



Escola Politècnica Superior
de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TREBALL DE FI DE CARRERA

TÍTULO DEL TFC: Evaluación de la tecnología IEEE 802.11n con la plataforma OPNET

TITULACIÓN: Ingeniería Técnica de Telecomunicaciones, especialidad Telemática

AUTOR: Carlos Navarrete Chávez

DIRECTOR: David Remondo Bueno

FECHA: 14 de octubre de 2009

Título: Evaluación de la tecnología IEEE 802.11n con la plataforma OPNET

Autor: Carlos Navarrete Chávez

Director: David Remondo Bueno

Data: 14 de octubre de 2009

Resumen

En los últimos años las tecnologías inalámbricas se han expandido rápidamente y con un gran éxito de tal forma que podríamos decir que ocupan un rol importante en nuestra vida cotidiana.

En casa, en la oficina, en las universidades e institutos, en las empresas, aeropuertos y muchos sitios más podemos hacer uso de esta tecnología que nos permite mantenernos siempre comunicados de forma fácil y económica a través de dispositivos móviles.

Este proyecto analiza las características más relevantes descritas en el nuevo estándar IEEE 802.11n, dando a conocer las mejoras y beneficios introducidos a nivel de las capas física y MAC del protocolo OSI, que proporcionan una importante mejora de la tecnología de redes inalámbricas en la tasa de transmisión de .datos.

El estándar 802.11n no ha sido aún completado aunque tiene previsto su lanzamiento en Estados Unidos a finales de este mismo año. A pesar de ello, algunos distribuidores han ido lanzando productos que incorporaban algunas de las características descritas en los diferentes borradores del estándar.

Este trabajo tiene como primer objetivo, el análisis a nivel teórico de las mejoras propuestas en el nuevo estándar. Para ello, haremos un breve repaso del camino seguido por el estándar hasta el día de hoy; para luego describir en mayor detalle dichas mejoras e intentando compararlas con las características descritas en el estándar original.

Finalmente, ayudándonos de la plataforma de simulación OPNET, realizaremos algunas pruebas sobre algunos escenarios WLAN que nos permitan mostrar una de las mejoras más importantes a nivel MAC de 802.11n: la diferenciación de servicios en las aplicaciones. Esta característica introducida por primera vez en el estándar IEEE 802.11e representa el punto de partida a un servicio QoS en las aplicaciones de las tecnologías inalámbricas que necesitan transmitirse en tiempo real.

Title: Evaluación de la tecnología IEEE 802.11n con la plataforma OPNET

Author: Carlos Navarrete Chávez

Director: David Remondo Bueno

Date: October, 14th 2009

Overview

In the last years the wireless technologies have expanded quickly and with a great success in such a way that we could say that they occupy an important list in our daily life.

At home, in the office, in the universities and institutes, in the companies, airports and more many places we can make use of this technology that always allows staying official statements in an easy and economic way through mobile devices.

This project analyzes the most outstanding characteristics described in standard new IEEE 802.11n, giving to know the improvements and benefits introduced level of the layers physics and MAC of the protocol OSI that provide an important improvement of the technology of wireless nets in the transmission rate of data.

The standard 802.11n have not been even completed although it has foreseen their launching in United States at the end of this same year. In spite, some distributors have gone products that incorporated some of the characteristics described in the different drafts of the standard rushing.

This work has as first objective, the analysis at theoretical level of the improvements proposed in the new standard. For it, we will make a brief review of the road continued by the standard until today's day; it stops then to describe in more detail this improvements and trying to compare them with the characteristics described in the original standard.

Finally, helping us of the simulation platform OPNET, we will carry out some tests on some scenarios WLAN that allow us to show one from the most important improvements to level MAC of 802.11n: the differentiation of services in the applications. This characteristic introduced for the first time in standard IEEE 802.11e represent the starting point to a service QoS in the applications of the wireless technologies that you/they need to be transmitted in real-time.

ÍNDEX

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: EL ESTÁNDAR IEEE 802.11	3
1.1. Introducción	3
1.2. IEEE 802.11b.....	3
1.3. IEEE 802.11a.....	4
1.4. IEEE 802.11g.....	4
1.5. IEEE 802.11n.....	4
CAPÍTULO 2: ESTUDIO DEL ESTÁNDAR IEEE 802.11n.....	5
2.1. Introducción	5
2.2. Capa física	6
2.2.1. OFDM.....	6
2.2.2. MIMO (Multiple-Input Multiple-Output).....	7
2.2.3. Anchos de banda de canal: 20- 40 Mhz	9
2.2.4. Preámbulo Greenfield (GF)	15
2.2.5. Intervalo de guarda pequeño (Short GI)	15
2.2.6. Código de verificación de paridad de baja densidad (LDPC).....	16
2.3. Capa MAC	16
2.3.1. Agregación.....	17
2.3.2. Block Acknowledgement.....	20
2.3.3. Protocolo de dirección inversa.....	23
2.3.4. PMSP (Power – Save Multi – Poll)	24
CAPÍTULO 3: ESTUDIO DEL ESTÁNDAR IEEE 802.11e.....	27
3.1. Estándar IEEE 802.11e	27
3.1.1. Introducción.....	27
3.1.2. EDCA	28
3.1.3. HCCA	31
3.1.4. Block Ack.....	32
3.1.5. Direct Link Protocol (DLP).....	34
CAPÍTULO 4: SIMULACIONES Y RESULTADOS	35
4.1. Configuración del escenario de la simulación	35
4.1.1. Configuración de los tráfico de las aplicaciones	35
4.1.2. Parámetros WLAN.....	36
4.2. Resultados de las simulaciones.....	37
4.2.1. Parámetros a evaluar	37
4.2.2. Escenario 802.11	37
4.2.3. Escenario 802.11 con EDCA	40
4.2.4. Análisis de las simulaciones sobre la aplicación de DATOS.....	42
4.2.5. Análisis de las simulaciones sobre la aplicación de VIDEO	43
4.2.6. Análisis de las simulaciones sobre la aplicación de VOZ	45
CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....	47
GLOSARIO	49
REFERENCIAS.....	53

ANEXOS	55
1.1. Anexo 1: Historia de 802.11n	56
1.1.1. Preparación del estándar	56
1.1.2. IEEE 802.11 HTSG	56
1.1.3. IEEE 802.11 TGn	57
1.1.4. El camino del estándar desde entonces	58
1.2. Anexo 2: Proceso de codificación LDPC	60
1.3. Anexo 3: Capa MAC 802.11	63
1.3.1. DCF (Función de coordinación distribuida)	63
1.3.2. PCF (Función de coordinación puntual)	64
1.4. Anexo 4: Manual del simulador OPNET	66
1.4.1. Introducción.....	66
1.4.2. Partes del simulador OPNET Modeler.....	66
1.4.3. Modelado de una nueva red.....	73
1.4.4. Node Editor	78
1.4.5. Process Model Editor.....	78
1.5. Anexo 5: Configuración de la red.....	80
1.5.1. Selección de los elemento de la red	80
1.5.2. Configuración de las aplicaciones	81
1.5.3. Configuración de los perfiles.....	83
1.5.4. Configuración de las estaciones	84
1.5.5. Configuración del punto de acceso	88
1.5.6. Elección de las estadísticas a simular.....	89
1.5.7. Configuración de la simulación.....	90

TABLAS

Tabla 1.1. Resumen de PHYs IEEE 802.11.....	3
Tabla 4.1. Parámetros de configuración de los tráfico de las aplicaciones....	35
Tabla 4.2. Parámetros de acceso EDCA por defecto.....	37
Tabla 4.3. Comparativa de valores de throughput en escenario 802.11.....	39
Tabla 4.4. Retardos para las aplicaciones en escenario EDCA.....	40
Tabla 4.5. Comparativa de valores de throughput en escenario EDCA.....	41

FIGURAS

Fig. 2.1. Comparación entre las modulaciones: portadora única y OFDM [1]....	6
Fig. 2.2. Representación del sistema Transmit Beamforming [2].....	7
Fig. 2.3. Representación del sistema MIMO/SDM [2].....	8
Fig. 2.4. Sistema MIMO “2x3” [1].....	9
Fig. 2.5. Diseño de subportadoras en canal 40Mhz [1].....	10
Fig. 2.6. Máscara espectral del canal 40Mhz [1].....	11
Fig. 2.7. Interferencia co-canal entre canales de 20 y 40Mhz [1].....	11
Fig. 2.8. Diseño se subportadoras en canal de 20 Mhz [1].....	13
Fig. 2.9. Máscara espectral de canal 20 Mhz [1].....	13
Fig. 2.10. Coexistencia en la banda de 5 Ghz [1].....	14
Fig. 2.11. Coexistencia en la banda de 2,4 Ghz [1].....	14
Fig. 2.12. Representación del Intervalo de Guarda [2].....	15

Fig. 2.13. Diagrama de las mejoras introducidas respecto al estándar 802.11e.....	17
Fig. 2.14. Agregación A-MSDU y A-MPDU [1].....	18
Fig. 2.15. Encapsulamiento A-MSDU [1].....	19
Fig. 2.16. Encapsulamiento A-MPDU [1].....	19
Fig. 2.17. Mecanismo de reordenación [1].....	21
Fig. 2.18. Secuencias HT BA inmediato [1].....	21
Fig. 2.19. Secuencias HT BA retrasado [1].....	23
Fig. 2.20. TXOP (a) sin y (b) con el protocolo de dirección inversa [1].....	23
Fig. 2.21. Secuencia PMSP [1].....	25
Fig. 3.1. Mapeo de TC a AC [3].....	28
Fig. 3.2. Funcionamiento EDCA [3].....	29
Fig. 3.3. Representación del acceso al canal para cada AC [1].....	30
Fig. 3.4. Representación de la fase de Acceso Controlado al canal [1].....	31
Fig. 3.5. BlockAck Inmediato y Retrasado [1].....	34
Fig. 4.1. Escenario de la simulación.....	36.
Fig. 4.2. Retardo escenario 802.11.....	38.
Fig. 4.3. Troughput escenario 802.11.....	39.
Fig. 4.4. Retardo escenario EDCA.....	40
Fig. 4.5. Troughput escenario EDCA.....	41
Fig. 4.6. Retardos aplicación DATOS.....	42
Fig. 4.7. Troughputs aplicación DATOS.....	43.
Fig. 4.8. Retardos aplicación VIDEO.....	44.
Fig. 4.9. Troughputs aplicación VIDEO.....	44
Fig. 4.10. Retardos aplicación VOZ.....	45
Fig. 4.11. Troughputs aplicación VOZ.....	46
Fig.5.1. Mapeo de TC a AC [1].....	62
Fig. 5.2. Mecanismo DCF [3].....	63
Fig. 5.3. Mecanismo PCF [9].....	65
Fig. 5.4. OPNET Modeler.....	66
Fig. 5.5. Project Editor.....	67
Fig. 5.6. Node Editor.....	67
Fig. 5.7. Process Model Editor.....	68
Fig. 5.8. Link Model Editor.....	68
Fig. 5.9. Path Editor.....	69
Fig. 5.10. Demand Editor.....	69
Fig. 5.11. Probe Editor.....	70
Fig. 5.12. Simulation Sequence Editor.....	70
Fig. 5.13. Antenna Pattern Editor.....	71
Fig. 5.14. Filter Editor.....	71
Fig. 5.15. ICI Editor.....	72
Fig. 5.16. Modulation Curve.....	72
Fig. 5.17. Packet Format Editor.....	73
Fig. 5.18. PDF Editor.....	73
Fig. 5.19. Módulos y conexiones lógicas del Node Editor.....	78
Fig. 5.20. Opciones del menú Process Model Editor.....	79
Fig. 5.21. Ventana configuración de Application Config.....	81

Fig. 5.22.	Configuración de la aplicación de VOZ.....	82
Fig. 5.23.	Configuración de la aplicación de VIDEO.....	82
Fig. 5.24.	Configuración de la aplicación de DATOS.....	82
Fig. 5.25.	Ventana configuración de Profile Config.....	83
Fig. 5.26.	Ventana de configuración de las estaciones.....	84
Fig. 5.27.	Configuración de la aplicación de VOZ en la estación.....	85
Fig. 5.28.	Configuración de la aplicación de la estación al punto de acceso....	85
Fig. 5.29.	Configuración del perfil de VOZ en la estación.....	86
Fig. 5.30.	Configuración los parámetros WLAN de una estación.....	87
Fig. 5.31.	Configuración los parámetros EDCA de una estación.....	87
Fig. 5.32.	Ventana de configuración del punto de acceso.....	88
Fig. 5.33.	Ventana de configuración de aplicaciones soportadas por el AP.....	89
Fig. 5.34.	Ventana de selección de parámetros a simular.....	89
Fig. 5.35.	Ventana de configuración de la simulación.....	90

INTRODUCCIÓN

En los últimos años las tecnologías inalámbricas se han expandido rápidamente y con un gran éxito de tal forma que podríamos decir que ocupan un rol importante en nuestra vida cotidiana.

En casa, en la oficina, en las universidades e institutos, en las empresas, aeropuertos y muchos sitios más, podemos hacer uso de esta tecnología que nos permite mantenernos siempre comunicados de forma fácil y económica a través de dispositivos móviles.

A modo de ejemplo, hace pocos meses de este año el Ayuntamiento de Barcelona puso en marcha el servicio gratuito “WiFi Barcelona” el cual permite la conexión a Internet de forma gratuita a través de diversos puntos de acceso repartidas en ciertos puntos de la ciudad con el fin de fomentar la comunicación y el acceso a las nuevas tecnologías en los ciudadanos.

Es por ello que desde la creación de la primera versión del estándar 802.11 en el año 1997, el crecimiento de esta tecnología basado en redes inalámbricas (WLAN) no ha parado de crecer de forma inestimable hasta el día de hoy.

El gran éxito que ha tenido esta tecnología ha hecho que la gente quiera poder acceder a aplicaciones multimedia como juegos en tiempo real, audio y videoconferencia a través de sus dispositivos inalámbricos, todo esto manteniendo una velocidad de datos que satisfaga sus necesidades, las cuales no eran cubiertas por los primeros estándares ya que estaban pensados para aplicaciones “best effort”.

Afortunadamente, desde entonces la tecnología ha continuado desarrollándose pasando por estándares como el 802.11a y 802.11g, los cuales brindaban una mayor tasa de datos; hasta que en el año 2002 se empezó a definir algunas mejoras a nivel físico y MAC como parte de un nuevo estándar que basándose en el 802.11a permitiese conseguir tasas de transmisión superiores a los 100Mbps.

Así se plantaban las primeras bases del estándar 802.11n, el cual definía un conjunto de mecanismos y mejoras para proporcionar a los usuarios mayores tasas de datos, alcance y fiabilidad.

El estándar 802.11n ha sido recientemente ratificado por la organización IEEE en septiembre de este año. A pesar de ello, algunos distribuidores han ido lanzando productos que incorporaban algunas de las características descritas en los diferentes borradores del estándar.

Sin duda 802.11n marca una verdadera revolución en el mundo de las comunicaciones, aumentando la velocidad de las redes inalámbricas de una forma increíble y acercándolas de esta forma a las tasas brindadas por las redes cableadas.

CAPÍTULO 1: EL ESTÁNDAR IEEE 802.11

En este capítulo haremos una breve introducción sobre la tecnología de redes inalámbricas IEEE 802.11. Mostrando finalmente las principales características de los diferentes estándares propuestos.

1.1. Introducción

La familia IEEE 802.11 constituye una serie de especificaciones para la tecnología de redes inalámbricas (WLAN). Estas especificaciones están orientadas a nivel de la capa física y la subcapa MAC del modelo OSI, para adaptarlas a los requerimientos especiales de las WLAN pero ofreciendo la misma interfaz para capas superiores, manteniendo así la interoperabilidad.

La primera versión del estándar 802.11 fue aprobado en 1997 por la IEEE tras varios años de desarrollo y en la que se definían 3 opciones para la capa física (PHY): infrarrojo, FHSS y DSSS, soportando tasas de datos de 1 y 2 Mbps en la banda de 2,4 GHz.

En la **Tabla 1.1**, se muestran algunas características a nivel de la capa física de los estándares propuestos en la tecnología. En ella podemos destacar las diferencias de las tasas de datos soportadas, las cuales han ido en aumento hasta llegar a los 600 Mbps con el estándar 802.11n.

Tabla 1.2. Resumen de PHYs IEEE 802.11

	802.11	802.11b	802.11a	802.11g	802.11n
Tecnología PHY	DSSS	DSSS/CKK	OFDM	OFDM DSSS/CKK	SDM/OFDM
Tasa de datos	1, 2 Mbps	5.5, 11 Mbps	6 - 54 Mbps	1 – 54 Mbps	6 – 600 Mbps
Banda de frecuencia	2,4 Ghz	2,4 Ghz	5 Ghz	2,4 Ghz	2,4 y 5 Ghz
Ancho de canal	25 Mhz	25 Mhz	20 Mhz	25 Mhz	20 y 40 Mhz

1.2. IEEE 802.11b

El estándar IEEE 802.11b fue ratificado el año 1999, basándose en la técnica DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) e introduciendo el esquema de codificación CCK (Complementary Code Keying).

La velocidad de transmisión máxima es de 11Mbps, utilizando el mismo método de acceso CSMA/CA definido en el estándar original. Trabaja en la banda ISM de 2,4 GHz.

1.3. IEEE 802.11a

El estándar IEEE 802.11a también fue aprobado en el año 1999, aunque los productos de esta tecnología salieron más tarde que los del 802.11b, debido a que su realización fue más complicada.

Está basada en OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), tecnología que explicaremos con mayor detalle en siguientes capítulos, ya que es utilizada también en la capa física del estándar 802.11n.

La tecnología permite conseguir velocidades de transmisión hasta los 54Mbps en la banda de 5Ghz. El hecho de operar en una banda diferente que el estándar 802.11b, provoca que los productos de dichas tecnologías no sean compatibles entre sí.

1.4. IEEE 802.11g

El estándar IEEE 802.11g fue lanzado el año 2003, combinando las ventajas de los dos estándares anteriores, permitiendo alcanzar velocidades de hasta 54 Mbps.

Esta tecnología es compatible con 802.11b y 802.11a, ya que permite soportar tanto OFDM como DSSS. Trabaja en la banda de 2,4 Ghz.

