, esta señal resultante aparentemente es aleatoria e independiente de los datos originales. En esta técnica, el ancho de banda se comparte entre todos los usuarios que además trabajan en la misma banda frecuencial.

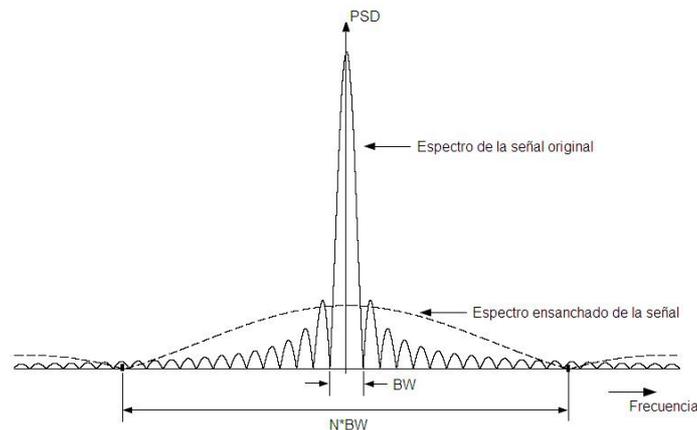


Fig. 1.3 Densidad de potencia espectral del espectro ensanchado

El patrón utilizado para ensanchar el espectro debe ser conocido tanto por el emisor como por el receptor. Según este patrón se clasifican los distintos tipos de técnicas de ensanchado del espectro:

- **Espectro ensanchado por salto de frecuencia (FHSS):** en esta técnica el ancho de banda se divide en un largo número de subcanales y las transmisiones se envían por uno de estos subcanales durante un tiempo. Después de este tiempo, se cambia de frecuencia y se sigue la transmisión. El orden en los saltos en frecuencia viene determinado según un patrón pseudoaleatorio que conoce tanto el emisor como el receptor. Para más detalle ver [5 y 6].
- **Espectro ensanchado por secuencia directa (DSSS):** en esta técnica el canal se divide en 14 subcanales de 22 MHz cada uno y las señales se transmiten sobre un mismo subcanal sin saltar a otro.

El DSSS consiste en la generación de un patrón de bits redundante para cada uno de los bits que componen la señal de información y la posterior modulación de la señal resultante. En recepción es necesario realizar el proceso inverso para obtener la señal original. En [5] se describe esta técnica con mayor detalle.

- **Sistema de multiplexación ortogonal en frecuencia (OFDM)** (ver [3 y 5]): en esta técnica el ancho de banda total del canal se divide en 52 subcanales o subportadoras permitiendo así enviar tantos símbolos como

subcanales se han creado de forma paralela. De estas subportadoras 48 se utilizan para transmitir datos y las otras 4 son de control y sincronización.

A continuación en la tabla 1.2 se resumen (ver [5]) las características de la capa física para las versiones más extendidas del estándar de las WLAN.

Tabla 1.2. Capa física en las versiones más extendidas del estándar 802.11

Versión	Banda	Alcance	Tasa de transmisión máxima	Tecnologías
802.11b	2,4 GHz ISM	150 m	11 Mbps	DSSS
802.11a	5 GHz	50 m	54 Mbps	OFDM
802.11g	2,4 GHz ISM	100 m	54 Mbps	DSSS OFDM

1.4. La capa de enlace

La capa de enlace (DLC – *Data Link Control*) es la responsable del flujo de datos (ver [3]). Acepta los datos de la capa superior, la capa de red, los empaqueta en tramas y los envía hacia la capa física. De la misma forma, recibe tramas de la capa física y las transforma en paquetes antes de enviarlos a la capa de red. Además, se encarga de detectar y evitar errores utilizando el CRC (*Cyclic Redundancy Check*) añadido en la trama.

La capa DLC está dividida en dos subcapas la LLC (*Logical Link Control*) y la MAC (*Medium Access Control*).

1.4.1. La subcapa LLC

Esta subcapa es la más alta dentro de la capa DLC y se encarga de la sincronización de las tramas, del flujo de los datos y de la detección de errores mediante el CRC. Además, genera y mantiene enlaces lógicos entre los dispositivos de la red.

En el estándar de las redes locales inalámbricas, IEEE 802.11, la capa LLC no sufre modificaciones con respecto a los estándares de las redes locales cableadas, por este motivo esta subcapa no se describe detalladamente.

1.4.2. La subcapa MAC

La subcapa MAC sí se modifica en el estándar 802.11 ya que el medio inalámbrico presenta propiedades operacionales distintas al medio cableado y por ello, requiere unos protocolos de acceso distintos y más complejos.

Esta subcapa controla el acceso al medio físico, inalámbrico o cableado. Se basa en una serie de protocolos que definen cómo se comparte el canal entre los distintos dispositivos.

Los protocolos de acceso al medio se pueden clasificar en dos grandes grupos, protocolos distribuidos y protocolos centralizados, de acuerdo con el tipo de arquitectura de red para la cual han sido diseñados. Dentro de estas dos grandes clases de protocolos se puede realizar otra subdivisión según la forma de acceder al canal:

- Protocolos de contienda o acceso aleatorio.
- Protocolos de asignación o acceso garantizado.
- Protocolos híbridos.

En [4] y [8] se realiza una descripción detallada de estas tres clases de protocolos MAC así como se numeran y describen un gran número de protocolos de cada clase.

De las clasificaciones anteriores, los protocolos más utilizados en redes WLAN en modo *ad-hoc* son los de contienda o acceso aleatorio ya que los protocolos de acceso garantizado o de asignación y los protocolos híbridos suelen necesitar de un nodo central que controle los accesos. Así, dentro de este tipo de protocolos se describen los más relevantes para el presente proyecto:

- **Aloha** [4]: el protocolo *Aloha* fue el primero que se utilizó para transmisiones inalámbricas en modo paquete.

Este protocolo funciona de forma muy simple y se caracteriza por la falta de un canal de control de acceso. Así, cuando los nodos tienen paquetes los transmiten directamente. Si las transmisiones colisionan, los nodos vuelven a probar el envío después de un tiempo aleatorio.

- **Aloha ranurado** [4]: este protocolo es una extensión del *Aloha*. Consigue mejorar el caudal efectivo del sistema imponiendo que los nodos deben intentar las transmisiones al principio del *slot* o ranura temporal.
- **MACA (Multiple Access with Collision Avoidance)**: este protocolo realiza un diálogo de intercambio para minimizar los efectos de nodos ocultos y de nodos expuestos. Este intercambio consiste en un paquete de control desde el nodo origen al nodo destino, RTS (*Request to Send*) y en otro paquete de control del destino al origen, CTS (*Clear to Send*). Si el nodo emisor recibe el CTS significa que puede iniciar la transmisión, en caso contrario, deberá intentar la transmisión en otro instante. En [8] se detalla este protocolo así como se explican distintas versiones que lo mejoran (MACAW, MACA/PR y MACA-BI).
- **CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)**: este es el protocolo MAC definido en el estándar IEEE 802.11. Presenta dos posibles modos de funcionamiento [4 y 9].

El primero se utiliza para paquetes de tamaño pequeño. Y su procedimiento es el siguiente (ver figura 1.4):

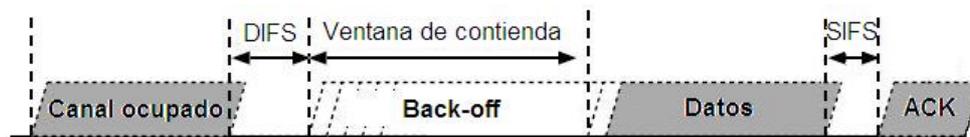


Fig. 1.4 Procedimiento del protocolo CSMA-CA

1. Escucha el canal (CSMA). Si el medio está ocupado continúa escuchando.
2. Cuando el canal está vacío durante un tiempo superior a DIFS (*Distributed Inter-Frame Space*), el nodo origen genera un tiempo aleatorio de espera (*back-off*) y lo decremента únicamente cuando no hay actividad en el canal.
3. Cuando finaliza el tiempo de espera se inicia la transmisión.
4. Si esta transmisión se recibe sin errores, el nodo destino espera un tiempo SIFS (*Short Inter-Frame Space*) y responde con un ACK (*Acknowledge*). En caso que el nodo origen no reciba el ACK, éste supone que el paquete se ha perdido y prepara la retransmisión doblando el tiempo de espera de *back-off*.

El tiempo SIFS es menor al DIFS con tal de dar preferencia a los nodos que intentan responder con un ACK.

El segundo modo de funcionamiento de este protocolo es apropiado para paquetes de gran tamaño ya que reduce las colisiones causadas por el efecto de los nodos ocultos. Su funcionamiento es igual al anterior pero introduce un intercambio RTS-CTS antes de la transmisión de la información. Además, en este procedimiento se utilizan campos de tiempo en los paquetes que indican al resto de nodos la duración de la transmisión. Este campo se llama NAV (*Network Allocate Vector*) e indica a todos los nodos que escuchan el RTS o el CTS cuanto tiempo deben esperar para volver a escuchar el canal.

1.5. Introducción a las técnicas *Cross-Layer*

Actualmente, las redes inalámbricas han sufrido un gran crecimiento. Este crecimiento se debe al uso de Internet sobre redes inalámbricas ya que estas ofrecen una serie de beneficios que las redes normales no pueden ofrecer. Esto hace pensar, que en un futuro muy cercano, las redes inalámbricas soportarán un mayor número de aplicaciones con diferentes tipos de tráfico como el tráfico de voz, videoconferencia, juegos, datos, etc. Todas estas aplicaciones requieren una cierta Calidad de Servicio, distinta para cada una de

ellas. Así, para garantizar esta QoS y optimizar el rendimiento de estas redes se han presentado diferentes propuestas.

Una de las propuestas estudiadas se basa en la interoperabilidad entre las diferentes capas del sistema, a través del cambio de información entre ellas. A este intercambio de información entre las diferentes capas del modelo OSI que forman el sistema de comunicaciones, se le denomina *Cross-Layer*.

1.5.1. Estado del arte

En la literatura se presentan diversas propuestas que estudian cómo mejorar la eficiencia de los sistemas inalámbricos mediante el intercambio de información entre las capas del modelo OSI, es decir, mediante el uso de técnicas *Cross-Layer*. A pesar de que la optimización de las redes inalámbricas puede realizarse a diferentes niveles, la mayoría de estas propuestas de *Cross-Layer* se basan en el intercambio de información entre la capa física (PHY) y la capa de acceso al medio (MAC), por ser el canal radio un elemento inherentemente variante en el tiempo, y constituir la capa MAC el nivel más cercano al mismo.

Las principales mejoras que se intentan conseguir con estas técnicas son la optimización del uso de los recursos radioeléctricos, el caudal efectivo, el retardo de las transmisiones y el consumo de energía, ya que uno de los mayores inconvenientes de los dispositivos inalámbricos es la limitación de la vida de sus baterías.

A continuación se resumen algunos artículos que presentan propuestas de técnicas *Cross-Layer* con el objetivo de conseguir las mejoras ya nombradas.

➤ ***Diseño Cross-Layer para un sistema con reserva multicanal bajo un canal tipo Rayleigh*** [10]

Este artículo considera un protocolo MAC del tipo *Aloha* Ranurado con reserva del canal de datos. Según las medidas realizadas en la capa física y el intercambio de información hacia la capa MAC, la estación base garantiza acceso a los usuarios situados en el canal tipo *Rayleigh*.

Basándose en este entorno, se propone un diseño *Cross-Layer* para optimizar el acceso al medio reservando el canal. Para ello, el documento se divide en dos partes:

- Una primera parte, donde se presenta una formulación de la cadena de Markov para analizar del funcionamiento (*throughput* / utilización del canal) del sistema multicanal ranurado.
- Una segunda parte, donde se presenta un diseño Neyman-Pearson como protocolo MAC optimizado. Este diseño se presenta como modelo para la evaluación del funcionamiento de otros diseños basados en detectores de la capa física convencional.

➤ **Adaptación y optimización de técnicas *Cross-Layer* para redes inalámbricas móviles CDMA con datos multimedia** [11]

En este artículo se estudia el problema de adaptación y de optimización del *Cross-Layer* en aplicaciones multimedia para redes celulares CDMA sobre IP. Considerando como requerimientos básicos la velocidad de codificación y la SNR (relación señal a ruido), se propone utilizar un control de potencia y una codificación de canal común. El objetivo es maximizar la calidad de vídeo entregada mientras se minimiza el consumo de recursos. Para conseguir estas mejoras, se incorporan características de adaptación de red del codificador H.264/AVC al protocolo de transporte RTP/UDP/IP,

➤ **Eficiencia del consumo de potencia en WLAN IEEE 802.11a mediante la adaptación de *Cross-Layer*** [12]

Este artículo presenta una técnica *Cross-Layer* que intenta reducir el consumo de energía en cada transmisión. Para ello, se estudia el traspaso de información de la capa física a la capa de enlace con tal de conseguir una transmisión eficiente en términos de potencia.

Esta propuesta considera la potencia total necesaria como la suma de dos componentes (ver fórmula 1.1).

- Potencia base: potencia necesaria para realizar las operaciones básicas tales como potencia consumida por los circuitos del dispositivo inalámbrico, el amplificador de potencia, etc.
- Potencia incremental: potencia debida a la transmisión, recepción y la escucha del canal.

$$P_{Total} = P_{base} + P_{incremental} \quad (1.1)$$

Esta técnica estudia cómo reducir la componente de potencia $P_{incremental}$. Para ello define distintos parámetros que consumen energía:

- El modelo físico utilizado.
- La velocidad de transmisión necesaria.
- La mínima relación señal-ruido (SNR).

Y a partir de ellos, se elige la potencia óptima necesaria para realizar una transmisión correcta.

Esta propuesta presenta un análisis matemático donde se contemplan todos estos parámetros. Para conocer con más detalle este modelo ver [12].

CAPÍTULO 2. EL ESCENARIO DEL ESTUDIO

2.1. Introducción

En este capítulo se detallan todos los parámetros y características que se han considerado al diseñar el entorno del sistema estudiado. En este escenario de estudio, se considera una red local inalámbrica en modo *ad-hoc*, basada en el estándar IEEE 802.11 de redes WLAN (ver Capítulo 1). Posteriormente, sobre este sistema se aplicarán diferentes técnicas *Cross-Layer*, descritas en el capítulo 3.

También se presentan algunas de las características básicas de los nodos que componen la red, como su movilidad, su posición, etc. que marcan las pautas del comportamiento propio de los dispositivos que componen este tipo de redes. Además, se presenta el modelo de tráfico y el protocolo MAC diseñado.

2.2. Descripción de los parámetros del sistema

2.2.1. Área de simulación

El escenario de trabajo definido presenta la forma geométrica de un cuadrado de dos dimensiones. Éste se encuentra centrado en $X = 0$ metros (X_{\min}) e $Y = 0$ metros (Y_{\min}), y tiene una longitud de $L \times L$ metros (ver fig. 2.1). Se ha trabajado con escenarios de diferentes tamaños, desde escenarios considerados pequeños, de $100\text{m} \times 100\text{m}$, hasta escenarios más grandes, de $400\text{m} \times 400\text{m}$.

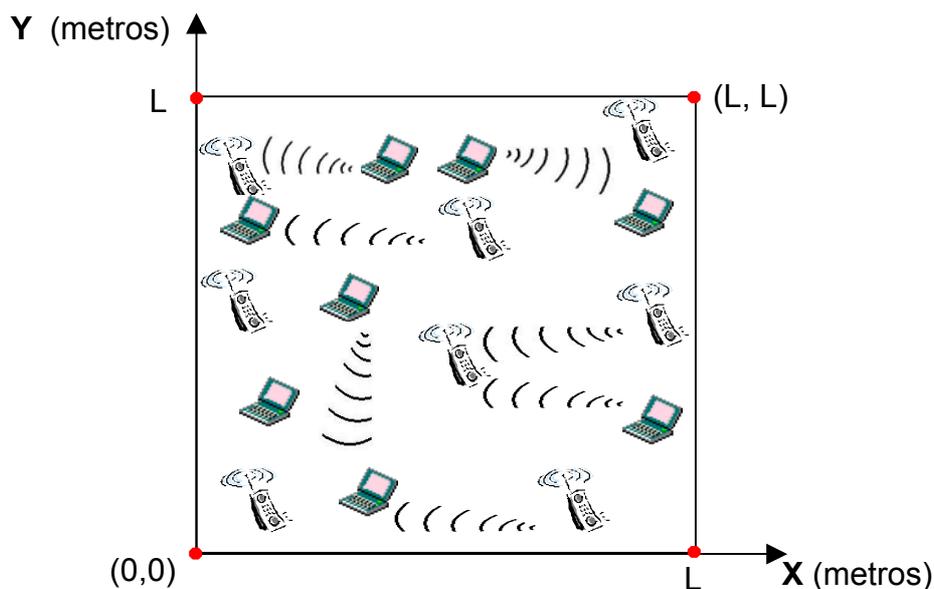


Fig. 2.1 Área del escenario de simulación

2.2.2. Frecuencia de transmisión

El sistema diseñado trabaja a una frecuencia portadora de 2,4 GHz, que pertenece a la banda de frecuencias libre. Esta frecuencia es la que se define en el estándar IEEE 802.11 para redes locales inalámbricas, y se utiliza en las versiones, 802.11b y 802.11g.

2.2.3. Modelo de la capa física

En el modelo del canal de transmisión, capa física, se define una tasa de transmisión binaria de 11 Mbps, independientemente del nivel de potencia recibido por el nodo destino. Esta tasa se define en el estándar IEEE 802.11, siendo la tasa máxima en la versión 802.11b y una de las posibles tasas en el resto de versiones, 802.11a (tasa máxima de 54 Mbps) y 802.11g (tasa máxima de 22 Mbps).

2.2.4. Nodos

El número de nodos del sistema se ha considerado variable, desde un mínimo de 5 nodos hasta un máximo de 100 nodos.

2.2.4.1. Posición inicial

Sobre el área delimitada como escenario se distribuyen los nodos del sistema. La posición inicial de cada uno de ellos se calcula de forma aleatoria y uniforme dentro del área del escenario.

2.2.4.2. Modelo de movilidad

Se ha considerado un modelo de movilidad para los nodos donde la velocidad es constante para todos ellos y de valor 1,5 km/h o 0,0001 m/u.t. (m/unidad de tiempo) según la expresión (2.1), que corresponde a un valor medio de personas caminando en interiores. Además, esta velocidad es homogénea para todos los nodos y su dirección es también aleatoria y uniformemente distribuida.

Este movimiento se calcula de forma aleatoria tanto para el sentido como para el valor absoluto en las dos componentes de la velocidad, eje de las X (V_x) y de las Y (V_y). Una vez calculadas estas componentes se debe comprobar que el nodo no supera el área delimitada como escenario. Si sucede que el nodo sobrepasa el límite, por uno de los ejes o por ambos, se le sitúa en la posición máxima y se cambia el signo de la componente de velocidad del eje que ha sobrepasado. Por ejemplo, si un nodo supera el límite máximo del eje X, en un escenario de 200mx200m, entonces se le posiciona en $X = 200$ metros y se cambia el signo de la componente V_x .

Con este modelo de movilidad se consigue un “efecto rebote” que simula un sistema en el que entran y salen usuarios de forma homogénea. Es decir, se mantiene constante el número de nodos dentro del escenario además de conseguir que los nodos no se sitúen fuera del área de simulación (ver fig. 2.2).

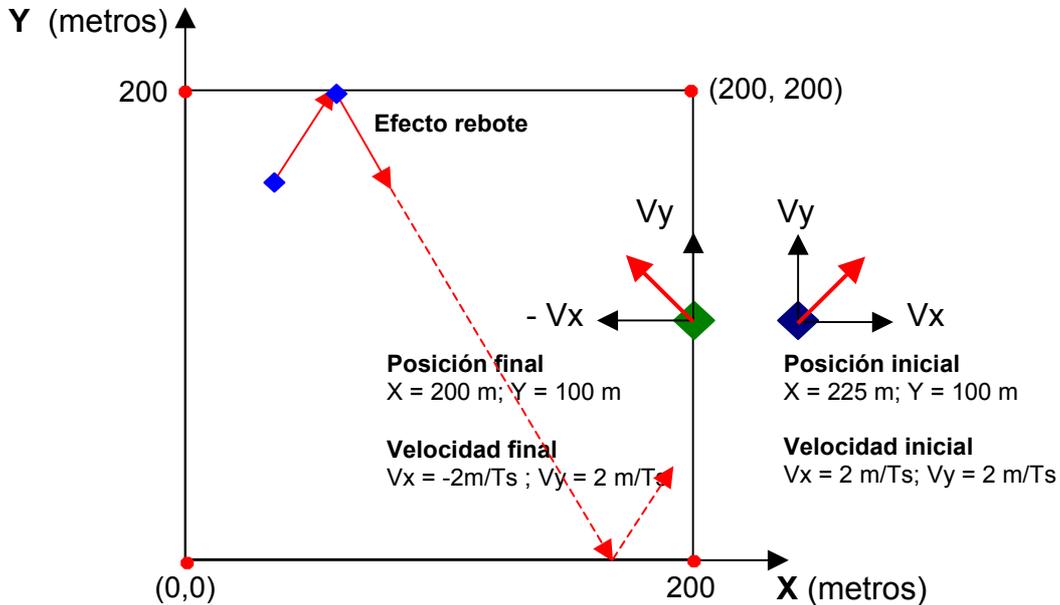


Fig. 2.2 Demostración del movimiento de los nodos

2.2.4.3. Tamaño de la cola

Todos los nodos del escenario tienen una cola de tamaño fijo que puede almacenar hasta 500 paquetes equivalente a 250.000 bytes según el tamaño de los paquetes indicado en el apartado siguiente, 2.2.5. Si un nodo intenta almacenar más paquetes de los que se admiten en la cola, el número de paquetes que superan el tamaño máximo de la cola serán paquetes que se pierden por el desbordamiento de la cola.

2.2.5. Modelo de tráfico

En el modelo de tráfico utilizado se han considerado llegadas de *Poisson* y mensajes de tamaño uniforme entre 1 y 4 paquetes. Todos los paquetes tienen un tamaño constante de 500 bytes.

Al dividir el tamaño de un paquete por la tasa binaria de transmisión, se consigue el equivalente en segundos, de una unidad de tiempo (ver fórmula 2.1).

$$\text{Unidad_de_Tiempo} = \frac{500 \text{ Bytes} \times 8 \text{ bits/Byte}}{11 \times 10^6 \text{ bits/s}} = 0,36 \times 10^{-3} \text{ s} = 0,36 \text{ ms} \quad (2.1)$$

En este modelo de tráfico utilizado la generación de llegadas es de tipo *Poisson*. En el sistema se han utilizado distintos valores de probabilidad de generar mensajes, desde 0,0004 hasta 0,04. Esta probabilidad se define igual para todos los nodos del sistema.

2.2.6. Elección del destino de las transmisiones

Antes de transmitir, un nodo debe elegir el nodo al que el paquete irá destinado (nodo destino). Esta elección se realiza de forma aleatoria y equiprobable entre todos los nodos que existen en el sistema.

2.2.7. Modelo de propagación

El modelo de propagación es un modelo clásico utilizado para redes inalámbricas de interiores que calcula la atenuación entre el nodo destino y el nodo origen. El tipo de canal definido en el sistema del estudio es *Rayleigh*. Este canal es de tipo NLOS (*Non Line of Sight*), es decir, sin visibilidad directa entre los nodos, que es típico en entornos de interior con obstáculos como, por ejemplo, un edificio.

En el modelo definido, se calcula la atenuación sumando dos componentes: las pérdidas debidas a la distancia entre los nodos y las pérdidas por obstáculos denominada *shadowing* (ver fórmula 2.2).

$$L = L_{\text{distancia_nodos}} + L_{\text{shadowing}} \quad (2.2)$$

2.2.7.1. Atenuación por distancia

Esta componente de la atenuación viene determinada exclusivamente por la distancia entre nodo origen y destino y se calcula según la expresión 2.3.

$$L_{\text{distancia_nodos}} = \begin{cases} 40 + 20 \cdot \log[d(\text{metros})] \quad (\text{dB}) & \text{si } d \leq 5 \text{ metros} \\ 40 + 14 + 10 \cdot \gamma \cdot \log\left[\frac{d(\text{metros})}{5}\right] \quad (\text{dB}) & \text{si } d > 5 \text{ metros} \end{cases} \quad (2.3)$$

Donde, γ es un parámetro dependiente. Su valor típico es $\gamma_{\text{típico}} = 3,5$.

2.2.7.2. Atenuación por obstáculos o shadowing

Esta atenuación, también conocida como atenuación lenta, se introduce a causa de los diferentes obstáculos que se encuentran entre el nodo emisor y receptor y que son variables a poca distancia.

Existen diferentes modelos para el cálculo del *shadowing*. En este sistema se aplica un modelo con estadística lognormal, que en unidades logarítmicas tiene el comportamiento de una variable aleatoria *gaussiana* (ver fig. 2.3). En el sistema diseñado, esta variable toma los valores de desviación típica igual a 15 dB, y media 0.

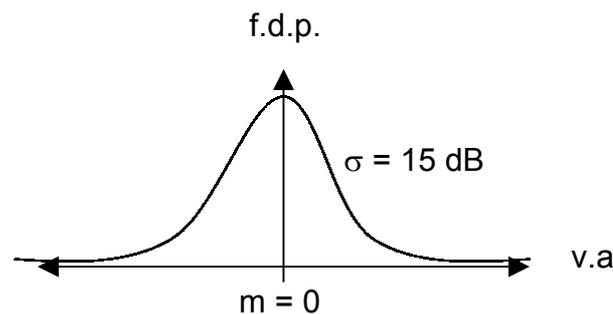


Fig. 2.3 Función de la variable aleatoria *gaussiana* en unidades logarítmicas

El cálculo de la atenuación por obstáculos en el sistema se calcula según la siguiente expresión, 2.4.

$$L_{shadowing} = \cos(2 \cdot \pi \cdot v) \cdot \sqrt{-2 \cdot \log(v)} \cdot \sigma + m \quad (2.4)$$

Donde v es una variable aleatoria uniforme entre 0 y 1.

2.2.7.3. Variación del canal en el tiempo

La componente de atenuación por *shadowing* varía según la posición de los nodos y se modifica cada tiempo de coherencia del canal. Este tiempo de coherencia se define como el tiempo que transcurre entre actualizaciones del estado del canal (ver [13]), y en un canal inalámbrico de tipo *Rayleigh* se calcula según la fórmula 2.5.

$$T_c = \frac{1}{4,13 \cdot f_d} \quad (2.5)$$

Donde f_d es la frecuencia *Doppler* máxima generada por el movimiento de los nodos.

Esta frecuencia *Doppler* es una dispersión en la frecuencia portadora causada por el movimiento de los nodos (ver [14] y [15]). Es decir, la frecuencia portadora que recibe el nodo destino está desplazada relativamente de la frecuencia portadora del nodo origen. Esta dispersión puede ser positiva o negativa, dependiendo de si los nodos se aproximan o se alejan.

En la siguiente fórmula, (2.6), se presenta el cálculo de la frecuencia máxima *Doppler*.

$$f_d = \frac{v}{\lambda} = f \times \frac{v}{c} \quad (2.6)$$

Donde,

- c es la velocidad de la luz.
- f es la frecuencia portadora del sistema.
- v es la velocidad relativa del nodo transmisor y del receptor.

Sustituyendo en la fórmula anterior los valores de la velocidad de la luz, de la frecuencia portadora del sistema: 2,4 GHz, y de la velocidad de los nodos: 1,5 km/h (ver apartado 2.2.4.2), se determina el valor de la frecuencia *Doppler* máxima que es de 3,33 Hz. Entonces, sustituyendo este valor de frecuencia *Doppler* en la fórmula 2.5, se determina el tiempo de coherencia del sistema que corresponde a 72 ms.

2.2.8. Cálculo de la potencia de recepción

Para calcular la potencia recibida (P_{rx}) de un nodo se deben conocer las ganancias de las antenas emisora (G_{tx}) y receptora (G_{rx}), la potencia de transmisión (P_{tx}) del nodo origen y la atenuación (L) determinada en la fórmula 2.2. En la fórmula (2.7) se muestra como se realiza el cálculo de la potencia de recepción.

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - L \quad (dB) \quad (2.7)$$

En el sistema se han fijado la potencia de transmisión y las ganancias de las antenas con los valores típicos de las redes locales inalámbricas:

$$\begin{aligned} P_{tx} &= 20 \text{ dBm} \\ G_{tx} &= G_{rx} = 0 \text{ dB} \end{aligned}$$

Una de las condiciones necesarias que debe cumplir un paquete para que pueda ser recibido por su destino, es que su potencia de recepción (calculada en el nodo receptor) sea mayor al umbral de potencia de recepción propio del

nodo. Este umbral se denomina sensibilidad (S) y en el sistema diseñado se ha asignado un valor de -90 dBm.

Considerando los valores detallados en la fórmula (2.7) de P_{tx} , G_{tx} y G_{rx} , y la sensibilidad determinada a -90 dBm, cualquier nodo de nuestro sistema tiene un radio de cobertura de 200 metros sin considerar la atenuación introducida por el *shadowing*. Por lo tanto, en el caso de escenarios menores al radio de cobertura, todos los nodos se escuchan, provocando colisiones entre las transmisiones, que hacen que los paquetes no se reciban. En cambio, en el caso de escenarios grandes, no todos los nodos se escuchan entre sí, ya que sus radios de cobertura pueden no solaparse. Por lo tanto, existe la posibilidad de que se realicen transmisiones simultáneas sin interferirse entre ellas y consiguiendo que los paquetes lleguen correctamente (ver fig. 2.4), siempre y cuando la potencia de recepción del destino supere el umbral marcado por la sensibilidad y no contenga error.

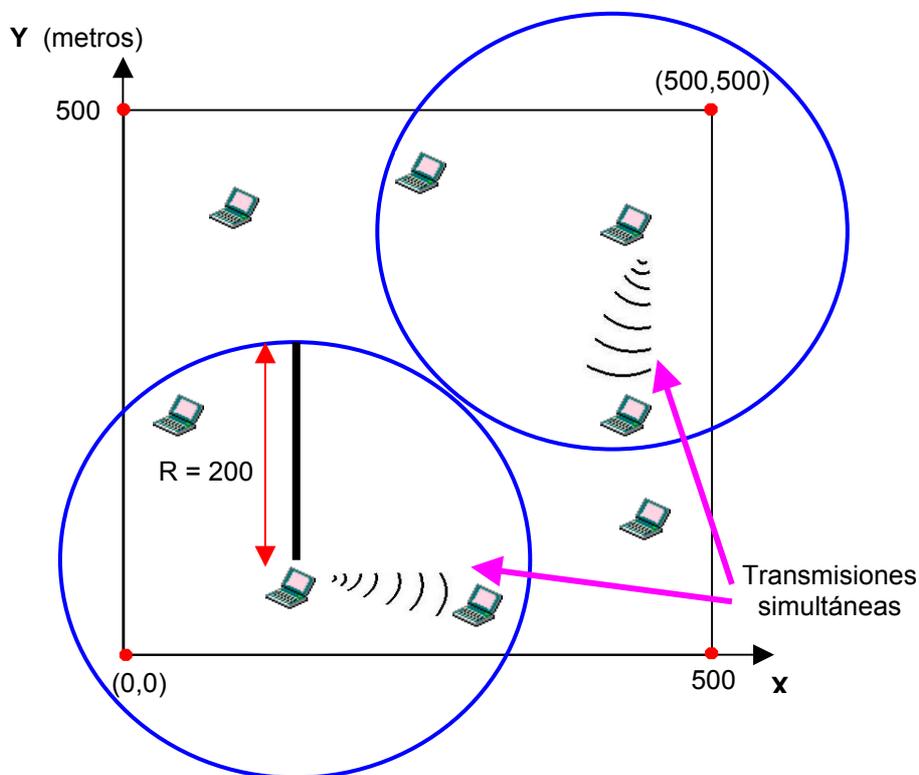


Fig. 2.4 Radio de cobertura y transmisiones simultáneas

2.2.9. Cálculo del PER

Un paquete se puede recibir correctamente cuando la potencia de recepción es mayor a la sensibilidad del nodo destino y además, no colisiona con otros paquetes. Ambas condiciones son necesarias, pero no suficientes para que un paquete sea recibido correctamente. Existe la posibilidad de que un paquete no llegue correctamente a su destino porque contenga error debido al canal.