1.5. IEEE 802.11n

El éxito comercial del estándar 802.11g impulsó enormemente el uso de WiFi y la necesidad de ampliar las demandas sobre la tecnología. De esta forma, se continuó desarrollando y en el año 2002 se empezó a definir algunas mejoras a nivel PHY/MAC que formarían parte del hoy nuevo estándar 802.11n.

El estándar 802.11n fue ratificado por la organización IEEE el 11 de septiembre de 2009, operando en las bandas de 2.4 y 5 GHz, aunque se espera que opere preferentemente en la segunda debido a que la primera está más ocupada.

Este estándar incorpora un ancho de banda de los canales de 40MHz, la tecnología MIMO, además de otras mejoras a nivel físico y MAC.

CAPÍTULO 2: ESTUDIO DEL ESTÁNDAR IEEE 802.11n

En este capítulo realizaremos el estudio del nuevo estándar 802.11n. Para ello, describiremos las mejoras propuestas a nivel de la capa física y MAC que le permiten alcanzar altas tasas de datos.

En el **Anexo 1**, podremos conocer el proceso seguido por el estándar desde su propuesta, hasta su ratificación en septiembre de este mismo año.

2.1. Introducción

Antes de entrar en próximos apartados al estudio detallado de las mejoras del estándar IEEE 802.11n a nivel, describiremos brevemente las características más relevantes que nos permiten conseguir tasas elevadas de datos, entre otras muchas más innovaciones.

Tasas de datos superiores a nivel físico

Las tasas de datos en 802.11n son significativamente mejores sobre las conseguidas por 802.11a y 802.11g, fundamentalmente por el uso de la multiplexación espacial (MIMO) y el uso de canales de 40 MHz.

Además de estas mejoras, también se incluyen mejoras opcionales que incluyen el uso de intervalo de guarda más pequeño, el cual puede ser utilizado bajo ciertas condiciones de canal; y un nuevo formato de preámbulo llamado preámbulo Greenfield.

Mejora de la eficiencia a nivel MAC

Esta eficiencia se logra gracias a la implementación de la agregación de paquetes y mejoras en el protocolo de Block Ack (detallado en el estándar 802.11e)

También se incluyen mejoras como el protocolo de dirección inversa que proporciona una mejora de rendimiento bajo ciertos tipos tráficos y la utilización de un espacio inter-trama más pequeño (RIFS)

Robustez

Esta mejora se consigue inherentemente mediante el incremento de la diversidad espacial dado por la utilización de múltiples antenas. Otras opciones que nos brindan robustez son el uso de la codificación STBC (Space-Time Block Coding) y un nuevo código de canal LDPC (Low Density Parity Code), entre otros más.

Finalmente, debido al gran crecimiento de la utilización de dispositivos móviles, se introduce una nueva técnica de acceso al canal llamado PSMP (Power-Save Multi-Poll), la cual permite soportar eficientemente un mayor número de estaciones.

2.2. Capa física

2.2.1. OFDM

La capa física del estándar 802.11n se desarrolló basándose en la estructura de la multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM) de 802.11a.

Esta elección se hizo ya que OFDM es mucho más adecuada para entornos de fading ante posibles interferencias, debido a que modula el conjunto de datos en las diferentes subportadoras y por tanto sólo se verían afectadas algunas subportadoras, las cuales luego pueden ser recuperadas mediante algún método de corrección de errores.

En la **Fig.2.1** se muestra una comparación ilustrativa entre ambos tipos de multiplexaciones.

Además, la utilización de OFDM resulta imprescindible si tenemos en cuenta que es tolerante con los errores de sincronización de tiempo, muy común en sistemas de intercambio elevadas tasas de datos.

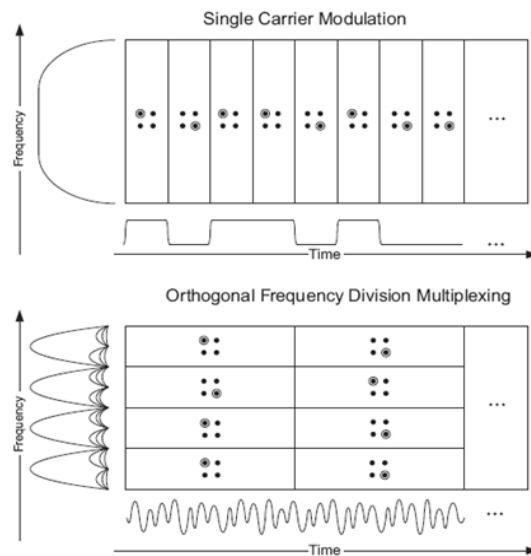


Fig. 2.1 Comparación entre las modulaciones: portadora única y OFDM [1]

Para 802.11a, el tiempo de símbolo es de 4ms (incluyendo los 800ns de intervalo de guarda). Por tanto, para 54 Mbps cada uno de estos símbolos lleva 216 bits de información y 72 bits de corrección de errores repartidos dentro de las 48 subportadoras de datos disponibles.

En 802.11n, se mantiene estos 4ms de tiempo de símbolo pero el número de subportadoras para cada canal de 20 MHz aumenta a 52, incrementando la tasa de datos máxima de 54 a 65 Mbps para una transmisión radio.

Dado que 802.11n también permite la utilización de hasta 8 tasas de transmisión distintas y un número de transmisores a 4, tenemos hasta 32 tasas de datos disponibles.

Como explicaremos en próximos apartados, utilizando canales de 40 MHz aumentamos el número de subportadoras a 108.

2.2.2. MIMO (Multiple-Input Multiple-Output)

MIMO representa el corazón del estándar 802.11n, ya que fundamentalmente a través de esta técnica se logran velocidades de hasta 600 Mbps.

Tradicionalmente, en las comunicaciones radio se utilizaba un sistema SISO (Single-Input Single-Output) en las que tanto el transmisor como el receptor estaban configuradas con una antena.

En este tipo de sistemas, la cantidad de información que puede ser transportada depende de la cantidad de potencia de señal que excede el ruido en el receptor (SNR). Mientras mayor sea el valor de SNR, mayor será la cantidad de información que podrá llevar la señal y podrá recuperar el receptor.

MIMO describe un sistema compuesto por un transmisor con múltiples antenas que transmite a un receptor el cual también está provisto de múltiples antenas. Este sistema aprovecha fenómenos físicos en la transmisión como la propagación multicamino para incrementar la tasa de transmisión y reducir considerablemente la tasa de transmisión (contraproducentes en un sistema SISO convencional).

A continuación describiremos algunas técnicas que hace servir MIMO para mejorar el SNR en el receptor.

2.2.2.1. Transmit Beamforming

Esta técnica consiste en enviar diversas señales de radio desfasadas desde múltiples antenas que luego son luego añadidas en una única señal por el receptor; la **Fig 2.2** muestra un ejemplo de esta técnica.

Al transmitir con más de una antena es posible coordinar la señal que se envía desde cada una de ellas, consiguiendo mejorar notablemente la señal recibida.

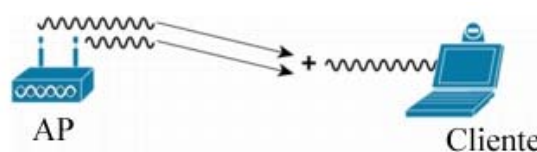


Fig. 2.2 Representación del sistema Transmit Beamforming [2]

Debido a que cada señal es enviada desde una distancia diferente desde cada antena, es probable que cada una de ellas llegue al receptor con una determinada fase. Esta diferencia en fase afecta a la potencia total de la señal en el receptor, pero ajustando adecuadamente la fase de cada una de las señales en el transmisor, la señal recibida puede aumentarse, incrementando así el SNR.

Para aumentar la señal en el receptor e implementar esta técnica, es necesario que el receptor envíe al transmisor información relacionada con la señal a recibir para que éste pueda sintonizar cada señal que envíe. Esta información no se envía inmediatamente y tiene una validez efímera ya que cualquier movimiento del transmisor o receptor, puede invalidar inmediatamente los parámetros usados.

Esta técnica es útil sólo cuando se transmite a un único receptor, ya que no es posible optimizar la fase de las señales transmitidas cuando se transmite a varios receptores (broadcast o multicast); siendo especialmente eficaz en entornos donde hay algunos objetos reflectivos que puedan causar pérdidas.

2.2.2.2. *SDM (Spatial Division Multiplexion)*

Consiste en la multiplexación de una señal de mayor ancho de banda en señales de menor ancho de banda iguales, transmitiéndose desde múltiples antenas. Si estas señales llegan con una correcta separación de tiempo, el receptor será capaz de distinguirlas creando múltiples canales en anchos de banda mínimos.

Como se muestra en la **Fig. 2.3**, con MIMO/SDM la tasa de datos del sistema aumenta con el número de flujos de datos independientes; por ello, el número de antenas transmisoras/receptoras debe ser mayor o igual al flujos de datos.

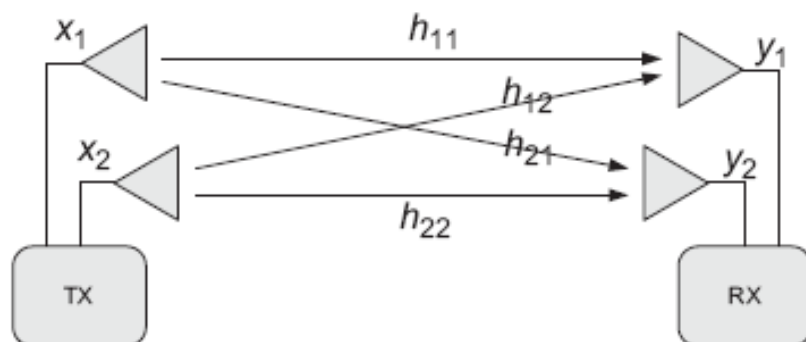


Fig. 2.3 Representación del sistema MIMO/SDM [2]

Cuando una señal viaja por diferentes caminos hacia un único receptor, el tiempo que tarda en llegar a su destino depende de la longitud del camino que recorre. La señal que viaja por el camino más corto llegará primera, seguida de

las copias o ecos de las señales ligeramente retrasadas de los caminos más largos. Dado que éstas viajan a la velocidad de la luz, el tiempo transcurrido entre la primera señal y las siguientes es de sólo nanosegundos; por lo que esta demora tan pequeña puede causar una degradación de la señal en una sola antena, ya que todas las copias pueden interferir con la primera al llegar.

MIMO envía múltiples señales radio al mismo tiempo aprovechando el multicamino. Cada una de estas señales es llamada flujo espacial. Cada flujo espacial es enviado desde su propia antena, usando su propio transmisor. Debido al espacio entre cada una de las antenas, cada señal sigue ligeramente un camino distinto hacia el receptor (diversidad espacial). El receptor dispone de múltiples antenas, cada una de ellas con su propia radio, las cuales decodifican independientemente las señales recibidas; donde a continuación son combinadas en una sola.

El resultado de esta señal es mucho mejor que el de conseguido por una sola antena o utilizando la técnica de transmit beamforming.

Los sistemas MIMO se describen utilizando el número de transmisores y receptores presentes, por ejemplo en la **Fig 2.4** se muestra un sistema MIMO: “2X3” (2 transmisores y 3 receptores)

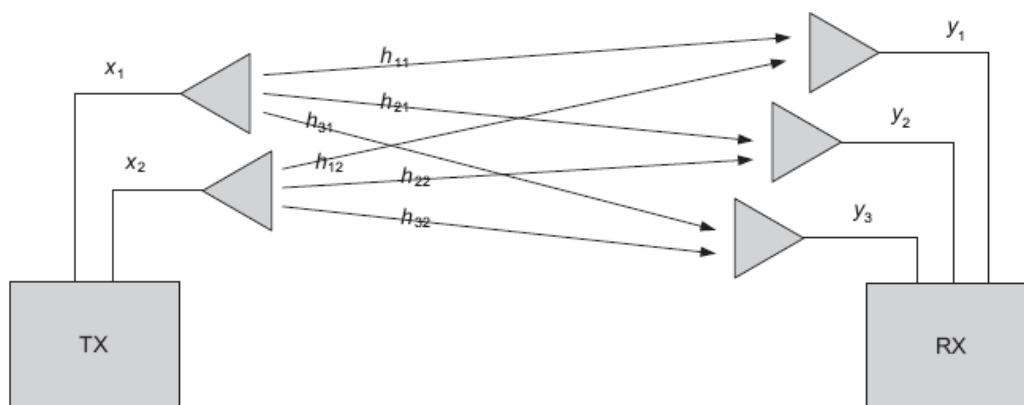


Fig. 2.4 Sistema MIMO “2x3” [1]

La ganancia de SNR de los sistemas 2x1 a 2x2 y 3x2 es claramente mayor a la conseguida por cada paso a partir del sistema 3x3 en adelante.

2.2.3. Anchos de banda de canal: 20- 40 Mhz

Además de la introducción de la tecnología MIMO, el nuevo estándar IEEE 802.11n añade una de las mejoras más significativas a nivel radio para alcanzar velocidades de transmisión elevadas, hablamos del incremento del ancho de banda de canal a 40 MHz.

El ancho de banda del canal es una medida importante para cuantificar la eficacia de la radio, conocida como eficiencia espectral y medida en bitz/Hz.

Dado que 802.11a y 802.11g utilizan el mismo ancho de banda de canal de 20 MHz, se aprovecha una técnica llamada channel bounding (canal envolvente) para conseguir utilizar dos canales a la vez, obteniendo un único canal de 40 MHz y velocidades de hasta 108 Mbps.

Cuando se utiliza el canal de 40 MHz, se aprovecha que cada canal de 20 MHz tiene reservados algunas frecuencias al inicio y fin del canal (para evitar interferencias entre canales adyacentes) con el fin de utilizarlas para llevar información, aumentando considerablemente la tasa de datos.

2.2.3.1. Canal de 40 Mhz

El rango de frecuencias diseñado para 40 Mhz abarca sitio para 128 subportadoras, utilizando un espacio entre ellas de 311,5 Khz, el mismo que el utilizado en 20Mhz.

Al inicio y fin del canal, dejamos una banda de guarda de 6 y 5 subportadoras nulas, respectivamente (-64 a -58 y 59 a 63). Además, se añaden 3 subportadoras nulas alrededor de la banda base (-1, 0 y 1) para facilitar la implementación en los receptores del direct down conversion; sumando así hasta 14 subportadoras nulas (3 más que 20 Mhz).

Como se ilustra en la **Fig 2.5**, de estas 114 subportadoras disponibles, se utilizan 6 subportadoras como pilotos (sincronización) con cual tendríamos finalmente 108 subportadoras para datos, más del doble de las utilizadas en los 20Mhz (52 en 802.11n y 48 de 802.11a)

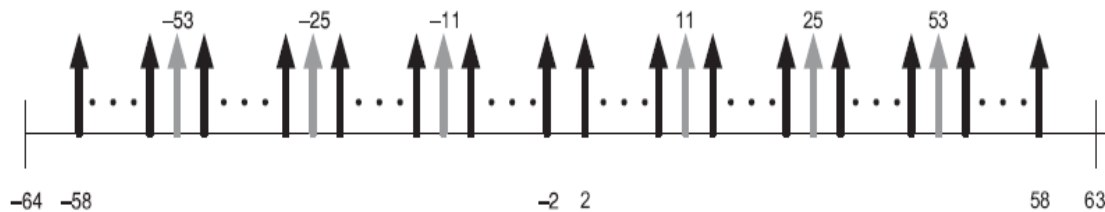


Fig. 2.5 Diseño de subportadoras en canal 40Mhz [1]

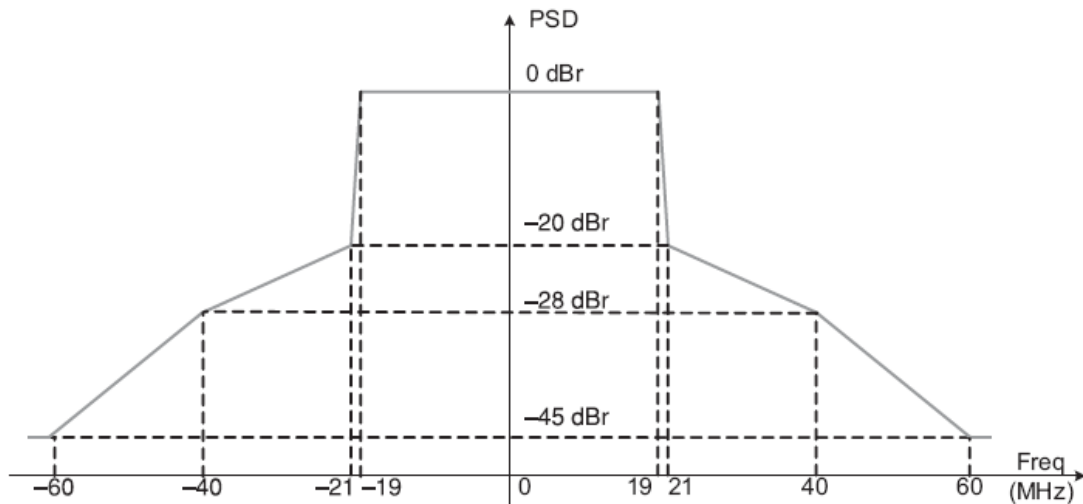


Fig. 2.6 Máscara espectral del canal 40Mhz [1]

Con este nuevo diseño de subportadoras para el ancho de banda se hace imprescindible una nueva máscara espectral que se muestra en la **Fig 2.6**, siendo una de las premisas de su diseño que la interferencia de canal adyacente frente a dispositivos vecinos de 40 Mhz, sea la misma que frente a dispositivos de 20 Mhz.

Cuando dos dispositivos de 40 y 20 Mhz se encuentran en canales adyacentes, el dispositivo de 20 Mhz experimenta una mayor interferencia co-canal que frente a si se encontrase con otro dispositivo de 20 Mhz.

Como se muestra en la **Fig 2.7**, la interferencia entre las máscaras de espectro de 40 Mhz y 20Mhz se produce entre los niveles -20 y -28 dBm del espectro de 20 Mhz, la cual no puede ser filtrada. En cambio, la interferencia entre 20 Mhz, se produce entre los niveles -20 y -45 dBm del mismo espectro de 20 Mhz.