La condición de si un paquete que ha recibido el destino contiene error o no lo contiene, depende de la potencia con la que se ha recibido, es decir, de la relación señal a ruido (SNR). A mayor potencia, la probabilidad de error en el paquete (PER) es menor mientras que a menor potencia de recepción la PER es mayor (ver tabla 2.1). Puesto que este valor depende de múltiples factores como el tipo y grado de codificación de canal, se ha optado por simplificar este análisis usando los valores aproximados de la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Asignación de PER según los intervalos de potencia recibida (Prx)

PER	Potencia Recibida
10^{-3}	Sensibilidad < Prx < Sensibilidad + 10 dB
10^{-4}	Sensibilidad + 10 dB < Prx < Sensibilidad + 20 dB
10^{-5}	Sensibilidad + 20 dB < Prx < Sensibilidad + 30 dB
10^{-6}	Prx > Sensibilidad + 30 dB

2.3. Protocolo de acceso al medio

En el sistema diseñado, el protocolo de acceso al medio es el *Aloha* Ranurado (ver capítulo 1 apartado 1.4.2). En el diseño del protocolo se ha determinado que un paquete puede ser retransmitido hasta un máximo de 6 veces. Entre estas retransmisiones se debe esperar un tiempo aleatorio (*back-off*), calculado a partir del número de reintento en el que se encuentre el paquete y de la generación de un número aleatorio. Para cada reintento se especifica un intervalo de tiempos dentro del que se genera el número aleatorio. Este intervalo crece normalmente de forma exponencial y es llamado ventana de contienda o *contention window* (CW) (ver tabla 2.2). Estos intervalos aparecen especificados en el estándar IEEE 802.11.

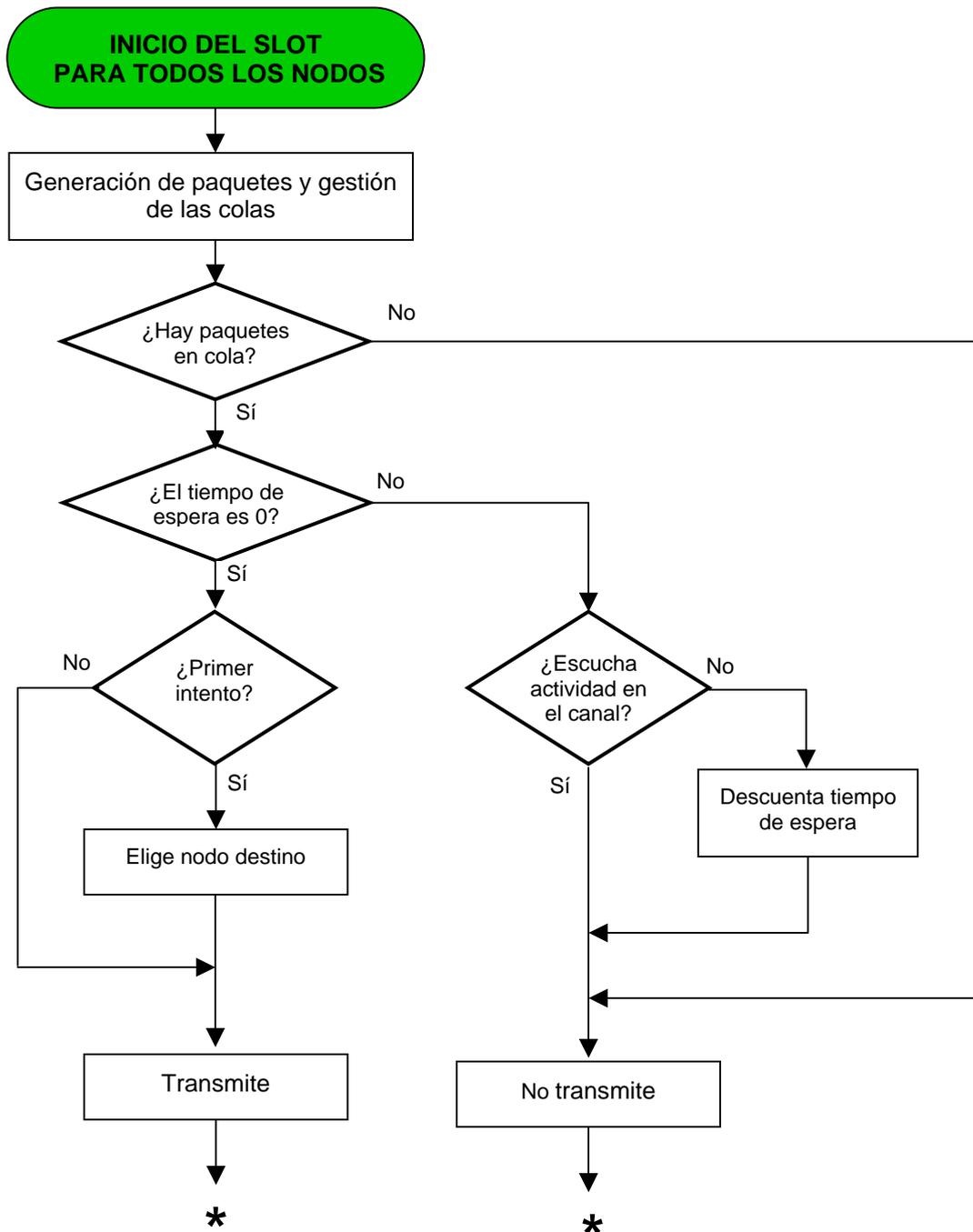
Tabla 2.2. Tiempos de espera de las CW

Nº reintento	Tiempo de espera (unidades de tiempo)
1º reintento	Variable aleatoria uniforme entre 1 y 7
2º reintento	Variable aleatoria uniforme entre 1 y 15
3º reintento	Variable aleatoria uniforme entre 1 y 31
4º reintento	Variable aleatoria uniforme entre 1 y 63
5º reintento	Variable aleatoria uniforme entre 1 y 127
6º reintento	Variable aleatoria uniforme entre 1 y 255

Una vez asignada la ventana de contienda, el tiempo de espera se calcula de forma aleatoria, eligiendo un valor que se encuentra entre el máximo y el mínimo del intervalo correspondiente. Este tiempo es el que el nodo debe esperar antes de retransmitir el paquete.

2.3.1. Procedimiento de las transmisiones en el sistema

Teniendo en cuenta todos los parámetros de diseño y el protocolo MAC descrito, en el siguiente diagrama de flujo, fig. 2.5, se presenta el procedimiento de las transmisiones y las recepciones del sistema.



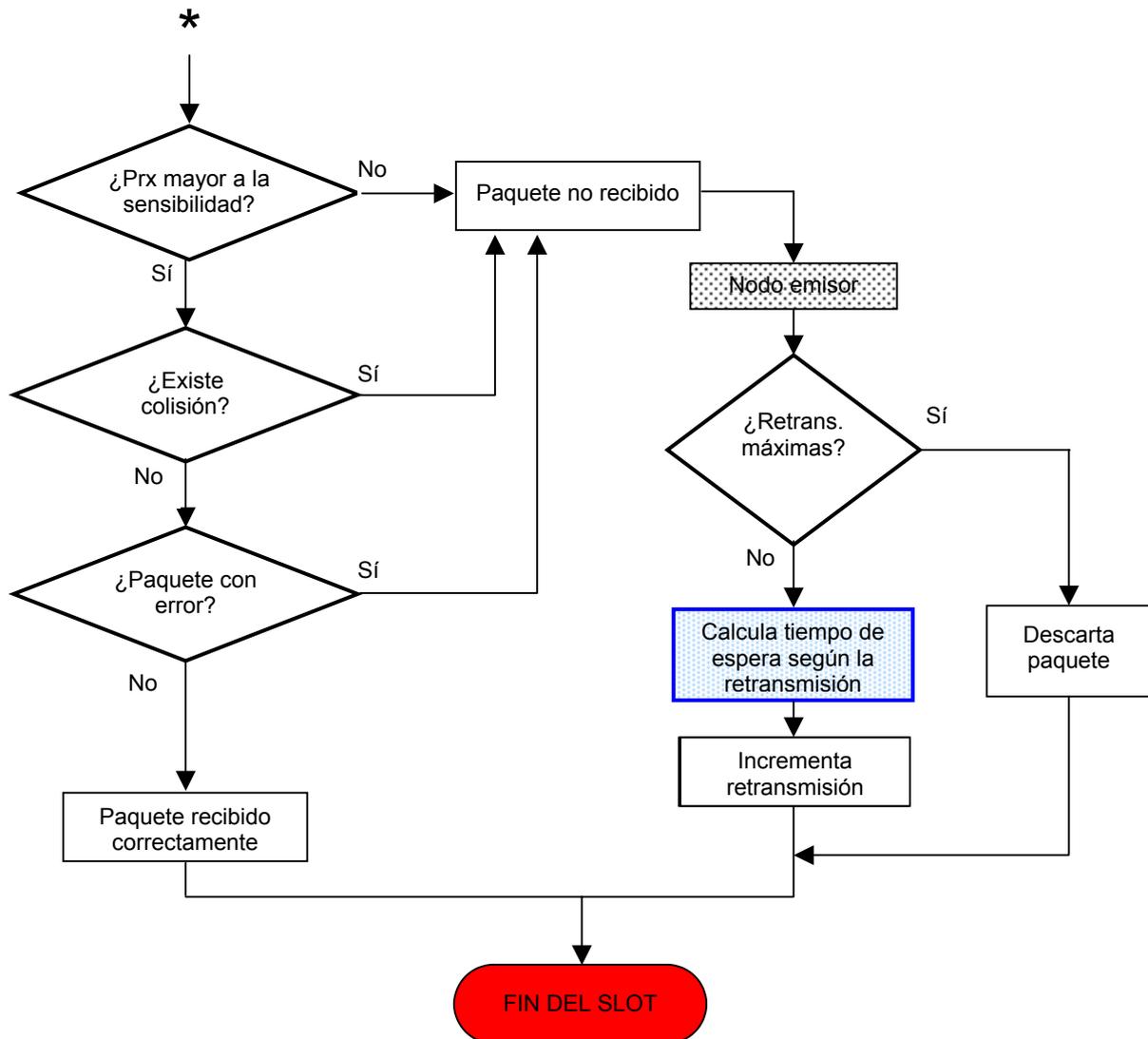


Fig. 2.5 Diagrama de flujo de las transmisiones del sistema

Como se observa en el diagrama de flujo 2.5, en cada unidad de tiempo, los nodos pueden generar paquetes según el modelo de tráfico descrito en el apartado 2.2.5. Para transmitir es necesario que los nodos tengan paquetes en la cola y que además no se encuentren en tiempo de espera a causa de una retransmisión. Si estas dos condiciones se cumplen los nodos comprueban si es la primera vez que intenta transmitir el paquete; si es así, han de elegir un nodo destino; si no, transmiten el paquete hacia el mismo destino que en los intentos previos. En el caso que el nodo se encuentre en tiempo de espera, escucha el canal y si no detecta actividad decreta el tiempo.

Una vez se han realizado las transmisiones, los nodos destino comprueban las recepciones. Estas transmisiones se reciben correctamente si el paquete llega por encima de la sensibilidad, no colisiona con otra transmisión y no contiene error debido al canal. Si no se cumple una de estas tres condiciones, el paquete no se recibe. Entonces, el nodo emisor comprueba si se han realizado las 6 retransmisiones máximas posibles. En el caso que sí se hayan realizado,

el paquete se elimina del sistema. En el caso que no se hayan realizado, el nodo emisor calcula el tiempo que deberá esperar antes de volver a intentar el envío del paquete según el número de retransmisión en el cual se encuentre e incrementa el número de retransmisión.

Este procedimiento de actuación del protocolo MAC para el cálculo del tiempo de espera en las retransmisiones es el que se modifica con las técnicas de *Cross-Layer* propuestas que se describen en el capítulo 3.

Finalmente, en la tabla 2.3 se resumen los parámetros utilizados en el sistema.

Tabla 2.3. Resumen de los parámetros del escenario de estudio

Parámetros		Valores
Tamaño del escenario		Cuadrado en 2D de lado variable, desde 100mx100m hasta 400mx400m
Frecuencia de transmisión		2,4 GHz
Nodos	Cantidad	Variable desde 5 nodos hasta 100 nodos
	Posición inicial	Aleatoria y uniforme dentro del escenario
	Movimiento	Rectilíneo de dirección aleatoria uniforme y módulo constante de 1,5 km/h
	Tamaño de cola	500 paquetes (250.000 bytes)
Modelo de tráfico	Tamaño de paquete	Constante a 500 bytes
	Tasa binaria	Constante a 11 Mbps
	Probabilidad de generar mensaje	De 0,0004 a 0,04
	Cantidad de paquetes por mensaje generado	Entre 1 y 4 paquetes/u.t.
Destino de las transmisiones		Aleatorio y uniforme entre los nodos existentes
Modelo de transmisión y canal	Potencia de transmisión	20 dBm
	Ganancia de antenas	0 dB (omnidireccionales)
	Atenuación	Distancia + <i>shadowing</i> lognormal
	Tiempo de coherencia	72 ms
Sensibilidad		-90 dBm
PER		Según SNR
Protocolo MAC		<i>Aloha</i> ranurado

CAPÍTULO 3. TÉCNICAS *CROSS-LAYER* PROPUESTAS

3.1. Introducción

Una vez definido el escenario de referencia de la red local inalámbrica con arquitectura *ad-hoc*, en el presente capítulo se describen las técnicas *Cross-Layer* propuestas en el proyecto.

Como se ha explicado en el capítulo 1 apartado 1.5, las técnicas *Cross-Layer* se basan en un intercambio de información entre las capas del modelo OSI que forman un sistema de comunicaciones. El objetivo que se pretende alcanzar introduciendo estas técnicas de *Cross-Layer* en un sistema de comunicaciones, es mejorar la eficiencia y el rendimiento de dicho sistema optimizando el uso de los recursos disponibles. Es decir, el espectro radioeléctrico y la batería de los terminales inalámbricos.

Se ha de remarcar que para realizar este intercambio de información entre las capas involucradas en las técnicas de *Cross-Layer* se requiere señalización adicional. Así, se deberá reservar un canal de control para esta señalización.

Así, las técnicas de *Cross-Layer* estudiadas en este trabajo se basan en el traspaso de información de la capa física (PHY) a la capa de enlace, en concreto a la capa de control de acceso al medio (MAC). Estas dos capas son contiguas en la pila OSI del sistema, por lo que el traspaso de información es inmediato. Entonces, según la información enviada, se varían aspectos que controlan el acceso al medio adaptando las transmisiones al estado del canal inalámbrico en un determinado instante.

El método propuesto en este proyecto para obtener las mejoras de eficiencia y de rendimiento en el sistema de comunicaciones mediante las técnicas *Cross-Layer*, es conseguir reducir el número de paquetes que no se reciben intentando mantener o aumentar los paquetes recibidos correctamente por el destino. Es decir, aumentar o mantener el caudal efectivo o *throughput* disminuyendo los paquetes no recibidos. Además, con estas técnicas se ha de intentar no perjudicar al sistema en otros parámetros como el retardo medio.

Consiguiendo reducir los paquetes no recibidos se optimiza el uso del espectro radioeléctrico y se consigue un ahorro de energía. Se intenta que una transmisión se realice únicamente si hay una probabilidad elevada de que sea correcta evitando así el malgasto de recursos y de las baterías de los nodos. Por otro lado, se trata de reducir en lo posible la probabilidad de que se genere una colisión, que siempre supone un malgasto de energía de transmisión de dos o más nodos.

3.2. Descripción de las técnicas propuestas

El protocolo MAC del sistema de comunicaciones de referencia, que no tiene implementada ninguna técnica *Cross-Layer*, define que una vez se ha transmitido un paquete si no consigue llegar correctamente al destino tiene hasta 6 retransmisiones para volver a intentarlo, esperando un tiempo aleatorio en cola, antes de volver a acceder al canal, que se elige según las ventanas de contienda (CW) especificadas en el estándar IEEE 802.11 (ver capítulo 2 apartado 2.3). Todos los paquetes que no han llegado correctamente utilizan las mismas CW independientemente del motivo por el que no han llegado y del estado del canal. Este aspecto es el que se propone modificar con las técnicas *Cross-Layer*.

Así, con las técnicas diseñadas, se crean distintas ventanas de contienda que separan a los paquetes que no llegan correctamente según la potencia recibida por el destino, es decir, según la SNR. De esta forma, se tiene en cuenta el estado del canal en el instante de la transmisión para determinar el nuevo acceso. Pero para que todo esto funcione es necesario que la capa física sea capaz de medir o estimar el valor de la SNR en cada transmisión.

Con esta modificación del algoritmo de contienda del protocolo MAC se pretende reducir el número de colisiones y el número de paquetes que llegan por debajo de la sensibilidad (umbral de potencia recibida) del nodo destino. Al reducir estos dos parámetros se consiguen reducir los paquetes no recibidos.

Para todas las técnicas *Cross-Layer* implementadas se crean cinco ventanas de contienda distintas, detalladas más adelante, que se diferencian por los intervalos de tiempos de espera que definen. El nodo origen selecciona una de estas ventanas para retransmitir un paquete según la potencia que ha recibido el nodo destino. Puesto que se considera un nivel de potencia de ruido constante, este valor de potencia recibida se puede utilizar directamente como estimación del nivel de relación señal a ruido (SNR) presente en cada transmisión. Estos intervalos de potencia se muestran en la tabla 3.1.

El objetivo final en todas las técnicas es procurar la minimización de la probabilidad de que dos o más nodos generen el mismo valor de *back-off* en la transmisión, aprovechando la información de capa física para separar los usuarios en grupos disjuntos en la medida de lo posible.

Tabla 3.1. Selección de la CW según el margen de potencia recibida (P_{rx})

Ventanas de contienda	Márgenes de potencia recibida
CW-1	$P_{rx} < \text{Sensibilidad}$
CW-2	$\text{Sensibilidad} < P_{rx} < \text{Sensibilidad} + 10 \text{ dB}$
CW-3	$\text{Sensibilidad} + 10 \text{ dB} < P_{rx} < \text{Sensibilidad} + 20 \text{ dB}$
CW-4	$\text{Sensibilidad} + 20 \text{ dB} < P_{rx} < \text{Sensibilidad} + 30 \text{ dB}$
CW-5	$P_{rx} > \text{Sensibilidad} + 30 \text{ dB}$

Como se observa en la tabla anterior, con esta separación por potencia recibida de los paquetes a retransmitir, se diferencia entre los paquetes que llegan por debajo de la sensibilidad (CW-1) y los paquetes que han colisionado o que contenían error (CW-2, CW-3, CW-4 y CW-5).

Como ya se ha explicado, la selección de la ventana de contienda se realiza según el nivel de potencia recibida por el nodo destino. Así, el diagrama de flujo de estas técnicas es el mostrado a continuación, figura 3.1. Este diagrama muestra el procedimiento que se debería realizar antes de “Calcula tiempo de espera según la retransmisión” en el flujograma 2.5 del capítulo 2.

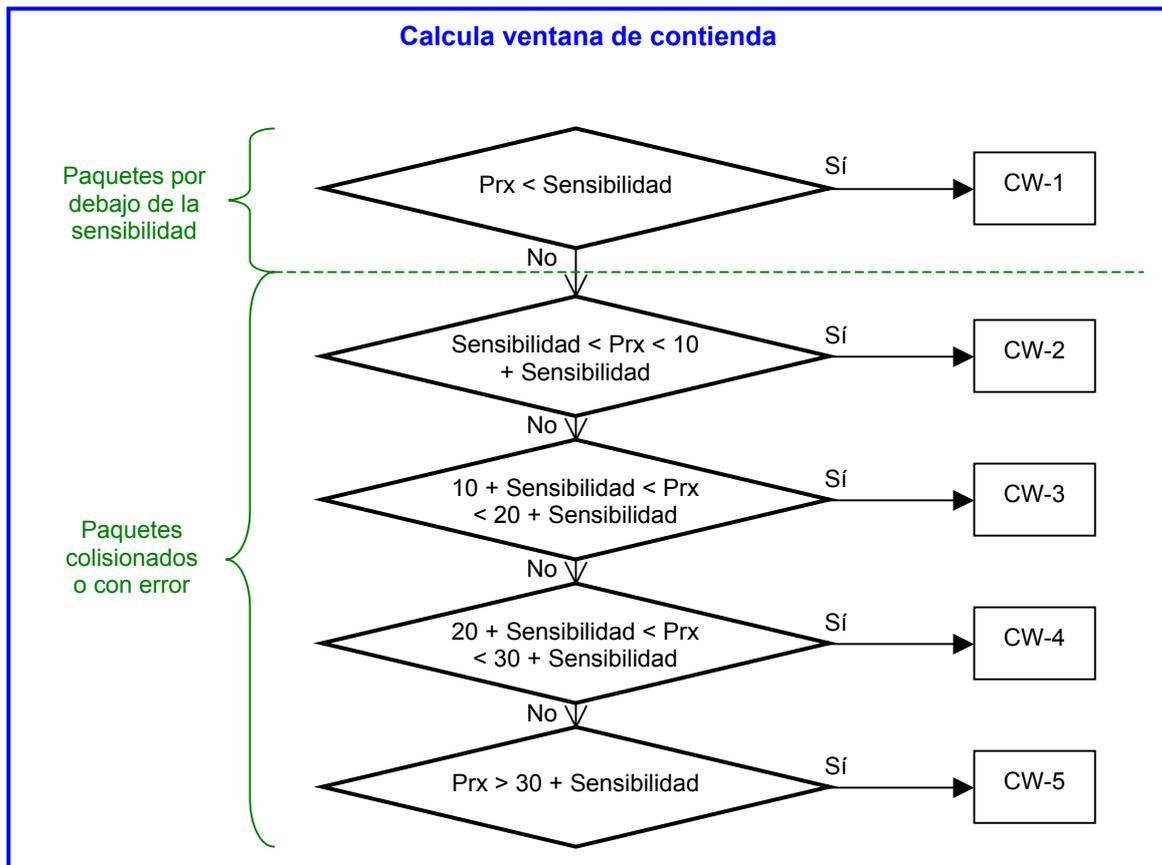


Fig. 3.1 Diagrama de flujo de las técnicas *Cross-Layer* propuestas

Se han propuesto 7 técnicas *Cross-Layer* clasificadas en dos grupos según el procedimiento llevado a cabo cuando un paquete se recibe por debajo de la sensibilidad, es decir, cuando la ventana de contienda seleccionada es la CW-1. Así, en el primer grupo, se encuentran tres de las técnicas diseñadas, denominadas 1A, 2A y 3A, que cuando un paquete llega por debajo de la sensibilidad se espera un tiempo aleatorio según los márgenes especificados. En el segundo grupo se clasifican las otras cuatro técnicas, denominadas 1B, 2B, 3B y 4B, y el procedimiento que especifican en la CW-1 es cambiar de destino. Es decir, en este segundo grupo no se reintenta el envío de un paquete al mismo destino cuando se ha detectado que la transmisión anterior

no ha sido recibida simplemente porque el nivel de potencia recibida no era suficiente (no porque se haya producido una colisión).

3.2.1. Técnica *Cross-Layer* 1A

Esta técnica *Cross-Layer* es la que presenta en las 5 ventanas de contienda los márgenes de tiempos de espera más similares a la ventana del sistema de referencia. En la tabla 3.2 se muestran las 5 ventanas de contienda aplicadas de esta técnica.

Tabla 3.2. Ventanas de contienda de la técnica 1A en unidades de tiempo

Reintentos	CW-1	CW-2	CW-3	CW-4	CW-5
1º	1 a 7	1 a 5	1 a 4	1 a 3	1 a 2
2º	1 a 15	1 a 13	1 a 11	1 a 9	1 a 7
3º	1 a 31	1 a 27	1 a 23	1 a 19	1 a 15
4º	1 a 63	1 a 56	1 a 49	1 a 42	1 a 35
5º	1 a 127	1 a 117	1 a 107	1 a 97	1 a 87
6º	1 a 255	1 a 235	1 a 215	1 a 195	1 a 175

Como se observa, la ventana CW-1, para transmisiones que han llegado por debajo de la sensibilidad, presenta los mismos márgenes de tiempos de espera que el sistema de referencia (ver capítulo 2 apartado 2.3). Las demás ventanas van disminuyendo los márgenes de espera con el objetivo de priorizar a aquellas transmisiones que han llegado con una SNR más elevada. Es decir, se priorizan las transmisiones en las que los nodos emisor y receptor se encuentran cerca y existe entre ellos menos atenuación debida al *shadowing*. En definitiva, se priorizan las transmisiones que tienen unas mejores condiciones del canal.

Así, en esta técnica, los paquetes que se han de retransmitir porque han colisionado o porque contenían error y han llegado con una potencia elevada, esperan menos tiempo en cola, entre retransmisiones, que el resto de paquetes. Cuanto menos tiempo esperen, más paquetes con potencias altas se transmitirán, y como son paquetes que tienen mayor probabilidad de llegar correctamente al destino es posible que se consiga aumentar el *throughput* del sistema, además de disminuir el retardo medio.

Por otra parte, con las cinco ventanas de contienda que separan a las transmisiones por la potencia recibida, existe la posibilidad de disminuir las colisiones del sistema, consiguiendo así, el objetivo de las técnicas *Cross-Layer*.

3.2.2. Técnica *Cross-Layer* 2A

Esta segunda técnica *Cross-Layer* se ha diseñado con los mismos objetivos que la técnica anterior, pero además se pretenden mejorar aquellos aspectos en los que la técnica 1A puede dar malos resultados.

Las ventanas de contienda de esta técnica 2A son bastante distintas a las del sistema de referencia. En la tabla 3.3 se muestran estas 5 ventanas de contienda.

Tabla 3.3. Ventanas de contienda de la técnica 2A en unidades de tiempo

Reintentos	CW-1	CW-2	CW-3	CW-4	CW-5
1º	1 a 255	16 a 35	8 a 15	3 a 7	1 a 2
2º	1 a 255	36 a 87	16 a 35	8 a 15	1 a 7
3º	1 a 255	88 a 175	36 a 87	16 a 35	1 a 15
4º	1 a 255	176 a 215	88 a 175	36 a 87	1 a 35
5º	1 a 255	216 a 255	176 a 215	88 a 175	1 a 87
6º	1 a 255	256 a 512	216 a 255	176 a 215	1 a 175

Como se observa en estas cinco CW, también se priorizan las transmisiones con mayor potencia recibida, puesto que son los que tienen menores márgenes en los tiempos de espera. Pero en este caso, los márgenes entre las distintas ventanas de contienda no se solapan, haciendo que dos paquetes que han colisionado tengan una probabilidad menor de volver a colisionar.

En esta técnica también se han variado los márgenes de tiempos de espera de la CW-1. Ahora los márgenes siempre van de 1 a 255 independientemente del número de retransmisión en que se encuentre un paquete. Esta ventana se ha diseñado así para dar el mayor tiempo de espera posible a una transmisión que ha llegado por debajo de la sensibilidad y que sólo llegará bien si los nodos se acercan lo suficiente o si cambian las condiciones del canal.

Si el motivo de la insuficiente potencia recibida es por la distancia de los nodos, cuanto más tiempo se espere entre las retransmisiones más probabilidad tendrán de llegar correctamente, ya que el movimiento de los nodos es lento. Si el motivo de no llegar al límite de potencia recibida es por el mal estado del canal entre los nodos, dando un tiempo de espera elevado es posible que el estado del canal cambie favorablemente, puesto que el tiempo de coherencia del canal es de 200 unidades temporales equivalente a 73 ms (ver capítulo 2 apartado 2.2.7.3).

Así, priorizando los paquetes con mayor potencia, disminuyendo la probabilidad de colisión y disminuyendo la probabilidad de que una transmisión vuelva a llegar por debajo de la sensibilidad, esta técnica puede introducir mejoras en el rendimiento del sistema, aumentando el *throughput*.

3.2.3. Técnica *Cross-Layer* 3A

La técnica *Cross-Layer* 3A es casi igual que la 2A, ya que las ventanas de contienda no son solapadas y las transmisiones que han llegado por debajo de la sensibilidad siempre tienen el intervalo de tiempos de espera máximo, de 1 a 255. Pero en este caso, las ventanas CW-2, CW-3, CW-4 y CW-5 están intercambiadas. En la tabla 3.4 se muestran los márgenes de espera de las ventanas de contienda de esta técnica *Cross-Layer*.

Tabla 3.4. Ventanas de contienda de la técnica 3A en unidades de tiempo

Reintentos	CW-1	CW-2	CW-3	CW-4	CW-5
1º	1 a 255	1 a 2	3 a 7	8 a 15	16 a 35
2º	1 a 255	1 a 7	8 a 15	16 a 35	36 a 87
3º	1 a 255	1 a 15	16 a 35	36 a 87	88 a 175
4º	1 a 255	1 a 35	36 a 87	88 a 175	176 a 215
5º	1 a 255	1 a 87	88 a 175	176 a 215	216 a 255
6º	1 a 255	1 a 175	176 a 215	216 a 255	256 a 512

Como se observa en la tabla anterior, en esta técnica 3A, se priorizan aquellos paquetes que han llegado por encima de la sensibilidad del nodo destino pero que se han recibido con una SNR menor. Este es el efecto que se pretende en esta técnica al intercambiar las ventanas de contienda para las transmisiones que han colisionado o que contienen error.

Los nodos emisor y receptor se mueven, pero pueden acercarse o alejarse. Entonces, si las transmisiones que llegan por encima de la sensibilidad pero muy cerca del límite esperan un tiempo elevado para ser retransmitidas, es más probable que en el siguiente intento ya no lleguen por encima de la sensibilidad, pasando a ser transmisiones de la CW-1. Intercambiando las ventanas de contienda se pretende no perjudicar a estas transmisiones y así, no disminuir las transmisiones que pueden llegar correctamente si no vuelven a colisionar.

Además, aunque las transmisiones que llegan con una potencia elevada deban esperar más tiempo, es poco probable que pasen a ser transmisiones por debajo de la sensibilidad ya que se trata de transmisiones entre nodos que se encuentran cerca, y aunque se separen, seguirán estando dentro del área de cobertura.

3.2.4. Técnica *Cross-Layer* 1B

La técnica 1B tiene las mismas ventanas de contienda para paquetes que han colisionado o paquetes que contenían error, CW-2, CW-3, CW-4 y CW-5, que la técnica 1A. La única diferencia es que en la ventana CW-1, ya no se elige un tiempo de espera dentro de los márgenes especificados en el sistema de referencia, sino que se cambia de destino. En la tabla 3.5 se muestran las cinco ventanas de contienda diseñadas para esta técnica *Cross-Layer*.

Tabla 3.5. Ventanas de contienda de la técnica 1B en unidades de tiempo

Reintentos	CW-1	CW-2	CW-3	CW-4	CW-5
1º	Cambiar de destino	1 a 5	1 a 4	1 a 3	1 a 2
2º		1 a 13	1 a 11	1 a 9	1 a 7
3º		1 a 27	1 a 23	1 a 19	1 a 15
4º		1 a 56	1 a 49	1 a 42	1 a 35
5º		1 a 117	1 a 107	1 a 97	1 a 87
6º		1 a 235	1 a 215	1 a 195	1 a 175

Este cambio en la ventana CW-1, se realiza con el objetivo de disminuir el retardo medio, la ocupación de las colas y los paquetes que llegan por debajo de la sensibilidad.

Los paquetes que se reciben por debajo de la sensibilidad sólo llegarán bien si los nodos se acercan y si las condiciones del canal no desfavorecen la transmisión. Pero considerando que el movimiento de los nodos es muy lento y que no siempre se acercan, la probabilidad de llegar correctamente al destino mediante las retransmisiones es baja. Así, un gran número de estos paquetes llegará a la sexta retransmisión y finalmente se eliminarán del sistema. Por este motivo, se propone cambiar de destino cuando una transmisión se sitúa en la CW-1. Además, ahora estas transmisiones no esperan entre los diferentes reintentos.

Al cambiar de destino existe mayor probabilidad de poder entregar correctamente la transmisión. Además, en esta técnica el nodo emisor almacena para cada transmisión que ha llegado por debajo de la sensibilidad todos los nodos destinos. Así se evita realizar las retransmisiones hacia nodos que ya se habían intentado previamente y que no estaban dentro del área de cobertura. Sólo en casos en los que el número de retransmisiones es mayor al número de posibles destinos, por ejemplo un sistema con 5 nodos, se permite repetir destino en una retransmisión que ha llegado por debajo de la sensibilidad.

En el resto de ventanas de contienda, se producen los mismos efectos que en la técnica 1A. Se priorizan las transmisiones que llegan al destino con mayor SNR, y los márgenes de tiempos de espera están solapados. Pero además, es posible que en esta nueva técnica 1B sea mayor la probabilidad de colisionar, ya que existen más transmisiones en el sistema que pueden producir colisión.

3.2.5. Técnica Cross-Layer 2B

Esta técnica tiene las mismas ventanas que la técnica 2A excepto la CW-1 en la que se cambia de destino. El objetivo es obtener las mejoras potenciales que introduce la técnica 2A en cuanto a las colisiones y el *throughput* e introducir las posibles mejoras de la técnica 1B en cuanto al retardo medio, la ocupación en cola y los paquetes recibidos por debajo de la sensibilidad. La tabla 3.6 muestra las cinco ventanas de contienda de esta técnica 2B.

Tabla 3.6. Ventanas de contienda de la técnica 2B en unidades de tiempo

Reintentos	CW-1	CW-2	CW-3	CW-4	CW-5
1º	Cambiar de destino	16 a 35	8 a 15	3 a 7	1 a 2
2º		36 a 87	16 a 35	8 a 15	1 a 7
3º		88 a 175	36 a 87	16 a 35	1 a 15
4º		176 a 215	88 a 175	36 a 87	1 a 35
5º		216 a 255	176 a 215	88 a 175	1 a 87
6º		256 a 512	216 a 255	176 a 215	1 a 175

El funcionamiento para el cambio de destino es el mismo que se ha explicado en la técnica 1B, y en cuanto a las ventanas de contienda restantes, se favorecen las transmisiones que llegan con una potencia más elevada al destino y tienen intervalos de tiempos de espera no solapados.

3.2.6. Técnica Cross-Layer 3B

Esta técnica introduce el cambio de destino en la ventana CW-1 y presenta las mismas ventanas de contienda cuando una transmisión colisiona o contiene error que la técnica 3A. La tabla 3.7 muestra las CW de esta nueva técnica 3B.

Tabla 3.7. Ventanas de contienda de la técnica 3B en unidades de tiempo

Reintentos	CW-1	CW-2	CW-3	CW-4	CW-5
1º	Cambiar de destino	1 a 2	3 a 7	8 a 15	16 a 35
2º		1 a 7	8 a 15	16 a 35	36 a 87
3º		1 a 15	16 a 35	36 a 87	88 a 175
4º		1 a 35	36 a 87	88 a 175	176 a 215
5º		1 a 87	88 a 175	176 a 215	216 a 255
6º		1 a 175	176 a 215	216 a 255	256 a 512

En esta técnica las ventanas de contienda no están solapadas, y se priorizan los paquetes que llegan por encima de la sensibilidad del nodo destino, pero muy en el límite. Con ello, se introducen las mismas ventajas potenciales que en la técnica 3A, en cuanto a los paquetes que colisionan. Además, con el cambio de destino en la primera ventana, se pretenden los objetivos de reducir el retardo medio, disminuir la ocupación de las colas y disminuir los paquetes recibidos por debajo de la sensibilidad.

3.2.7. Técnica *Cross-Layer* 4B

La última técnica *Cross-Layer* propuesta, no sólo cambia los márgenes de tiempo de espera o la metodología a seguir si una transmisión ha llegado por debajo de la sensibilidad con respecto del sistema de referencia, sino que además, varía el número de reintentos.

Esta técnica está diseñada para sistemas de comunicaciones en los que no interesa eliminar los paquetes del sistema a causa de las retransmisiones. Es decir, en sistemas en los que interesa entregar un paquete a un destino sin importar que el retardo medio sea algo más elevado. Por ejemplo, tráfico sin altos requerimientos de calidad de servicio, como el tráfico de datos *best-effort*.

Las ventanas de contienda de esta técnica son las mismas que la técnica 2B, tal y como se muestra en la tabla 3.8. En las que los intervalos de tiempos de espera no son solapados, y se priorizan las transmisiones que llegan al destino por encima de la sensibilidad con mayor potencia, mayor SNR.

Tabla 3.8. Ventanas de contienda de la técnica 4B en unidades de tiempo

Reintentos	CW-1	CW-2	CW-3	CW-4	CW-5
1º	Cambiar de destino	16 a 35	8 a 15	3 a 7	1 a 2
2º		36 a 87	16 a 35	8 a 15	1 a 7
3º		88 a 175	36 a 87	16 a 35	1 a 15
4º		176 a 215	88 a 175	36 a 87	1 a 35
5º		216 a 255	176 a 215	88 a 175	1 a 87
6º		256 a 512	216 a 255	176 a 215	1 a 175

La diferencia de esta nueva técnica es que la condición del número máximo de retransmisiones cambia. Para todas las técnicas anteriores hay 6 retransmisiones como máximo aunque se varíe de destino, así, en escenarios con más de 6 posibles destinos únicamente se prueba hasta llegar al máximo de retransmisiones. Por ejemplo, si sucede que los cuatro primeros reintentos se ha cambiado de destino porque la transmisión era por debajo de la sensibilidad y en el quinto reintentó el paquete tiene una potencia superior a la sensibilidad, solamente se tendrá un único un intento más para entregar el paquete. Cabe la posibilidad que este paquete sufra una colisión o contenga error, con lo que este paquete se extraerá del sistema.

Con esta nueva técnica, la transmisión de un paquete que llega por debajo de la sensibilidad se puede reintentar con todos los posibles destinos y si algún destino está dentro del área de cobertura, se permiten hasta 6 reintentos más con el objetivo de entregar el paquete. Para ello, el nodo origen necesita almacenar todos los destinos a los que ha probado transmitir, y así, no repetir destino en las futuras retransmisiones. Además, debe almacenar el número de retransmisiones que ha realizado al mismo nodo destino

El diagrama de flujo de la figura 3.2 muestra el funcionamiento de esta técnica.

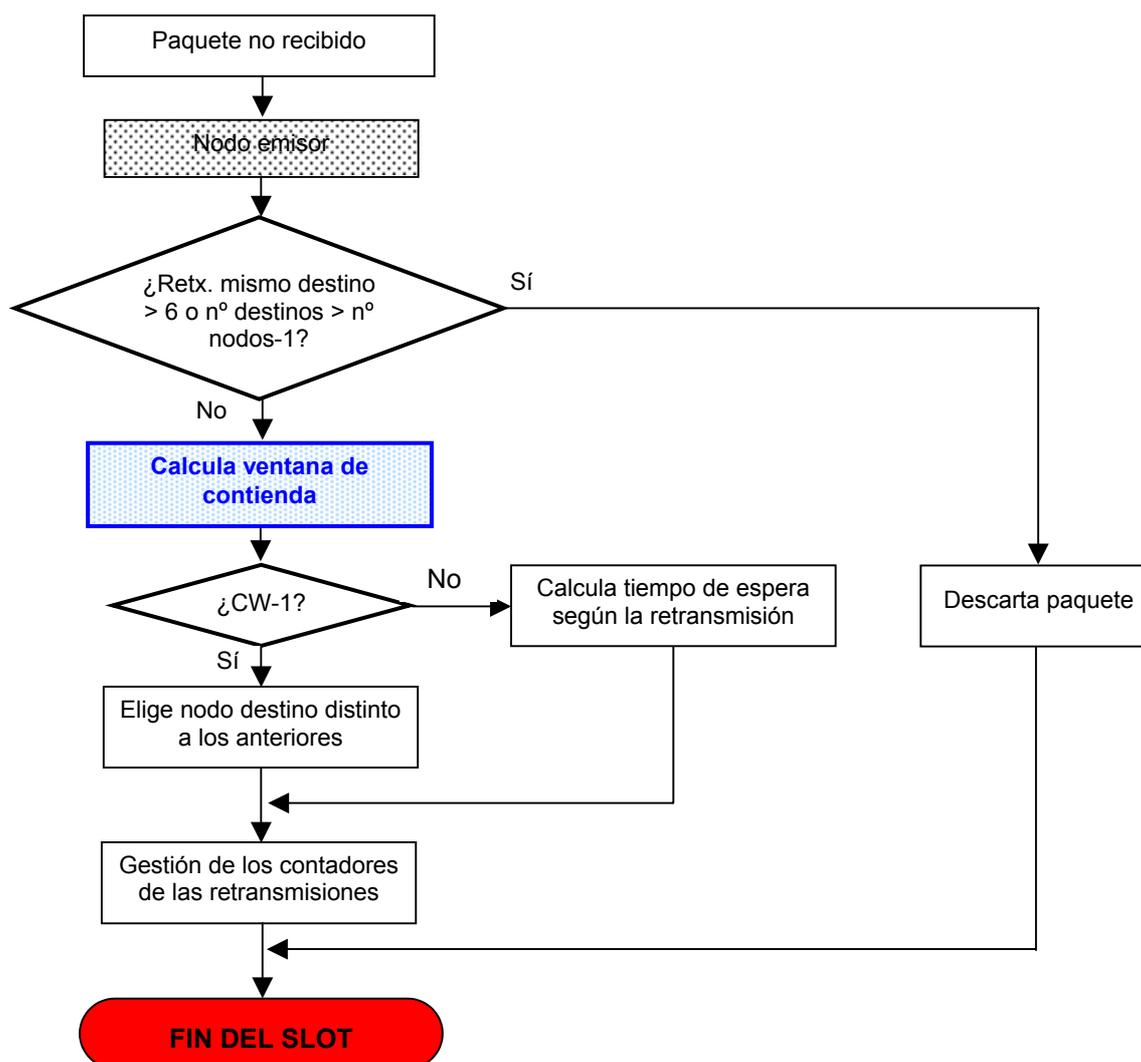


Fig. 3.2 Diagrama de flujo de la técnica *Cross-Layer 4B*

Cuando un paquete no se recibe, el nodo emisor comprueba si se supera el valor máximo definido para los dos contadores de las retransmisiones:

- Número de destinos intentados > N° de nodos-1
- Retransmisiones a un mismo destino > 6

Si se supera uno de los dos contadores, el paquete se elimina del sistema. En caso que no se supere ninguno, se ha de calcular la ventana de contienda según la potencia que recibe el nodo destino. Si la CW es la 1, el nodo origen ha de cambiar de nodo destino para la siguiente retransmisión; en cambio si es cualquiera de las otras 4 CW, el nodo origen debe calcular un tiempo aleatorio de espera dentro de los rangos especificados en la CW elegida.

Por último, el nodo origen debe gestionar el valor de los contadores de las retransmisiones. Si se cambia de destino, CW-1, el nodo incrementa el contador de destinos intentados e inicializa el contador de las retransmisiones a un mismo destino. Si la CW elegida es cualquiera de las otras 4, el nodo origen únicamente incrementa el contador de las retransmisiones a un mismo destino.

CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN DEL SIMULADOR

4.1. Introducción

En este capítulo se detalla la estructura general del software que se ha diseñado con el fin de crear un simulador de redes inalámbricas basadas en el estándar IEEE 802.11 sobre el que se han estudiado las técnicas *Cross-Layer* propuestas y descritas anteriormente. Además, también se detallan las cinco clases que lo componen, y las diferentes variables y funciones que forman estas clases.

Este software se ha realizado en el lenguaje de programación C++. El lenguaje C++ es considerado de los más potentes en la actualidad, ya que permite trabajar tanto en bajo como en alto nivel. Este lenguaje se diseñó como prolongación del lenguaje C, por lo que es más sencillo de aprender para programadores que ya han trabajado con C.

El lenguaje C++ (ver [16]) es un lenguaje en el que se aplica la programación orientada a objetos (*Object Oriented Programming*), metodología de programación que requiere un diseño exhaustivo, con el que se obtiene un aumento en la escalabilidad de los programas, se mejora la corrección de errores y el mantenimiento de las aplicaciones.

Una clase es una abstracción de datos (atributos), y operaciones (métodos) realizadas con estos. Por lo tanto, una clase está compuesta por diferentes variables, ya sean simples o complejas, y por funciones, las cuales operan con las diferentes variables.

Estas características del lenguaje, además de los conocimientos adquiridos anteriormente sobre el lenguaje C, han sido las causas por las que lenguaje elegido para programar el simulador del sistema es el lenguaje C++.

4.2. Estructura del programa

El simulador diseñado está formado por un programa principal que tiene implementadas diferentes funciones. Desde estas funciones se llaman a los diversos métodos y atributos que forman parte de las clases del programa.

Las cinco clases definidas en el programa son la clase CNodo, la clase CCola, la clase CCanal, la clase CTransmisión y la clase CEscenario. A continuación, en la figura 4.1, se muestran estas cinco clases del sistema y la relación existente entre ellas, así como la relación que existe entre el programa principal y las clases.

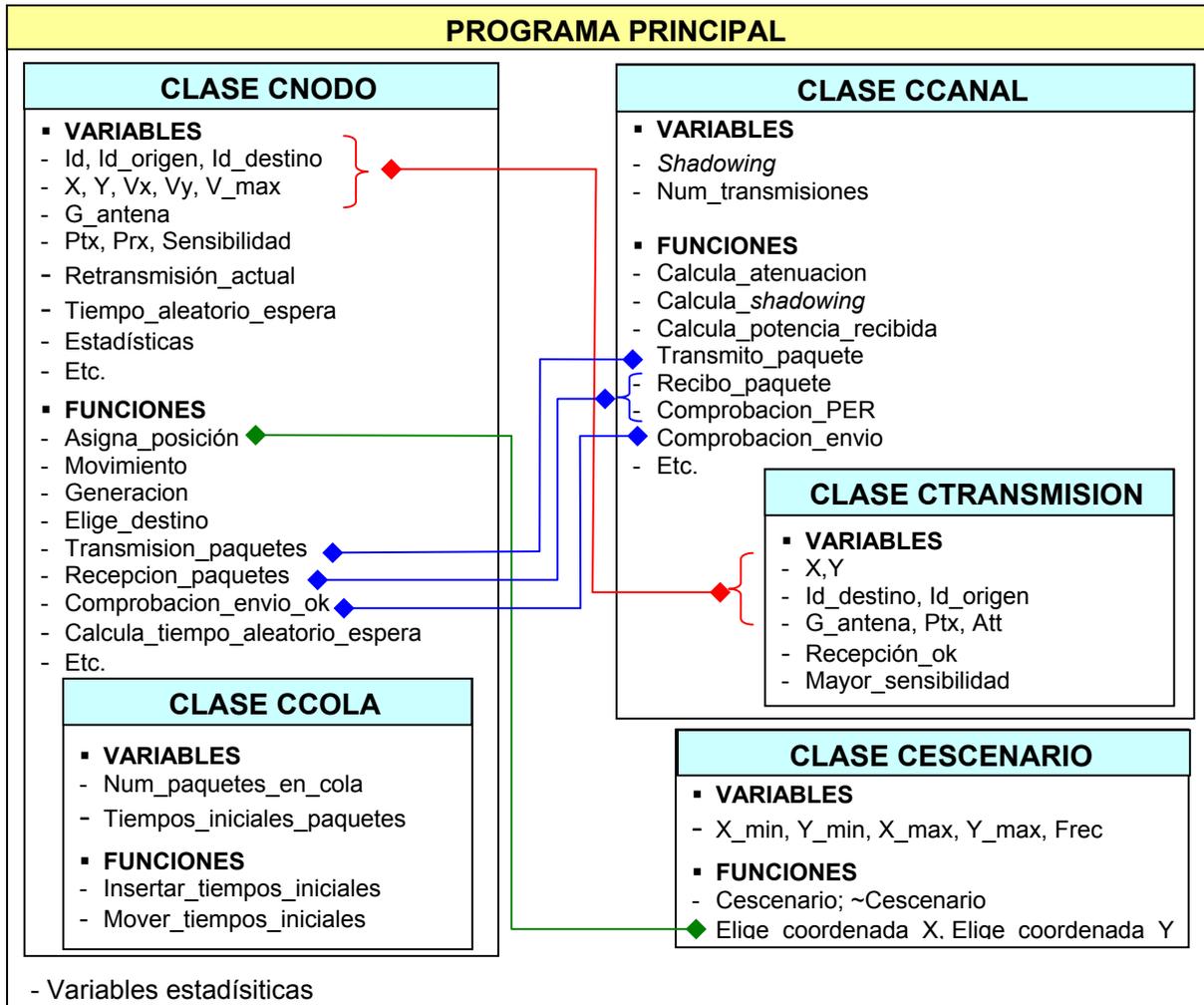


Fig. 4.1 Diagrama de relaciones entre las clases

Tal y como se muestra en la figura 4.1, se presentan algunas de las relaciones existentes entre las funciones de las diferentes clases que forman el programa.

En rojo se presentan las relaciones entre la clase CNodo y la clase CTransmision a través de la clase CCanal. En esta relación, se envían parámetros básicos de las transmisiones como los identificadores del nodo origen y destino y la posición, la ganancia de la antena y la potencia de transmisión del nodo emisor.

Las relaciones azules son funciones de la clase CNodo que llaman a otras funciones de la clase CCanal para realizar las transmisiones, recepciones y comprobaciones de las recepciones en el sistema.

Por último, la relación verde es la que une las clases CEscenario y CNodo. Esta relación permite asignar una posición aleatoria dentro del escenario a cada nodo del sistema.

4.2.1. El programa principal

El programa principal está formado por diferentes funciones y variables, que definen el funcionamiento global del sistema de redes inalámbricas diseñado.

4.2.1.1. Variables globales

Las variables globales definidas en el programa principal, almacenan los datos utilizados posteriormente para realizar el estudio y análisis del sistema, ya sea el de referencia, como las diferentes técnicas *Cross-Layer* propuestas.

- **Num_total_paquetes_generados:** número total de paquetes que se han generado en todo el sistema.
- **Num_total_paquetes_recibidos:** número total de paquetes que se han recibido correctamente por todos los nodos del sistema.
- **Num_total_colisiones:** número total de colisiones que se producen en el sistema.
- **Num_total_paquetes_debajo_sensibilidad:** número total de paquetes enviados con potencia de recepción por debajo del umbral (sensibilidad), de todo el sistema.
- **Num_total_paquetes_descartados:** número total de paquetes que se eliminan del sistema por superar el número máximo de retransmisiones y no han sido recibidos correctamente.

En este punto, solamente se han enumerado algunas de ellas, las más significativas. Su uso en la obtención y cálculo de resultados se encuentra definido con más detalle en el apartado 5.1 del capítulo 5.

4.2.1.2. Funciones y estructura del programa principal

La estructura general del programa está formada por diferentes funciones que siguen un orden secuencial de ejecución. Esta estructura detallada a continuación, es la que sigue el simulador diseñado para el sistema referencia del estudio.

En primer lugar, el programa entra en la fase de inicialización de todas las variables globales del sistema que funcionan como contadores. Todas estas acciones se realizan en la función *Inicializacion_sistema*. El siguiente paso es la asignación de la posición inicial a los nodos, dando valor a las componentes X e Y de cada nodo. La función encargada de llevar a cabo esta acción es la función *posicion_nodos*.

Después de realizar los dos primeros pasos, el programa entra en el bucle principal que se acaba cuando el periodo de simulación llega a su fin, a su

última iteración. La duración de la simulación es un parámetro variable a escoger, pero en todo caso deberá ser siempre lo suficientemente grande para asegurar que los resultados obtenidos son significativos del comportamiento medio del sistema.

A continuación, se detallan las diferentes acciones que se llevan a cabo dentro del bucle, para cada unidad de tiempo.

- **1^{er} Paso:** inicialización de las diferentes variables y parámetros de los nodos. De esta forma, se evita almacenar valores erróneos en las variables que puede conducir a resultados de comportamiento no deseados en el sistema. La función implicada en este paso es `inicio_iteración`.
- **2^o Paso:** se calculan los paquetes generados por cada nodo así como el estado de ocupación en el que se encuentra la cola de cada uno. La función relacionada con este paso es `generación_paquetes`. Esta función utiliza las funciones de la `CNodo` `Estoy_generando` y `Generación` (ver apartado 4.2.2).
- **3^{er} Paso:** el sistema entra en la fase de transmisión. La función encargada de esta fase es la denominada `transmision_entre_nodos` que realiza la transmisión de paquetes. Para que la transmisión se lleve a cabo se deben cumplir dos premisas:
 - La cola del nodo debe tener algún paquete.
 - El nodo no debe encontrarse en tiempo de espera (*back-off*).

En esta fase se utiliza la función `Elige_destino` cuando el nodo se encuentra en su primera transmisión.

- **4^o Paso:** en esta fase se realiza el control de recepción, es decir, se comprueba si el paquete ha sido recibido correctamente o no.
- **5^o Paso:** si la recepción no ha sido exitosa, en esta fase se realiza la selección de las ventanas de contienda y tiempo de *back-off* para la siguiente retransmisión.

Estos dos últimos pasos, se implementan en las funciones `Recepciones` y `Comprueba_envio` del programa principal.

- En la función `Recepciones` se calcula si los diferentes paquetes enviados, se han recibido correctamente. Para llevar a cabo este cálculo, se hace uso de otras funciones de la clase `nodo`, como son `Recepcion_paquetes` y `Recepcion_ok` (ver apartado 4.2.2).
- En la función `Comprueba_envio`, se hace uso de la función de la clase `nodo` `Comprobacion_envio_ok` para comprobar el estado de las recepciones (ver apartado 4.2.2).

- **6º Paso:** la siguiente fase consiste en darle movilidad a los nodos a través de la función `movimiento_nodos`.
- **7º Paso:** este es el último paso del bucle, donde se comprueba si el periodo de simulación ha finalizado. Si no es así, se vuelve a comenzar el bucle.
- **8º Paso:** se realiza el cálculo de las estadísticas del sistema.

En el caso de los sistemas que implementan las técnicas de *Cross-Layer*, la estructura es similar, pero con algunos cambios que intentan mejorar el funcionamiento de éste. Estos cambios, se producen especialmente, en las ventanas de contienda utilizadas en el momento de retransmitir un paquete que no ha sido recibido correctamente. En el capítulo 3, se explica con detalle cada una de las técnicas *Cross-Layer* aplicadas. A continuación, en la figura 4.2, se presenta el diagrama de flujo del programa principal.

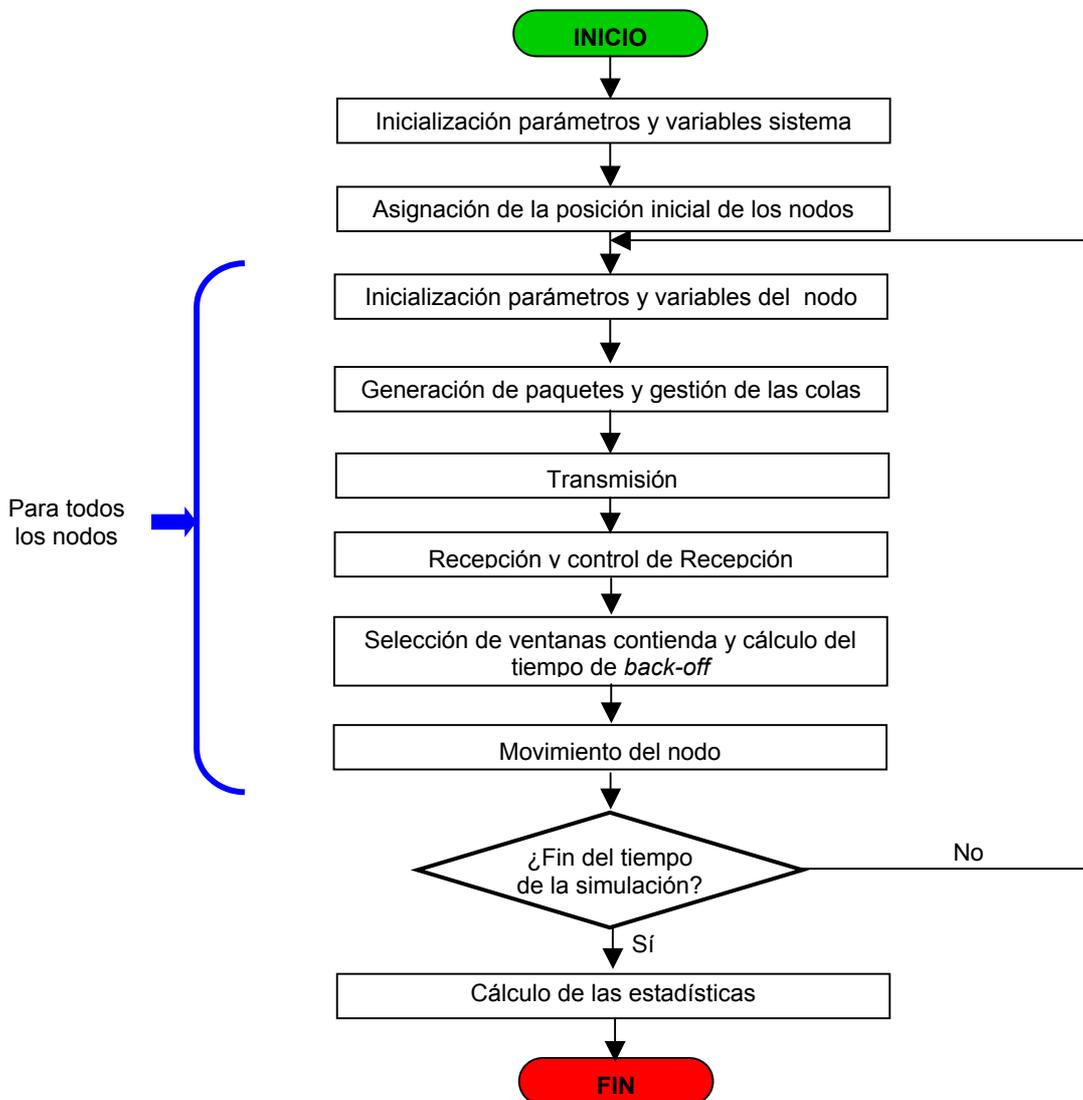


Fig. 4.2 Diagrama de flujo del programa principal

4.2.2. Clase CNode

Esta clase define el comportamiento de los nodos que forman parte del sistema, simulando desde su movimiento hasta sus transmisiones y recepciones de paquetes. A continuación se definen los atributos (parámetros y variables) y funciones que la componen.

4.2.2.1. Atributos de la Clase CNode

- **Identificadores** (Id, Id_origen, Id_destino): variables numéricas que identifican a los nodos, así como la función que ocupan en la transmisión.
- **Posición inicial y velocidad** (X, Y, Vx, Vy, V_max): variables que proporcionan la información de las componentes de la posición inicial y velocidad asignadas al nodo, así como el módulo máximo de la velocidad.
- **Ganancias** (G_antena): ganancia de la antena de los nodos, ya sea transmisora o receptora.
- **Potencias** (Ptx, Prx, Sensibilidad): variables que almacenan las diferentes potencias que intervienen en una transmisión, potencia transmisora, receptora y sensibilidad.
- **Tamaño_paquete**: tamaño que tienen cada uno de los paquetes generados por el nodo.
- **Cola**: variable de la clase CCola que define las características de la memoria de almacenamiento del nodo. El apartado 4.2.3 detalla esta clase.
- **Generación y transmisión** (Prob_generar_paquete, Transmitiendo): variables que informan si el nodo genera paquetes y si se encuentra en estado de transmitir.
- **Estado retransmisión** (Retransmisión_actual, Tiempo_aleatorio_espera, Num_max_retransmisiones): variables que proporcionan información sobre las retransmisiones del nodo. Es decir, retransmisión actual en la que se encuentra el nodo, tiempo que debe esperar hasta la próxima retransmisión y número máximo de retransmisiones que se permiten.
- **Estadísticas** (Num_paquetes_generados, Num_paquetes_recibidos, Num_colisiones, etc.): variables que almacenan información del estado de las diferentes transmisiones.

4.2.2.2. Funciones de la Clase CNode

En este punto se detallan las diferentes funciones que forman la clase nodo y que nos resumen su comportamiento.

- ✓ **Funciones de posición y movimiento** (*Asigna_posicion*, *Movimiento* y *Asigna_velocidad*): funciones que asignan la posición inicial (X, Y) y velocidad (V_x , V_y) del nodo. Además de simular el movimiento de los nodos, desplazando su posición a través de las variables de la velocidad calculadas, V_x y V_y . (ver apartado 2.2.4.2, capítulo 2).
- ✓ **Funciones de generación de paquetes** (*Estoy_generando* y *Generacion*): con estas funciones se calcula la capacidad de generar paquetes del nodo. Si el resultado obtenido es positivo, se calcula el número de paquetes que se generan. Tanto el cálculo del estado de generar como el número de paquetes generados, se realiza de forma aleatoria.
- ✓ **Elige_destino**: en esta función se le asigna al nodo emisor un nodo destino para realizar la transmisión del paquete (ver apartado 2.2.6, capítulo 2).
- ✓ **Función Transmision_paquetes**: esta función se encarga de pasar los parámetros de la transmisión correspondiente a la función de la clase *CCanal* encargada de almacenar estos valores (ver apartado 4.2.4.2), tales como los identificadores de los nodos implicados en la transmisión, potencia de transmisión y ganancia de la antena transmisora.
- ✓ **Funciones de Recepción** (*Recepcion_paquetes* y *Recepcion_ok*): estas dos funciones participan en el proceso de recepción de los paquetes. Con ellas se calcula si el paquete se recibe correctamente o no.

Si el paquete se recibe correctamente, se incrementa la variable *Num_paquetes_recibidos*. Si el paquete no se recibe correctamente, se incrementa la variable de estadísticas relacionada con el motivo que ha hecho que el paquete no haya sido recibido correctamente:

- Se incrementa la variable *Num_paquetes_recibidos_erróneos* cuando el paquete no se recibe porque contiene error (ver apartado 4.2.4.2).
 - Se incrementan *Num_colisiones* y *Num_paquetes_colisionados*, si el paquete no se ha recibido porque ha sufrido alguna colisión.
 - Se incrementa la variable *Num_paquetes_recibidos_debajo_sensibilidad* cuando el paquete no se ha recibido porque no ha superado el umbral de potencia de recepción del nodo (ver apartado 4.2.4.2).
- ✓ **Función Comprobacion_envio_ok**: a través de esta función se comprueba si el nodo ha enviado correctamente el paquete.

Si la transmisión es correcta, se decrementa el número de paquetes en cola y se calcula el retardo del paquete. Si la transmisión no es correcta, se aumenta el valor de *retransmision_actual*, y se calcula el tiempo de espera hasta la nueva retransmisión. En caso que la retransmisión supere el número máximo de retransmisiones, el paquete será extraído de la cola y eliminado del sistema.

- ✓ **Función `Calcula_tiempo_aleatorio_espera`:** esta función se encarga de calcular el tiempo de espera hasta el siguiente intento de envío del nodo. El cálculo del tiempo es aleatorio dentro del intervalo de tiempo especificado en la ventana de contienda. Este tiempo depende del número de retransmisión en el que se encuentra el paquete.

4.2.3. Clase `CCola`

Esta clase está relacionada con la clase `CNodo`, ya que en cada objeto nodo se define una variable del tipo `Cola`, que representa el *buffer* de almacenamiento.