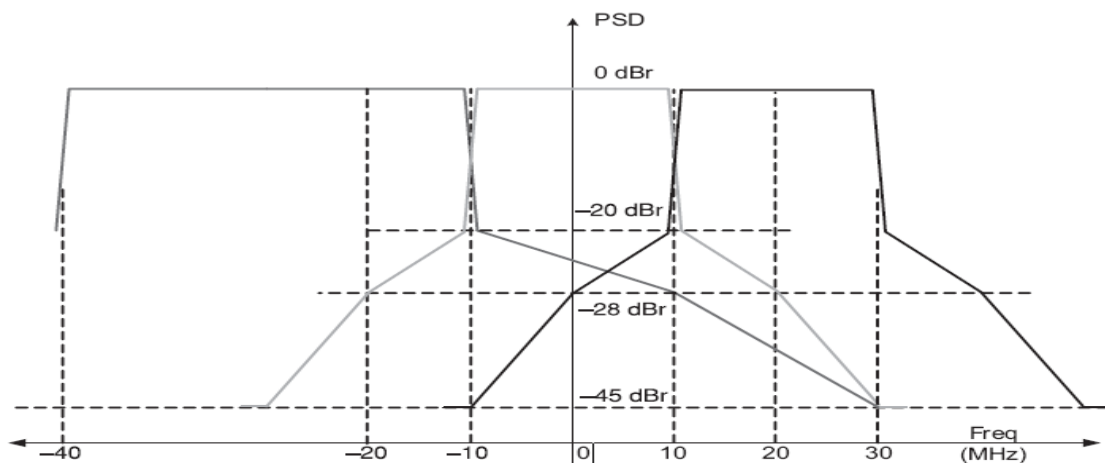


Fig. 2.7 Interferencia co-canal entre canales de 20 y 40Mhz [1]

Otro de los aspectos a tener en cuenta con la interferencia co-canal es la potencia relativa entre la señal de interés y la interferencia; ya que con la utilización del espectro de 5Ghz, muchos dispositivos que trabajen en esta frecuencia son capaces de colocar espacialmente cerca puntos de acceso en canales no adyacentes. Por esta razón, los puntos de acceso ubicados en canales adyacentes tienen una separación espacial mayor y la interferencia es mucho menor.

El canal de 40 Mhz está especificado por dos campos: *Nprimary_ch* y *Secondary*. El primero representa el número de canal del canal primario de 20 Mhz. Este canal es el por el cual el AP transmite todas las tramas de control y administración del entorno combinado de 20 y 40 Mhz. En este mismo entorno, todos los clientes de 20 Mhz sólo se asocian al canal primario ya que el beacon es transmitido sólo en este canal.

El segundo campo indica si el canal secundario de 20 Mhz está por encima o debajo del canal primario (1: encima, -1: debajo). El número de canal secundario es equivalente a:

$$N^{\circ} \text{ canal secundario} = N_{\text{primary_ch}} + \text{Secondary} * 4 \quad (2.1)$$

Por ejemplo, un canal de 40 Mhz consiste en un *N_primary*=36 y *Secondary*=1, lo cual especifica el uso del canal 36 para el canal primario y el canal 40 para el canal secundario.

Los canales de 20 Mhz no se superponen en la banda de 5Ghz, lo cual permite la coexistencia e interoperabilidad entre dispositivos de 20 y 40 Mhz, por lo que los canales de 40 Mhz incorporan la misma filosofía.

Sin embargo, en la banda de 2,4 Ghz los canales se superponen; con lo que para mejorar el ajuste de la selección de canales de 40 Mhz, los canales de 40 Mhz en esta banda también se superponen.

2.2.3.2. Canal de 20 Mhz

Como se muestra en la **Fig 2.8**, una de las mejoras que incorpora 802.11n respecto al canal de 20 Mhz es el aumento del número de subportadoras de datos a 52 (2 subportadoras al inicio y fin del canal). Estas subportadoras de datos ocupan las ubicaciones de -28 a -22, -20 a -8, -7 a -1; 1 a 6, 8 a 20, y 22 a 28, y las subportadoras piloto ocupan el mismo sitio que en 802.11a -21, -7, 7 y 21.

Con el fin de mejorar la interferencia co-canal, se ajustó la máscara espectral de 802.11a hasta los -45 dBr, la cual puede verse en la **Fig 2.9**.



Fig. 2.8 Diseño de subportadoras en canal de 20 Mhz [1]

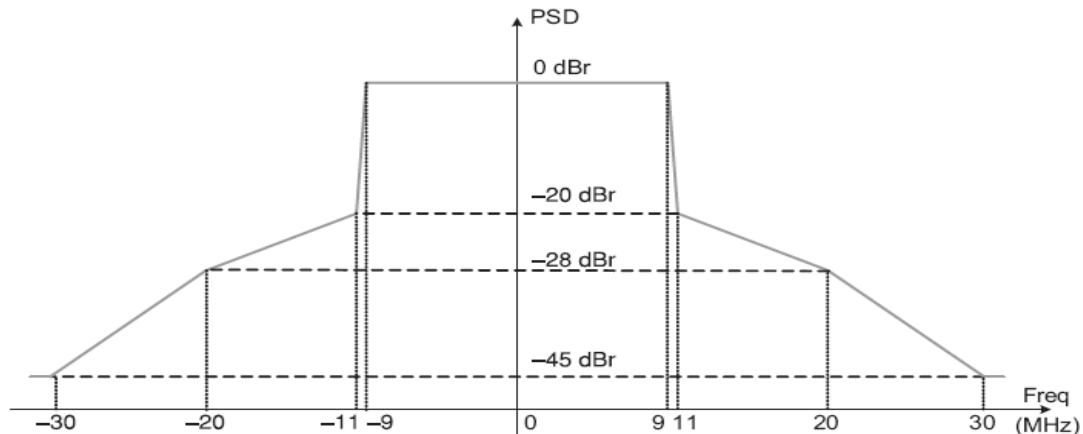


Fig. 2.9 Máscara espectral de canal 20 Mhz [1]

2.2.3.3. Operación de los canales de 20/40 Mhz

En las bandas de 5 Ghz.

Para la operación de 20/40 Mhz se utilizan dos canales adyacentes de 20 Mhz uno de los cuales es designado como canal primario y el otro como canal secundario.

Comparado respecto al canal de 2,4 Ghz, estas bandas tienen mayor ancho de banda por lo que los canales de 40 Mhz son más fáciles de colocar. Por este motivo, esta banda es la preferida para la operación de los canales de 40 Mhz, sobretodo cuando se despliegan una gran cantidad de puntos de acceso.

En la **Fig 2.10** se representa la coexistencia entre los canales de 20 y 40 Mhz en la banda de 5 Ghz.

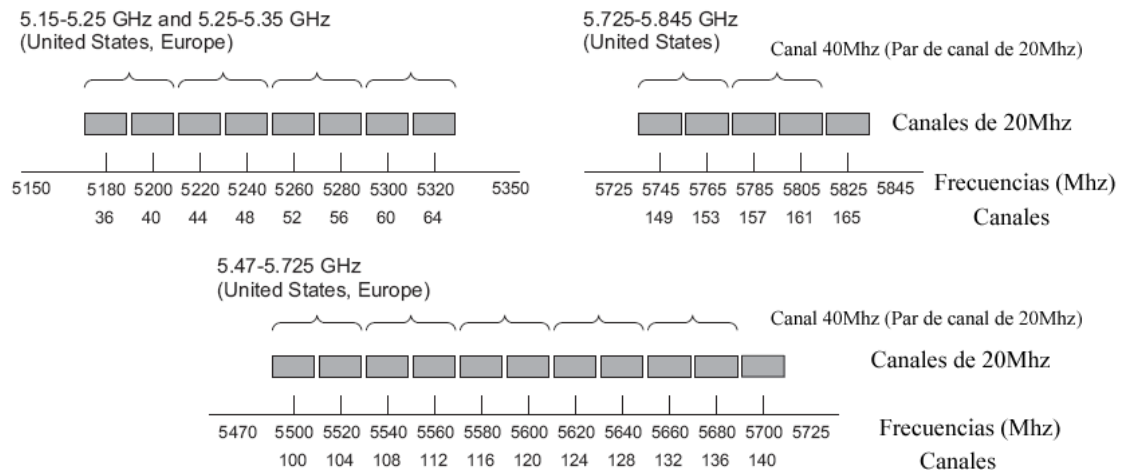


Fig. 2.10 Coexistencia en la banda de 5 Ghz [1]

En la banda de 2,4 Ghz.

La operación en esta banda es más complicada debido a la limitación del espectro disponible, la sobreposición de canales y la operabilidad de los dispositivos 802.11b y 802.11g en esta banda.

La banda de 2,4 Ghz está compuesta por canales espaciados entre sí en 5 Mhz La mayor cuestión con la operación de canales de 40 Mhz en esta banda es la coexistencia entre BSSs colindantes, en uno o más de estos canales usados.

Para explicar mejor esta situación, en la figura siguiente se muestran opciones de coexistencia entre canales vecinos de 40 y 20 Mhz en los canales 1, 6 y 11 como la representada en la **Fig 2.11**

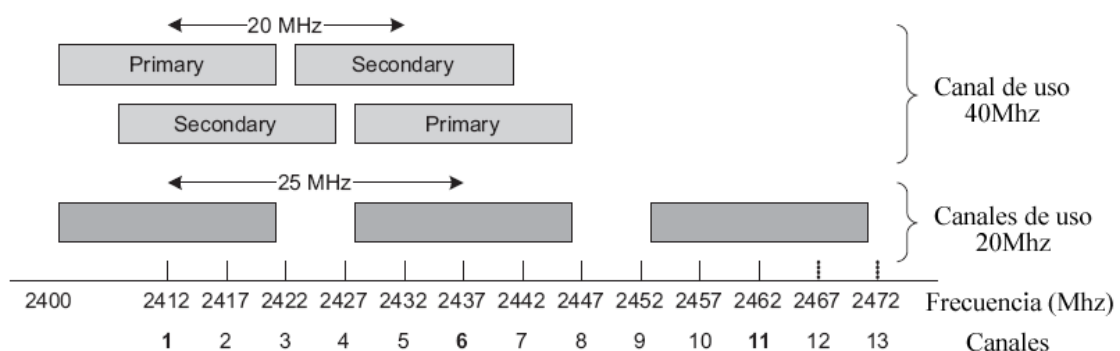


Fig. 2.11 Coexistencia en la banda de 2,4 Ghz [1]

Si el BSS vecino se encuentra en sólo dos de los canales usados, es posible seleccionar los canales primario y secundario de tal forma que el canal primario coincida con uno de los canales usados, y el secundario ocupe el espectro en los canales no utilizados.

2.2.4. Preámbulo Greenfield (GF)

Durante el desarrollo del estándar 802.11n, muchos opinaron que debería trabajarse en un preámbulo más eficiente bajo ciertas condiciones de red. Por esta razón se adoptó un formato de preámbulo sin los campos comunes, de tal forma que no fuese compatible.

Los entornos en los cuales no se requiera una compatibilidad con otros estándares son conocidos como despliegues “Greenfield”.

Los propulsores del formato del preámbulo GF, propusieron finalmente que también se usase este preámbulo en presencia de dispositivos no compatibles, ya que si el acceso al medio es controlado a través de mecanismos de protección MAC dentro tiempo de reserva (por ejemplo RTS/CTS), entonces no es necesaria esta compatibilidad. De esta forma, reducimos el overhead en el tiempo de reserva.

Los beneficios de la utilización del preámbulo GF pueden ser considerables en entornos con tasas de datos altas y paquetes pequeños como VoIP.

De cualquier forma, GF está incluido en el estándar 802.11n como un formato de preámbulo opcional, ya que durante su desarrollo, muchos detractores argumentaron que no ofrecía mejoras de eficiencia en redes pequeñas y que supusiese una carga añadida en la autodetección de múltiples tipos de preámbulo.

2.2.5. Intervalo de guarda pequeño (Short GI)

El intervalo de guarda que forma parte del símbolo OFDM es utilizado para minimizar la interferencia intersimbólica (ISI). Esta interferencia se da principalmente en entornos multicamino, donde el inicio de un nuevo símbolo llega al receptor antes de que sea entregado el último símbolo; reduciendo el SNR efectivo

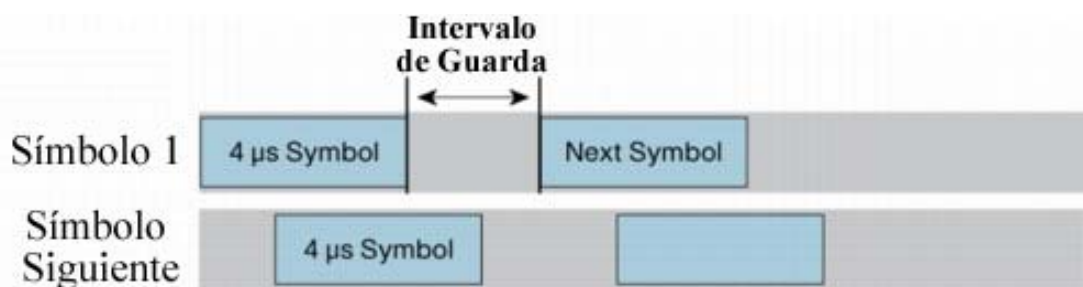


Fig. 2.12 Representación del Intervalo de Guarda [2]

Como se muestra en la **Fig 2.12**, el intervalo de guarda (GI) es un periodo fijo entre símbolos que permite la correcta llegada de los símbolos más tardíos; el cual está fijado en 800 ns.

En casos en los cuales no haya una distancia considerable entre transmisor y receptor, 802.11 permite la utilización de un intervalo de guarda de 400 ns. Esto permite la reducción del periodo de símbolo a 3,6 ms, incrementando así un 11% las tasas de datos.

En cualquier caso, la utilización del GI pequeño es sólo seleccionada si se alcanza una tasa de datos elevada con GI.

2.2.6. Código de verificación de paridad de baja densidad (LDPC)

Este modo opcional introducido por 802.11n, el cual consiste en una clase especial de códigos lineales de bloque. El término de “baja densidad” hace referencia a que este código de verificación, utiliza muchos 0s y pocos 1s en la matriz de verificación de paridad.

Los pasos iniciales para generar la palabra código incluyen seleccionar su tamaño y determinar el número de ellas. A continuación, se calcula el conjunto de bits acortados y generando los bits de paridad; y si fuese necesario, puntualizar o repetir todo el proceso.

Uno de los pasos clave en esta codificación es el proceso de montaje de los bits útiles en un número entero tanto de símbolos OFDM como palabras código LDPC. Parte de este proceso es determinar cuál de los 3 tamaños de palabra código LDPC usar (648, 1296 o 1944 bits).

Cada palabra código LDPC contiene los bits de información y paridad. El número de bits de información es determinado basándonos en la tasa de código del MCS seleccionado. Por ejemplo, si utilizamos una palabra código de 1944 bits y un MCS con una tasa de codificación de 5/6, el número de bits de información será 1620 y los bits de paridad, 324.

En el **Anexo 2**, describiremos en mayor detalle proceso de codificación LDPC.

2.3. Capa MAC

Desde el inicio del proceso de la estandarización de 802.11n, se reconoció que el aumento de las tasas de datos a nivel físico, el overhead a nivel MAC provocaría que sin mejoras en esta capa, los usuarios se beneficiasen muy poco de las mejoras en la capa física.

La capa MAC provee funciones de control de acceso al medio como la coordinación de acceso direccionamiento, seguridad, etc. que unidas a las mejoras (principalmente QoS), permiten que el rendimiento del estándar aumente considerablemente

Las mejoras MAC descritas en el nuevo estándar estuvieron basadas en mejorar algunas características introducidas por primera vez en el estándar 802.11e.

Como se muestra en la **Fig 2.13**, una de las mejoras fue la de reducir el intervalo entre tramas para las transmisiones que utilizaban el mecanismo Block Ack, ya que el SIFS actual no era necesario para que el receptor pueda reensamblar la señal recibida.

Otras de las mejoras introducidas fue la de concatenar la trama BAR con las tramas de datos, de tal forma que mejoremos la eficiencia MAC ligeramente.

Finalmente, se mejoró el mecanismo de fragmentación, haciendo posible reducir el tamaño de la trama BA para poder conseguir confirmar un paquete MSDU completo y no sus fragmentos.

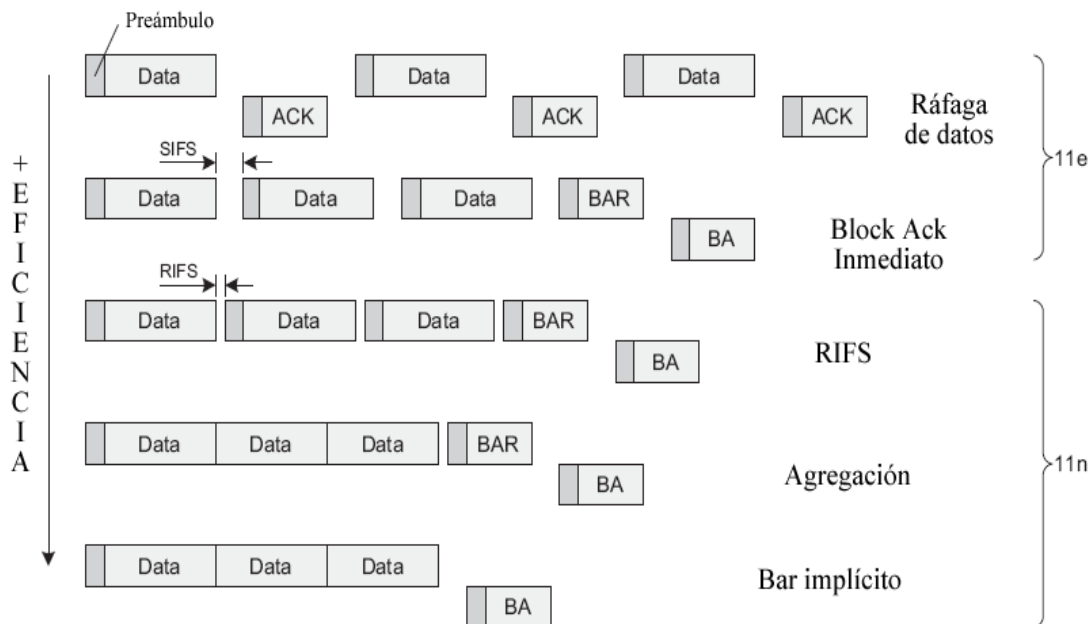


Fig. 2.13 Diagrama de las mejoras introducidas respecto al estándar 802.11e [1]

2.3.1. Agregación

Con el fin de reducir el overhead asociado con el preámbulo y los campos de la trama MAC, 802.11n introduce la agregación de paquetes. Para ello, se propusieron dos técnicas, ilustradas en la **Fig. 2.14**:

- **A-MSDU (MSDU agregada):** efectuada al inicio de la capa MAC, la cual agrega MSDUs como primer paso en la formación de la MPDU.
- **A-MPDU (MPDU agregada):** efectuada al final de la capa MAC, agrega múltiples MPDUs para formar PSDU que será luego pasado a la capa PHY para formar el payload para la transmisión.