A continuación, se detallan los atributos y funciones que definen el comportamiento de esta clase.

4.2.3.1. *Atributos de la Clase `CCola`*

- **`Num_paquetes_en_cola`:** esta variable almacena el número de los paquetes que existen en cola, es decir, guarda la ocupación de la cola.
- **`Tiempos_iniciales_paquetes`:** vector que almacena las unidades de tiempo en las que los paquetes han sido introducidos en la cola. Esta variable se utiliza para calcular el retardo de un paquete correcto.

4.2.3.2. *Funciones de la Clase `CCola`*

- ✓ **Funciones relacionadas con los tiempos de los paquetes** (`Insertar_tiempos_iniciales` y `mover_tiempos_iniciales`): estas funciones marcan cada paquete con la unidad de tiempo en que entran en la cola y desplazan los tiempos iniciales de los paquetes de forma sincronizada con la ocupación de la cola. Estas acciones se realizan cuando un paquete se ha enviado correctamente o cuando se elimina de la cola.

4.2.4. Clase `CCanal`

En esta clase se detalla las características y funcionamiento del canal definido en el simulador para redes inalámbricas.

4.2.4.1. *Atributos de la Clase `CCanal`*

- **`Transmisiones`:** variable de la clase `CTransmision` donde se almacenan los parámetros y variables principales de cada transmisión. Esta clase puede almacenar tantas transmisiones como nodos hay en el sistema.

- **Shadowing**: es una matriz que almacena la atenuación aleatoria calculada para cada transmisión. Esta matriz se actualiza cada 200 unidades de tiempo (72 ms).

4.2.4.2. Funciones de la Clase CCanal

- ✓ **Funciones implicadas en la atenuación** (*Calcula_shadowing*, *Gauss*, *Calcula_distancia*, y *Calcula_atenuación*): estas funciones están relacionadas entre sí para realizar el cálculo de la atenuación total producida entre dos nodos de una transmisión.

Mediante la función *Calcula_atenuación* se obtiene la atenuación total de una transmisión. Esta función suma la componente derivada de la distancia entre los nodos (función *Calcula_distancia*) y la componente derivada del *shadowing* (funciones *Calcula_shadowing* y *Gauss*).

- ✓ **Función *Calcula_potencia_recibida***: esta función calcula la potencia recibida por el nodo destino, donde intervienen las ganancias de las antenas, potencia de transmisión y la atenuación total del canal.
- ✓ **Función *Transmito_paquete***: es la función encargada de almacenar los parámetros principales de todas transmisiones en la clase *CTransmisiones* (ver apartado 4.2.5.1).
- ✓ **Función *Recibo_paquete***: esta función se encarga de controlar si el paquete se ha recibido o no. Para ello se realizan los siguientes pasos:

1º Se mira si el nodo en cuestión, es destino de algunas de las transmisiones.

2º Si se cumple el paso 1, se calculan las potencias de recepción del nodo y se almacenan en el objeto *Transmisión*.

3º Se compara la potencia *Prx* de cada una de las transmisiones en las cuales participa el nodo como destino, con el umbral de sensibilidad. Existen 3 posibilidades:

- Ninguna de las transmisiones tiene una potencia *Prx* superior a la sensibilidad por lo que no se recibe ningún paquete.
- Sólo una de las transmisiones obtiene una *Prx* superior al umbral, entonces el paquete se recibe correctamente.
- Varias transmisiones tienen una potencia de recepción superior al umbral. En este caso, se produce colisión y no se recibe ningún paquete.

- ✓ **Funciones implicadas en la PER:** (Comprobacion_PER y Error_paquete): con estas funciones se calcula si el paquete contiene error debido al canal o no.

La función Comprobación_PER devuelve un *booleano* según si existe error o no. Este cálculo lo realiza a través de la función Error_paquete y en función de la Prx. Es decir, existen cuatro intervalos de potencias, y a cada uno se le ha asignado una probabilidad de error como se ha explicado en el capítulo 2 apartado 2.2.9. Una vez asignada la correspondiente PER, se compara con un número calculado de forma aleatoria. Si este valor es menor al PER asignado significa que existe error en el paquete.

- ✓ **Función Paquetes_recibidos_debajo_sensibilidad:** en esta función, a partir de la potencia de recepción de la transmisión en cuestión, se calcula si el paquete llega por debajo de la sensibilidad. El resultado de esta función se utiliza en la función del nodo Recepción_ok.
- ✓ **Función Comprobacion_envio:** esta función devuelve valor verdadero en el caso de que la transmisión sea realizada con éxito. Para ello se comprueba el valor del campo Recepción_ok, perteneciente a la variable Transmisiones de la clase transmisiones (ver apartado 4.2.5.1).

4.2.5. Clase CTransmisión

En esta clase no se define ninguna función, simplemente se detallan una serie de variables que aportan la información necesaria de cada transmisión.

Como se ha comentado en el apartado 4.2.3, en la clase CCanal, se declara una variable de tipo clase CTransmisión.

4.2.5.1. Atributos de la Clase CTransmisión

- **Identificadores** (Id_destino e Id_origen): son los identificadores del nodo destino y origen de la transmisión correspondiente.
- **Ganancia, posición y potencia de transmisión** (G_antena, X e Y, Ptx): ganancia de la antena del nodo origen, su posición y la potencia con la que transmite.
- **Atenuación** (Att): almacena la atenuación calculada de una transmisión.
- **Recepción_ok:** variable *booleana* que almacena el valor de estado de la transmisión.
- **Mayor_sensibilidad:** variable *booleana* que indica si la transmisión supera o no la sensibilidad del nodo destino.

4.2.6. Clase CEscenario

En esta clase se define las características básicas del escenario diseñado para redes inalámbricas. Tanto sus atributos como sus funciones están directamente relacionados con las dimensiones del escenario.

4.2.6.1. Atributos de la Clase CEscenario

- **Variables del escenario** (X_min, Y_min, X_max, Y_max, Frec): variables que delimitan el área del escenario, así como la frecuencia del sistema.

4.2.6.2. Funciones de la Clase CEscenario

- ✓ **Constructor (Cescenario) y destructor (~Cescenario)**: el constructor es una función donde se inicializan las variables del escenario (X_min, Y_min, X_max, Y_max) y la frecuencia del sistema.

El funcionamiento del destructor es el inverso, elimina el área del escenario asignando valor 0 a las variables X_max e Y_max.

- ✓ **Funciones de asignación de coordenadas** (Elige_coordenada_X, Elige_coordenada_Y): en estas funciones se calculan las variables X e Y de forma aleatoria dentro del área delimitada como escenario. Estas funciones se utilizan como parámetros en la función Asigna_posición de la clase Nodo.

4.3. Programación de las técnicas *Cross-Layer*

Para implementar las técnicas *Cross-Layer* propuestas en el proyecto (ver capítulo 3) se han tenido que modificar algunas de las funciones programadas para el sistema de referencia y además, se han tenido que añadir variables y funciones nuevas.

La implementación de estas técnicas no ha sido muy complicada gracias al tipo de programación por clases y gracias a que la clase Transmisión almacena todos los parámetros de las transmisiones, entre ellos, la potencia recibida por los nodos.

4.3.1. Modificaciones comunes a todas las técnicas

4.3.1.1. Clase CNodo

En la clase CNodo se añade los siguientes parámetros:

- **Variables de tiempo de espera** (Tablas_espera_max, Tablas_espera_min) matrices de 6 filas (número de retransmisiones) y 5 columnas (número de ventanas de contienda) que almacenan los valores máximos y mínimos, respectivamente, de los márgenes definidos en las ventanas de contienda.

En la clase CNode se añade las siguientes funciones:

- ✓ **Función Asigna_tiempos_espera**: esta función introduce en las matrices anteriores los tiempos de espera máximos y mínimos propuestos para las cinco ventanas de contienda de las técnicas *Cross-Layer*.
- ✓ **Función Estadísticas_tabla_espera**: esta función calcula la media de las ventanas de contienda utilizadas para las retransmisiones.

En la clase CNode se modifica las siguientes funciones:

- ✓ **Función Comprobación_envio_ok**: esta función se modifica cuando el paquete no se recibe. Ahora el nodo origen ha de seleccionar la ventana de contienda según la potencia que recibe el nodo destino. La selección se realiza mediante una función nueva que se define en la clase CCanal *Selecciona_tabla_espera_segun_Prx*.
- ✓ **Función Calcula_tiempo_aleatorio_espera**: ahora esta función necesita conocer la ventana de contienda para elegir el tiempo aleatorio de espera entre los márgenes definidos por las técnicas *Cross-Layer*.

4.3.1.2. Clase CCanal

En la clase CCanal sólo se añade una función:

- ✓ **Función Selecciona_tabla_espera_segun_Prx**: esta función utiliza el valor de la Prx almacenada en la clase Transmisión para elegir la ventana de contienda.

4.3.2. Modificaciones de las técnicas tipo B

4.3.2.1. Clase CNode

En la clase CNode se añade una nueva variable:

- **Posibles_destinos**: vector que almacena los identificadores de los diferentes destinos a los cuales se ha intentado transmitir. Número máximo de identificadores que puede almacenar es 6, que corresponde a la primera transmisión más las 5 retransmisiones posibles antes de eliminar el paquete del sistema.

En la clase nodo se modifican las siguientes funciones:

- ✓ **Función *Elige_destino***: esta función, continúa manteniendo su característica básica, que es asignar al nodo emisor un destino para realizar la transmisión. Pero ahora, en las retransmisiones en que se selecciona la CW-1 se ha de cambiar de destino. En este caso, el nodo emisor elige destino de forma aleatoria entre los posibles destinos que no se hayan elegido en uno de los intentos anteriores. Para controlar el histórico de destinos elegidos, se hace uso del vector *Posibles_destinos*.
- ✓ **Función *Comprobación_envio_ok***: esta función se modifica al elegir la ventana de contienda. Si la ventana elegida es CW-1, no se le asignará un tiempo de espera aleatorio, sino que se elegirá un nuevo destino para retransmitir el paquete.

En esta función también se inicializa el vector *Posible_destinos*. Esta instrucción se lleva a cabo cuando el paquete ha sido enviado correctamente o cuando el paquete se elimina del sistema por superar los 6 reintentos.

4.3.3. Modificaciones de la técnica 4B

4.3.3.1. Clase *CNodo*

En la clase *CNodo* se añade dos nuevas variables:

- **Contadores** (*destinos_intentados* y *Retransmisiones_mismo_destino*): estas variables funcionan como contadores relacionados con las retransmisiones del sistema. Almacenan el número de destinos diferentes a los que se ha intentado transmitir un mismo paquete (máximo valor: $\text{Nodos} - 1$), y el número de transmisiones realizadas a un mismo destino para enviar un paquete (máximo valor: 6).

Además, se modifica el siguiente parámetro:

- **Posibles_destinos**: este vector aumenta su índice máximo a $\text{Nodos} - 1$. De este modo se puede intentar la transmisión con todos los nodos del sistema.

En la clase *CNodo* se modifica la siguiente función:

- ✓ **Función *Comprobación_envio_ok***: esta función modifica el criterio que hace eliminar un paquete del sistema cuando supera el número máximo de retransmisiones. Ahora, un paquete se elimina del sistema si se ha intentado retransmitir a todos los destinos posibles del sistema, o si se supera el número máximo de retransmisiones hacia un mismo destino.

El contador *destinos_intentados*, se inicializa cuando el paquete se elimina del sistema o cuando se ha enviado correctamente.

El contador *Retransmisiones_mismo_destino* se inicializa cuando se cambia de destino de la transmisión, además de inicializarse en los mismos casos que el contador *destinos_intentados*.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

5.1. Introducción

En los capítulos anteriores se ha explicado el sistema *ad-hoc* de referencia y las diferentes técnicas *Cross-Layer* diseñadas con el objetivo de encontrar alguna mejora en el sistema inicial que aumente su eficiencia. En el presente capítulo se muestran los resultados de las pruebas realizadas sobre el sistema estudiado, así como con las diferentes técnicas de *Cross-Layer* diseñadas. Además se realiza la valoración de las mejoras que se presentan con los nuevos sistemas, siempre comparándolos con el sistema de referencia.

Para realizar el estudio de los diferentes sistemas se han definido una serie de variables comunes en todos ellos. Estas variables proporcionan las estadísticas de las diferentes pruebas realizadas. A continuación se listan todas las estadísticas extraídas.

5.2. Estadísticas extraídas

En este punto del capítulo se muestran todas las variables utilizadas en los diferentes simuladores de estudio, así como las relaciones y dependencias entre ellas. En la siguiente figura, fig. 5.1, se muestra un diagrama en el cual se presentan la mayor parte de variables utilizadas y la interrelación entre ellas.

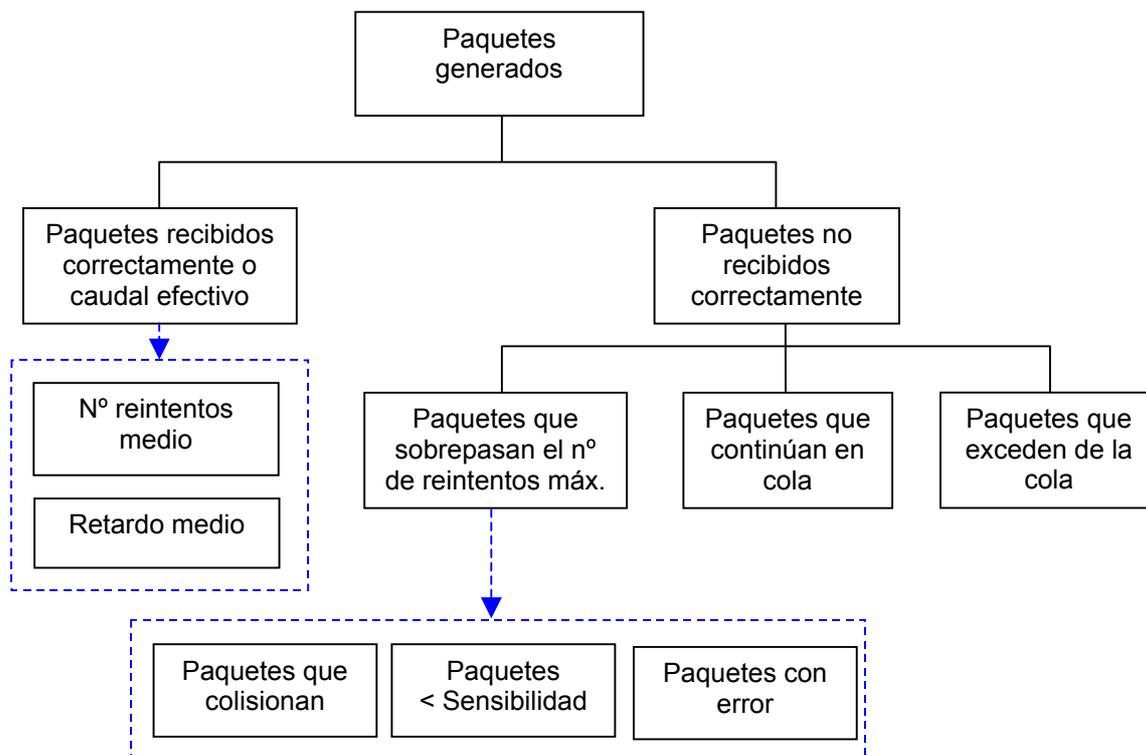


Fig. 5.1 Diagrama de estadísticas calculadas

5.2.1. Paquetes Generados

Esta variable está directamente relacionada con la probabilidad de generar paquetes de cada nodo. Es decir, a mayor probabilidad aumentan los paquetes generados. Además, esta estadística cuenta el número de paquetes que genera cada nodo por unidad de tiempo, ya que según el modelo de tráfico utilizado, ver apartado 2.2.5, los nodos pueden generar hasta 4 paquetes/unidad de tiempo.

En el momento en el que se genera un paquete, éste puede ser un paquete recibido correctamente o un paquete no recibido correctamente. Por lo tanto, de esta variable se derivan las estadísticas de paquetes recibidos correctamente y de paquetes no recibidos correctamente.

5.2.2. Paquetes no recibidos correctamente

Esta variable contabiliza todos aquellos paquetes que no se han transmitido correctamente. Dentro de este gran grupo se pueden diferenciar 3 subgrupos de paquetes que definen los motivos por los que un paquete no se recibe correctamente.

- Paquetes que sobrepasan el nº de reintentos.
- Paquetes que se han quedado en cola.
- Paquetes que exceden de la cola.

La suma de estos tres subgrupos o variables proporciona el valor total de los paquetes no recibidos correctamente.

5.2.2.1. Paquetes que sobrepasan el nº de reintentos

En esta variable se reflejan todos aquellos paquetes que después de realizar el número de reintentos máximos no han podido enviarse correctamente, y por lo tanto deben eliminarse del sistema, es decir, extraerse de la cola.

Existen diferentes causas por las cuales se reintenta el envío de un paquete. Estos tres motivos se convierten en tres estadísticas nuevas:

- **Paquetes que colisionan:** se considera que un paquete colisiona cuando se ha enviado en el mismo instante que otro u otros paquetes que se encuentran dentro de su alcance (radio de cobertura), vayan dirigidos o no al mismo nodo destino.
- **Paquetes por debajo de la sensibilidad (Paquetes < Sensibilidad):** son los paquetes que, debido a la distancia entre el emisor y el receptor y a los obstáculos entre ellos, no se reciben con la potencia necesaria para ser escuchados por el destino. Es decir, la potencia de estos paquetes no supera el umbral de la sensibilidad del nodo receptor.

- **Paquetes con error:** son aquellos paquetes que a pesar de llegar a destino con una potencia superior al umbral de la sensibilidad y no colisionar con otras transmisiones, no se han recibido correctamente porque la información que contienen no es correcta, su trama contiene algún error debido al canal.

5.2.2.2. Paquetes que se han quedado en cola

Se definen como paquetes que se han quedado en cola (paquetes en cola), a todos aquellos que han sido generados y se encuentran ocupando un lugar en la cola por los siguientes motivos:

- No se han podido transmitir porque no les ha llegado su turno. Es decir, su posición final en la cola es posterior a los paquetes que en el último instante de la simulación se encuentran en estado de transmisión.
- En el instante final de la simulación del sistema se encuentran en el primer lugar de la cola. Pero están esperando llegar al final de su tiempo de contienda para realizar su próxima transmisión.

5.2.2.3. Paquetes desbordados de la cola

Se denominan paquetes que desbordados de la cola o paquetes perdidos por desbordamiento de cola, a todos aquellos paquetes que se han generado, pero no han podido ocupar una posición en la cola porque ésta se encuentra totalmente llena.

5.2.3. Paquetes recibidos correctamente o caudal efectivo

Se consideran paquetes recibidos correctamente, a todos aquellos paquetes que han sido transmitidos y llegan al destino correctamente, ya que se reciben con una potencia mayor a la sensibilidad, no colisionan y no contienen error de canal.

A partir de esta variable se calculan dos estadísticas más:

- Número medio de reintentos.
- Retardo medio de acceso.

5.2.3.1. Número medio de intentos

En el sistema diseñado, no todos los paquetes que se reciben correctamente se han enviado una única vez. Existe la posibilidad de que se hayan intentado enviar varias veces, sin superar el número máximo de reintentos, hasta conseguir llegar correctamente al destino.

Para calcular el número de intentos medio, se suman el total de transmisiones que se han realizado y se dividen por el número total de paquetes recibidos correctamente (ver fórmula 5.1).

$$N^{\circ} _ Medio _ Re _ int _ entos = \frac{N^{\circ} _ total _ Transmisiones}{N^{\circ} _ total _ Paquetes _ Re _ cibidos _ Correctamente} \quad (5.1)$$

El número total de transmisiones lo constituyen los paquetes recibidos correctamente, paquetes colisionados, paquetes recibidos por debajo de la sensibilidad y paquetes recibidos con error debido al canal (ver fórmula 5.2).

$$N^{\circ} _ total _ Transmisiones = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \quad (5.2)$$

Donde,

- P_1 = Paquetes recibidos correctamente o caudal efectivo.
- P_2 = Paquetes colisionados.
- P_3 = Paquetes recibidos por debajo de la sensibilidad.
- P_4 = Paquetes con error.

5.2.3.2. Retardo medio de acceso

Se define como retardo medio, el tiempo que pasa desde que un paquete se genera hasta que se recibe correctamente por el nodo destino. Este retardo se ve afectado por el tiempo que el paquete está en cola esperando a ser transmitido y por el tiempo de espera debido a las posibles retransmisiones, en caso que no se envíe correctamente en el primer intento.

Para calcular el retardo medio se debe sumar el retardo calculado de todos los paquetes recibidos correctamente y dividir por el número total de éstos (ver fórmula 5.3).

$$Retardo _ medio = \frac{\sum_{i=1}^N Retardo_i}{\sum_{i=1}^N Paquetes _ recibidos _ correctamente_i} \quad (5.3)$$

5.2.4. Transmisiones y Retransmisiones

Además de las variables ya descritas, se calculan dos parámetros más, las transmisiones y retransmisiones del sistema (ver fig. 5.2).

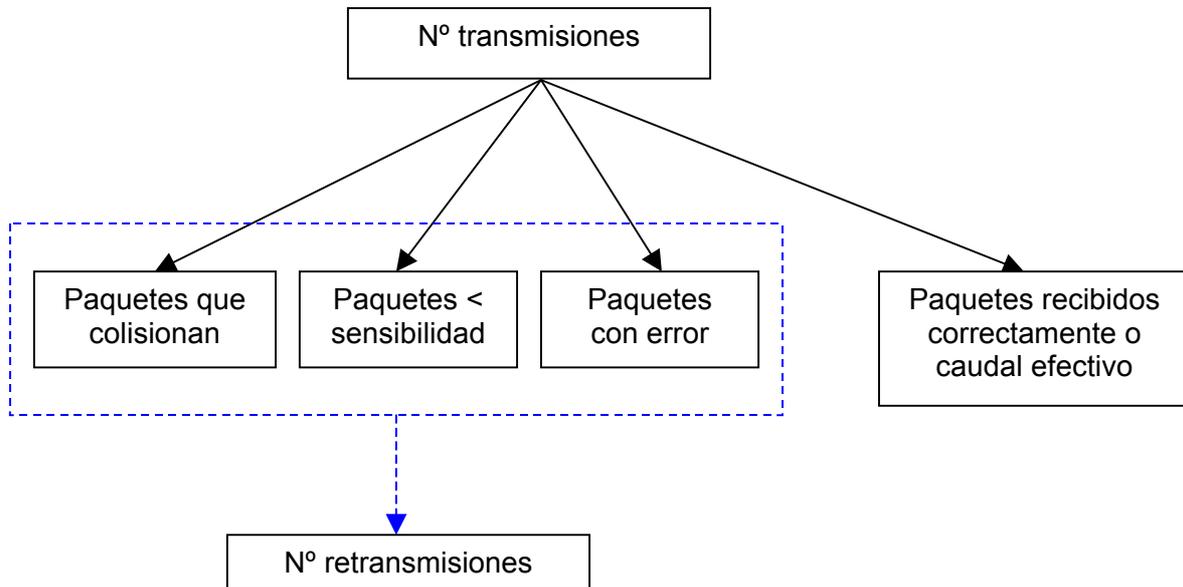


Fig. 5.2 Diagrama de estadísticas calculadas

5.2.4.1. Transmisiones

Se considera como transmisión cualquier intento de envío de un paquete, se haya realizado con éxito o no. Por lo tanto, se engloban dentro de esta variable los paquetes recibidos correctamente, paquetes colisionados, paquetes por debajo de la sensibilidad y los paquetes erróneos (ver fórmula 5.2).

5.2.4.2. Retransmisiones

Se denomina retransmisión a cualquier transmisión de un paquete que no se consigue entregar al destino después del primer intento. En la siguiente fórmula, (5.4), se presenta el concepto de esta variable.

$$\text{Retransmisiones} = \text{Num_total_Transmisiones} - \text{Transmisiones_1er_intento} \quad (5.4)$$

Donde las Transmisiones_1er_intento son la suma de los paquetes que se han recibido correctamente más los paquetes que han sobrepasado el número máximo de reintentos (ver fórmula 5.5). Ya que un paquete que se ha transmitido, finalmente o llega al destino o se elimina del sistema después de las retransmisiones máximas.

$$\text{Transmisiones_1er_intento} = P_1 + P_5 \quad (5.5)$$

Donde,

P_1 = Paquetes recibidos correctamente.

P_5 = Paquetes que sobrepasan el número de reintentos.

Por lo tanto, según las fórmulas 5.2 y 5.5, el cálculo de las retransmisiones se resume como la suma de los paquetes colisionados, los paquetes recibidos por debajo de la sensibilidad y los paquetes con error, menos los paquetes que sobrepasan el número máximo de reintentos (ver fórmula 5.6).

$$\text{Re transmisiones} = P_2 + P_3 + P_4 - P_5 \quad (5.6)$$

Donde,

P_2 = Paquetes colisionados.

P_3 = Paquetes recibidos por debajo de la sensibilidad.

P_4 = Paquetes con error.

P_5 = Paquetes que sobrepasan el número de reintentos.

5.2.5. Control de admisión

Se define como control de admisión el mecanismo por el cual el sistema calcula el número de usuarios máximos que es capaz de aceptar cumpliendo unos ciertos requisitos de calidad de servicio. En nuestro caso esta calidad de servicio viene medida en términos de paquetes recibidos correctamente.

El umbral de la calidad de servicio aceptada es definido por el usuario o el diseñador de la red, quien decide qué valor mínimo de *throughput* es necesario para cumplir con las especificaciones de QoS asignadas.

5.3. Rendimiento del sistema de referencia

El primer punto del análisis de los resultados es conocer el comportamiento del sistema de comunicaciones inalámbricas de referencia para tener una base con la que comparar el rendimiento del sistema aplicando las técnicas *Cross-Layer* propuestas. Este sistema de referencia es el escenario base sobre el cual no se ha aplicado ninguna técnica *Cross-Layer*.

Para analizar el comportamiento y el rendimiento de este sistema se han realizado pruebas variando el tamaño del escenario, el número de usuarios y la carga de tráfico del sistema. Con los resultados obtenidos, se ha verificado que el comportamiento de este sistema de referencia corresponde a un sistema de comunicaciones WLAN típico. Estos resultados se muestran en el anexo 1 puesto que no era uno de los objetivos directos del presente proyecto, sino que se ha realizado para poder obtener medidas de mejora de las nuevas técnicas propuestas.

5.4. Rendimiento del sistema con las técnicas 1A, 2A y 3A

Los primeros resultados obtenidos han sido los de las tres técnicas tipo A (ver apartado 3.2 del capítulo 3). En el análisis realizado en el presente apartado no se muestra la técnica 1A ya que en las estadísticas extraídas se observa que el comportamiento no varía prácticamente del obtenido con el sistema de referencia (ver fig. 5.3a y 5.3b). Además, para las pruebas realizadas en escenarios pequeños, de 100mx100m, incluso empeora el comportamiento aumentando hasta en un 16,35 % las colisiones en el sistema (ver anexo 1). Esto se debe a que el diseño implementado en la técnica 1A es muy similar al sistema de referencia, manteniendo el estilo de CW solapadas. Además, se priorizan las transmisiones con mayor SNR haciendo que aumenten las colisiones sobretodo en escenarios pequeños donde éstas se producen con mayor probabilidad.

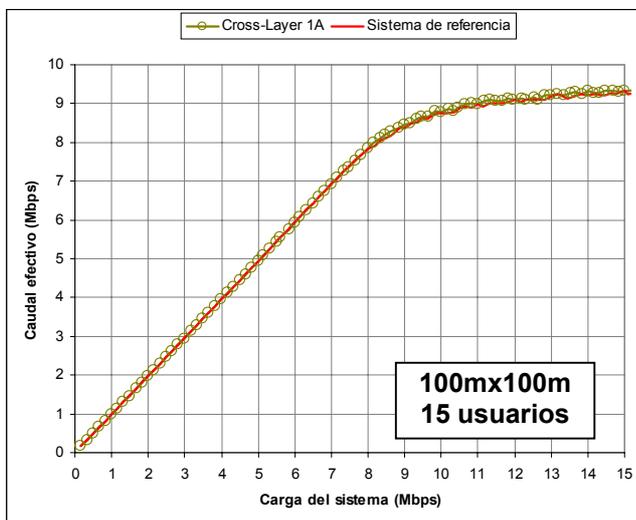


Fig. 5.3a Caudal efectivo, técnica 1A

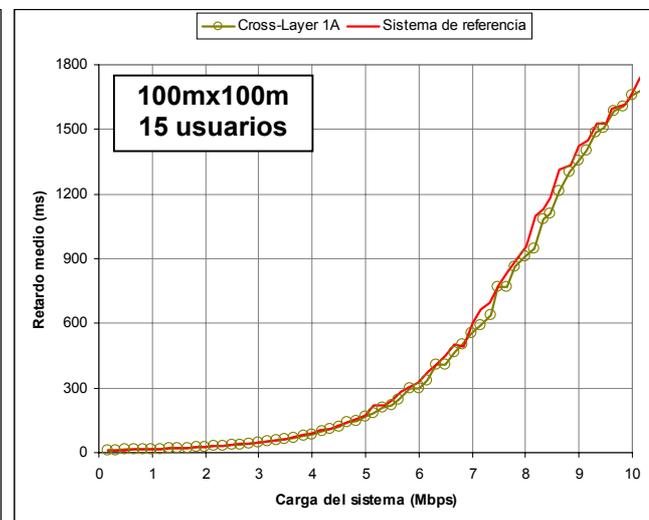


Fig. 5.3b Retardo medio, técnica 1A

Seguidamente se analiza el rendimiento de las dos técnicas 2A y 3A, así como las mejoras esperadas según su diseño (ver capítulo apartado 3.2, capítulo 3).

- Caudal efectivo o throughput

Uno de los objetivos del diseño de estas técnicas 2A y 3A es conseguir un aumento del caudal efectivo o *throughput* como se explica en el capítulo 3. Sin embargo, en las estadísticas extraídas al aplicar estas dos técnicas en el sistema de comunicaciones diseñado, se observa:

- Cargas de tráfico bajas: se aumenta o se mantiene el caudal efectivo dependiendo del tipo de escenario. En escenarios pequeños, se mantiene mientras que en escenarios grandes se consigue un aumento de hasta 17,9 % con un número medio de usuarios (ver fig. 5.4).
- Cargas de tráfico elevadas: los sistemas con las técnicas de *Cross-Layer* se saturan antes que el sistema de referencia, es decir, absorben menos

tráfico. Estas técnicas saturan antes el sistema cuanto mayor es el escenario existiendo pocas diferencias en escenarios de tamaño pequeño (ver fig. 5.4).

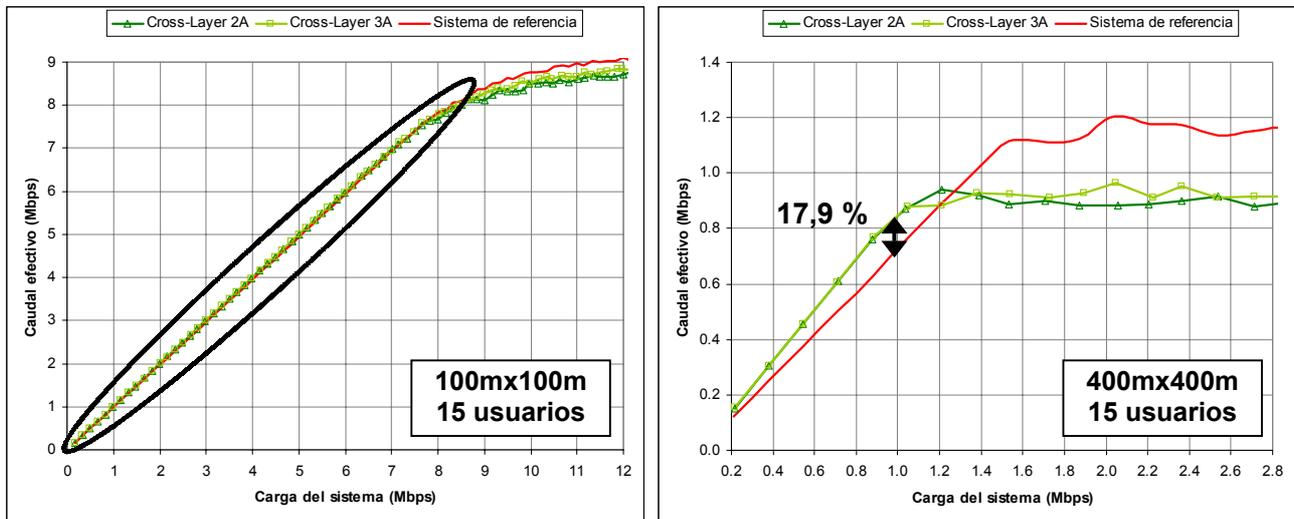


Fig. 5.4 Caudal efectivo, sist. de referencia y técnicas 2A y 3A

El hecho de que el sistema sólo mejore para cargas de tráfico bajas y para cargas altas empeore aplicando las técnicas de *Cross-Layer* se debe a los rangos de tiempos de espera definidos en las CW. Estas CW lo que hacen es retardar más en media las retransmisiones de los paquetes que no se reciben dejando pasar sólo las transmisiones que pueden llegar correctamente. Para cargas de tráfico bajas en las que las colas de los nodos no se han llenado aún este sistema da buenos resultados. Sin embargo, al ir aumentando la carga de tráfico las colas se llenan debido a los paquetes que esperan a ser retransmitidos y el sistema se satura.

- Número medio de intentos

La estadística del número medio de intentos muestra que aplicando estas técnicas se necesitan menos reintentos para conseguir enviar correctamente los paquetes que en un inicio no se han recibido. Así, para cargas de tráfico bajas, donde el *throughput* conseguido es igual o mayor, estas técnicas mejoran la eficiencia del sistema.

Con esta reducción del número medio de intentos se minimiza el consumo de energía consiguiendo cumplir unos de los principales objetivos de las técnicas *Cross-Layer*.

En los mismos escenarios mostrados en las gráficas del caudal efectivo se observa un descenso del número medio de intentos de 57,5 % en escenarios grandes y de 20,5 % en escenarios pequeños (ver figura 5.5).

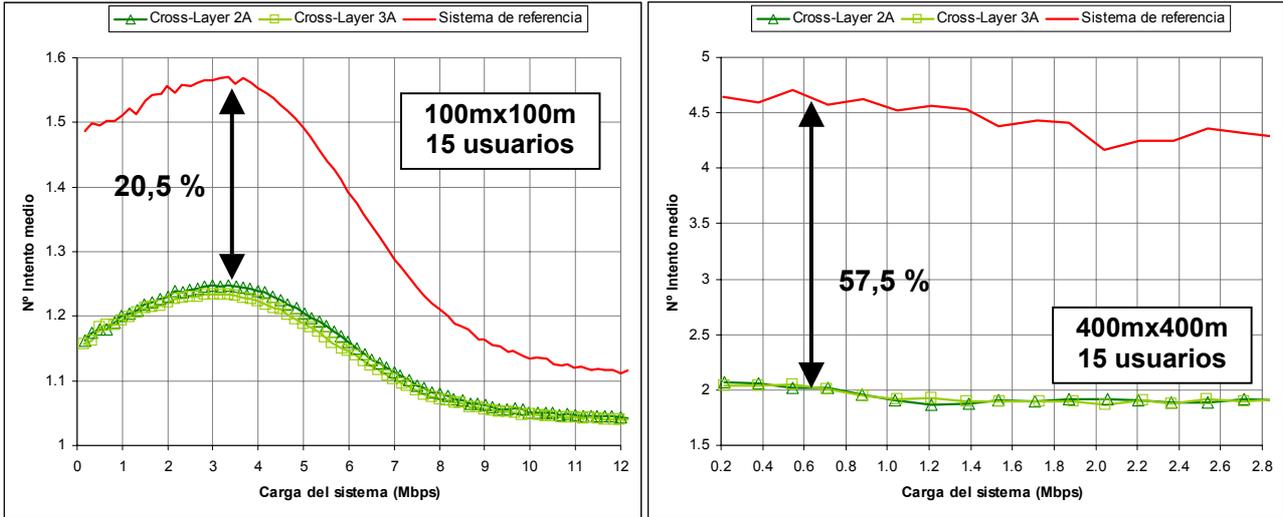


Fig. 5.5 N° medio intentos, sist. de referencia y técnicas 2A y 3A

- **Retardo medio de acceso**

Aplicando las técnicas de *Cross-Layer* al sistema de comunicaciones se aumenta el retardo medio de acceso en todos los escenarios. Este hecho sucede porque los rangos de tiempos de espera propuestos en las CW son más elevados que en el sistema de referencia, es decir los paquetes no recibidos esperan más tiempo en media para volver a ser retransmitidos. Con lo que en media los paquetes que se reciben correctamente también esperan más (ver figura 5.6).

Este comportamiento es lógico, pues en un la gran mayoría de sistemas de comunicaciones existe el compromiso entre eficiencia y retardo. Es decir, si se quiere reducir el número de colisiones se deben retrasar algunas de las transmisiones, perjudicando así al retardo medio.

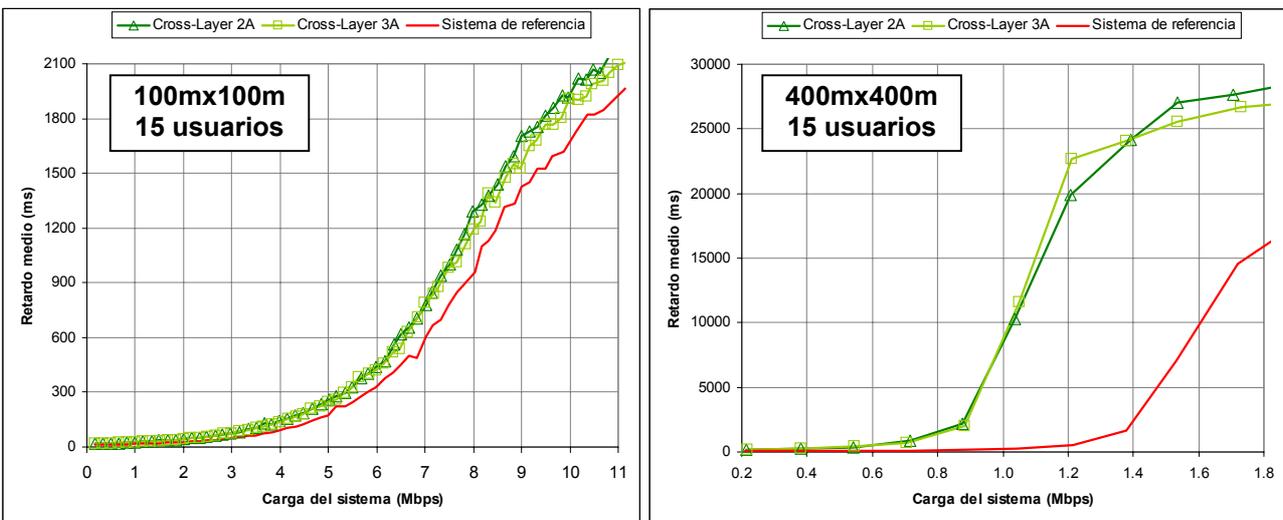


Fig. 5.6 Retardo medio, sist. de referencia y técnicas 2A y 3A

- Paquetes no recibidos

La estadística de paquetes no recibidos es complementaria al caudal efectivo, puesto que la suma de ambas corresponde al total de paquetes generados como se muestra en la figura 5.1. Así, los resultados de esta estadística muestran que en escenarios grandes y cargas de tráfico bajas existe un número menor de paquetes no recibidos mientras que para cargas de tráfico elevadas aumenta. En escenarios pequeños el comportamiento no varía casi con respecto del sistema de referencia, empeorando ligeramente para cargas de tráfico altas.

Esta estadística se puede desglosar en paquetes que sobrepasan el número máximo de reintentos, paquetes que exceden de las colas y paquetes que permanecen en cola. Se observan las siguientes diferencias respecto del sistema de referencia:

- Paquetes desbordados de las colas: para cargas de tráfico bajas, los sistemas con estas dos técnicas *Cross-Layer* se comportan igual que el sistema de referencia. Pero con una diferencia, las colas comienzan a desbordarse para cargas de tráfico más bajas, aumentando el número de paquetes que exceden de las colas (ver figura 5.7).

Este hecho sucede porque, como ya se ha explicado, los paquetes no recibidos esperan más tiempo en media en cola para ser retransmitidos, con lo que las colas se llenan para cargas de tráfico más bajas.

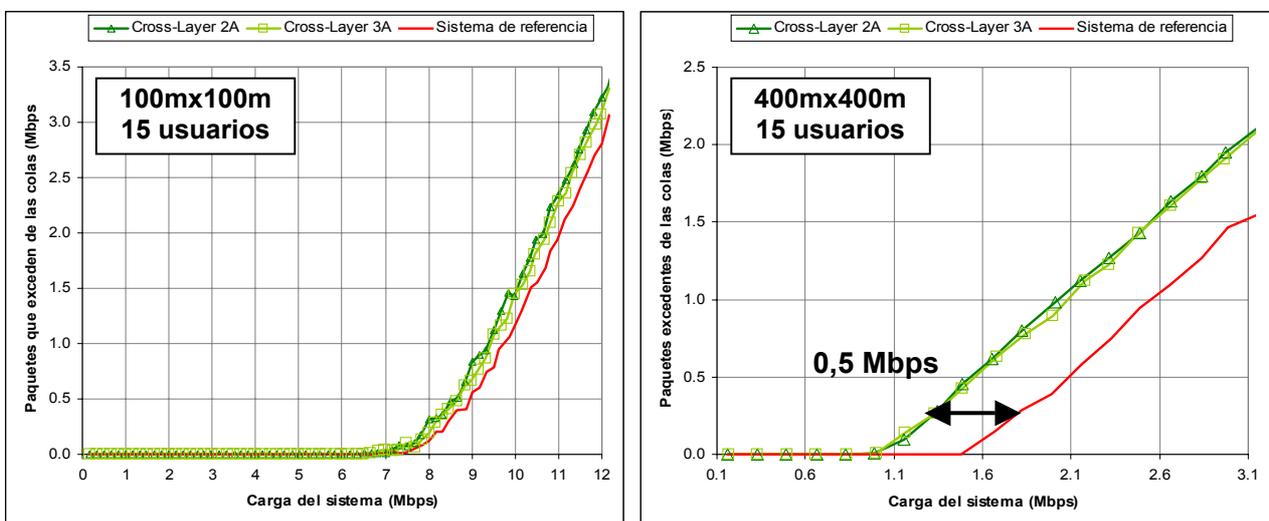


Fig. 5.7 Paquetes desbordados de cola, sist. de referencia y técnicas 2A y 3A

- Paquetes que sobrepasan el número máximo de reintentos: disminuyen tanto para cargas de tráfico bajas como para cargas altas. En las cargas altas esta disminución se produce debido a que el sistema se satura. Sin embargo, en las cargas bajas esta disminución de los paquetes que

sobrepasan el número máximo de reintentos se debe a que las técnicas de *Cross-Layer* mejoran el comportamiento del sistema.

Esta estadística está relacionada con las colisiones, los paquetes recibidos por debajo de la sensibilidad y los paquetes con error debido al canal (ver fig. 5.1). Así, alguna de estas tres estadísticas ha de disminuir para que disminuyan los paquetes que sobrepasan las 6 retransmisiones máximas.

- Colisiones del sistema: las técnicas 2A y 3A disminuyen el número de paquetes que colisionan. Esta mejora la consiguen gracias a los intervalos de tiempos de espera no solapados definidos en las CW que hacen disminuir la probabilidad de que un paquete que ha colisionado vuelva a colisionar. Ahora los motivos por los que puede volver a colisionar son:
 - Las transmisiones tienen el mismo margen de potencia recibida con lo que eligen la misma CW y además eligen el mismo tiempo de espera.
 - Las transmisiones colisionan con una nueva transmisión que también está dentro de su área de cobertura.

Además, los rangos de los tiempos de espera de las CW de estas técnicas *Cross-Layer* son mayores a los del sistema estándar por lo que las retransmisiones se retardan un tiempo más elevado en media.

En valor absoluto, el número de paquetes que colisionan en el sistema con las técnicas de *Cross-Layer* es menor. Pero se ha de tener en cuenta que el número de transmisiones en estos sistemas, también es menor debido a que los nodos esperan más tiempo en retransmitir los paquetes no recibidos. Así, para ver el efecto de las ventanas de contienda se ha calculado el porcentaje de colisiones respecto del total de transmisiones. En esta estadística, se observa una disminución de hasta un 5,1 % en el total de colisiones en el sistema para escenarios pequeños donde predominan las colisiones y de un 1,5 % para escenarios grandes (ver figura 5.8).

En esta estadística además se observa claramente la diferencia existente entre las técnicas 2A y 3A.

- *Escenarios pequeños*: (ver figura 5.8) la técnica 2A presenta un número más elevado de colisiones ya que en estos escenarios las transmisiones tienen en media una potencia más elevada y esta técnica contiene rangos de espera menores en las CW para potencias de recepción elevadas (ver capítulo 3).
- *Escenarios grandes*: la técnica 3A presenta más colisiones en este caso (ver figura 5.8) puesto que en media las transmisiones presentan potencias más bajas y esta técnica define rangos de espera menores en las CW para potencias bajas (ver capítulo 3).

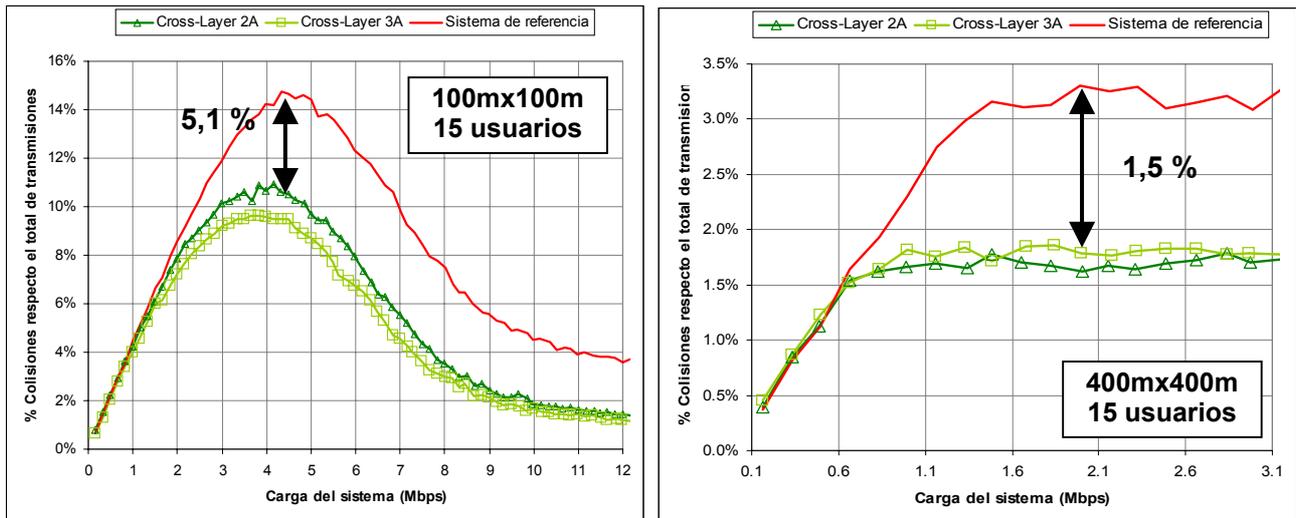


Fig. 5.8 % Colisiones, sist. de referencia y técnicas 2A y 3A

- Paquetes recibidos por debajo de la sensibilidad: esta estadística disminuye en el sistema aplicando las técnicas *Cross-Layer*. Esto se debe a que los rangos de los tiempos de espera de la CW-1 son muy elevados consiguiendo que mejoren las condiciones del canal o que los nodos emisor y receptor se acerquen.

Igual que sucede con las colisiones, esta estadística disminuye en valor absoluto a causa de la disminución de transmisiones, pero para ver el efecto real de las ventanas de contienda se ha calculado el porcentaje de paquetes recibidos por debajo de la sensibilidad respecto del total de transmisiones en un escenario de tamaño grande que es donde predominan este tipo de transmisiones.

En la figura 5.9 se observa esta una disminución de hasta un 18 % en escenarios de tamaño grande y de un 4,2 % en escenarios pequeños, con lo que la ganancia de las técnicas queda patente.

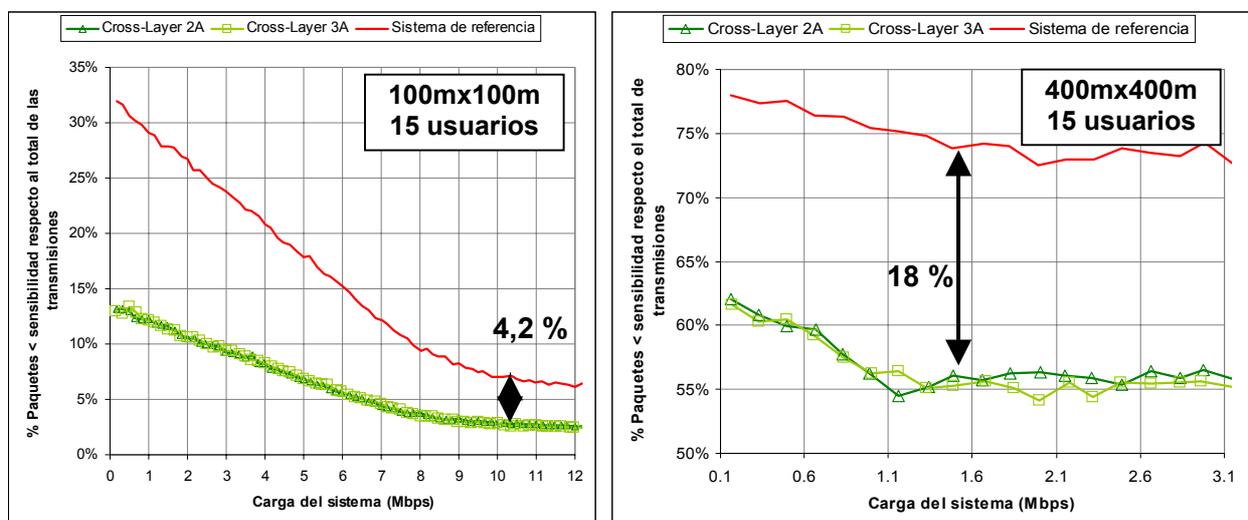


Fig. 5.9 % Paquetes < sensibilidad, sist. de referencia y técnicas 2A y 3A

- Control de admisión

El número de usuarios que acepta el sistema implementado con la técnica *Cross-Layer 2A* y la *3A* es mayor cuando la carga de tráfico propia de cada usuario (probabilidad de generar) es baja (ver figura 5.10) y el escenario de tamaño pequeño. En estos escenarios se ha definido un umbral de QoS del 99 % de paquetes correctos, mientras que en escenarios grandes del 80 %.

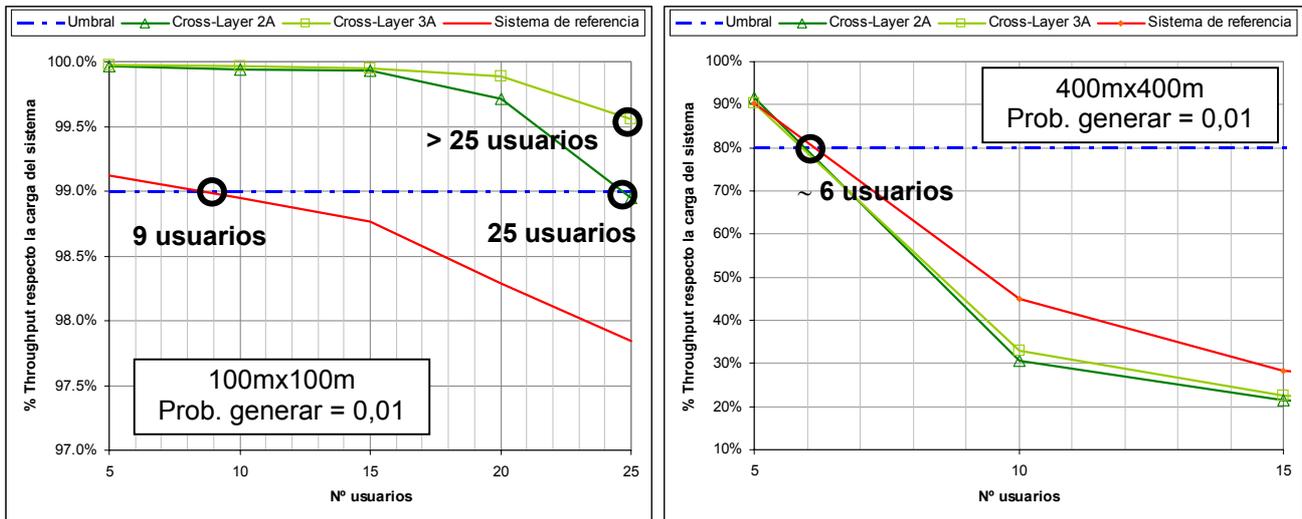


Fig. 5.10 Control de admisión, sist. de referencia y técnicas 2A y 3A

5.4.1. Conclusiones del rendimiento de las técnicas 1A, 2A y 3A

La técnica de *Cross-Layer 1A* no presenta ninguna mejora de rendimiento en el sistema de comunicaciones.

Las técnicas *2A* y *3A* sí presentan mejoras de rendimiento cuando la carga de tráfico generada por cada usuario del sistema es baja:

- Aumentan el *throughput*.
- En media necesitan un menor número de intentos para enviar correctamente un paquete, con lo que se consigue ahorrar energía.
- El número de usuarios admitidos en el sistema con una determinada QoS es mayor.
- Disminuyen los paquetes no recibidos.

Así, estas técnicas necesitan en media un número menor de intentos para conseguir mantener el caudal efectivo o incluso aumentarlo. Por lo tanto, se está optimizando la utilización del espectro radio además de disminuir el consumo de energía permitiendo alargar la vida de las baterías de los terminales inalámbricos.

Por lo tanto, para cargas de tráfico bajas, estas técnicas consiguen los objetivos esperados aumentando el rendimiento del sistema y disminuyendo el uso de los recursos disponibles.

Sin embargo, debido al aumento de los rangos de tiempo de espera en las CW, los paquetes presentan un retardo medio de acceso mayor al aplicar las técnicas de *Cross-Layer*. Y para cargas de tráfico altas el sistema no es capaz de absorber el mismo tráfico que el sistema de referencia, se satura.

Así, se puede concluir que aplicar las técnicas de *Cross-Layer* 2A y 3A presenta beneficios en sistemas con cargas de tráfico bajas y con modelos de tráfico sin requerimientos de retardo muy elevados, por ejemplo, tráfico de datos *best-effort*.

5.5. Rendimiento del sistema con las técnicas 1B, 2B, 3B y 4B

Después de analizar el rendimiento de las técnicas A, se pasa a estudiar las técnicas denominadas B (ver apartado 3.2, capítulo 3). Una de las principales características que diferencian a las técnicas B de las A, es que priorizan aquellos paquetes que no llegan a destino porque no superan el umbral de la potencia de recepción. Respecto al comportamiento en caso de colisión de estas técnicas es similar al de las técnicas tipo A, a excepción de la técnica 4B que difiere bastante del resto en su rendimiento.

El hecho de que el comportamiento de la técnica *Cross-Layer* 4B sea diferente al resto de técnicas tipo B, es debido a que el algoritmo de retransmisiones que utiliza es diferente. Este algoritmo intenta disminuir los paquetes que sobrepasan el número máximo de retransmisiones, con el objetivo de transmitir más paquetes con éxito (ver capítulo 3).

El rendimiento de estas técnicas presenta algunas diferencias con el sistema de referencia, que en general suponen ventajas significativas en los diferentes parámetros de rendimiento. La principal diferencia, es que la saturación del sistema se produce con cargas de tráfico más altas. Es decir, los sistemas con técnicas tipo B tienen la capacidad de absorber mayor número de paquetes generados.

Como se ha comentado anteriormente, la técnica 4B es la que presenta un comportamiento más distinto, tal y como se verá más adelante. Por ello, se ha decidido estudiar el rendimiento de estas técnicas en dos grupos. Por un lado, se analizan las técnicas 1B, 2B y 3B y por otro, se ha estudiado la técnica 4B.

5.5.1. Rendimiento del sistema con las técnicas 1B, 2B, 3B

Para analizar el rendimiento de estas tres técnicas, se deben valorar ciertos aspectos como es el caudal efectivo, los paquetes no recibidos y las causas por las cuales no se reciben estos paquetes.

- Caudal efectivo

Estas técnicas consiguen mejorar el caudal efectivo tanto en escenarios grandes como en escenarios pequeños, priorizando aquellas transmisiones en las que el paquete llega por debajo de la sensibilidad.

En escenarios grandes, esta mejora es más notable ya que en estos escenarios la probabilidad de que el paquete llegue por debajo de la sensibilidad es mayor. Por lo que se cambia de destino más veces aumentando las posibilidades de entregar el paquete correctamente y así consiguiendo mejorar el *throughput*. Si se compara las tres técnicas entre sí, se observa:

- Escenarios pequeños: la que presenta peores resultados es la técnica 1B.
- Escenarios grandes: la técnica 1B presenta mejores resultados.

Esto se debe a las ventanas de contienda diseñadas en esta técnica 1B que favorecen en mayor grado a las transmisiones que colisionan y que presentan mayor SNR. Es decir, en estas ventanas, los intervalos de tiempo de contienda son menores consiguiendo reducir el tiempo medio de espera entre retransmisiones. Este hecho aumenta el número total de transmisiones, y con ello, paradójicamente aumenta la posibilidad de que estas transmisiones sean correctas, con lo que el rendimiento global del sistema mejora significativamente. En la fig. 5.11, se muestra el comportamiento de dichas técnicas para un escenario de 100mx100m y uno de 400mx400m.

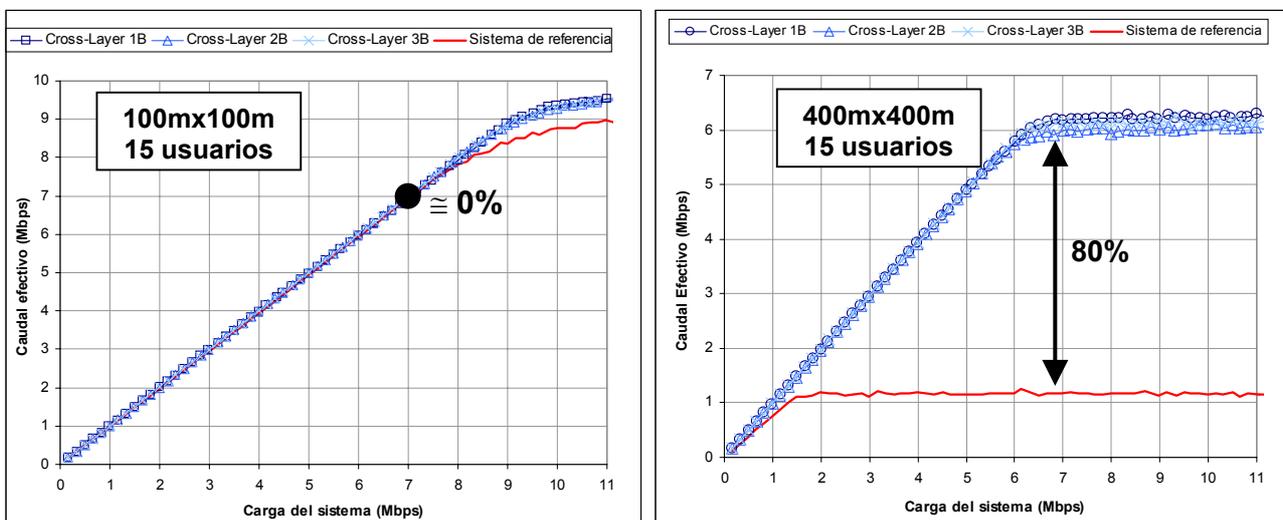


Fig. 5.11 Caudal efectivo, sist. de referencia y técnicas 1B, 2B y 3B

- Retardo medio de acceso

Todas estas técnicas mejoran el retardo medio siendo más notable la mejora en escenarios de tamaño grande. El motivo de este comportamiento, como se ha explicado anteriormente, es que en estos escenarios se producen más transmisiones por debajo de la sensibilidad, que no esperan tiempo entre las

retransmisiones sino que cambian de nodo destino. Esto provoca que todos los paquetes esperen menos tiempo en cola, reduciendo así el retardo medio.

Para la misma carga de tráfico, estas tres técnicas tipo B mejoran el retardo medio respecto el sistema de referencia, en un 20,76% en escenarios pequeños, y un 82,91% en escenarios grandes (ver figura 5.12). Por lo tanto, queda patente la considerable mejora del sistema conseguida con estas técnicas, pues no solamente se ha mejorado el caudal efectivo, sino que al mismo tiempo, se ha conseguido reducir el retardo medio del sistema.

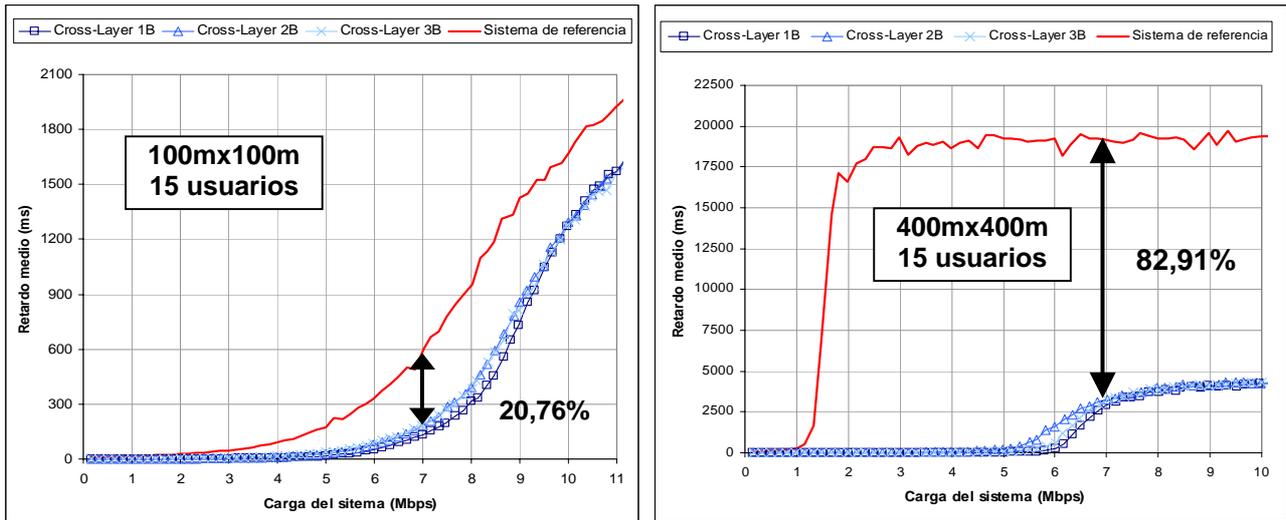


Fig. 5.12 Retardo medio, sist. de referencia y técnicas 1B, 2B y 3B

- Número medio de intentos

Esta estadística muestra que aplicando estas técnicas *Cross-Layer* se necesita un número menor de reintentos para conseguir enviar correctamente los paquetes que en un inicio no se han recibido. Esta diferencia es mayor cuando el escenario es más grande.