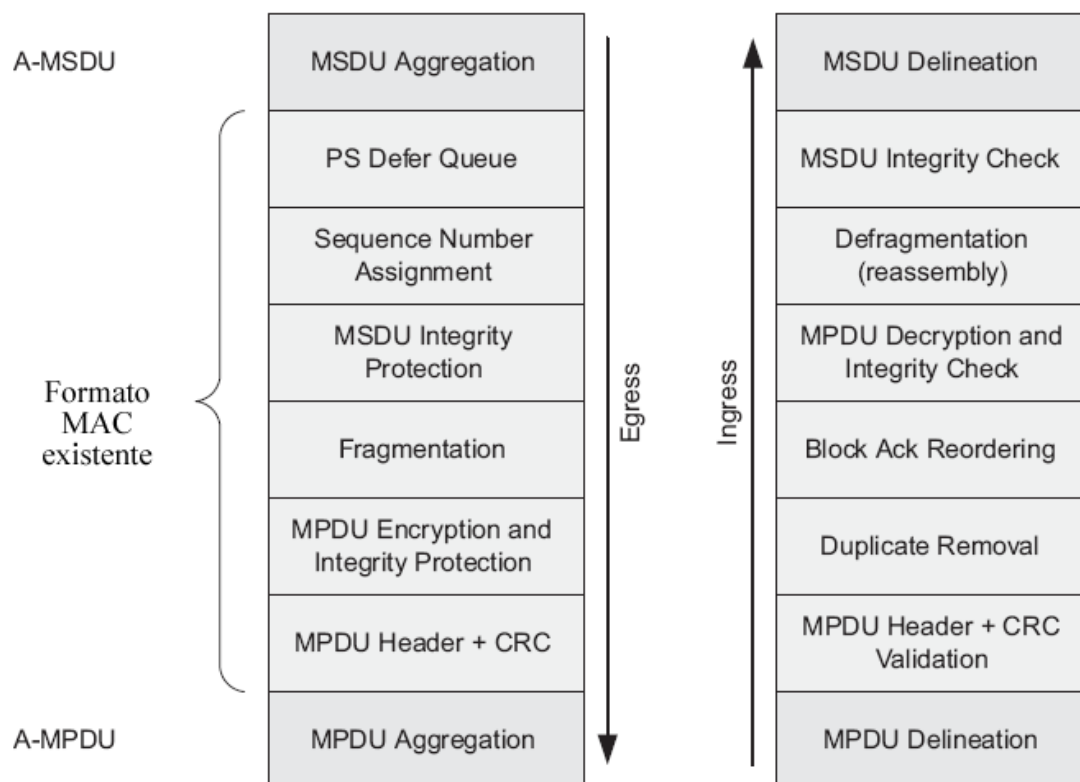


Fig. 2.14 Agregación A-MSDU y A-MPDU [1]

2.3.1.1. A-MSDU (MAC Service Data Units agregada)

A-MSDU permite la agregación de múltiples tramas Ethernet con un destino común y las ensambla en una única trama 802.11 para transmitirla.

Este mecanismo es el más efectivo de los dos propuestos en la agregación ya que está basado en el hecho de que el formato original de la trama es Ethernet, cuya cabecera es más pequeña en comparación a la de 802.11.

Con este mecanismo, los MSDUs recibidos desde la capa LLC y, destinadas al mismo receptor y de la misma categoría de servicio (identificados con el mismo TID), pueden ser acumulados en un único MPDU.

La **Fig 2.15** muestra el encapsulamiento realizado por A-MSDU, donde la máxima longitud que puede recibir una estación es detallada en la información de Capacidades HT, tomando el valor de 3839 ó 7935 bytes.

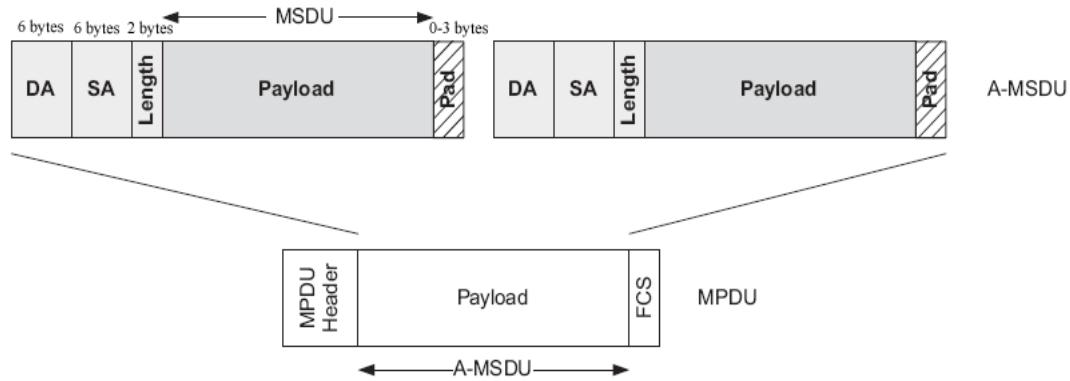


Fig. 2.15 Encapsulamiento A-MSDU [1]

2.3.1.2. A-MPDU (MAC Service Data Units agregada)

Este mecanismo es un poco distinto al A-MSDU, ya que en lugar de colectar tramas Ethernet, traduce cada trama Ethernet a formato 802.11 para luego ser recogidas hacia un destino común sin requerir ensamblarlas.

Todas las tramas MPDU son lógicamente agregadas al inicio de la MAC; para ello se antepone a cada una de esas tramas un pequeño delimitador y un campo de padding; siendo luego agregadas a la capa física como PSDU para la transmisión como un único PPDU (**Fig. 2.16**).

Todas las tramas MPDU en un A-MPDU son enviadas al mismo receptor y una misma Categoría de Servicio (mismo TID)

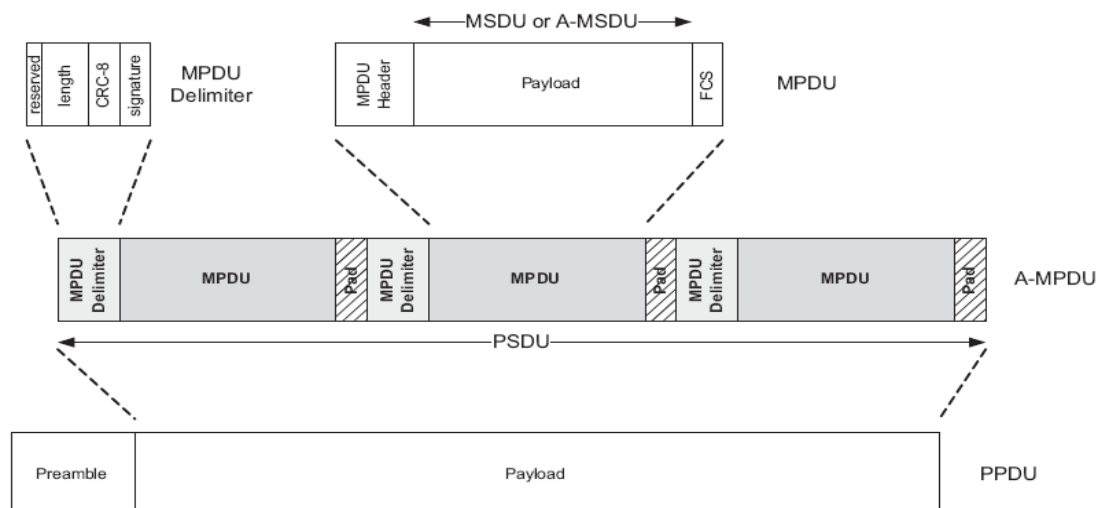


Fig. 2.16 Encapsulamiento A-MPDU [1]

2.3.2. Block Acknowledgement

Este mecanismo fue introducido en el estándar 802.11e para mejorar la eficiencia, permitiendo la transmisión de un conjunto de tramas de datos que son confirmadas con una única trama BA, en vez de una BA para cada trama de datos transmitida con éxito.

A continuación, mostraremos las variantes introducidas en el nuevo estándar con el fin de aprovechar el uso de la agregación y las tasas altas de datos.

2.3.2.1. BA Inmediato HT

Este mecanismo supone una modificación importante respecto al original, por lo que se mantiene como un mecanismo separado para mantener la compatibilidad con dispositivos estandarizados.

Policía de Normal ACK en la agregación.

El mecanismo introducido en 802.11n adapta el mecanismo original DATA/ACK a la agregación, por lo que es necesaria la presencia de un control de policía en las tramas de datos QoS en la transmisión agregada.

Si una o más tramas MPDU agregadas tienen el campo Ack Policy como Normal ACK, entonces el receptor deberá retornar una trama BA como respuesta al agregado.

El uso de un control de policía Normal ACK para solicitar una trama BA, no elimina la necesidad de la trama BAR, ya que ésta realiza dos funciones esenciales: solicitar una respuesta BA y vaciar las tramas MSDUs en el buffer de re-ordenación mantenidos como consecuencia de un MSDU anterior incompleto.

Si el emisor no recibe una confirmación ACK de una trama MSDU cuyo “tiempo de vida” haya expirado, entonces ha de enviar una trama BAR que vacíe del buffer de reordenación todas las tramas MSDUs subsecuentes a la trama expirada.

En la **Fig 2.17** se muestra como la trama “3” no es recibida correctamente, por lo que se aplica el mecanismo de reordenación.

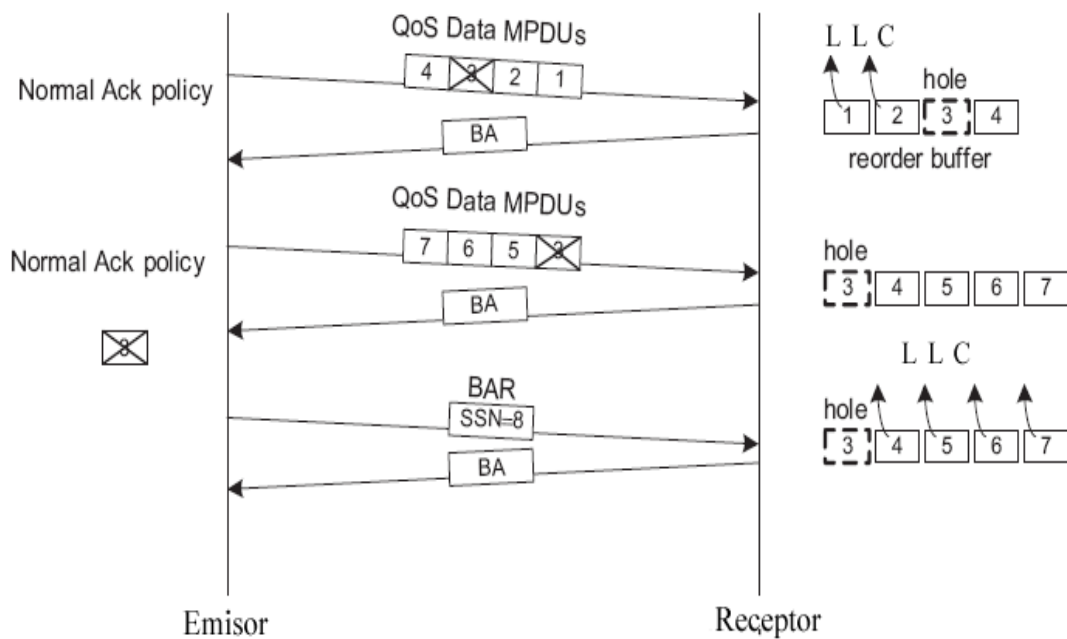


Fig. 2.17 Mecanismo de reordenación [1]

Secuencias TXOP

A continuación en la **Fig 2.18**, se muestran unas secuencias utilizadas bajo HT BA inmediato. El TXOP comienza con el intercambio de un RTS/CTS con el fin de brindar mayor protección.

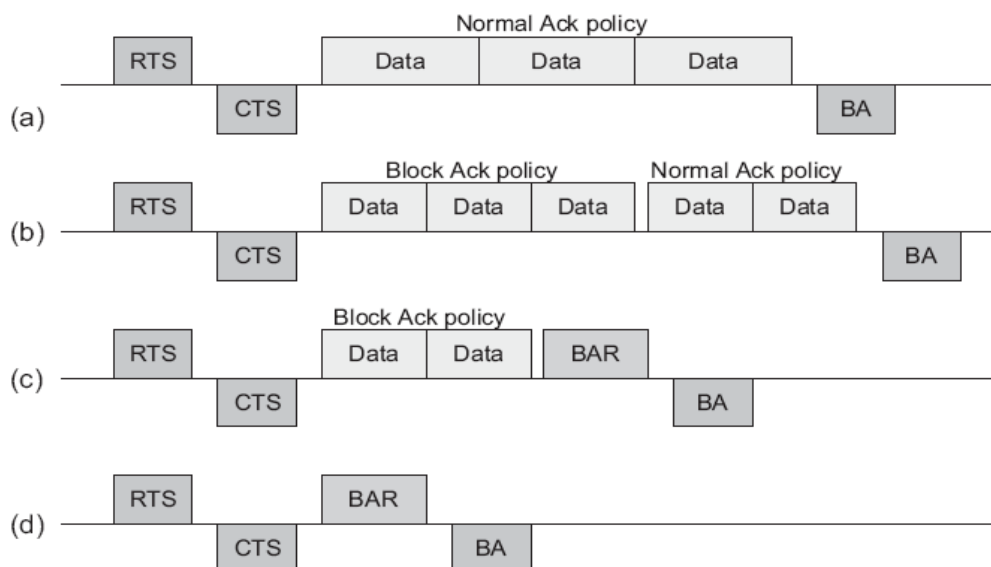


Fig. 2.18 Secuencias HT BA inmediato [1]

- a) Una trama agregada única es realizada con el parámetro de control de policía ACK como Normal ACK en las tramas MPDUs que la conforman.
- b) Esta secuencia es similar excepto que 2 transmisiones agregadas son enviadas una detrás de la otra como una ráfaga. Esta secuencia mejora la robustez ya que en el caso de que una trama sea demasiado larga y sujeta a posibles cambios rápidos en las condiciones del canal, haciéndose necesaria la estimación de nuevo canal. Para ello, el primer agregado se envía con control de policía Block ACK, y el segundo como Normal ACK para solicitar un BA.
- c) Esta secuencia es utilizada cuando una trama MSDU es descartada debido a la expiración de su tiempo de vida; por lo que se hace necesaria la trama BAR para liberar todas las demás MSDUs del buffer de reordenación. Este caso, las tramas están disponibles y pueden enviarse antes de la trama BAR; para ello, el agregado debe enviarse con un control de policía BA.
- d) Esta secuencia muestra como la trama BAR puede enviarse separada de los datos para conseguir una mayor optimización.

2.3.2.2. *BA retrasado HT*

Este mecanismo es una extensión del protocolo de BA retrasado que se diferencia del estándar en la forma en la que son confirmadas las tramas BA y BAR.

Bajo este mecanismo, las tramas BAR y BA transportan un control de policía BAR Ack y BA Ack, respectivamente, Este campo es cambiado a 1, indicando que el receptor de la trama no debe retornar una respuesta ACK.

Secuencias TXOP

Al igual que sucedía con el mecanismo de BA inmediato, el TXOP comienza con el intercambio de un RTS/CTS o DATA/ACK. Este mecanismo permite que el TXOP sea utilizado para confirmar las tramas totalmente que se envían del emisor al receptor.

En la **Fig 2.19**, se muestran unas secuencias utilizadas bajo HT BA retrasado:

- a) En esta secuencia, el emisor envía una trama agregada con BA Ack seguido de una trama BA.
- b) En esta se muestra como una trama BA puede enviarse junto a las tramas de datos utilizando el protocolo de dirección invertida.
- c) En la última secuencia, se muestra como reduciendo la robustez podemos enviar las tramas de datos junto con las tramas BAR y BA

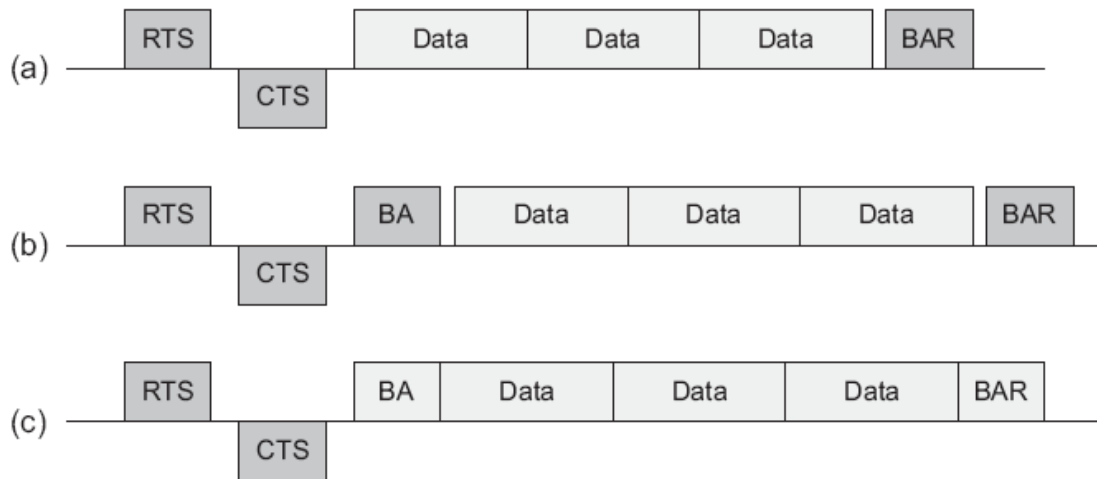


Fig. 2.19 Secuencias HT BA retrasado [1]

2.3.3. Protocolo de dirección inversa

Muchas de las aplicaciones están pensados en un intercambio de tráfico asimétrico, como por ejemplo FTP o HTTP, ambos sobre el protocolo TCP. En este escenario, se transportan paquetes de datos TCP de gran tamaño desde el emisor al receptor; mientras que en dirección opuesta, se transportan pequeños paquetes ACK. Esto supone que la utilización de TXOPs en una dirección sea mucho mayor que en la dirección opuesta.

A continuación en la **Fig 2.20** podemos observar el envío de tramas MSDU utilizando funcionamiento normal y aplicando el mecanismo de dirección inversa.

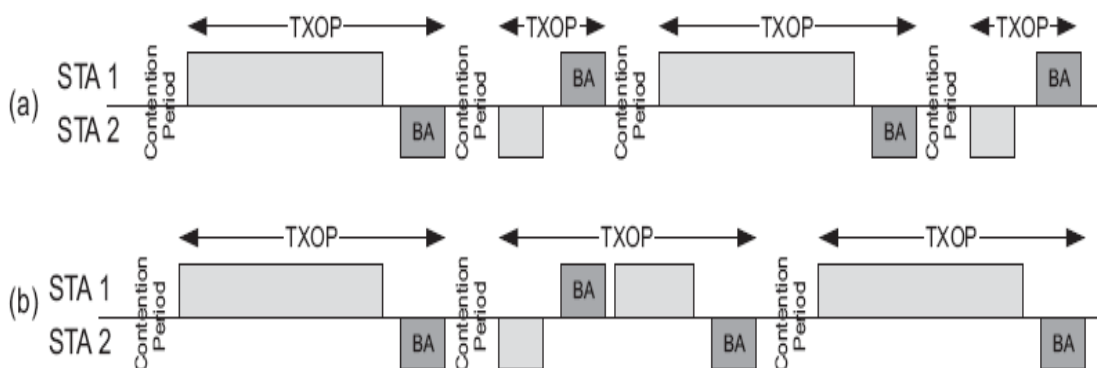


Fig. 2.20 TXOP (a) sin y (b) con el protocolo de dirección inversa [1]

El protocolo de dirección inversa es una característica opcional que permite ceder el resto de la utilización de un TXOP a otra trama. El overhead asociado a

periodo de contención y el intercambio RTS/CTS al inicio del TXOP son amortizados con una eficiente utilización del TXOP.

En un EDCA - TXOP, todas las tramas de datos pertenecen a una misma AC tanto en el emisor como el receptor. El TID en las MPDUs indica a que AC pertenecen, por lo que si se transporta un RDG (Reverse Direction Grant) el AC será el de mayor prioridad (AC=3)

En un HCCA – TXOP, el inicializador RD (Reverse Direction) determina si esta función está limitada o no en función del AC a la que pertenezca.

2.3.4. PMSP (Power – Save Multi – Poll)

Esta técnica introducida en este nuevo estándar permite optimizar el acceso al canal de los dispositivos que transmiten y reciben pequeñas cantidades de datos periódicamente y que necesitan mantener inactiva su interfície de comunicación con el fin de ahorrar energía.

PMSP provee una pequeña mejora en la utilización del canal para y el ahorro de energía sobre técnicas como el HCCA y el APSD (Automatic Power Save Delivery). PMSP utiliza una única trama PMSP para registrar múltiples estaciones en lugar de la trama CF-Poll de HCCA, logrando una ligera mejora en ciertos escenarios.

El acceso al canal es optimizado agrupando las transmisiones de bajada como en una ráfaga y programando las de subida para que se transmitan continuamente una detrás de otra.

PMSP optimiza el consumo de energía a través de la programación del inicio de fase PMSP en el enlace de bajada y subida, de modo que las estaciones puedan desactivar sus receptores o transmisores hasta que sea necesario, respectivamente.

Como se muestra en la **Fig. 2.21**, la secuencia empieza con una trama PMSP que contiene el registro para la próxima transmisión de bajada y subida. Tras recibir esta trama, una estación sólo necesita estar “despierta” un periodo de tiempo PMSP–DTT (PMSP Download Transmission Time) y PMSP–UTT (PMSP Upload Transmission Time), respectivamente.

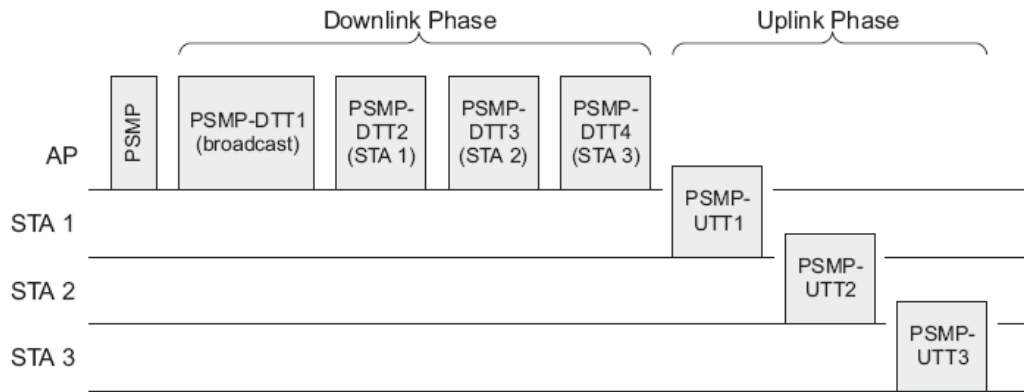


Fig. 2.21 Secuencia PMSP [1]

Durante la fase de bajada, las tramas PPDUs como una ráfaga continua separadas por un intervalo de tiempo SIFS o RIFS.

Un PMSP-DTT puede contener una o más PPDUs, en las cuales las tramas MAC que transportan pueden estar dirigidas a una estación específica.

Una estación que tenga una o más tramas para transmitir, comenzará su transmisión al inicio del PMSP-UTT. Las PMSP-UTT estarán separadas por un intervalo de tiempo SIFS o USTime (utilizado en RIFS y más pequeña que SIFS).

CAPÍTULO 3: ESTUDIO DEL ESTÁNDAR IEEE 802.11e

Dado que las pruebas de este proyecto están basadas en el estudio de las mejoras a nivel MAC del estándar; en este capítulo describiremos en mayor detalle el acceso al medio introducido en el estándar 802.11e.

En el Anexo 3, hemos añadido un breve repaso de los mecanismos de acceso al medio utilizados en anteriores estándares.

3.1. Estándar IEEE 802.11e

Desde la presentación del estándar original de 802.11, han aparecido un gran número de estándares que proponían nuevas mejoras del rendimiento de la capa MAC.

Dado que el estándar original fue pensado para soportar tráfico “Best effort”, uno de los inconvenientes principales era que no garantizaba unos umbrales que delimitasen el retraso y jitter para las aplicaciones multimedia, además de garantizarles un ancho de banda mínimo. Con el fin de solucionar estos inconvenientes, nace el estándar IEEE 802.11e, enfocado principalmente en la diferenciación de servicios para aplicaciones en tiempo real.

El estándar IEEE 802.11e, a través del control de admisión, limita el conjunto de tráfico admitido dentro de un conjunto de clases de servicio determinadas, para brindar QoS a los flujos existentes y que al mismo tiempo los recursos del medio sean utilizados al máximo.

802.11n aprovecha muchas de las características detalladas en el estándar 802.11e como las mejoras de QoS y la introducción de conceptos como el TXOP y Block Ack. De cualquier forma, estas mejoras de rendimiento son sólo la base para el desarrollo en el nuevo estándar, ya que no son escalables directamente, debido al aumento considerable de las tasas a nivel físico.

A continuación, describiremos en detalle las mejoras incorporadas en el estándar 802.11e; de tal manera que nos sirvan de base para comprender las mejoras a nivel MAC introducidas en el estándar 802.11n.

3.1.1. Introducción

Dadas las limitaciones de los mecanismos de acceso DCF y PCF, 802.11e incorpora HCF (Función de Coordinación Híbrida), mecanismo que combina los dos anteriores para la transmisión de datos QoS.

HCF incluye dos mecanismos de acceso al medio: un acceso al canal basado en contención (EDCA) y otro mecanismo de acceso controlado (HCCA).

El estándar 802.11e nos permite reducir los retardos a través de priorización de diversos tipos de paquetes de tráfico y mejorar la eficiencia del ancho de banda inalámbrico.

3.1.2. EDCA

El mecanismo de acceso distribuido mejorado (EDCA) es una extensión del DCF. Diseñado para soportar la priorización de calidad de servicio (QoS) sobre diferentes tráficos, a través de la introducción de 4 Categorías de Acceso (AC).

Antes de entrar a la capa MAC, cada paquete recibido es asignado con un valor específico de prioridad o categoría de tráfico (TC) definido en el estándar 802.11d, que será luego mapeada a una determinada categoría de acceso como se indica a continuación en la **Fig. 3.1**.

Priority	User priority in 802.1D	Access category (AC)	Designation (informative)
Lowest	1	AC[0]	Background
	2	AC[0]	Background
	0	AC[1]	Best effort
	3	AC[1]	Video
	4	AC[2]	Video
	5	AC[2]	Video
	6	AC[3]	Voice
Highest	7	AC[3]	Voice

Fig. 3.1 Mapeo de TC a AC [3]

Como se puede observar en la **Fig. 3.2**, cada AC conduce a una única entidad de contienda DCF con sus propios parámetros de prioridad, los cuales son anunciados periódicamente en las tramas de beacon.

Estos parámetros, descritos a continuación, brindan una mayor prioridad y menor tiempo de acceso a las AC de mayor prioridad:

- $CW_{\min}[AC]$
Representa el valor mínimo de la ventana de contención (CW)
- $CW_{\max}[AC]$
Representa el valor máximo de la ventana de contención (CW)

- $AIFS[AC]$
Este valor sustituye al intervalo de tiempo DIFS, tomando un valor diferente para cada AC para que tras éste, cada AC empiece su proceso de backoff.

- $AIFS[AC] = SIFS + AIFSN[AC] \times t_{slot}$

Donde, $AIFSN[AC]$ es un número aleatorio de slots

- $TXOP_Limit[AC]$
Un TXOP (oportunidad de transmisión) representa un tiempo durante el cual una estación (QSTA) permite transmitir una ráfaga continua de tramas de datos de una misma AC. Cada TXOP obtenido tras conseguir ganar la contención EDCA, es denominado EDCA –TXOP.

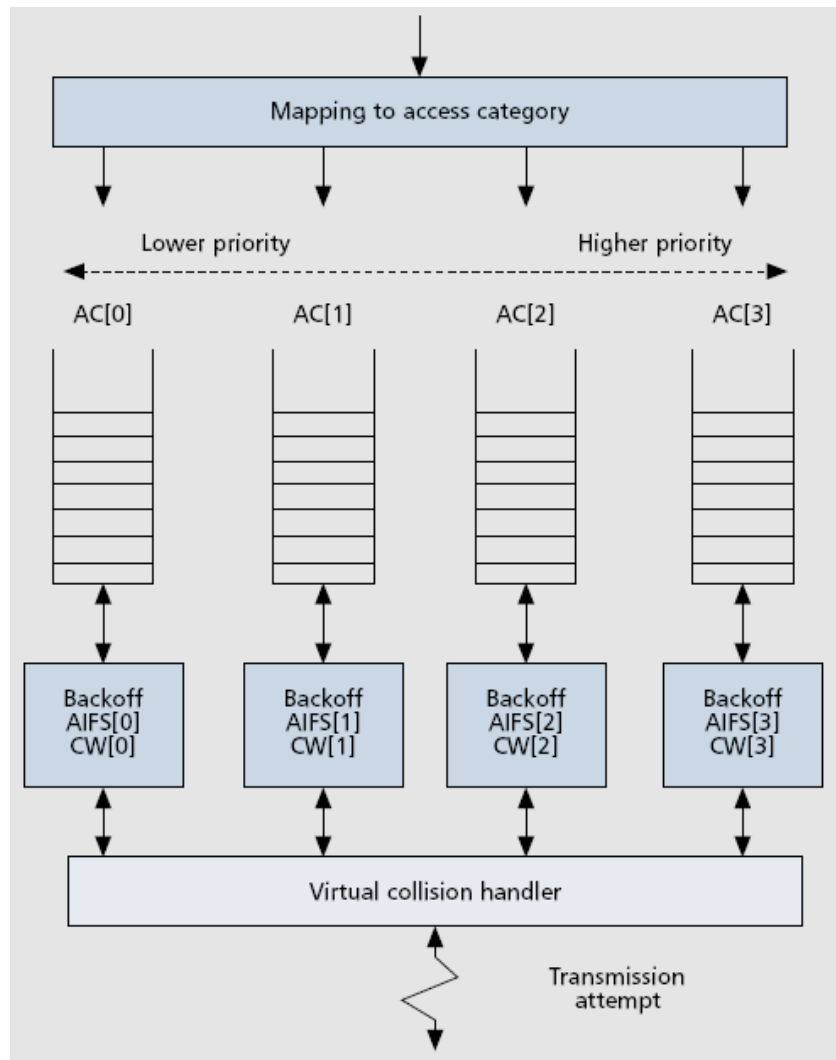


Fig. 3.2 Funcionamiento EDCA [3]

Tras ello, cada AC calcula aleatoriamente su propio tiempo de backoff entre los valores de $CW_{\min}[AC]$ y $CW_{\max}[AC]$, siendo más prioritario para el mayor AC como se muestra en la **Fig 3.3**.

Además de los 3 parámetros antes descritos, en el estándar también se define una variable usada en el incremento de la CW al provocarse una colisión llamada **factor de persistencia (PF)**, el cual dependería del TC al que pertenezca y que en estándares anteriores tomaba un valor fijo de 2.

Versiones anteriores:

$$newCW = \lfloor oldCW \times 2 \rfloor \quad (3.1)$$

Versión final (usando PF):

$$newCW[AC] = \lfloor oldCW[AC] \times PF[TC] \rfloor \quad (3.2)$$

Al generarse de esta forma, puede ocurrir que este tiempo coincida para diferentes ACs en una misma QSTA, dando lugar a una colisión interna. Por este motivo, un programador virtual interno será el encargado de permitir en estos casos, transmitir sólo las tramas provenientes del AC mayor.

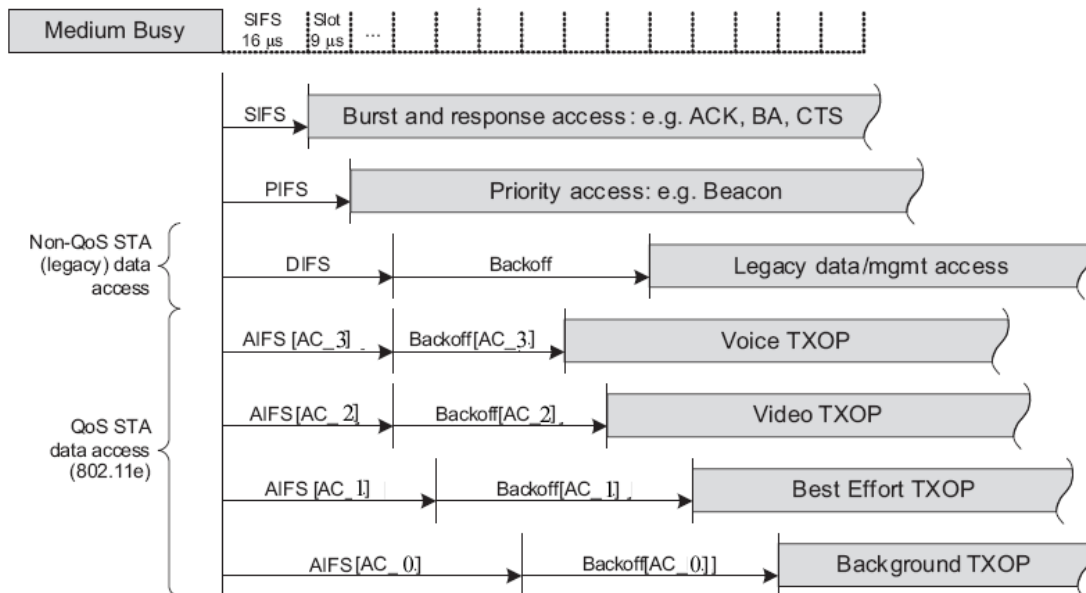


Fig. 3.3 Representación del acceso al canal para cada AC [1]

3.1.3. HCCA

Si bien EDCA mejora notablemente el rendimiento de DCF, no es suficiente para garantizar una calidad de servicio óptima bajo aplicaciones de gran carga. Por este motivo, se hace necesaria la utilización de un mecanismo MAC basado en polling como HCCA.

HCCA es un mecanismo de acceso al canal que utiliza un HC (Coordinador Híbrido) ubicado en el QAP; el cual se encarga de encuestar las QSTAs periódicamente para luego darles acceso al medio sin necesidad de competir por éste.

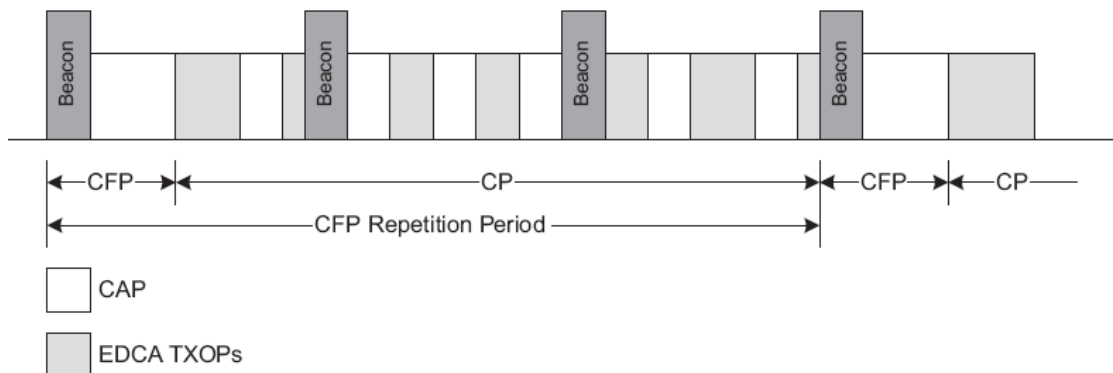


Fig. 3.4 Representación de la fase de Acceso Controlado al canal [1]

Como podemos observar en la **Fig 3.4**, este mecanismo se asemeja mucho al PCF; sin embargo, HCCA incluye algunas mejoras importantes que la distinguen de ella:

- HCCA, a través del HC; puede encuestar a las QSTAs tanto durante los periodos de CF y CFP, reduciendo de manera importante el retardo, ya que una estación es encuestada con mayor frecuencia que si sólo lo fuese en el CFP.
- Cuando una estación es encuestada, se le concede un TXOP durante el cual puede transmitir múltiples tramas; a diferencia de PCF en la que se transmite una sola trama la encuesta una estación.