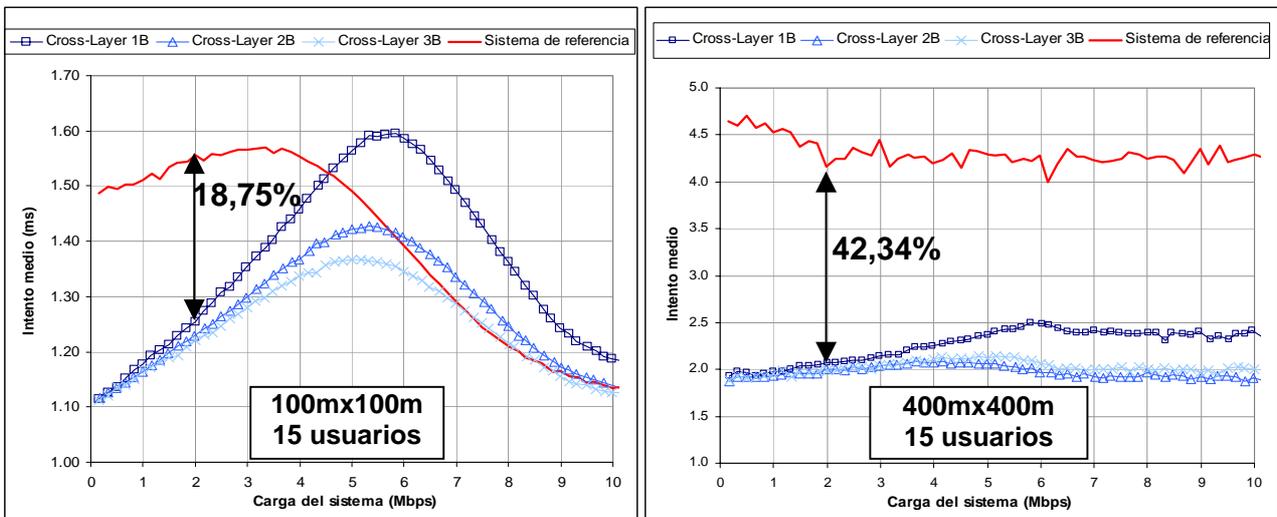


Fig. 5.13 N° medio intentos, sist. de referencia y técnicas 1B, 2B y 3B

El motivo de esta mejora, tal y como se ha comentado anteriormente, es debido a la priorización de los paquetes que llegan por debajo de la sensibilidad (ver fig. 5.13). De esta forma, se consigue optimizar el consumo de energía, es decir, ahorrar energía de los diferentes terminales inalámbricos.

- Paquetes no recibidos

Esta estadística es complementaria al *throughput* o caudal efectivo. Por lo tanto, si el caudal efectivo aumenta con la aplicación de estas tres técnicas, la estadística de los paquetes perdidos disminuye.

El comportamiento de esta estadística engloba, así mismo, tres estadísticas más, los paquetes desbordados de las colas, los paquetes extraídos del sistema por superar el número máximo de retransmisiones y los paquetes que continúan en cola.

- Paquetes desbordados de las colas: con estas tres técnicas *Cross-Layer*, se consigue reducir el número de paquetes en cola. Incluso, el desbordamiento de ésta se produce con una carga de tráfico mayor respecto al sistema de referencia. Esta mejora aumenta a medida que aumenta el tamaño del escenario a causa de la priorización de los paquetes por debajo de la sensibilidad, comentado anteriormente.

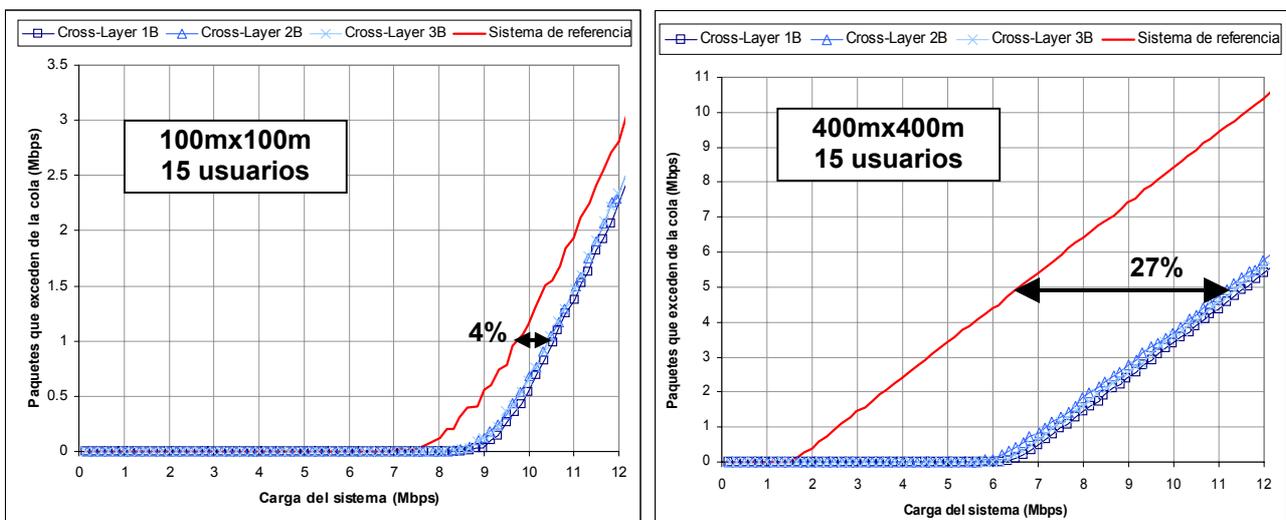


Fig. 5.14 Paquetes desbordados de la cola, sist. de referencia y técnicas 1B, 2B y 3B

- Paquetes que sobrepasan el número máximo de reintentos: existen tres estadísticas directamente relacionadas con los paquetes que exceden del número de retransmisiones máximas y que influyen en el comportamiento de ésta, como se ha comentado en el apartado 5.4.

La evolución de esta estadística en las tres técnicas tipo B, se produce más lentamente que en el sistema de referencia. Es decir, para una misma carga

de tráfico, el sistema de referencia presenta muchos más paquetes que sobrepasan el número máximo de retransmisiones que estas técnicas *Cross-Layer*.

- *Escenarios pequeños*: el comportamiento es el mismo excepto en el caso de la técnica 1B. Esta técnica *Cross-Layer* aumenta el número de paquetes que superan las 6 retransmisiones con respecto del sistema de referencia. Esto sucede por las tablas de contienda utilizadas en esta técnica 1B que presentan intervalos de tiempo de espera menores y además solapados, con lo que el número de paquetes no recibidos aumenta (ver figura 5.15).
- *Escenarios grandes*: el número de paquetes que superan las 6 retransmisiones siempre es mucho mayor en el sistema de referencia, con grandes porcentajes tales como el de la fig. 5.15, de un 76,77%.

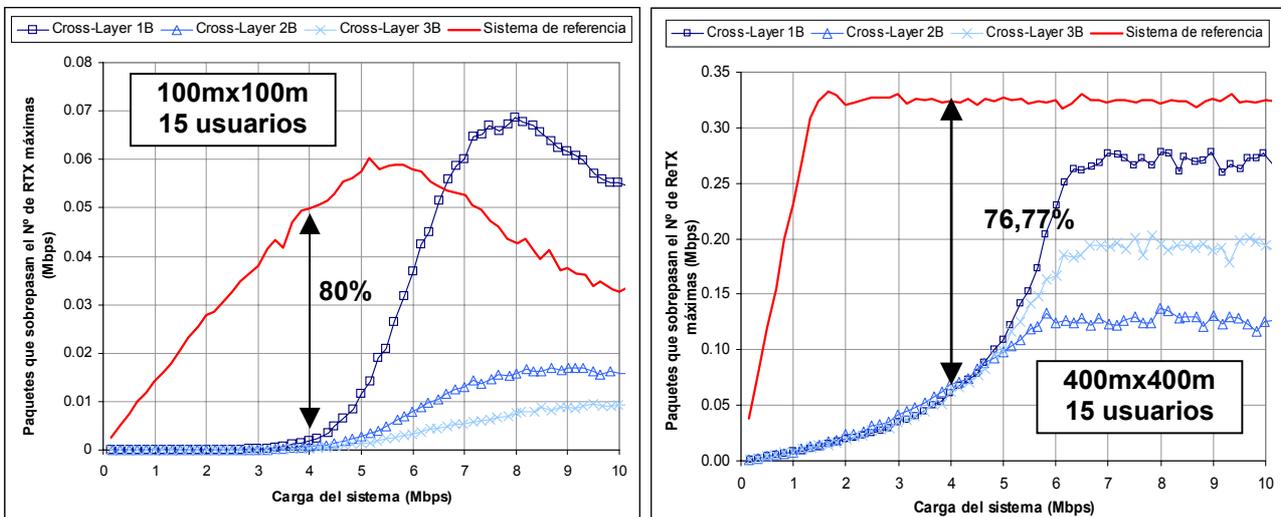


Fig. 5.15 Paquetes que superan las ReTx, sist. de referencia y técnicas 1B, 2B y 3B

Para entender con mayor profundidad el comportamiento de esta estadística, se debe analizar las colisiones, los paquetes que llegan con una potencia por debajo de la sensibilidad y los paquetes que contienen error.

- Paquetes que contienen error: esta estadística no varía respecto del sistema de referencia. Además, no es un parámetro que pretendan mejorar las técnicas de *Cross-Layer* propuestas.
- Colisiones del sistema: el número de colisiones es mayor en las técnicas tipo B que en el sistema de referencia, tanto para escenarios pequeños como en escenarios grandes. Este hecho se debe a que el número total de transmisiones en el sistema es más elevado a pesar de que los rangos de tiempos de las ventanas de contienda no se solapan. El aumento de las colisiones, se debe a la posibilidad de retransmitir un paquete a un nuevo destino sin esperar tiempo de contienda y que éste

sufra colisión. La técnica *Cross-Layer* 1B es la que produce más colisiones. En el caso de las técnicas 2B y 3B, se observa un efecto singular (ver fig. 5.16):

- *Escenarios pequeños*: existen más colisiones aplicando la técnica 2B. En estos escenarios las tablas con mayor probabilidad de ser asignadas son la CW-5 y la CW-4, que presentan los intervalos de tiempo menores ya que esta técnica prioriza las transmisiones con mayor potencia de recepción.
- *Escenarios grandes*: existen más colisiones aplicando la técnica 3B. En este caso, las tablas con mayor probabilidad de ser asignadas son la CW-2 y la CW-3 que presentan los rangos de tiempos de espera menores. Se ha de recordar que esta técnica 3B presenta las CW cambiadas de orden con respecto la técnica 2B. De esta forma se prioriza aquellas transmisiones que llegan por encima de la sensibilidad, pero su potencia de recepción es baja.

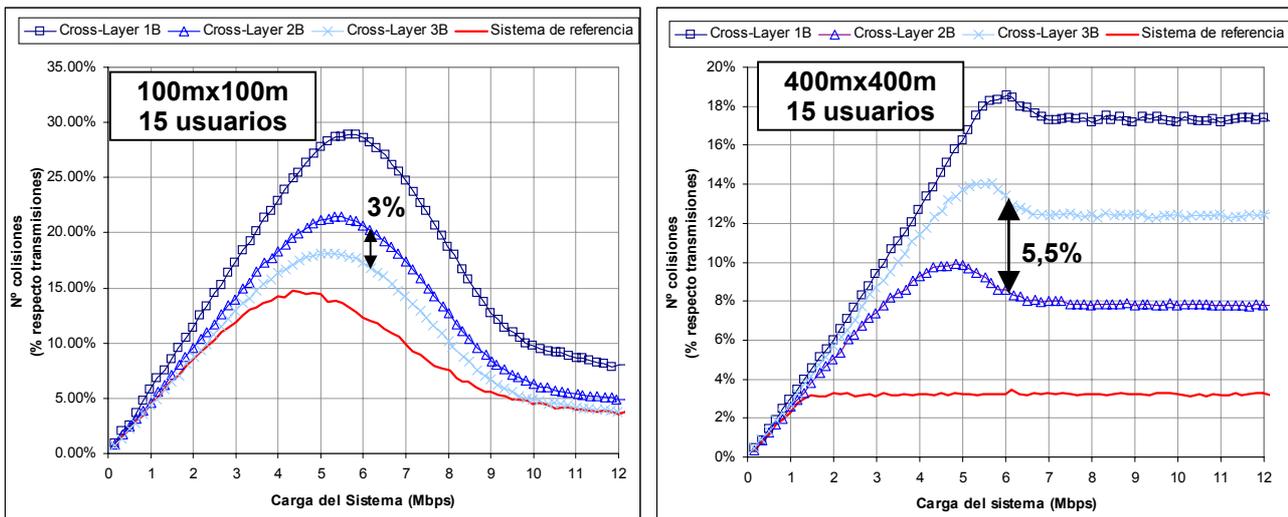


Fig. 5.16 % Colisiones, sist. de referencia y técnicas 1B, 2B y 3B

- Paquetes recibidos por debajo de la sensibilidad: observando el número total de estos paquetes, en el caso de las técnicas tipo B, su valor es mayor que en el sistema de referencia. Esto se debe a que se realizan mayor número de transmisiones. Sin embargo, si se observa el valor en porcentaje respecto el total de las transmisiones del sistema se reducen los paquetes por debajo de la sensibilidad a causa de su actuación en la CW-1. De esta manera, como se ya se ha comentado, se aumenta la posibilidad de que los paquetes sean correctamente recibidos.

El comportamiento del sistema con estas tres técnicas *Cross-Layer* es muy similar, ya que para los paquetes que llegan por debajo de la sensibilidad se sigue el mismo procedimiento de actuación (ver fig 5.17).

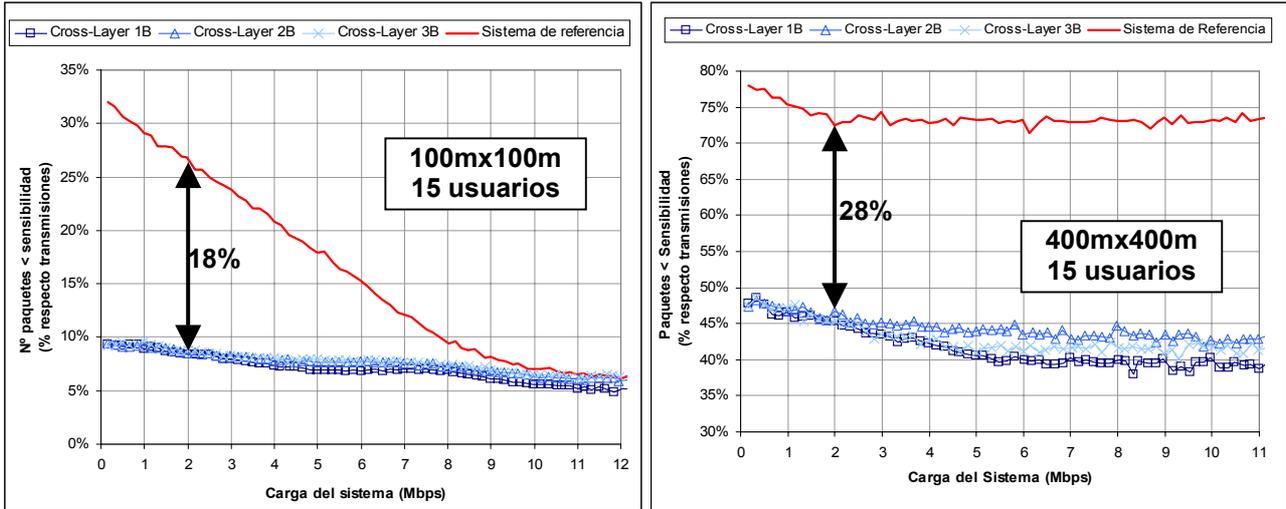


Fig. 5.17 % Paquetes < sensibilidad, sist. de referencia y técnicas 1B, 2B y 3B

- Control de admisión

Al aplicar estas tres técnicas se consigue incrementar el número de usuarios en el sistema para una determinada QoS (90% en escenarios pequeños y 95% en escenarios grandes) aumentando la eficiencia del sistema. Esta mejora es más notable en sistemas con escenarios grandes. A continuación, en la figura 5.18, se muestra el número de usuarios aceptados para sistemas con escenario de tamaño pequeño y grande, con una carga de tráfico por usuario baja (probabilidad de generar mensaje por usuario baja) para ambos sistemas.

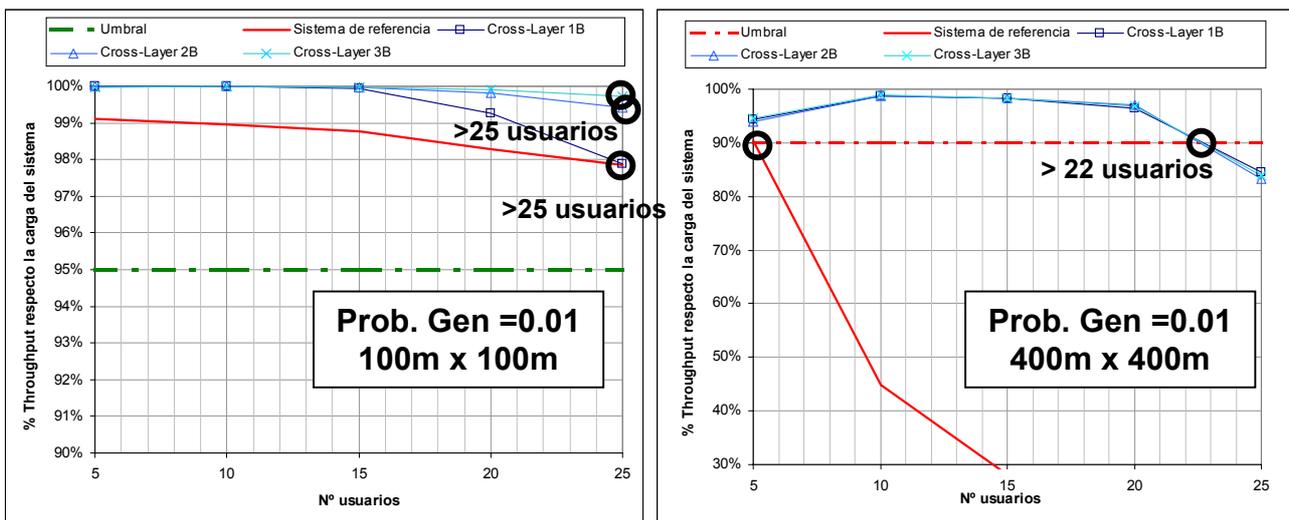


Fig. 5.18 Control de admisión, sist. de referencia y técnicas 1B, 2B y 3B

5.5.2. Rendimiento del sistema con la técnica 4B

El objetivo de la técnica 4B, tal y como se ha comentado en el capítulo 3, es entregar el mayor número de paquetes, sin tener en cuenta el retardo medio del paquete o el número de reintentos que se ha necesitado para ello.

El rendimiento de esta técnica difiere según el tamaño del escenario donde se aplica. Es decir, el comportamiento de esta técnica en escenarios pequeños empeora el rendimiento del sistema sin conseguir el objetivo principal propuesto. En cambio, en escenarios grandes, el rendimiento que presenta el sistema mejora con la aplicación de esta técnica.

- Caudal efectivo

Para analizar este parámetro se debe diferenciar el estudio según el tamaño del escenario.

- Escenarios pequeños: se empeora el caudal efectivo del sistema. Este comportamiento es debido al algoritmo de retransmisiones que presenta esta técnica. En un escenario pequeño la probabilidad de colisión es mayor con lo que un paquete pueda colisionar hasta 6 veces consecutivas antes de ser extraído del sistema. Pero puede suceder, que en una de estas retransmisiones, las condiciones del canal empeoren, haciendo que el paquete no sea recibido porque su potencia esté por debajo de la sensibilidad. Si esto sucede, el paquete cambiará de destino y se volverá a transmitir sin aplicar tiempo de espera e inicializando el contador de las retransmisiones a un mismo destino.
- Escenarios grandes: esta técnica sí mejora el caudal efectivo respecto el sistema referencia, además esta mejora es considerable, de un 53% sobre el sistema de referencia. En estos escenarios la probabilidad de que los paquetes lleguen a destino por debajo de la sensibilidad es mayor y en estos casos esta técnica cambia de destino sin esperar tiempo de contienda.

Aun así, la mejora que se obtiene con esta técnica es peor a la presentada con el resto de técnicas tipo B debido al número de retransmisiones máximas ($Retx_{m\acute{a}x}$) posibles (ver fórmula 5.7).

$$Retx_{m\acute{a}x} = (Num_nodos - 2) \times 6 + 5 \quad (5.7)$$

Además, esta diferencia entre técnicas crece al aumentar el número de nodos en el sistema, ya que en la técnica 4B el número de retransmisiones posibles crece a medida que crece el número de nodos. Este hecho provoca que un paquete tenga mayor probabilidad de llegar bien. Pero, en contra, el paquete se mantiene mucho más tiempo en cola, impidiendo que otros paquetes sean transmitidos.

En la siguiente figura, fig. 5.19, se presentan los resultados obtenidos para los dos tipos de escenarios (grande y pequeño) y un número de nodos medio.

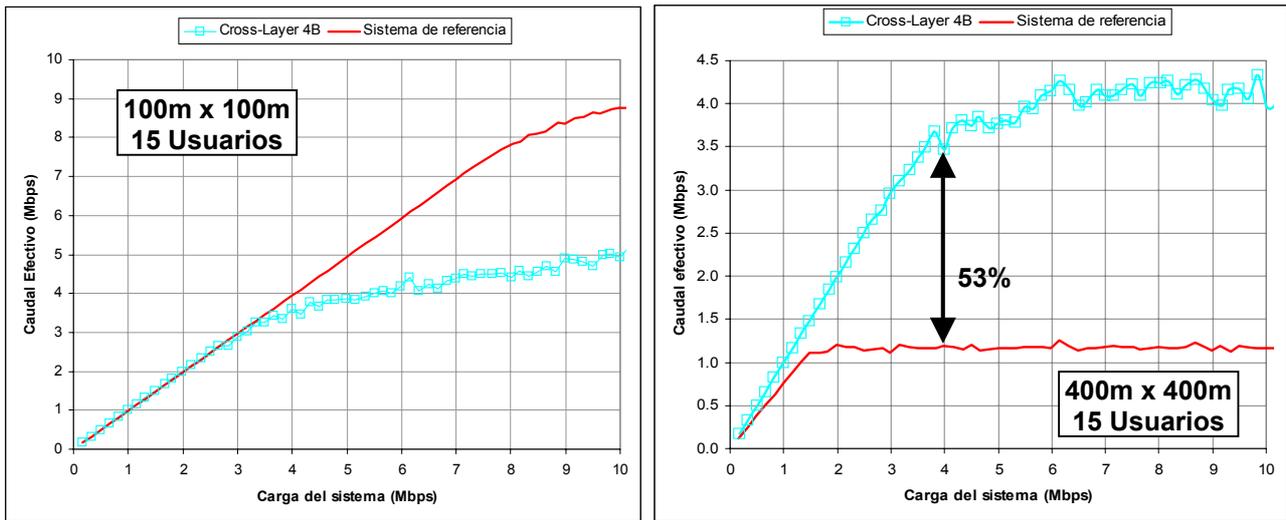


Fig. 5.19 Caudal efectivo, sist. de referencia y técnica 4B

- Retardo medio de acceso

Como ya se ha explicado, el comportamiento de la técnica 4B, es diferente según el escenario utilizado a causa del algoritmo de retransmisiones que se utiliza. En la fórmula 5.7 se observa que el número de retransmisiones posibles para esta técnica es mucho mayor a las 6 retransmisiones máximas del sistema de referencia.

- Escenarios pequeños: el retardo medio de acceso empeora con respecto al sistema de referencia.
- Escenarios grandes: el retardo medio mejora. En este caso, tal y como se ha comentado anteriormente, la probabilidad de que un paquete llegue por debajo de la sensibilidad es mayor. Por lo tanto, estas transmisiones cambian de destino y se retransmiten de forma inmediata, sin esperar un tiempo de contienda. Con ello, estos paquetes esperan menos tiempo entre retransmisiones, reduciendo su retardo medio.

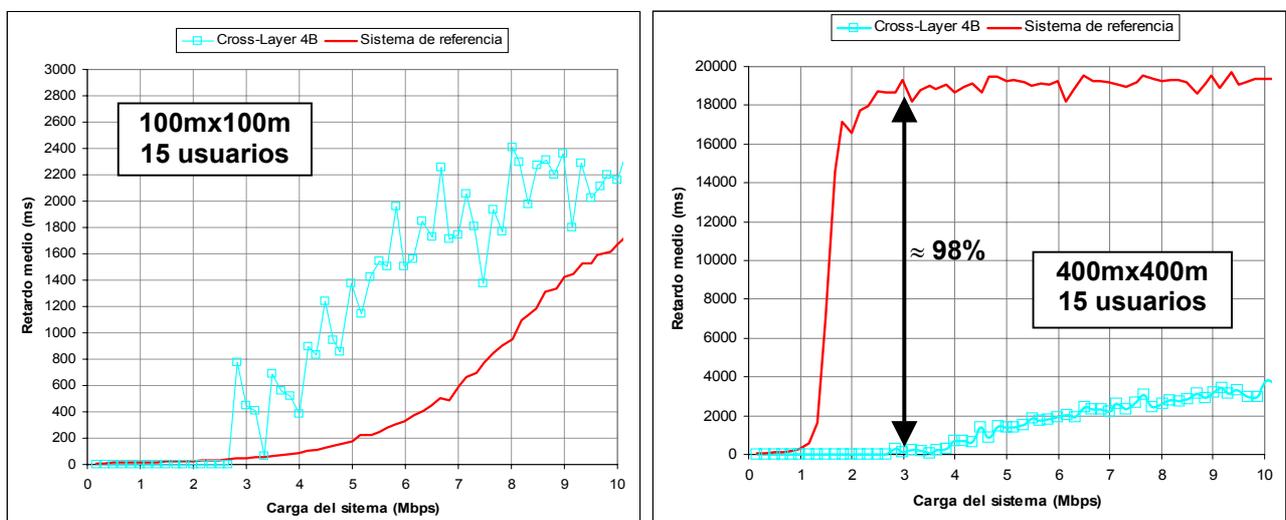


Fig. 5.20 Retardo medio, sist. de referencia y técnica 4B

En la fig. 5.20, se muestra que en escenarios grandes la minimización del retardo es notable, con lo que se hace patente la mejora de rendimiento del sistema con la aplicación de la técnica 4B.

- **Paquetes no recibidos**

Esta estadística también presenta diferentes comportamientos según el tamaño del escenario puesto que es complementaria a la estadística del caudal efectivo (ver fig. 5.1).

Los paquetes no recibidos se pueden desglosar según: paquetes que se pierden por desbordamiento de cola, los paquetes extraídos del sistema por superar el número de retransmisiones máximas y los paquetes que permanecen en cola. El análisis de estas estadísticas permite ver el comportamiento del sistema según el escenario elegido.

▪ **Paquetes desbordados de la cola:**

- *Escenarios pequeños:* el número de paquetes que exceden de las colas es mayor que en el sistema de referencia, comenzando a desbordarse para cargas de tráfico más bajas con la técnica 4B. Este comportamiento se debe a que los paquetes se sitúan con mayor probabilidad en las CW-2, CW-3, CW-4 y CW-5 que son las correspondientes a las transmisiones que colisionan o contiene error. En estas ventanas de contienda los rangos de tiempos de espera son mayores que los del sistema de referencia con lo que los paquetes pasan en media más tiempo en cola para ser retransmitidos.
- *Escenarios grandes:* el número de paquetes que exceden de las colas es menor. En estos escenarios la mayoría de las transmisiones se sitúan en la CW-1 (paquetes por debajo de la sensibilidad) con lo que el nodo origen cambia de destino sin esperar un tiempo de contienda, evitando así que se llenen las colas para cargas de tráfico bajas.

- **Paquetes que superan el n° máximo de retransmisiones:** en la técnica 4B, se minimiza el número de paquetes que superan las retransmisiones máximas. Este hecho se debe a que se permite probar la transmisión con todos los destinos posibles y hasta 6 veces con cada uno de ellos antes de eliminar el paquete del sistema (ver capítulo 3). En la siguiente figura, fig 5.21, se muestra la reducción considerable de esta estadística, sobre todo en escenarios de tamaño grande.

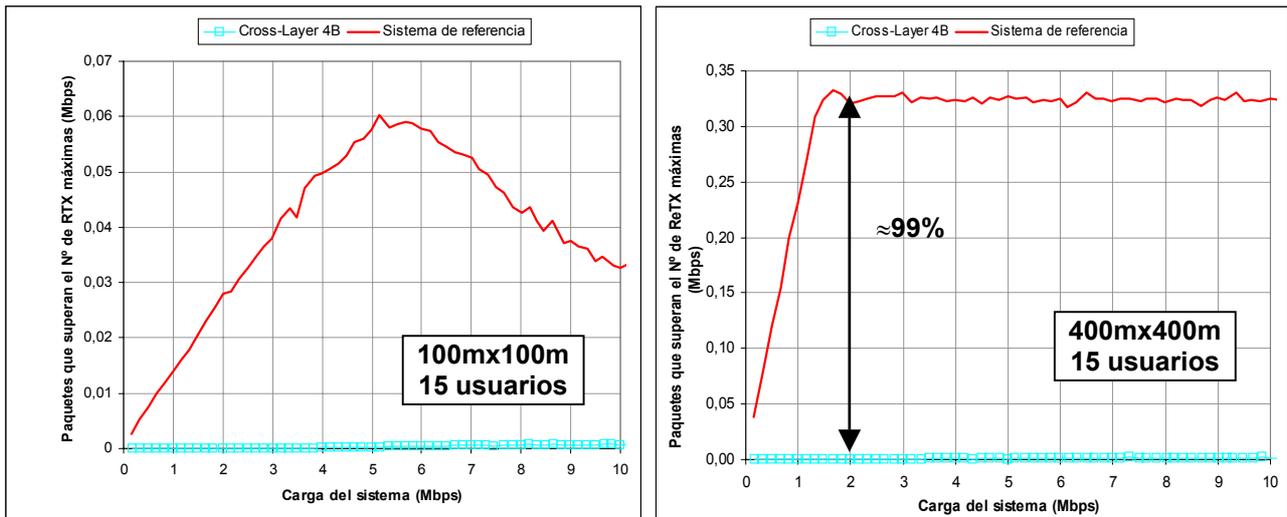


Fig. 5.21 Paquetes que superan las ReTx, sist. de referencia y técnica 4B

El comportamiento de esta estadística está relacionado con el rendimiento de otras tres estadísticas:

- Colisiones del sistema: el número de colisiones totales obtenidas con la técnica 4B es superior al número obtenido con el sistema de referencia. Pero se ha de tener en cuenta que se producen más transmisiones en el sistema debido al cambio de destino realizado en la CW-1. Así, para ver el efecto de las ventanas de contienda de esta técnica se ha calculado el porcentaje de colisiones respecto del total de transmisiones.

En este porcentaje se observa que en el sistema existe un número más alto de transmisiones que colisionan (ver fig. 5.22). Este hecho sucede porque ahora la probabilidad de que un paquete que ha colisionado vuelva a colisionar es mayor. Esta situación se da en los siguientes casos:

- Las transmisiones tienen el mismo margen de potencia recibida con lo que eligen la misma CW y además, eligen el mismo tiempo de espera.
- Las transmisiones colisionan con una nueva transmisión que también está dentro de su área de cobertura.
- Las transmisiones que antes se situaban en la CW-1 y cambian de destino, eligen al mismo nodo receptor de otra transmisión, o a un nodo que se encuentra en su área de cobertura y le hace colisionar.