Un QAP permite iniciar CAPs (Periodos de Acceso Controlado) usando HCCA, después de detectar durante un intervalo de tiempo PIFS el medio libre.

Para dejar el suficiente espacio dentro de una supertrama para el mecanismo EDCA, la duración máxima de un intervalo de beacon está limitada por la variable T_{CAP_limit}

HCCA está diseñado para soportar QoS, por lo que una estación necesita registrar los requerimientos de QoS de cada flujo de tráfico (TS) con el HC y,

en caso de ser admitido, establecer un orden de polling para conocer esos requerimientos.

Antes de cada transmisión se ha de establecer un flujo de tráfico (TS) y cada QSTA no permite más 8 TS (subida y bajada) con diferentes prioridades.

Un TS es un conjunto específico de MSDUs transportada en una sola dirección que necesita ser entregada cumpliendo ciertas limitaciones QoS. Un TS es identificado por:

- TSID (Identificador de TS) y dirección, si es TS de subida (hacia el AP)
- TSID, dirección y dirección de la estación, si es TS de bajada (hacia la estación)

Para iniciar un TS, una estación envía una trama de petición QoS hacia el AP que contiene una Especificación de Tráfico (TSPEC); cuyo propósito es reservar recursos dentro del HC y modificar el comportamiento de su scheduler.

Los requerimientos QoS más importantes descritos en un TSPEC son:

- **Intervalo de servicio máximo (RSI_{\max}):** tiempo máximo permitido entre TXOPs continuos asignados a la misma estación.
- **Límite de retardo (D):** retardo máximo permitido para el transporte de datos, incluyendo el retardo en cola.
- Otras tasas como: **tasa media de datos (p), tasa nominal de MSDU (L), tasa mínima de PHY (R)**, etc.

Al recibir todas las TSPECs, el QAP determinará primero el SI (Intervalo de servicio) seleccionado, cuyo valor será igual al valor máximo submúltiplo del intervalo de beacon. Dicho valor nunca será mayor que todos los RSI_{\max} requeridos por los diferentes TS.

Un intervalo de beacon es dividido en un número entero de SI, y las estaciones son “encuestadas” secuencialmente durante cada intervalo; de esta forma los TS admitidos son encuestados según el requerimiento del TS con el parámetro más restrictivo.

Finalmente, el QAP calcula el valor correspondiente del HCCA-TXOP para las diferentes estaciones que realicen sus peticiones QoS.

3.1.4. Block Ack

El mecanismo de Block Acknowledgement fue introducido en el estándar 802.11e con la finalidad de permitir la transmisión de un bloque de tramas de datos consecutivos confirmados con un único ACK al final de un TXOP.

Cada paquete de datos en un bloque es separado por un intervalo de tiempo SIFS, reduciendo de esta forma el overhead producido por el envío continuo de tramas ACK, confirmando cada paquete recibido exitosamente.

Originalmente en el estándar se definieron 2 variantes para Block ACK: BA inmediato y BA retrasado. Ambos mecanismos se diferencian en el manejo de las tramas BAR y BA durante la transferencia de tramas de datos.

Con BA inmediato, se solicita una respuesta BA inmediata; mientras que con BA retrasado, la correcta recepción de su propio BAR es confirmada con una trama ACK y el BA es reenviado en un canal de acceso separado confirmado con otro ACK.

3.2.4.1. *BA inmediato y BA retrasado*

El mecanismo BA necesita ser habilitado estableciendo una sesión BA a través del intercambio de un ADDBA Request y Response. Esta sesión se establece entre dos estaciones para un TID determinado, de emisor a receptor.

Como se observa en la **Fig 3.5**, tras el intercambio exitoso ADDBA, comienza la fase de transferencia de datos. El emisor envía un bloque de tramas de datos seguidos de un BAR (BA Request), a lo que el receptor responderá con una trama BA con el fin de reconocer todas las tramas de datos del bloque anterior recibidas correctamente. Aquellas que no hayan sido recibidas correctamente, serán enviadas re-encoladas por el emisor para ser enviadas en el siguiente bloque de datos.

Para abandonar la sesión BA, el emisor o el receptor deberán enviar una petición DELBA, la cual si es replicada con un ACK si es recibida correctamente.

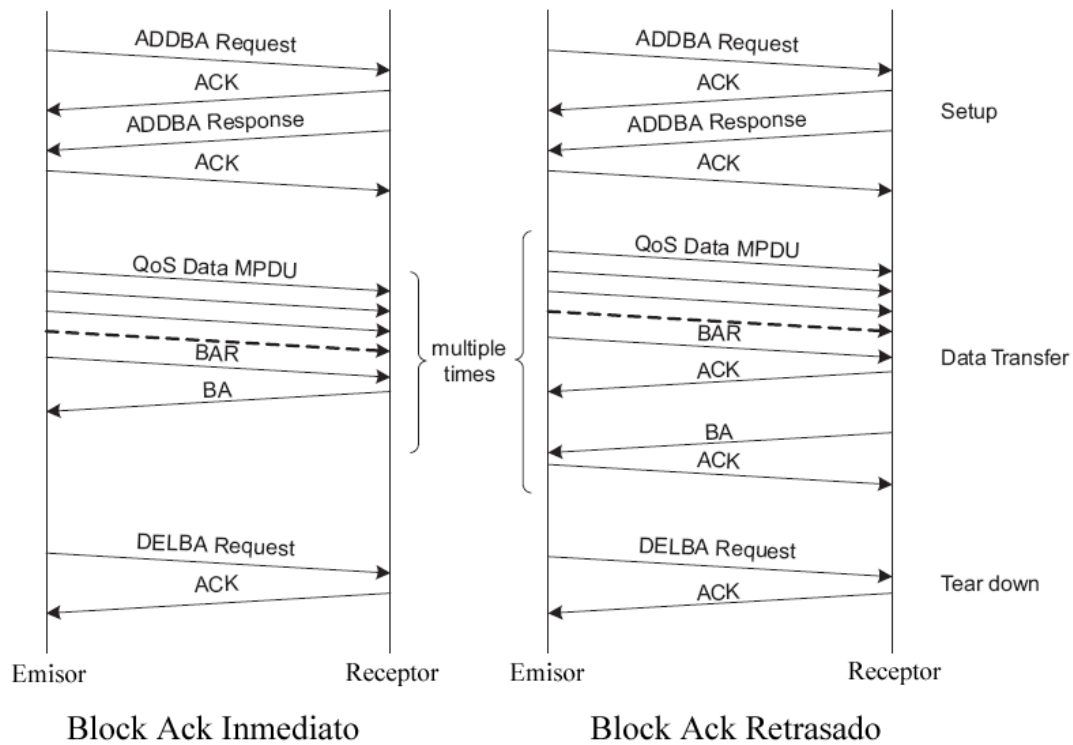


Fig. 3.5 BlockAck Inmediato y Retrasado [1]

3.1.5. Direct Link Protocol (DLP)

Este mecanismo se definió para solucionar el problema de desperdicio de recursos cuando sólo dos estaciones se comunican en modo infraestructura, utilizando los recursos del canal de forma eficiente.

DLP permite que tanto transmisor como receptor puedan intercambiar la elección de ciertos parámetros como la tasa de transmisión y creando un enlace directo entre ellos.

Cuando un enlace directo está activo, el transmisor realiza pruebas para medir la calidad de dicho enlace; y cuando se encuentre inactivo pasado un determinado tiempo, se revierte la comunicación de ambas estaciones hacia el QAP.

CAPÍTULO 4: SIMULACIONES Y RESULTADOS

Una vez hecha la introducción teórica y el estudio de las diferentes características introducidas en el estándar 802.11, pasaremos a ver los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas con la plataforma OPNET de la característica MAC de diferenciación de servicios.

Las pruebas realizadas intentan simular un escenario real WLAN, compuesto por 3 estaciones que transmiten de manera simultánea hacia un AP, cada una de las cuales transmitía una aplicación diferente.

Con el fin de estudiar el comportamiento de la implementación del mecanismo de acceso EDCA, se han simulado dos escenarios compuestos por los mismos elementos antes descritos: el primero utilizando el protocolo original 802.11 y el segundo añadiéndole las características QoS.

Sobre estos escenarios, se han analizado los retardos y throughput de todas las estaciones y las aplicaciones implementadas.

4.1. Configuración del escenario de la simulación

4.1.1. Configuración de los tráfico de las aplicaciones

El escenario de la simulación recreará un ambiente de “oficina” de 100 x 100 m. Como se puede observar en la **Fig 4.1**, en ella se sitúan 3 estaciones WLAN que generan tráfico de aplicaciones diferentes hacia el AP.

La configuración de cada una de las estaciones está hecha para trabajar sobre el protocolo UDP y corresponden a: voz, video y datos; cuyos datos son resumidos a continuación en la **Tabla 4.1**.

Tabla 4.1. Parámetros de configuración de los tráfico de las aplicaciones

	<i>DATOS</i>	<i>VIDEO</i>	<i>VOZ</i>
TC	0	5	7
Tasa de generación de datos	0.001	0,1 (10 tramas video/s)	-
Tamaño del paquete (bytes)	5000	17280 (128 x 120 píxeles)	-
Tasa de transmisión	40 Mbps	1,4 Mbps	100 Kbps

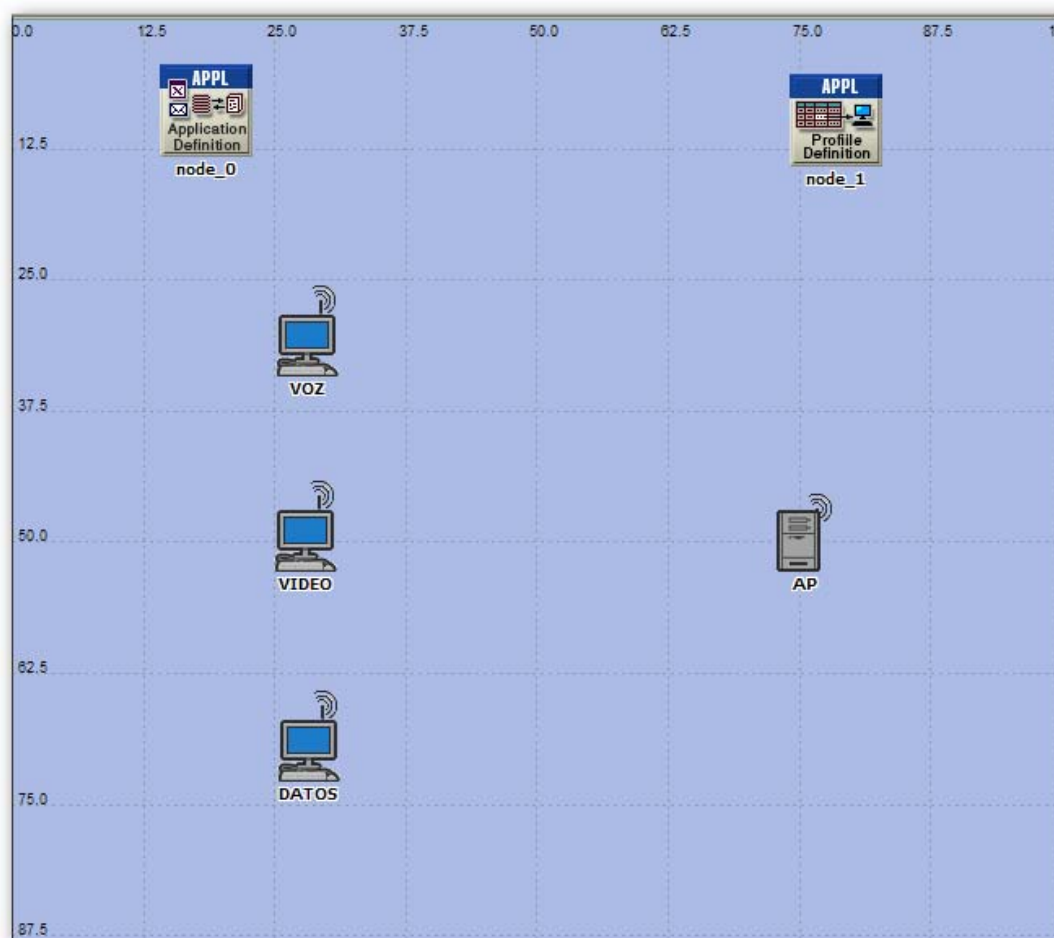


Fig. 4.1 Escenario de la simulación.

4.1.2. Parámetros WLAN

La configuración de los parámetros WLAN utilizados en ambos escenarios de simulación propuestos está detallada en el **Anexo 5**. En ella podemos destacar el uso de la tecnología DSSS y una tasa PHY de 11 Mbps, entre otros parámetros.

En el caso del escenario EDCA, además de los parámetros WLAN antes mencionados, se han configurado los parámetros de acceso al canal por defecto del estándar, los cuales se muestran a continuación en la **Tabla 4.2**.

Tabla 4.2. Parámetros de acceso EDCA por defecto

<i>AC</i>	CW_{\min}	CW_{\max}	<i>AIFSN</i>	<i>TXOP limit</i>
AC0	31	1023	7	0
AC1	31	1023	3	0
AC2	15	31	2	3,008 ms
AC3	7	15	2	1,504 ms
Legacy	15	1023	2	0

4.2. Resultados de las simulaciones

4.2.1. Parámetros a evaluar

Antes de analizar los resultados obtenidos por las simulaciones, describiremos brevemente los parámetros simulados:

Retardo

Este parámetro representa el retardo punto a punto de todos los paquetes que han sido recibidos satisfactoriamente por la capa MAC y reenviados a la capa superior.

Este retardo incluye los retardos por encolado y acceso al medio en la fuente MAC, recepción de todos los fragmentos individualmente y el retardo de la trama vía radio.

Throughput

Este parámetro representa el tráfico total en bits/s recibido satisfactoriamente y reenviado a la capa superior

Esta estadística no incluye las tramas de datos unicast direccionadas de otra MAC, duplicidad de tramas antes de ser recibidas o tramas incompletas.

4.2.2. Escenario 802.11

Este escenario está basado en el estándar original, con una tasa de transmisión a nivel física máxima de 11 Mbps. Sobre este escenario se analizarán los parámetros de **retardo** y **throughput**.

Retardo

En la **Fig. 4.2** se muestran los resultados obtenidos de retardo para las 3 aplicaciones, siendo aproximadamente el mismo valor de 1,5 s.

Este resultado resultaría bueno para la aplicación de datos debido a que transmitimos una gran cantidad de bytes en un tiempo relativamente aceptable y sobre una aplicación que no está condicionada por el retardo.

Sin embargo, este mismo tiempo de retardo para las aplicaciones multimedia como el video y la voz, que requieren asegurar un tiempo de acceso mínimo, resultaría crítico.

Como recomiendan los estándares de la ITU, el retraso máximo para el caso de las aplicaciones de video interactivas y VoIP, ha de ser de 150 y 25 ms respectivamente.

Por ello podríamos concluir que el resultado obtenido del retardo sobre dichas aplicaciones sería nefasto, debido a que sobrepasaríamos excesivamente ese retardo, dando lugar a una mala calidad de imagen para el caso del video y, ecos y comunicación interrumpida en el caso de la voz.

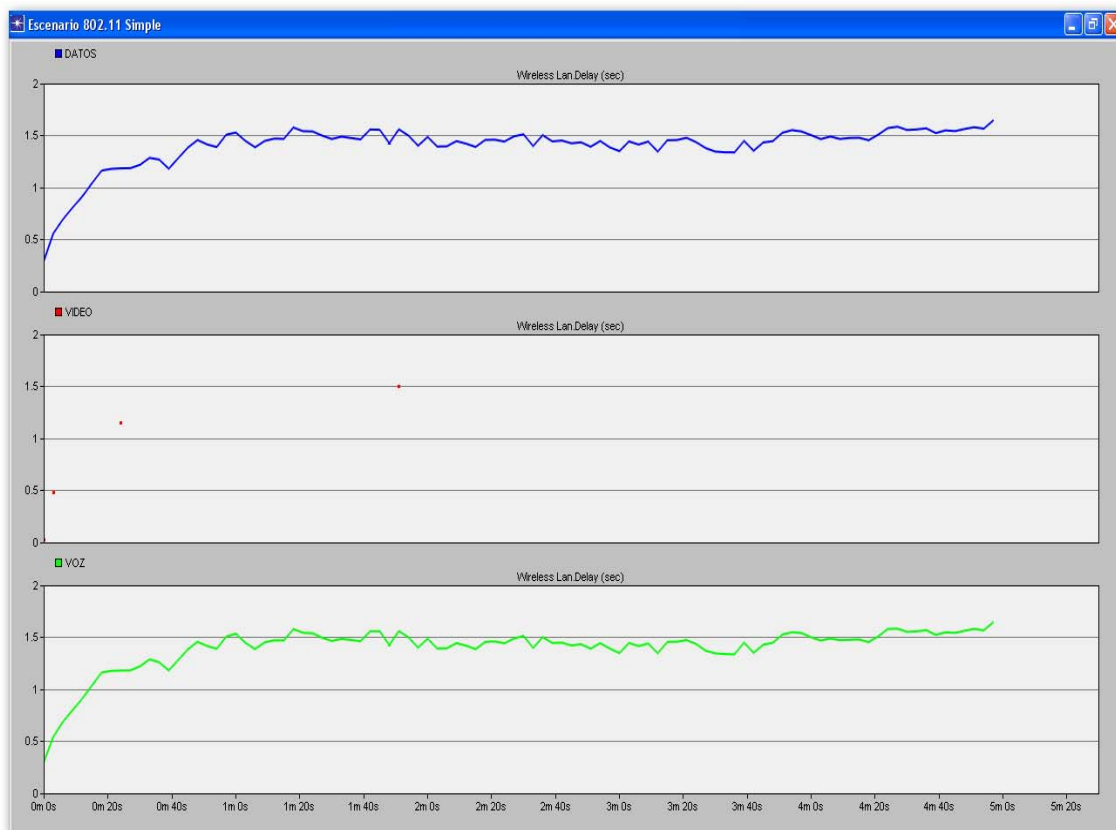


Fig. 4.2 Retardo escenario 802.11.

Throughput

En la **Fig. 4.3** se muestran los resultados obtenidos del throughput para las 3 aplicaciones. En ella podemos ver claramente que ninguna de las aplicaciones consigue transmitir a una tasa de datos ideal, debido a que todas compiten constantemente por el medio y en el que seguro se producen diversas colisiones y pérdidas de datos.



Fig. 4.3 Troughput escenario 802.11.

Tabla 4.3. Comparativa de valores de throughput en escenario 802.11

	<i>DATOS</i>	<i>VIDEO</i>	<i>VOZ</i>
Throughput máximo simulación	150 Kbps	4 Kbps	50 Kbps
Tasa de transmisión	40 Mbps	1,4 Mbps	100 Kbps

La **Tabla 4.3** muestra claramente la comparativa entre las tasas generadas por las aplicaciones y el throughput máximo alcanzado por las mismas. En el caso del vídeo sobretodo, se hace claramente patente que la tasa de transmisión sería fatal para una comunicación multimedia ya que daría lugar a múltiples errores y retardos en las comunicaciones.

4.2.3. Escenario 802.11 con EDCA

Este escenario es el mismo que el anterior pero además incorpora las mejoras a nivel MAC de priorización de tráfico QoS sobre las aplicaciones.

Retardo

En la **Fig 4.4** se aprecia el resultado de la simulación de los retardos de las aplicaciones bajo el escenario EDCA, claramente superior respecto al obtenido anteriormente con el escenario 802.11

Así podemos observar como el retardo de la aplicación de datos continúa siendo mayor a las otras aplicaciones, debido a la cantidad de información que se transmite.

La gran mejoría que se observa en la imagen y se detalla en los valores de la **Tabla 4.4**, es que los retardos de las aplicaciones de vídeo y voz disminuyen favorablemente hasta el orden de los ms, valores que nos permitirían tener una comunicación multimedia idónea.

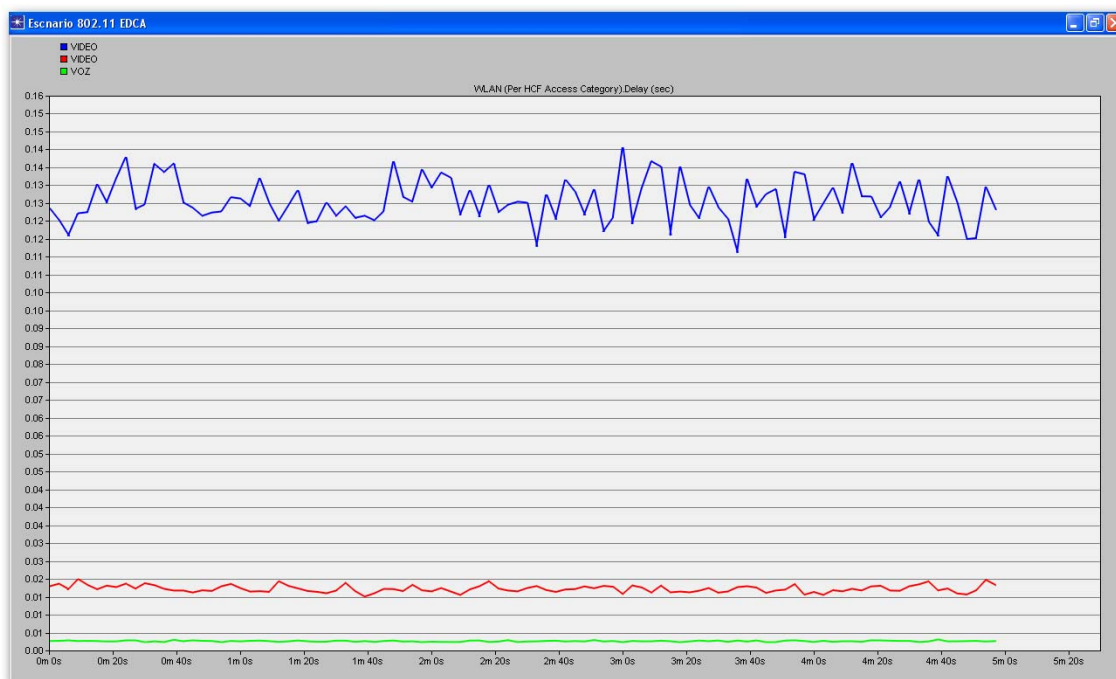


Fig. 4.4 Retardo escenario EDCA.

Tabla 4.4. Retardos para las aplicaciones en escenario EDCA

	<i>DATOS</i>	<i>VIDEO</i>	<i>VOZ</i>
Retardo	130 ms	18 ms	2,5 ms

Throughput

En la **Fig 4.5** se puede observar el resultado de la simulación de los throughput de las aplicaciones bajo el escenario EDCA. En ella se aprecia que las tasas de transmisión son mayores en comparación a las obtenidas anteriormente, esto es debido a que se prioriza cada aplicación y esto da lugar a que no se produzcan tantas colisiones que provocaban errores de datos.

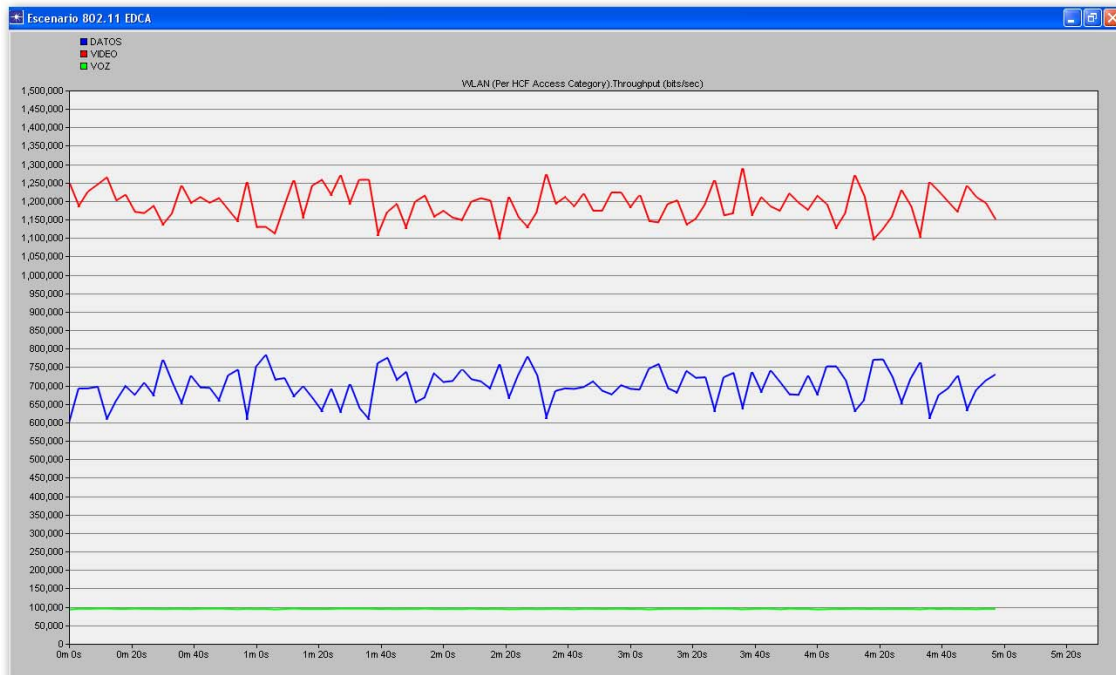


Fig. 4.5 Troughput escenario EDCA.

Además de la claridad de la mejora observada en la figura, podemos comprobar en la **Tabla 4.5** los valores exactos de las tasas enviadas. En ella destacamos que la aplicación de voz obtiene total prioridad sobre las demás, permitiendo que transmita a una tasa constante máxima de 100 Kbps.

Por otro lado, la aplicación de vídeo gana muchísima más tasa de datos que la de datos, llegando casi a transmitir a la tasa con la que se generó y que conlleva a una gran calidad en la transmisión de vídeo.

Tabla 4.5. Comparativa de valores de throughput en escenario EDCA

	<i>DATOS</i>	<i>VIDEO</i>	<i>VOZ</i>
Throughput máximo simulación	750 Kbps	1,25 Mbps	100 Kbps
Tasa de transmisión	40 Mbps	1,4 Mbps	100 Kbps

4.2.4. Análisis de las simulaciones sobre la aplicación de DATOS

Retardo

En la **Fig 4.6** podemos observar la comparativa de los retardos sobre ambos escenarios. Es notorio que el retardo sobre el escenario 802.11 es mucho mayor respecto al escenario EDCA, fundamentalmente debido a que en el primer escenario todos compiten por el medio y el retardo que se produce a nivel de la capa MAC es mayor, ya que incluye el retardo de espera de acceso al medio y el retardo tras intentar reenviar un paquete perdido.

Puede parecer que el hecho de que se transmita esta aplicación con una menor prioridad en el escenario EDCA, conlleve a que el retardo sea tan bueno como el que apreciamos y debería ser más cercano o mayor al del escenario simple, pero eso es un error.

Hemos de tener siempre en cuenta que el retardo de espera en cola puede ser mucho menor al retardo provocado tras una colisión por congestión del medio, ya que esto significaría tener que esperar la confirmación de un paquete que quizás se haya perdido, el reenvío del mismo y sobretodo el tiempo de acceso al medio que es fundamental en las comunicaciones WLAN.

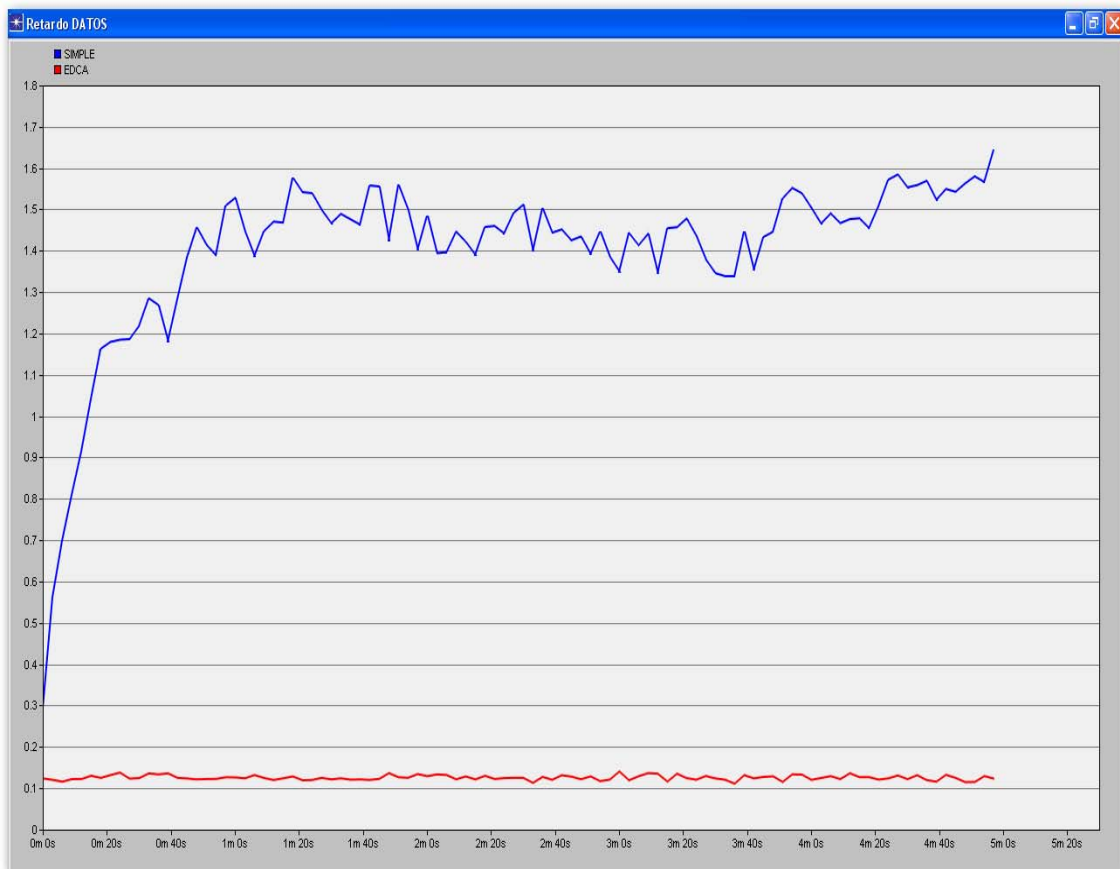


Fig. 4.6 Retardos aplicación DATOS.

Throughput

De igual forma que con el retardo, el throughput depende también de las condiciones del medio para poder transmitir de forma más eficaz y a una mayor tasa.

Como se puede observar en la **Fig. 4.7**, la tasa máxima alcanzada por el escenario EDCA es mucho mayor en comparación a la del escenario simple, debido en gran parte a que en este escenario no se producen tantas colisiones.

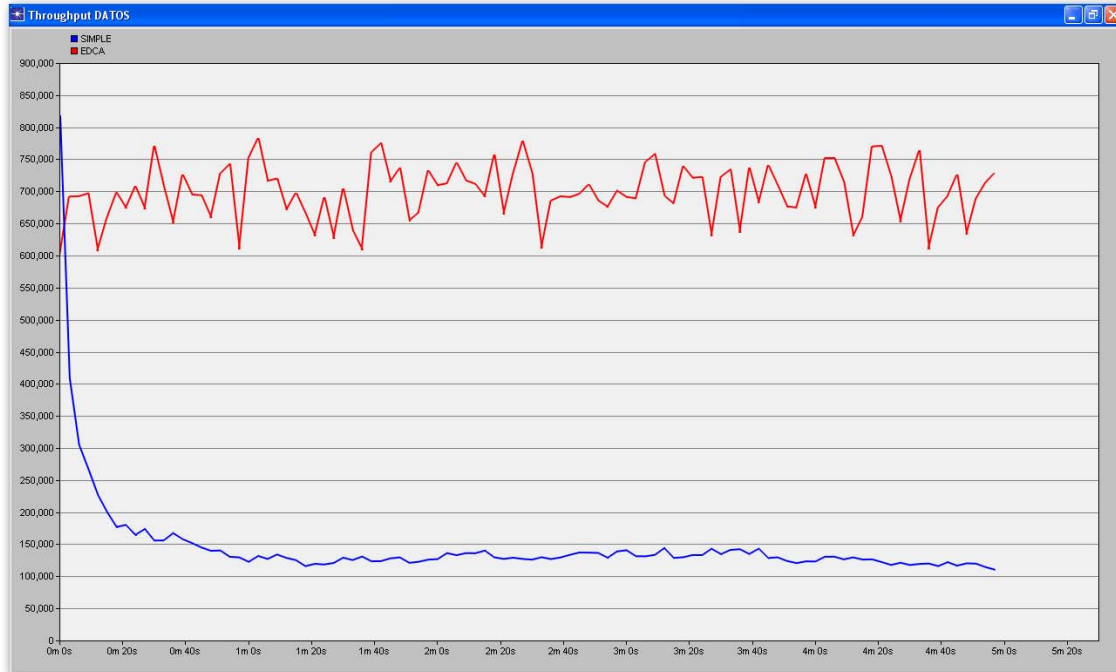


Fig. 4.7 Throughputs aplicación DATOS.

4.2.5. Análisis de las simulaciones sobre la aplicación de VIDEO

Retardo

En la simulación que se muestra a continuación en la **Fig. 4.7**, se puede apreciar la gran mejora que supone el uso de EDCA sobre el retardo. El escenario EDCA presenta una mayor prioridad de acceso para la aplicación de vídeo por lo que ganamos tremendamente en el tiempo de acceso al medio.

La utilización de parámetros que nos permitan un acceso más rápido unido a que no se producen colisiones en este entorno respecto al anterior, hacen que los valores de retardo sean idóneos para una comunicación en tiempo real.

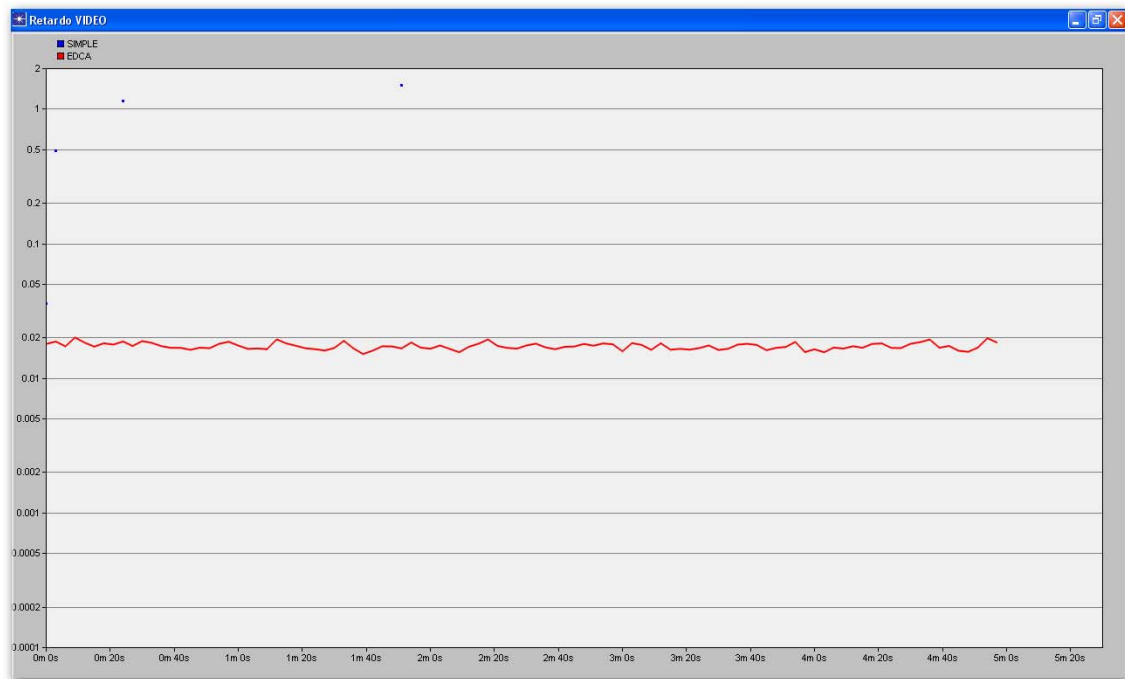


Fig. 4.8 Retardos aplicación VIDEO.

Throughput

De los resultados de throughput mostrados en la **Fig. 4.9**, podemos destacar la gran diferencia existente entre ambos valores de tasas máximas, consiguiendo con el escenario EDCA un valor muy próximo a los 1,4 Mbps generados.