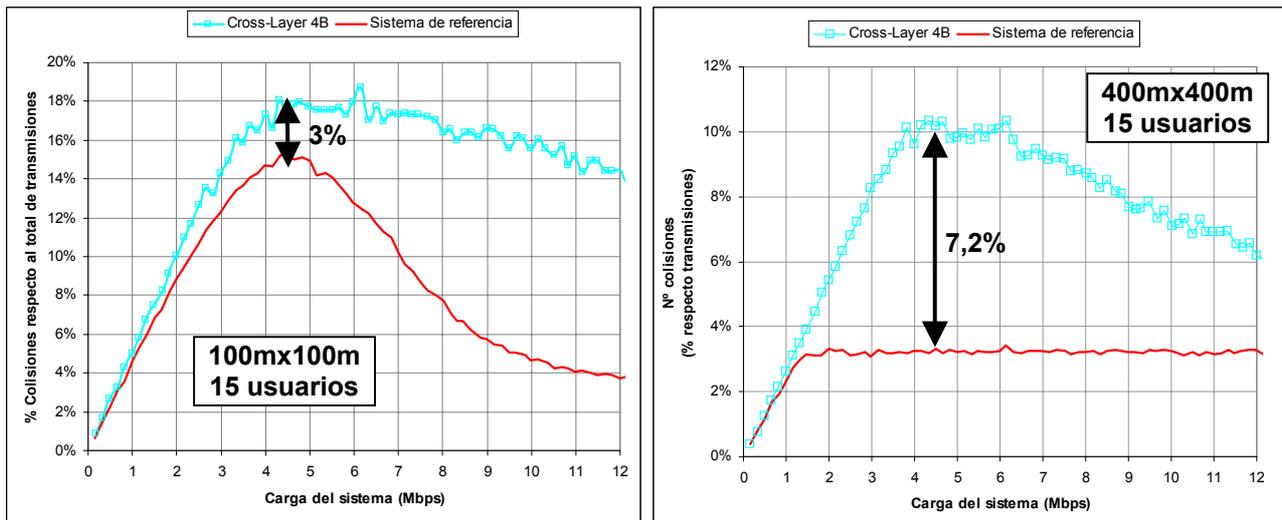


Fig. 5.22 % Colisiones, sist. de referencia y técnica 4B

Además, en escenarios pequeños influye negativamente el *shadowing* en el número de colisiones. Se puede dar el caso que las condiciones del canal cambien negativamente para una transmisión que ha colisionado y está en tiempo de espera. Entonces, esta transmisión pasa a tener una potencia por debajo de la sensibilidad haciendo que en la siguiente retransmisión cambie de destino e inicialice el contador de retransmisiones hacia un mismo destino. Ahora, permitiendo otra vez, hasta 6 retransmisiones más si vuelve a colisionar.

➤ Paquetes recibidos por debajo de la sensibilidad:

- *Escenarios pequeños:* el número de paquetes recibidos por debajo de la sensibilidad es menor en la técnica 4B que con el sistema de referencia. Esto sucede porque el nodo origen cambian de destino para evitar retransmitir hacia un nodo que probablemente no conseguirá recibir el paquete.
- *Escenarios grandes:* en valor absoluto esta estadística es mayor en el sistema con la técnica 4B que en el sistema de referencia. Este hecho sucede porque el número de transmisiones totales del sistema es mayor. Por lo que para ver el efecto de la técnica 4B se ha calculado el porcentaje respecto las transmisiones (ver fig. 5.23). En este porcentaje se observa que el número de paquetes que llegan por debajo de la sensibilidad disminuye a causa del cambio de destino realizado en la CW-1, haciendo más probable que el paquete se reciba correctamente.

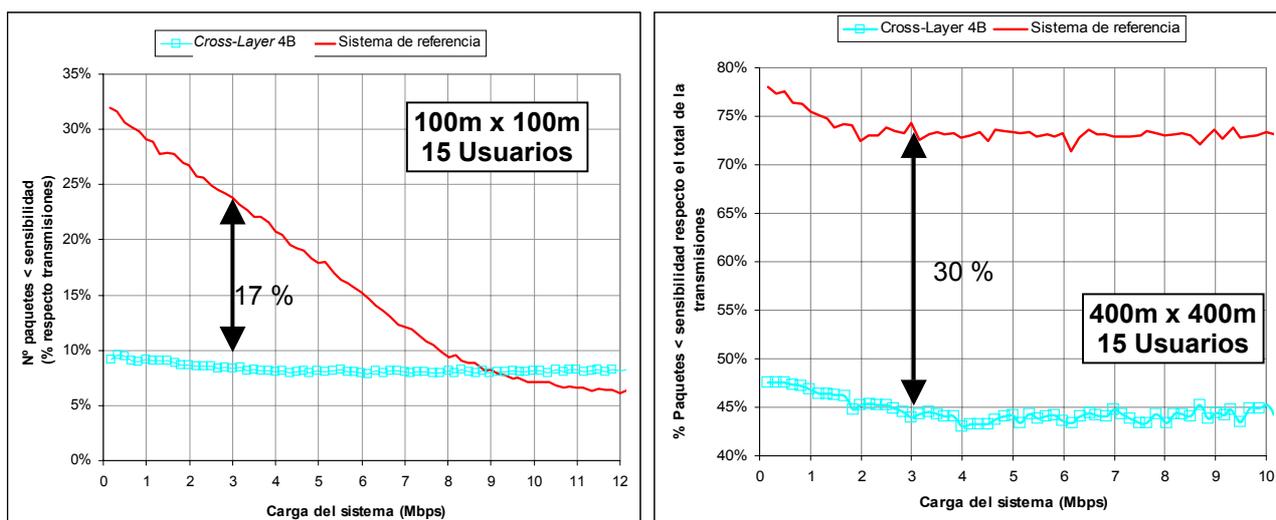


Fig. 5.23 % Paquetes < sensibilidad, sist. de referencia y técnica 4B

Se debe puntualizar que el porcentaje de paquetes que superan el número de retransmisiones varía en función del tamaño del escenario. En el caso de un escenario pequeño, el número de estos paquetes está influenciado en mayor parte por las colisiones. En cambio en escenarios de tamaño grande, los paquetes descartados quedan influenciado por los paquetes por debajo de la sensibilidad, donde su porcentaje respecto las transmisiones es mayor.

- Paquetes que contienen error: esta estadística varía en función de los paquetes que se reciben correctamente, ya que son los únicos paquetes que se comprueban si contienen error o no.

En el caso de escenarios grandes, el número de paquetes con error es mayor que en el caso de referencia, en cambio, en escenarios pequeños, su valor es menor que en el sistema de referencia.

- Control de admisión

El número de usuarios aceptados para una cierta QoS en el sistema, varía en función del tamaño del escenario. En escenarios pequeños esta técnica admite menos usuarios que el sistema de referencia. En cambio en sistemas grandes el número de usuarios aceptados es mayor que en el sistema de referencia.

En la figura 5.24, se muestra que para un umbral del 95% y 90 %, el número de usuarios aceptados en el caso de escenarios grandes y pequeños, respectivamente, es mayor con la técnica *Cross-Layer* 4B.

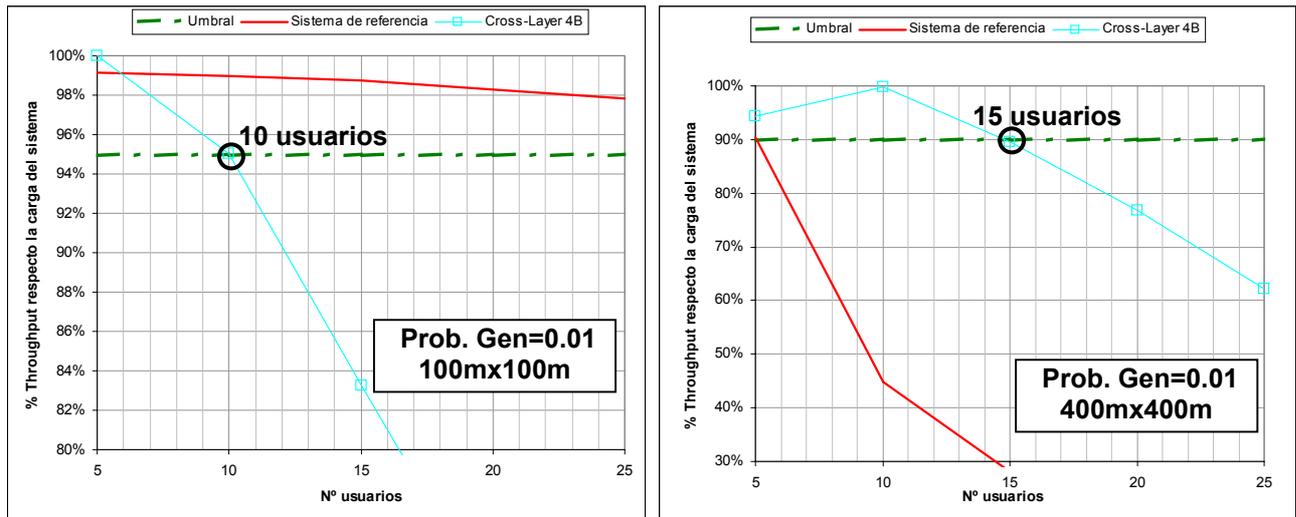


Fig. 5.24 Control de admisión, sist. de referencia y técnica 4B

Este hecho se debe, como se ha explicado anteriormente, a que a mayor tamaño del escenario, mayor número de paquetes que llegan por debajo de la sensibilidad, provocando su inmediata retransmisión a un nuevo destino. De esta manera se aumenta la posibilidad de enviar correctamente más paquetes incrementando el *throughput* del sistema.

5.5.3. Conclusiones de la técnica 1B, 2B, 3B y 4B

Después de conocer el comportamiento de estas técnicas, a continuación, se resumen las principales mejoras que ofrecen en el rendimiento del sistema.

✓ Técnicas 1B, 2B y 3B

El objetivo principal de estas técnicas es priorizar aquellas transmisiones que no son recibidas porque su potencia de recepción es menor a la sensibilidad. Así, las mejoras que ofrecen son:

- Aumentan el *throughput*.
- Disminuyen el retardo medio de acceso.
- Disminuyen el total de paquetes no recibidos.
- El número de reintentos medio se minimiza notablemente, sobretodo en grandes escenarios. Esto proporciona un considerable ahorro de energía en los diferentes terminales inalámbricos del sistema.
- El número de usuarios admitidos en el sistema con una determinada QoS es mayor.

Estas mejoras se presentan tanto en escenarios pequeños como en escenarios grandes, pero la mejora es mayor en el caso de grandes escenarios ya que el número de transmisiones por debajo de la sensibilidad predomina en este tipo de escenarios (ver capítulo 3). Además, gracias a esta característica, a diferencia de las técnicas tipo A, estas técnicas mejoran su rendimiento para carga de tráfico mayores.

✓ Técnica 4B

Esta técnica de *Cross-Layer* consigue su objetivo principal de evitar que los paquetes se eliminen del sistema debido al número máximo de retransmisiones. Además, en escenarios de tamaño grande presenta mejoras en el rendimiento del sistema:

- Aumenta el *throughput*.
- Disminuye el retardo medio de acceso.
- Disminuye el total de paquetes no recibidos.
- Reduce el número de intentos medios, consiguiendo así una optimización del consumo de energía
- El número de usuarios admitidos en el sistema con una determinada QoS es mayor.

Gracias al diseño de las ventanas de contienda de esta técnica, las transmisiones no recibidas tienen mayor probabilidad de ser entregadas al destino. Además, se disminuyen los paquetes no recibidos con lo que el sistema es más eficiente y utiliza los recursos disponibles de forma más óptima. Sin embargo, en escenarios pequeños esta técnica no tiene buen comportamiento a causa del aumento del número de retransmisiones.

Así, se puede concluir que esta técnica mejora la eficiencia del sistema y optimiza el uso de los recursos para escenarios grandes consiguiendo además, un porcentaje muy bajo de paquetes que se eliminan del sistema a causa de las retransmisiones. Por lo tanto, esta técnica 4B ofrece beneficios en sistemas en los que sea importante no descartar transmisiones, además de reducir notablemente el consumo de energía.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

Tras conocer la situación actual en la que se encuentran las redes inalámbricas y la importancia que han adquirido estas redes en la sociedad como una herramienta necesaria e indispensable, tanto en la vida profesional como en la personal, el presente proyecto se ha centrado en la aportación y estudio de nuevas técnicas *Cross-Layer* que intentan mejorar la eficiencia y el rendimiento de los sistemas WLAN en modo *ad-hoc*, basados en el estándar IEEE 802.11.

Uno de los objetivos marcados, era realizar un programa software en lenguaje C++. Este programa ha sido la herramienta base del proyecto con la que se ha conseguido estudiar, a través de las diversas pruebas realizadas, un sistema de referencia propio de redes inalámbricas con infraestructura *ad-hoc*. La implementación de las técnicas *Cross-Layer* sobre el sistema de referencia simulado, ha sido relativamente fácil, ya que la programación modular de este software ha facilitado tanto las modificaciones, como la introducción de nuevas funciones.

Una vez desarrollada dicha herramienta software, se ha realizado un detallado análisis del sistema de referencia y de las siete técnicas *Cross-Layer* propuestas, a través de un amplio abanico de pruebas. Estas pruebas, han servido como herramienta indispensable, para conocer el comportamiento del sistema de referencia y de las diferentes técnicas *Cross-Layer*. Además, han permitido realizar un análisis comparativo entre las diferentes técnicas y el sistema de referencia, demostrando así las mejoras de rendimiento y eficiencia que se han conseguido implementando dichas técnicas.

Una vez finalizado este análisis, se ha demostrado que la mayoría de estas técnicas, a excepción de la técnica 1A, consiguen mejorar el rendimiento del sistema y aumentar su eficiencia.

- Las técnicas *Cross-Layer* tipo A mejoran el *throughput* del sistema para cargas de tráfico bajas, aumentan el número de usuarios admitidos en el sistema bajo una determinada QoS y reducen el número de intentos medios con lo que se ahorra energía y consumo de la batería de los terminales. Sin embargo empeoran el retardo medio de acceso. Por lo tanto, estas técnicas son apropiadas para sistemas con cargas de tráfico bajas y con modelos de tráfico sin requerimientos de retardo muy elevados. Por ejemplo, tráfico de datos *best-effort*.
- Las técnicas *Cross-Layer* tipo B mejoran el sistema para todo tipo de cargas de tráfico consiguiendo un mayor *throughput*, un menor retardo medio de acceso y un aumento del número de usuarios admitidos en el sistema para una determinada QoS. Así, estas técnicas consiguen un uso de los recursos disponibles más eficiente siendo apropiadas para sistemas con cualquier tipo de carga de tráfico. Gracias a las mejoras de rendimiento que ofrecen, se pueden utilizar para aplicaciones en tiempo real con altos requerimientos de QoS, como puede ser la videoconferencia o la telefonía sobre IP.

En definitiva, tras conocer los exitosos resultados conseguidos, se puede concluir que con la elaboración del presente proyecto se han alcanzado plenamente los objetivos marcados inicialmente.

6.1. Impacto medio ambiental

Estas técnicas, además de presentar mejoras en el rendimiento de sistemas WLAN permiten minimizar el impacto medioambiental de estos sistemas.

Analizando los resultados obtenidos, se ha demostrado que estas técnicas hacen un uso más eficiente de los recursos disponibles. Reducen el consumo de energía en los diferentes dispositivos inalámbricos, permitiendo alargar la vida de sus baterías. Además, con estas técnicas propuestas el uso del espectro radio es más eficiente con lo que se reduce la contaminación electromagnética.

6.2. Líneas futuras de investigación

A partir del presente trabajo surge la posibilidad de ampliar el estudio de algunas de las técnicas *Cross-Layer* propuestas con el objetivo de mejorar aquellos aspectos o situaciones donde no se ha conseguido el rendimiento deseado del sistema inalámbrico WLAN. Además, también se presentan nuevas líneas de investigación relacionadas con estas técnicas.

- En cuanto a las técnicas 2A y 3A propuestas en el presente proyecto, se puede realizar un estudio mucho más profundo para conseguir encontrar un sistema que ofrezca mejoras para cargas altas de tráfico. Además se pueden realizar modificaciones en el algoritmo de contienda para mejorar los parámetros de retardo medio de acceso y de ocupación de las colas.
- Para la técnica 4B se puede realizar un estudio detallado en escenarios de tamaño pequeño con tal de conseguir las mejoras que ofrece esta técnica en escenarios grandes.
- Implementación de todas estas técnicas en un sistema donde el protocolo de acceso al medio sea el CSMA/CA, protocolo definido en el estándar IEEE 802.11. Así, se puede verificar que las mejoras de eficiencia conseguidas con el protocolo *Aloha* ranurado se mantienen.
- Estudio de técnicas de predicción de canal para conocer el estado futuro del medio inalámbrico y así adaptar las transmisiones según la información de la capa física.
- Análisis del compromiso entre carga de señalización y beneficios en términos de rendimiento al aplicar técnicas *Cross-Layer*.

REFERENCIAS

- [1] Sanjay Shakkottai, Theodore S. Rappaport, Meter C. Karlsson, “*Cross-Layer Design for Wireless Networks*”, University of Texas at Austin and TeliaSonera Sweden, IEEE Communications Magazine, 74-80 (Octubre 2003).
- [2] Luis Alonso and Ramon Agusti, “Automatic Rate Adaptation and Energy-Saving Mechanisms Based on *Cross-Layer* Information for Packet-Switched Data Networks”, Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), IEEE Radio Communications, 15-20 (Marzo 2004).
- [3] José A. Carballar, *Wi-Fi. Cómo construir una red inalámbrica*, Ed. Ra-Ma, Madrid (2004), pp. 4-5 y pp. 30-39.
- [4] Ajay Chandra V. Gummalla and John O. Limb, Georgia Institute of Technology, “*Wireless Medium Access Control Protocols*”, <http://www.comsoc.org/livepubs/surveys/index.html>, IEEE Communications Surveys & Tutorials, (Segundo trimestre de 2000).
- [5] Th. Zahariadis, “Evolution of the *Wireless* PAN and LAN standards”, Elsevier - Computer Standards & Interfaces, (julio de 2003).
- [6] Francisco López Ortiz, “El estándar IEEE 802.11, *Wireless LAN*”, <http://greco.dit.upm.es/~david/TAR/trabajos2002/08-802.11-Francisco-Lopez-Ortiz-res.pdf>, (Junio 2005).
- [7] Guoliang Li, “Physical Layer Design for a Spread Spectrum *Wireless LAN*”, Thesis submitted to the faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, pp. 4-9. Blacksburg, Virginia (1996).
- [8] Andrew D. Myers, Stefano Basagni, “*Wireless Media Access Control*”, Department of Computer Science, University of Texas, Dallas (2002).
- [9] Apichet Chayabejara, Salahuddin Muhammad Salim Zabir, Norio Shiratori, “An Enhancement of the IEEE 802.11 MAC for Multihop Ad Hoc Networks”, Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University, Japón (2003).
- [10] Atul Maharshi, Lang Tong, Senior Member, IEEE, and Ananthram Swami, Senior Member, IEEE, “*Cross-Layer* Designs of Multichannel Reservation MAC Under *Rayleigh* Fading”, IEEE Transactions On Signal Processing, vol. 51, N° 8, August 2003.
- [11] Yee Sin Chan, Yong Pei, Qi Qu and James W. Modestino, “On *Cross-Layer* Adaptivity and Optimization for Multimedia CDMA Mobil *Wireless Networks*”, Dept. of Electrical and Computer Engineering, University of California San Diego. Dept. of Computer Science and Engineering. Dept. of Electrical and Computer Engineering , Univeristy of Miami.

[12] Jun Zhao, Zihua Guo y Wenwu Zhu, "Power Efficiency in IEEE 802.11a WLAN with *Cross-Layer* Adaptation", Microsoft Research Asia.

[13] Ajay Chandra V. Gummalla and John O. Limb, Georgia Institute of Technology, "*Wireless* Medium Access Control Protocols", <http://www.comsoc.org/livepubs/surveys/index.html>, IEEE Communications Surveys & Tutorials, (Segundo trimestre de 2000).

[14] Wing Ho Yuen, Heung-no Lee, Timothy D. Andersen, "A Simple and Effective Cross Layer Networking System for Mobile Ad Hoc Networks", HRL Laboratories, LLC, 3011, Malibu Canyon Road, Malibu, CA 90265.

[15] Ramon Ferrús, apuntes de la asignatura "Comunicaciones móviles", Castelfdefels (cuatrimestre de otoño del curso académico 2001-2002).

[16] Fco. Javier Ceballos, "Fases en el desarrollo de un programa", cáp. 1 en *Curso de programación C/C++*, Ed. Ra-ma, pp. 1-15, Madrid (1995).

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Índice de figuras

Fig. 1.1a Red centralizada	Fig. 1.1b Red distribuida	5
Fig. 1.2 Pila de protocolos del estándar IEEE 802.11		6
Fig. 1.3 Densidad de potencia espectral del espectro ensanchado		7
Fig. 1.4 Procedimiento del protocolo CSMA-CA		10
Fig. 2.1 Área del escenario de simulación		13
Fig. 2.2 Demostración del movimiento de los nodos		15
Fig. 2.3 Función de la variable aleatoria <i>gaussiana</i> en unidades logarítmicas		17
Fig. 2.4 Radio de cobertura y transmisiones simultáneas		19
Fig. 2.5 Diagrama de flujo de las transmisiones del sistema		22
Fig. 3.1 Diagrama de flujo de las técnicas <i>Cross-Layer</i> propuestas		26
Fig. 3.2 Diagrama de flujo de la técnica <i>Cross-Layer</i> 4B		33
Fig. 4.1 Diagrama de relaciones entre las clases		35
Fig. 4.2 Diagrama de flujo del programa principal		38
Fig. 5.1 Diagrama de estadísticas calculadas		47
Fig. 5.2 Diagrama de estadísticas calculadas		51
Fig. 5.3a Caudal efectivo, técnica 1A	Fig. 5.3b Retardo medio, técnica 1A	53
Fig. 5.4 Caudal efectivo, sist. de referencia y técnicas 2A y 3A		54
Fig. 5.5 N° medio intentos, sist. de referencia y técnicas 2A y 3A		55
Fig. 5.6 Retardo medio, sist. de referencia y técnicas 2A y 3A		55
Fig. 5.7 Paquetes desbordados de cola, sist. de referencia y técnicas 2A y 3A		56
Fig. 5.8 % Colisiones, sist. de referencia y técnicas 2A y 3A		58
Fig. 5.9 % Paquetes < sensibilidad, sist. de referencia y técnicas 2A y 3A		58
Fig. 5.10 Control de admisión, sist. de referencia y técnicas 2A y 3A		59
Fig. 5.11 Caudal efectivo, sist. de referencia y técnicas 1B, 2B y 3B		61
Fig. 5.12 Retardo medio, sist. de referencia y técnicas 1B, 2B y 3B		62
Fig. 5.13 N° medio intentos, sist. de referencia y técnicas 1B, 2B y 3B		62
Fig. 5.14 Paquetes desbordados de la cola, sist. de referencia y técnicas 1B, 2B y 3B		63
Fig. 5.15 Paquetes que superan las ReTx, sist. de referencia y técnicas 1B, 2B y 3B		64
Fig. 5.16 % Colisiones, sist. de referencia y técnicas 1B, 2B y 3B		65
Fig. 5.17 % Paquetes < sensibilidad, sist. de referencia y técnicas 1B, 2B y 3B		66
Fig. 5.18 Control de admisión, sist. de referencia y técnicas 1B, 2B y 3B		66
Fig. 5.19 Caudal efectivo, sist. de referencia y técnica 4B		68
Fig. 5.20 Retardo medio, sist. de referencia y técnica 4B		68
Fig. 5.21 Paquetes que superan las ReTx, sist. de referencia y técnica 4B		70
Fig. 5.22 % Colisiones, sist. de referencia y técnica 4B		71
Fig. 5.23 % Paquetes < sensibilidad, sist. de referencia y técnica 4B		72
Fig. 5.24 Control de admisión, sist. de referencia y técnica 4B		73

Índice de tablas

Tabla 1.1. Clasificación de redes inalámbricas según alcance.....	3
Tabla 1.2. Capa física en las versiones más extendidas del estándar 802.11	8
Tabla 2.1. Asignación de PER según los intervalos de potencia recibida (<i>Prx</i>).....	20
Tabla 2.2. Tiempos de espera de las CW	20
Tabla 2.3. Resumen de los parámetros del escenario de estudio	23
Tabla 3.1. Selección de la CW según el margen de potencia recibida (<i>Prx</i>)	25
Tabla 3.2. Ventanas de contienda de la técnica 1A en unidades de tiempo.....	27
Tabla 3.3. Ventanas de contienda de la técnica 2A en unidades de tiempo.....	28
Tabla 3.4. Ventanas de contienda de la técnica 3A en unidades de tiempo.....	29
Tabla 3.5. Ventanas de contienda de la técnica 1B en unidades de tiempo.....	30
Tabla 3.6. Ventanas de contienda de la técnica 2B en unidades de tiempo.....	31
Tabla 3.7. Ventanas de contienda de la técnica 3B en unidades de tiempo.....	31
Tabla 3.8. Ventanas de contienda de la técnica 4B en unidades de tiempo.....	32



Escola Politècnica Superior
de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

ANEXOS

TÍTULO DEL PFC: Estudio de técnicas de *Cross-Layer* para sistemas de comunicaciones inalámbricos

TITULACIÓN: Ingeniería de Telecomunicación (segundo ciclo)

AUTORAS: Mireia Moya Román
Lorena Robles Campillo

DIRECTORES: Luís G. Alonso Zárate
Christos Verikoukis

FECHA: 30 de junio de 2005

ÍNDICE

ANEXO 1. AMPLIACIÓN DEL ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	1
1.1. Rendimiento del sistema de referencia.....	1
1.2. Rendimiento del sistema con la técnica 1A.....	7
ANEXO 2. GLOSARIO DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS.....	12

ANEXO 1. AMPLIACIÓN DEL ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

1.1. Rendimiento del sistema de referencia

En los resultados obtenidos, se ha verificado que el comportamiento de este sistema de referencia corresponde a un sistema de comunicaciones WLAN típico según los parámetros definidos en el capítulo 2.

Para analizar el comportamiento y el rendimiento de este sistema se han realizado pruebas variando el tamaño del escenario, el número de usuarios y la carga de tráfico del sistema.

- Aumento del número de usuarios en escenarios de tamaño constante

▪ Paquetes no recibidos

- *Escenarios pequeños:* al aumentar el número de usuarios en el sistema se producen más transmisiones. En escenarios de tamaño pequeño este aumento del número de transmisiones se traduce en un aumento de paquetes no recibidos (ver figura 1.1).
- *Escenarios grandes:* en este tipo de escenarios el total de paquetes no recibidos disminuye (ver figura 1.1). Este hecho se debe a que en escenarios grandes existe la posibilidad de que se produzcan transmisiones simultáneas sin interferirse (ver apartado 2.2.8). Estas transmisiones simultáneas tienen mayor probabilidad de llegar correctamente a mayor número de usuarios ya que en este caso es más probable encontrar a un nodo destino cerca.

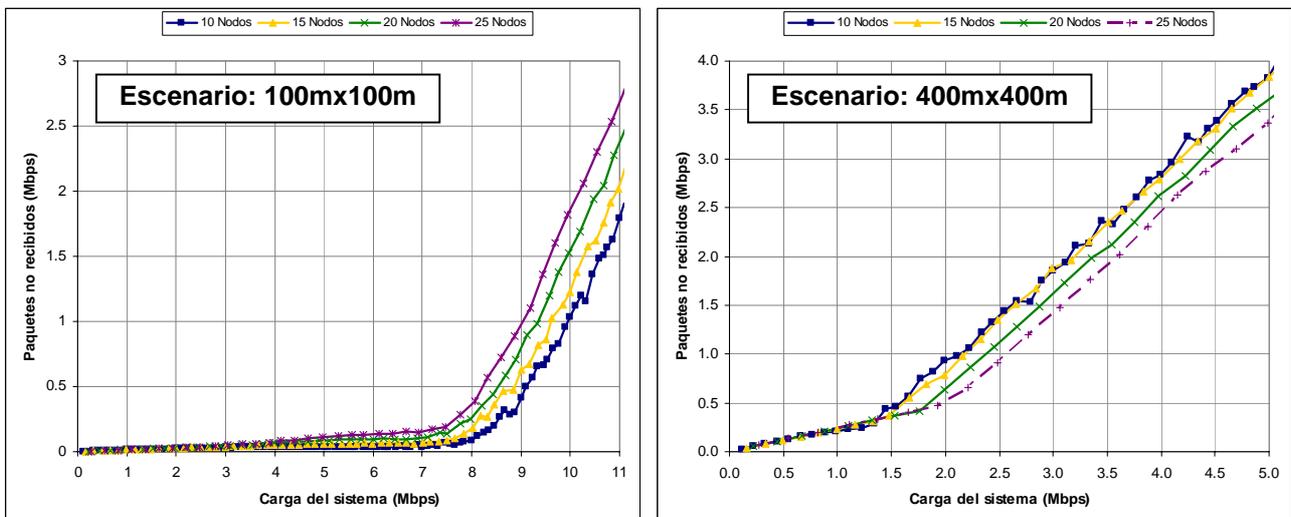


Fig. 1.1 Paquetes no recibidos del sistema de referencia según el n^o de nodos

Según lo explicado en el apartado 5.2.2 los paquetes no recibidos dependen del número de paquetes que se pierden por el desbordamiento de la cola, de los paquetes que sobrepasan el número máximo de retransmisiones y de los paquetes que permanecen en la cola.

- Paquetes que sobrepasan el número máximo de reintentos
 - *Escenarios pequeños*: en esta estadística se observa un crecimiento al aumentar el número de nodos del sistema.
 - *Escenarios grandes*: el número de paquetes que sobrepasan el número máximo de reintentos continúa creciendo.

- Paquetes que exceden de las colas
 - *Escenarios pequeños*: en esta estadística se observa un crecimiento al aumentar el número de nodos del sistema.
 - *Escenarios grandes*: en estos escenarios los paquetes que exceden de las colas disminuyen al aumentar el número de nodos debido a que, como se demuestra a continuación, disminuye el porcentaje de los paquetes con potencia menor a la sensibilidad con lo que el número de retransmisiones en el sistema disminuye así como la ocupación de las colas.

Para entender el comportamiento de estas dos estadísticas es necesario analizar las estadísticas de colisiones y las de paquetes recibidos por debajo de la sensibilidad.

➤ Colisiones:

- *Escenarios pequeños*: si se aumenta el número de usuario la probabilidad de que una transmisión colisione es mayor. Esto se debe a que en una misma área se sitúan más usuarios con lo que es más probable que su radio de cobertura se solape (ver figura 1.2).
- *Escenarios grandes*: independientemente de la existencia de transmisiones simultáneas, el hecho de que aumenten los usuarios en el sistema aumenta la probabilidad de colisión (ver figura 1.2). Esta estadística presenta unos valores mucho más pequeños ya que en este tipo de escenarios la probabilidad de colisionar es menor que en escenarios de tamaño pequeño.

Al aumentar las colisiones se realizan más retransmisiones aumentando la ocupación de las colas y la probabilidad de que las transmisiones superen el número máximo de intentos.

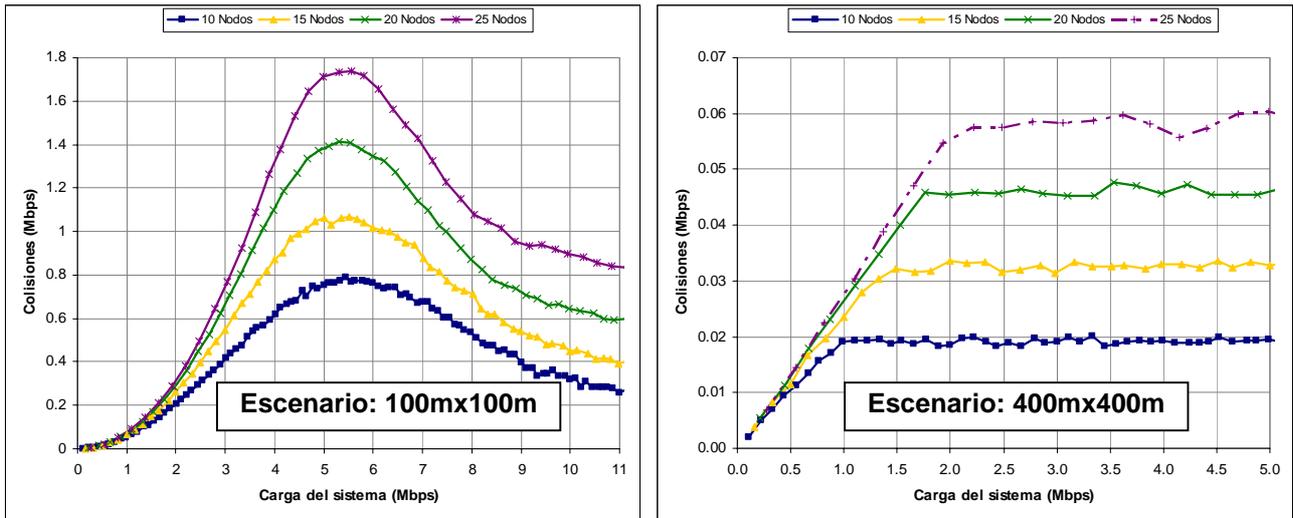


Fig. 1.2 Colisiones del sistema de referencia según el nº de nodos

➤ Paquetes por debajo de la sensibilidad:

- *Escenarios pequeños:* esta estadística aumenta de forma proporcional al aumento del número de nodos en el sistema. Al producirse más transmisiones es lógico que esta estadística crezca en valor absoluto, pero en porcentaje con respecto del total de las transmisiones para todos los escenarios probados existe una probabilidad de transmisiones por debajo de la sensibilidad igual.

Así, al aumentar los paquetes con potencia menor a la sensibilidad el nodo destino también se producen más retransmisiones que resultan en una mayor ocupación de las colas y en una probabilidad mayor de que se produzcan paquetes que sobrepasan los 6 reintentos.

- *Escenarios grandes:* a causa de la posibilidad de transmisiones simultáneas a medida que el número de usuarios en el sistema aumenta, la probabilidad de que un paquete se reciba por debajo de la sensibilidad disminuye. Este hecho sucede porque la probabilidad de encontrar a un nodo destino dentro del área de cobertura es mayor cuantos más usuarios hay en el sistema.

▪ Caudal efectivo

- *Escenarios pequeños:* el caudal efectivo disminuye a medida que aumentan los usuarios en el sistema (ver figura 1.3).
- *Escenarios grandes:* esta estadística es complementaria a los paquetes no recibidos (ver apartado 5.2) por lo tanto el caudal efectivo en el sistema aumenta a medida que aumentan los usuarios en el sistema.

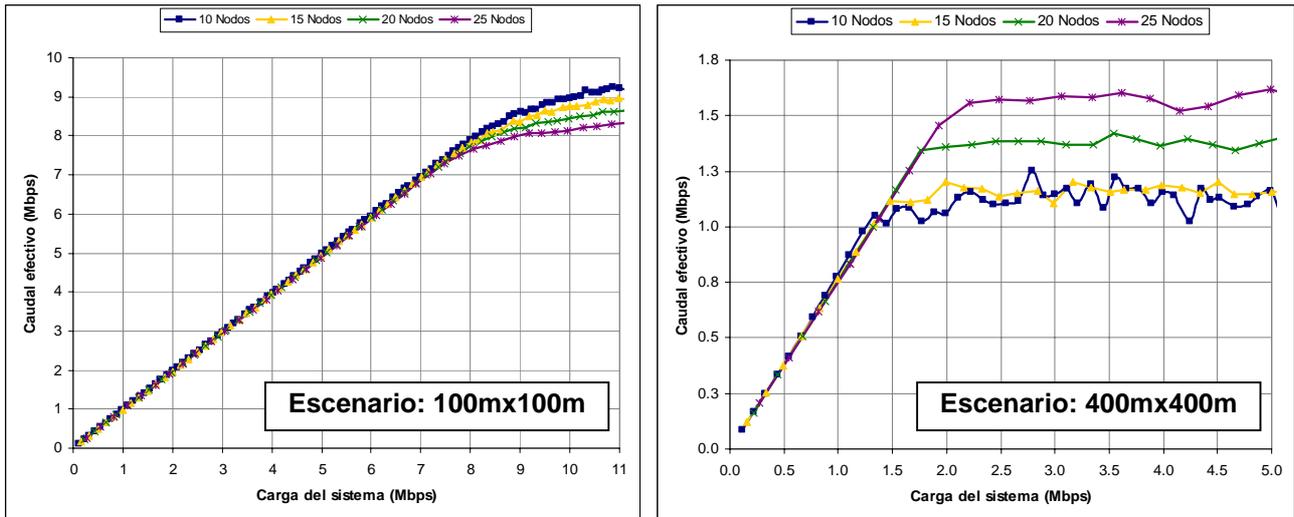


Fig. 1.3 Caudal efectivo del sistema de referencia según el nº de nodos

▪ Retardo medio de acceso

- *Escenarios pequeños:* a causa del aumento de las colisiones en el sistema y de los paquetes con potencia inferior a la sensibilidad el nodo destino, como ya se ha explicado, se producen más retransmisiones en el sistema haciendo que el retardo medio de acceso aumente (ver figura 1.4).

El aumento de las retransmisiones hace que los paquetes esperen más tiempo en cola retardando el envío de estos paquetes y de todos los que se van generando.

En esta estadística se observa el crecimiento exponencial del retardo medio de acceso debido a que los rangos de los tiempos de espera de las ventanas de contienda también tienen un crecimiento exponencial (ver apartado 2.3 del capítulo 2).

- *Escenarios grandes:* se observa el efecto de las transmisiones simultáneas. Con un número mayor de nodos el retardo medio de acceso es menor que con menos nodos cuando la generación de tráfico de cada nodo es baja. En cambio, para cargas de tráfico altas el retardo medio aumenta según aumenta el número de nodos (ver figura 1.4)

Este comportamiento se debe a que para cargas bajas de tráfico se producen menos colisiones y con un número alto de nodos la probabilidad de que una transmisión se reciba por debajo de la sensibilidad es menor que en un escenario con pocos nodos. Así, con un número elevado de nodos y poco tráfico se producen menos retransmisiones y por ello, los paquetes esperan menos tiempo en media en cola.

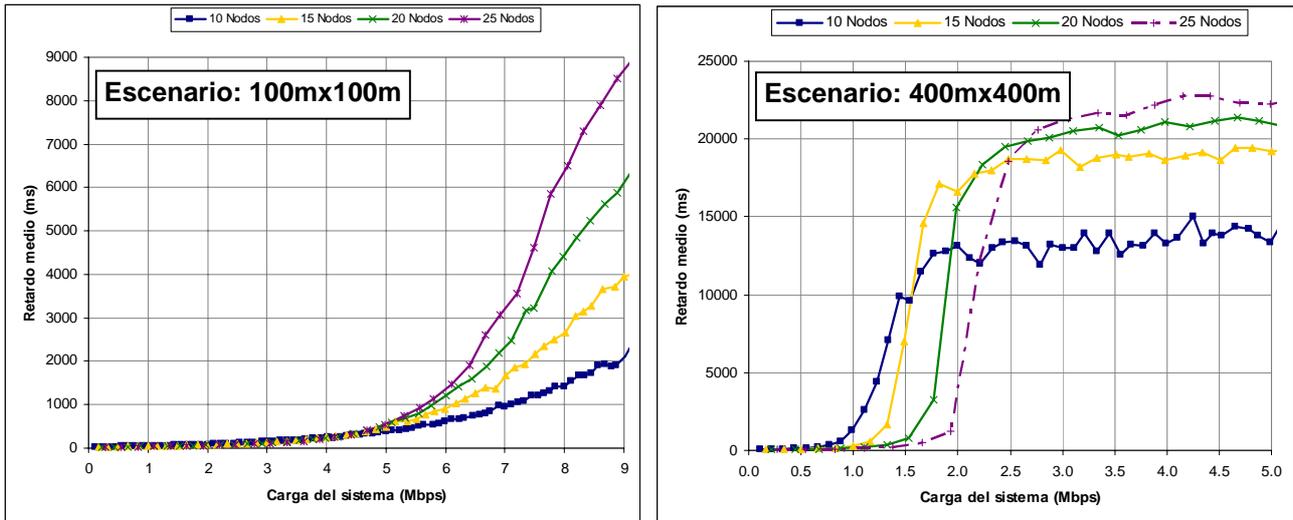


Fig. 1.4 Retardo medio del sistema de referencia según el nº de nodos

- **Aumentando el tamaño del escenario para un mismo nº de usuarios**
- **Paquetes no recibidos**

En este sistema, el total de paquetes no recibidos aumenta a medida que aumenta el tamaño del escenario. Esta estadística depende del total de paquetes que sobrepasan el número de reintentos máximo, del total de paquetes que exceden de las colas y de los paquetes que continúan en cola, y todas estas estadísticas aumentan también con el aumento del tamaño del escenario.

Para comprender este comportamiento es necesario observar las estadísticas de paquetes colisionados y de paquetes recibidos por debajo de la sensibilidad.

- **Colisiones:** esta estadística aumenta. Al aumentar el tamaño del escenario el porcentaje de transmisiones que no llegan al destino a causa de las colisiones disminuye ya que en media existe más distancia entre los nodos.
- **Paquetes por debajo de la sensibilidad:** esta estadística aumenta. Para un número de usuarios fijos, en escenarios de tamaño grande la probabilidad de que una transmisión se reciba por debajo de la sensibilidad es mayor. Este hecho se debe a que es más difícil encontrar a un nodo dentro del área de cobertura del nodo emisor (ver figura 1.5).

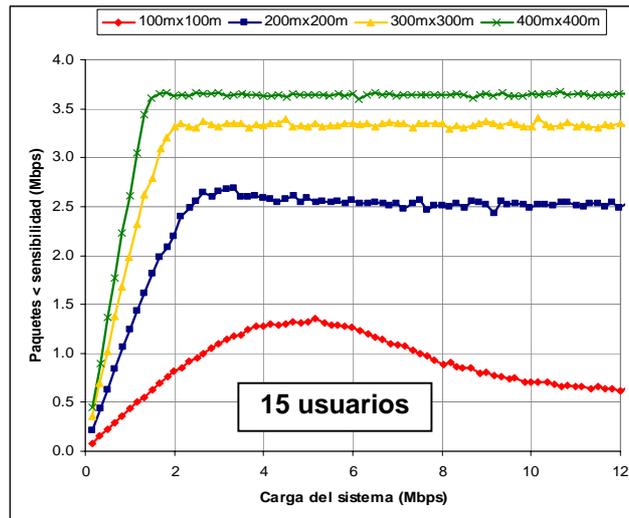


Fig. 1.5 Paquetes < sensibilidad del sist. de referencia según el escenario

Este aumento de los paquetes recibidos por debajo de la sensibilidad según el aumento del tamaño del escenario hace que para escenarios más grandes se realicen más retransmisiones. Así, se aumenta la ocupación de las colas y se aumentan los paquetes que sobrepasan los 6 reintentos máximos.

▪ Caudal efectivo

Esta estadística es complementaria a los paquetes no recibidos con lo que aumentando el tamaño del escenario se disminuye el caudal efectivo.

Esto es lógico puesto que es menor la probabilidad de encontrar a un nodo que escuche la transmisión si se fijan los usuarios en el sistema y se aumenta el tamaño del escenario (ver figura 1.6)

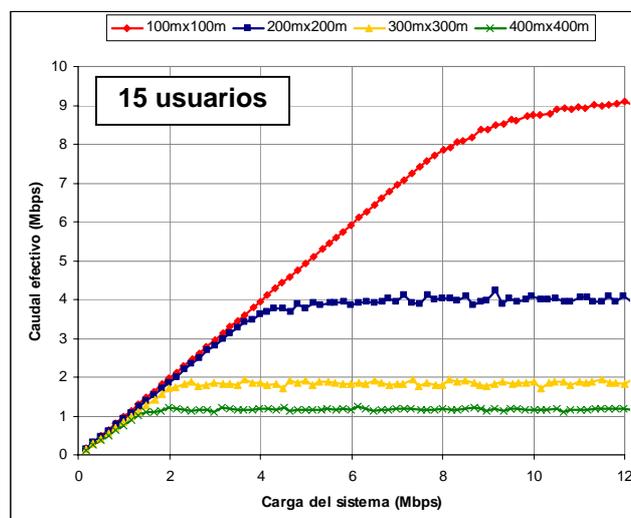


Fig. 1.6 Caudal efectivo del sistema de referencia según el escenario

- Retardo medio de acceso

De acuerdo con todas las demás estadísticas, el retardo medio de acceso aumenta según aumenta el tamaño del escenario. Esto se debe a que en escenarios grandes existen más paquetes que no se reciben por lo que aumentan las retransmisiones. Al aumentar las retransmisiones se aumenta el retardo medio de acceso a causa del algoritmo de contienda del sistema.

1.2. Rendimiento del sistema con la técnica 1A

La técnica de *Cross-Layer* 1A no presenta ninguna mejora en el sistema de comunicaciones, incluso empeora su comportamiento en escenarios de tamaño pequeño: 100mx100m y 200mx200m, aumentando el número de paquetes no recibidos por el destino. Así, en el presente anexo se analiza esta técnica y los motivos por los que no proporciona las mejoras esperadas.

La principal característica de esta técnica, como se explica en el capítulo 3 de la memoria, es la prioridad de los paquetes no recibidos que presentan una SNR mayor. Esta prioridad se consigue mediante los rangos de tiempos de espera propuestos en las ventanas de contienda CW-2, CW-3, CW-4 y CW-5 que hacen que los paquetes con mayor SNR esperen menos tiempo entre las retransmisiones. A mayor potencia recibida por el nodo menos tiempo de espera.

- Caudal efectivo

Uno de los objetivos en el diseño de esta técnica era conseguir aumentar el caudal efectivo o *throughput* del sistema. Sin embargo, en todas las pruebas realizadas con esta técnica 1A no se observan casi mejoras. Ambos sistemas, el de referencia y el de la técnica 1A, tienen el mismo comportamiento y casi el mismo rendimiento.

Este comportamiento se debe a que son sistemas muy parecidos. Aunque la técnica *Cross-Layer* 1A prioriza los paquetes con mayor SNR, presenta unas ventanas de contienda similares al sistema de referencia y con los rangos de tiempos solapados entre las distintas ventanas (ver capítulo 3).

En la figura 1.7 se observa el caudal efectivo para un sistema con un escenario de tamaño pequeño y con un escenario de tamaño grande para un número medio de usuarios.

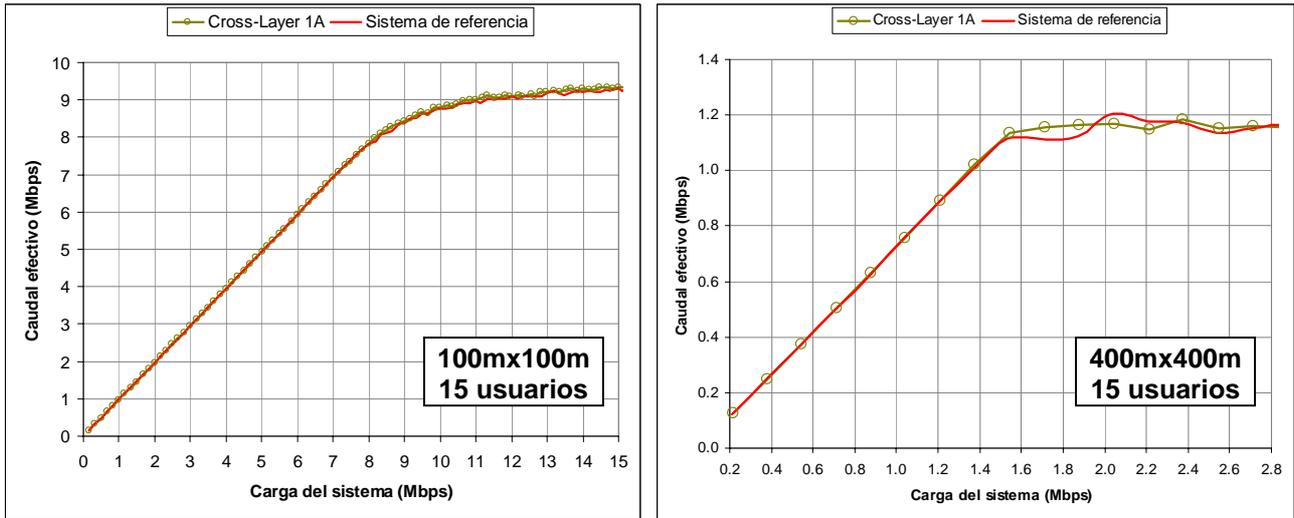


Fig. 1.7 Caudal efectivo del sistema de referencia y de la técnica 1A

- Retardo medio de acceso

Como se ha explicado, esta técnica mejora teóricamente el retardo medio del sistema. Pero en los resultados obtenidos con el sistema 1A se observa que esta mejora es muy leve (ver figura 1.8) debido a los mismos motivos explicados previamente para el caudal efectivo.

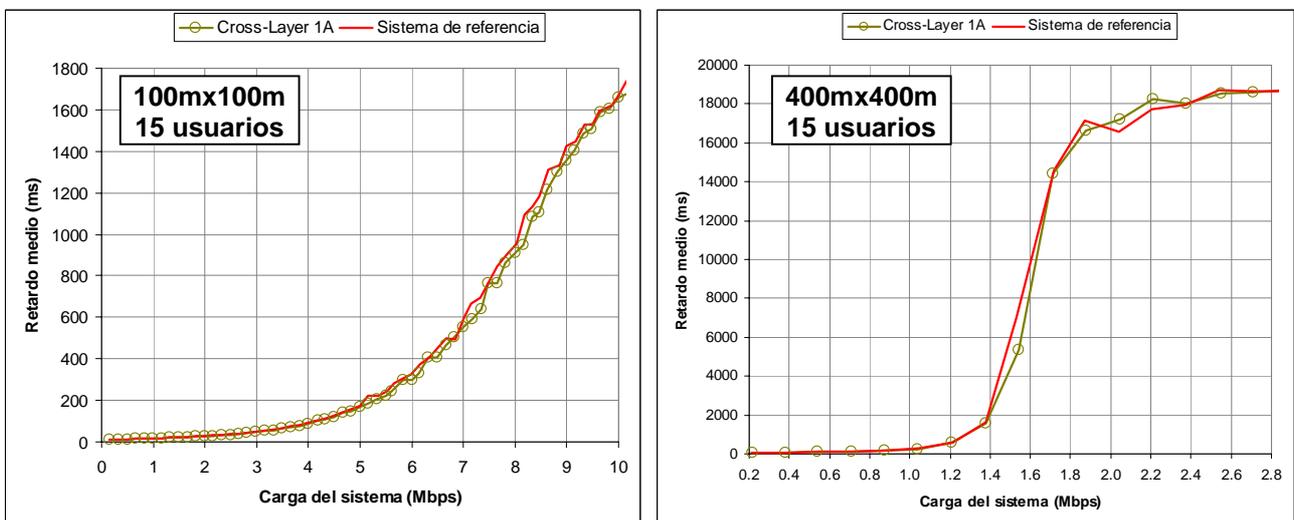


Fig. 1.8 Retardo medio del sistema de referencia y de la técnica 1A

- Paquetes no recibidos

El total de paquetes no recibidos en el sistema aplicando esta técnica *Cross-Layer* prácticamente no varía con respecto del sistema de referencia en todos los escenarios probados. Pero si se desglosa esta estadística según paquetes

que sobrepasan el número máximo de reintentos, paquetes que exceden de las colas y paquetes que permanecen en cola (ver capítulo 5) sí se observan dos diferencias:

- **Paquetes desbordados de las colas:** esta estadística disminuye ya que las transmisiones que no se reciben esperan menos tiempo en media para ser retransmitidas con lo que la ocupación de las colas es menor.
- **Paquetes que sobrepasan el número máximo de reintentos:** esta estadística aumenta en escenarios de tamaño pequeño mientras en escenarios grandes presenta el mismo rendimiento que el sistema de referencia (ver figura 1.9). Para comprender esta estadística se han de analizar las colisiones del sistema, los paquetes recibidos por debajo de la sensibilidad y los paquetes que contienen error.

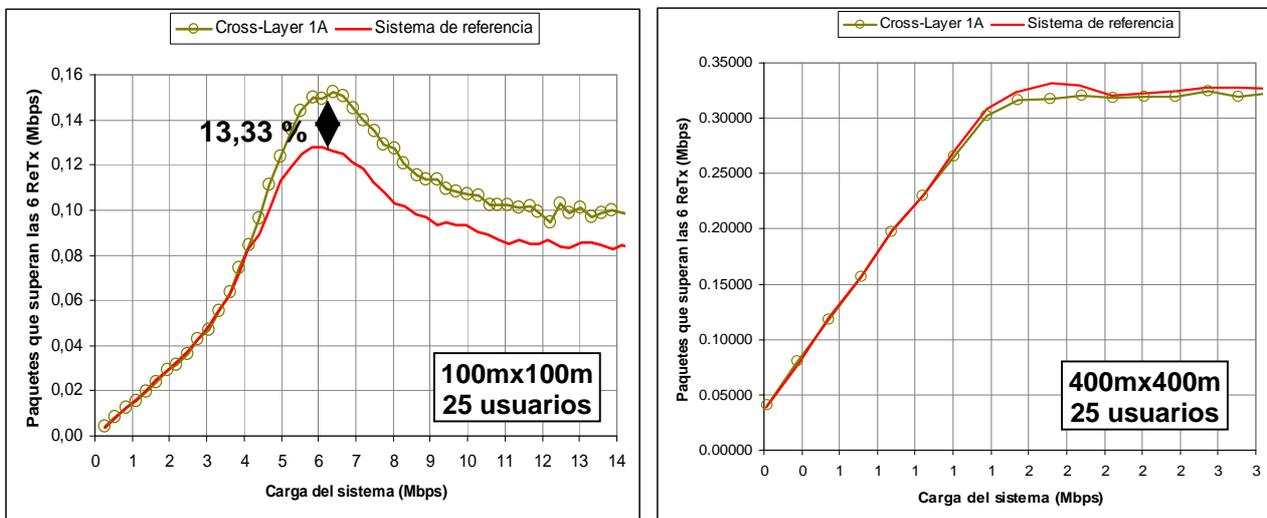


Fig. 1.9 Paquetes que superan las ReTx del sist. de referencia y técnica 1A

Analizando las estadísticas de colisiones, paquetes recibidos por debajo de la sensibilidad y paquetes con error debido al canal se observa que aumenta las colisiones en el sistema para escenarios de tamaño pequeño mientras que las otras dos estadísticas se mantienen igual que en el sistema de referencia.

- **Colisiones del sistema:** los nodos que realizan transmisiones que colisionan, para volver a transmitir las eligen una de las 4 ventanas de contienda nuevas en esta técnica de *Cross-Layer* (CW-1, CW-2, CW-3 y CW-4). Como ya se ha comentado estas ventanas presentan rangos de tiempos de espera más bajos que la ventana del sistema estándar priorizando los paquetes con mayor SNR.

A causa de que estas transmisiones esperan menos tiempo en retransmitirse se aumentan las transmisiones totales del sistema, sobretudo en escenarios con un número elevado de usuarios y de

tamaño pequeño donde se producen más colisiones. Pero estas transmisiones son las que presentan una potencia más elevada, con lo que son transmisiones que tienen una probabilidad mayor de producir nuevas colisiones.

En escenarios grandes donde no se producen tantas colisiones el comportamiento de la técnica 1A es prácticamente igual al sistema de referencia.

En la figura 1.10 se observa este efecto, donde el aumento de las colisiones es de un 16,35 % en un escenario pequeño con 25 usuarios.

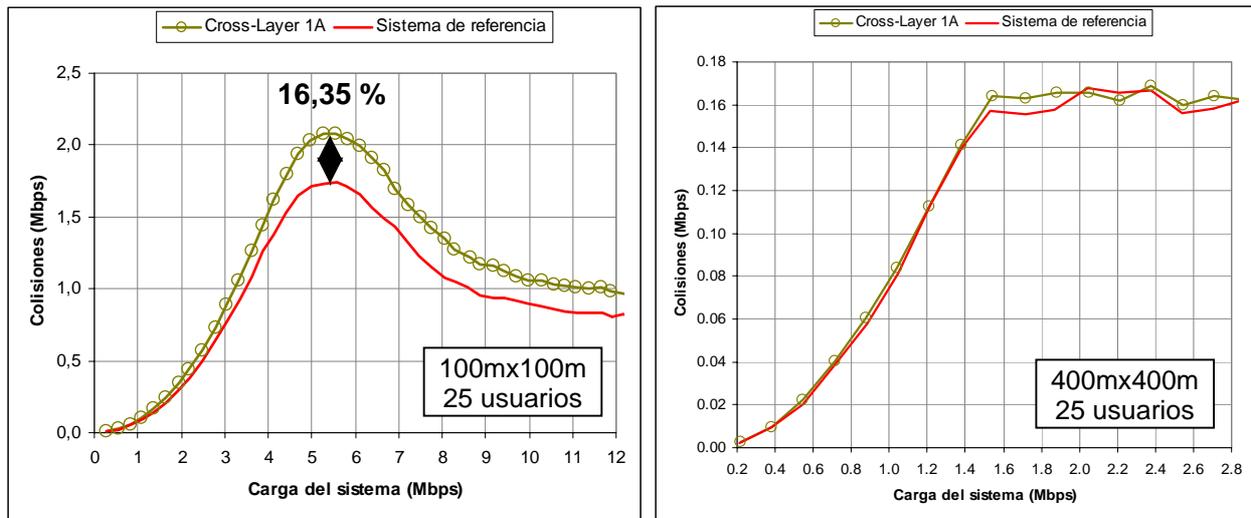


Fig. 1.10 Colisiones del sistema de referencia y de la técnica 1A

Además, las ventanas de contienda de esta técnica presentan rangos de tiempos de espera solapados, por lo que los motivos para que dos paquetes que han colisionado pueden volver a colisionar con esta técnica *Cross-Layer 1A*, son los mismos que en el sistema de referencia:

- Las transmisiones pertenecen al mismo margen de potencia recibida. Así, eligen la misma CW y eligen también el mismo tiempo de espera.
- Las transmisiones tienen distinto margen de potencia recibida y seleccionan distintas CW pero ambas eligen el mismo tiempo de espera dentro de los intervalos que se solapan.
- Las transmisiones colisionan con una nueva transmisión que también está dentro de su área de cobertura.

Se ha de puntualizar que el porcentaje de aumento de las colisiones no es igual al porcentaje de aumento de los paquetes que superan el número máximo de retransmisiones. Esto se debe, a que alguna de las

transmisiones que colisionan finalmente puede llegar correctamente al destino.

- Paquetes recibidos por debajo de la sensibilidad: es lógico que los paquetes por debajo de la sensibilidad no varíen de comportamiento porque la CW-1, ventana que se elige en estos casos, contiene los mismos valores de tiempos de espera que el sistema de referencia.
- Paquetes recibidos con error: esta estadística tampoco varía ya que el hecho de que un paquete contenga error depende de la situación del canal en el instante de la transmisión. Además, los paquetes que contienen error corresponden a un porcentaje muy bajo de las transmisiones y por tanto no es un parámetro que se pretende mejorar con las técnicas de *Cross-Layer*.

- **Control de admisión**

El número de usuarios que acepta el sistema implementado con la técnica *Cross-Layer* 1A es menor que el aceptado por el sistema de referencia sobretodo en escenarios de tamaño pequeño (ver figura 1.11). Este hecho se debe a que en escenarios pequeños se producen más colisiones y en el caso de la técnica 1A, como ya se ha explicado, este parámetro es mayor que en el sistema de referencia. Por ello, hay más transmisiones que no se reciben en el nodo destino y que hacen disminuir la QoS del sistema.

En la figura 1.11, se ha definido un umbral de QoS del 98 % de paquetes correctos para escenarios pequeños y un umbral del 80 % para escenarios grandes.

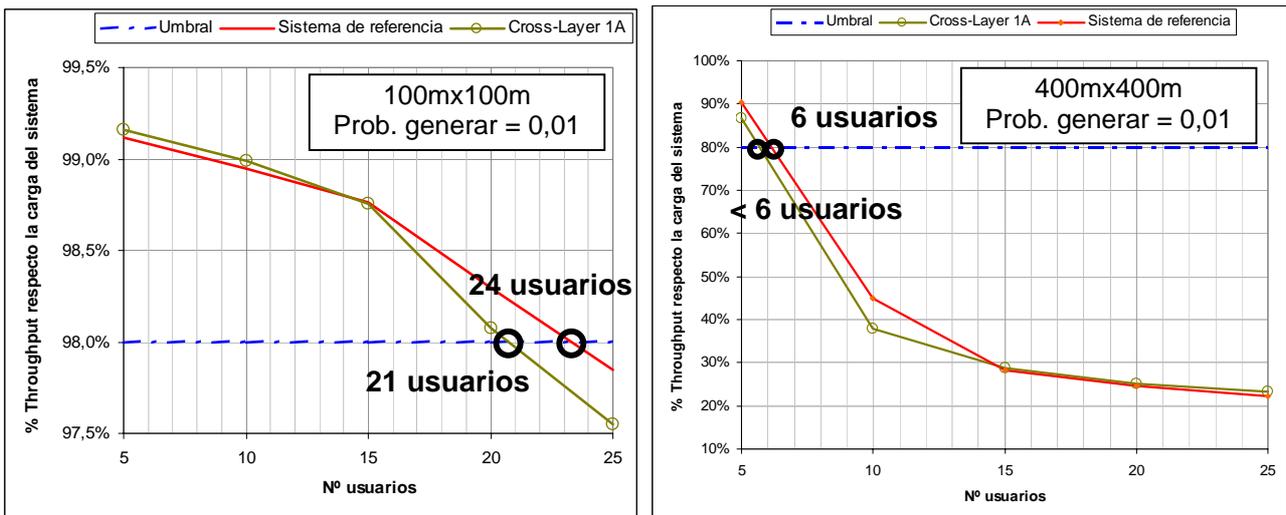


Fig. 1.11 Control de admisión del sistema de referencia y de la técnica 1A

ANEXO 2. GLOSARIO DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

- **ACK:** Acknowledge
- **BER:** Bit Error Ratio
- **BW:** Bandwidth
- **CDMA:** Code Division Multiple Access
- **CRC:** Cyclic Redundancy Check
- **CSMA-CA:** Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
- **CTS:** Clear to Send
- **CW:** Contention Window
- **DHSS:** Direct-Sequence Spread Spectrum
- **DIFS:** Distributed Inter-Frame Space
- **DLC:** Data Link Control
- **FEC:** Forward Error Correcting
- **FHSS:** Frequency Hopping Spread Spectrum
- **GPRS:** General Packet Radio System
- **GSM:** Global System for Mobile Communications
- **IEEE:** Institute of Electrical and Electronics Engineers
- **IP:** Internet Protocol
- **ISM:** Industrial Scientific Medical
- **LAN:** Local Area Network
- **LLC:** Logical Link Control
- **LMDS:** Local Multipoint Distribution System
- **MAC:** Medium Access Control
- **MACA:** Multiple Access with collision avoidance
- **MMDS:** Multichannel Multipoint Distribution System
- **NAV:** Network Allocate Vector
- **NLOS:** Non Line Of Sight
- **OFDM:** Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
- **OSI:** Open Systems Interconnection
- **PER:** Packet Error Ratio
- **PHY:** Physical Layer
- **PSD:** Power Spread Density
- **QoS:** Quality of Service
- **RTP:** Real-Time Transport Protocol
- **RTS:** Request to Send
- **SIFS:** Short Inter-Frame Space
- **SNR:** Signal to Noise Rate
- **UDP:** User Datagram Protocol
- **UMTS:** Universal Mobile Telecommunications System
- **U.T. :** Unidad temporal
- **WiMAX:** Worldwide Interoperability for Microwave Access
- **WLAN:** Wireless Local Area Network
- **WMAN:** Wireless Metropolitan Area Network
- **WPAN:** Wireless Personal Area Network