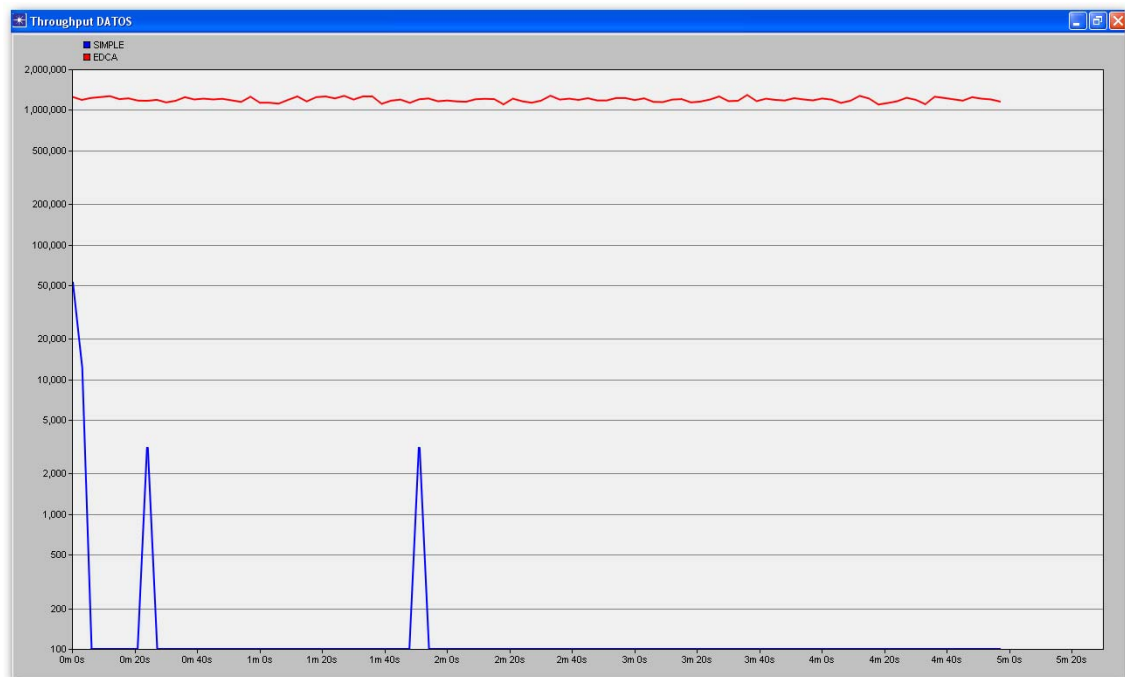


Fig. 4.9 Troughputs aplicación VIDEO.

4.2.6. Análisis de las simulaciones sobre la aplicación de VOZ

Retardo

A través del análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones de esta aplicación, podremos comprender la gran ventaja que supone el uso de la priorización de tráfico en las aplicaciones multimedia.

En la **Fig. 4.10** se observa la diferencia entre el uso de las características QoS en el retardo, ya que con los valores de la simulación por defecto obtendríamos tiempos de retardo que nos harían casi imposible la comunicación fluida y sin interrupciones sobre VoIP debido a que supera el orden de los segundos.

Sin embargo, con el uso de EDCA no sólo mejoramos notablemente estos tiempos, sino que también conseguimos reducirlos muy por debajo de lo recomendable para que no se produzcan cortes y ecos en la comunicación.

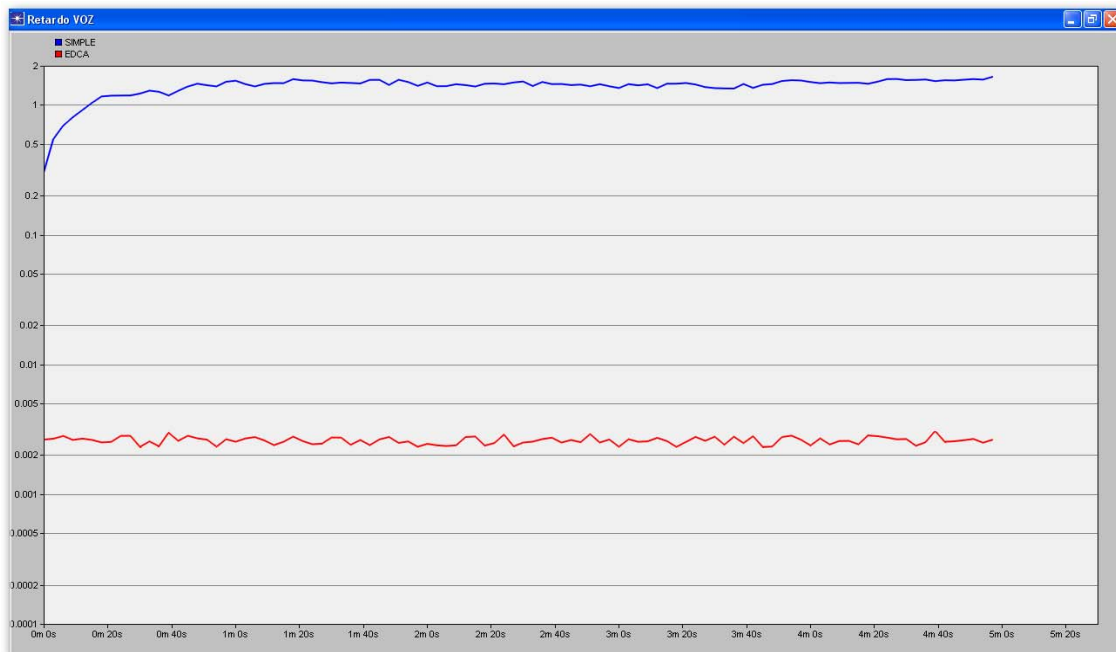


Fig. 4.10 Retardos aplicación VOZ.

Throughput

Resulta casi tan importante como el bajo retardo conseguido con EDCA, el obtener a través de las simulaciones del throughput una tasa de transmisión constante y casi ideal como se muestra en la **Fig. 4.11**.

Aunque la diferencia respecto al valor obtenido por el escenario 802.11 no parezca demasiada, realmente cuando hablamos de una tasa tan pequeña y un servicio tan exigente como el de VoIP, significa un servicio sin ningún fallo.

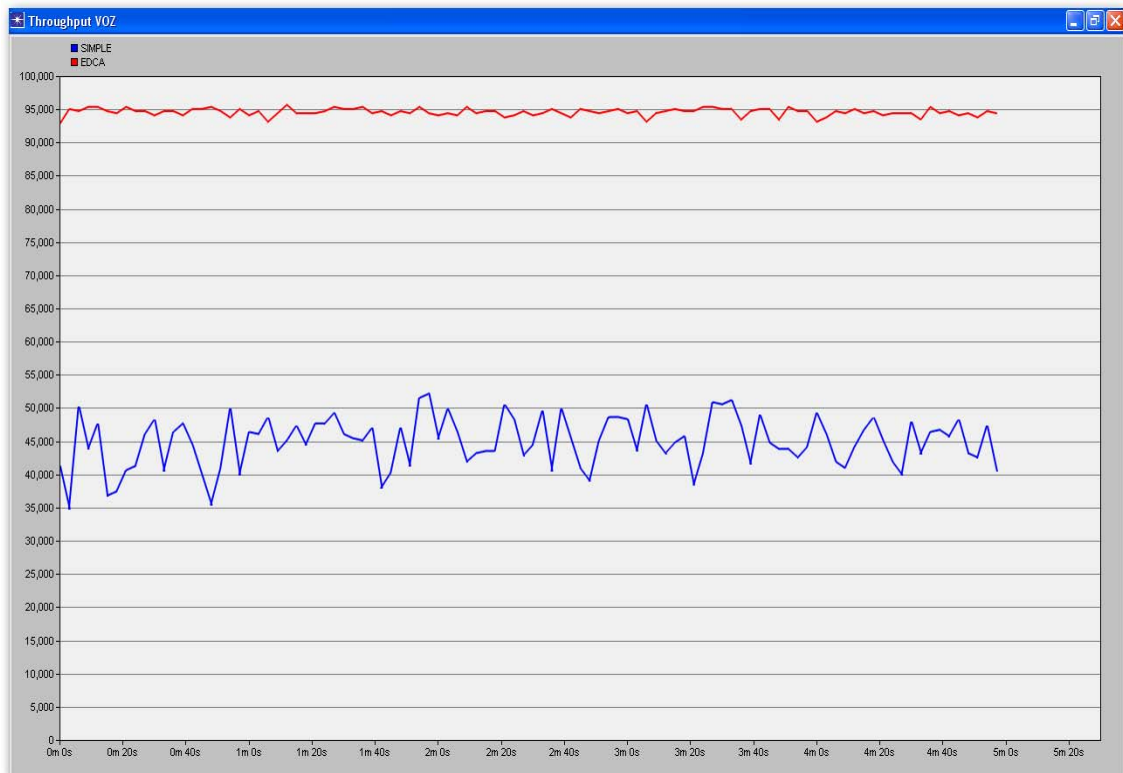


Fig. 4.11 Troughputs aplicación VOZ.

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Este proyecto representa uno de los muchos estudios que se realiza sobre la tecnología inalámbrica que tan de moda está hoy en día y que aún espera su auge con la incorporación de este nuevo estándar.

Cuando se nos planteó este proyecto, teníamos la idea de enfocarlo a la adaptación del estándar 802.11e a una red que trabajase como parte de una red MAN que trabajaba sobre la tecnología WIMAX. Debido a que éste conformaba una de las partes dentro del desarrollo de ese proyecto y a que una de las partes principales del mismo no pudieron ser acabadas, redirigimos nuestro trabajo al estudio de la priorización de tráfico sobre diversos modelos de redes WLAN.

Las pruebas de este proyecto han estado enfocadas a mostrar las ventajas que supone el uso de la priorización de tráfico sobre aplicaciones multimedia, como una parte incluida dentro de todas las mejoras que incorporará el hoy nuevo estándar IEEE 802.11n.

A través de las simulaciones realizadas con la ayuda de la plataforma OPNET, hemos comprobado el enorme potencial que supone el uso de este mecanismo sobre aplicaciones multimedia y la gran diferencia que supone su uso en parámetros fundamentales dentro de las comunicaciones como son el retardo y el throughput.

Hemos de decir que estas simulaciones han sido exitosas ya que muestran con total rotundidad la diferencia del uso del mecanismo EDCA sobre las redes inalámbricas. Sin embargo, éstas representaban el punto de inicio hacia pruebas de mayor complejidad que nos habíamos planteado para demostrar la efectividad de 802.11e.

Una vez conseguidos estos resultados, nos planteamos el comparar este modelo implementado con otro incorporado en un artículo prestigioso. Este artículo se muestra en las referencias de este proyecto [6] y pretende estudiar el comportamiento del estándar 802.11e sobre un conjunto de estaciones en un BSS, analizando parámetros como el retardo y el throughput mientras se aumenta de forma progresiva el número de estaciones.

La simulación de este artículo suponía modificar el modelo incorporado, añadiendo a cada estación 4 fuentes independientes, cada una de las cuales generaría el mismo tráfico pero asignado a un AC en particular, de tal forma que seríamos capaces de incorporar en una sola estación 4 flujos iguales pero que competirían a nivel MAC por el acceso al medio, dependiendo de sus parámetros EDCA.

Hace pocos días conseguimos modelar estas 4 fuentes dentro de una sola estación; pero a pesar de intentarlo hasta esta misma semana, no pudimos conseguir modificar la capa MAC de este modelo para que pudiese aceptar y diferenciar estas 4 fuentes. Por ello nos hemos quedado con una sensación

agridulce al haber faltado estas pruebas con el fin de incorporarlo en un posible artículo como alternativa al modelo incorporado en dicho estudio.

Dejando de lado el apartado de las pruebas realizadas, quisimos que este proyecto también hiciera honor a su título e incorporara una parte importante en esta memoria del proyecto, dedicando una menor parte pero no menos importante al estudio de diversas publicaciones y escritos sobre las posibles características del estándar antes de su ratificación.

Por ello, hemos dedicado un capítulo entero a explicar las mejoras que incorpora este nuevo estándar y que de buen recaudo nos ayudarán a comprender un poco mejor la forma como consigue velocidades tan altas en comparación a estándares anteriores.

Las líneas futuras que derivan de la realización de este proyecto son diversas. En primer lugar, y como no podía ser de otra manera, está el intentar completar este trabajo con el fin de incorporar el modelo descrito que no pudimos completar, con el fin de compararlo con resultados obtenidos por otros artículos.

Finalmente, otra de las grandes tareas de futuro sería el modelado a través del simulador OPNET u otro similar, de las mejoras incorporadas por el estándar IEEE 802.11n con el fin de permitir su estudio, a la vez que se incorporare como se espera en su uso diario.

GLOSARIO

AC	Categoría de Acceso
ACK	Confirmación
ADDBA	Bloque de confirmación añadido
AIFS	Espacio arbitrario intertrama
A-MPDU	Unidad de datos de protocolo MAC agregada
A-MSDU	Unidad de datos de servicio MAC agregada
AP	Punto de acceso
BA	Bloque de confirmación
BAR	Petición de bloque de confirmación
BSS	Conjunto de servicio básico
BSS ID	Identificador de BSS
BW	Ancho de banda
CCK	Código complementario de claves
CFP	Periodo libre de contención
CP	Periodo de contención
CSMA/CA	Acceso múltiple sin portadora con evasión de colisión
CTS	Preparado para enviar
CW	Ventana de contención
DA	Dirección de destino
dB	Decibelios
DCF	Función de coordinación distribuida
DELBA	Bloque de confirmación borrado
DIFS	Espacio intertrama de DCF
DSSS	Espectro ensanchado por secuencia directa
FSSS	Espectro ensanchado por salto de frecuencia
FTP	Protocolo de transferencia de archivos

GF	Greenfield
Ghz	GigaHerzios
GI	Intervalo de guarda
HC	Coordinador híbrido
HCCA	Acceso controlado al canal HCF
HCF	Función de coordinación híbrida
HT	Troughput de alta velocidad
HTSG	Grupo de estudio del Troughput de alta velocidad
HTTP	Protocolo de transferencia de hipertexto
Hz	Herzios
IEEE	Instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos
IFS	Espacio intertrama
IP	Protocolo de Internet
ISI	Interferencia intersimbólica
Khz	KiloHerzios
LDPC	Chequeo de paridad de baja densidad
LLC	Capa de control de enlace lógico
m	Metros
MAC	Control de acceso al medio
MCS	Esquema de modulación y codificación
MIMO	Entrada múltiple – Salida múltiple
MPDU	Unidad de datos de protocolo MAC
MSDU	Unidad de datos de servicio MAC
NAV	Vector de localización de red
OFDM	Multiplexación por división de frecuencia ortogonal
OSI	Interconexión de sistemas abiertos
PAR	Petición de autorización de proyecto

PC	Coordinador de punto
PCF	Función de coordinación puntual
PDU	Unidad de datos de protocolo
PHY	Capa física
PIFS	Espacio intertrama de PCF
PLCP	Procedimiento de convergencia de capa física
PSD	Densidad espectral de potencia
PSDU	Unidad de datos de servicio PLCP
PSMP	Ahorro de energía multiencuesta
QoS	Calidad de servicio
RD	Dirección inversa
RF	Radiofrecuencia
RIFS	Espacio intertrama reducido
RTS	Petición para enviar
Rx	Receptor
SA	Dirección de origen
SDM	Multiplexación por división espacial
SDU	Unidad de datos de servicio
SIFS	Espacio intertrama pequeño
SIG	Campo de señal
SISO	Entrada única – Salida única
SNR	Relación señal/ruido
SSID	Identificador de servicio conjunto
STA	Estación
STBC	Codificación de bloque espacio-tiempo
TBTT	Tiempo de transmisión de objetivo de beacon
TC	Categoría de tráfico

TGn	Grupo de trabajo de 802.11n
TID	Identificador de tráfico
TS	Flujo de tráfico
TSID	Identificador de flujo de tráfico
TSPEC	Especificación de tráfico
Tx	Transmisor
TXOP	Oportunidad de transmisión
UDP	Protocolo de uso de datagrama
VoIP	Voz sobre IP
WiFi	Tecnología inalámbrica
WLAN	Red de área local inalámbrica
WNG SC	Comité para la creación de la Nueva Generación WiFi
WWiSE	Eficiencia espectral mundial

REFERENCIAS

- [1] Perahia, E. and Stacey, R., *Next generation wireless LANs: throughput, robustness, and reliability in 802.11n*, New York Cambridge University Press (2008)
- [2] CISCO, "802.11n: The Next Generation of Wireless Performance" <http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/wireless/ps5678/ps6973/ps8382/prod_white_paper0900aecd806b8ce7.pdf>
- [3] Deyun, G.; Jianfei, C and King, N., "Admission control in IEEE 802.11e wireless LANs", *Network IEEE*, Volúmen 19, 6-13 (2005) <<http://ieeexplore.ieee.org>>
- [4] Qiang, N., "Performance Analysis and Enhancements for IEEE 802.11e Wireless Networks", *Network IEEE*, Volúmen 19, 21-27 (2005). <<http://ieeexplore.ieee.org>>
- [5] Yang, X., "IEEE 802.11n: enhancements for higher throughput in wireless LANs", *Wireless Communications IEEE*, Volúmen 12, 82-91 (2005). <<http://ieeexplore.ieee.org>>
- [6] Ching-Ling, H. and Wanjiun, L., "Throughput and delay performance of IEEE 802.11e enhanced distributed channel access (EDCA) under saturation condition", *Wireless Communications*, Volúmen 6, 136-145 (2007) <<http://ieeexplore.ieee.org>>
- [7] Deyun, G.; Jianfei, C. and Chan Wen, Ch., "Admission Control Based on Rate-Variance Envelop for VBR Traffic Over IEEE 802.11e HCCA WLANs", *Vehicular Technology*, Volúmen 57, 1778-1788 (2008). <<http://ieeexplore.ieee.org>>
- [8] Rashid, M.M; Hossain, E. and. Bhargava, V.K., "Controlled Channel Access Scheduling for Guaranteed QoS in 802.11e-Based WLANs", *Wireless Communications*, Volúmen 7, 1287-1297 (2008). <<http://ieeexplore.ieee.org>>
- [9] Schiller, J., *Mobile Communications*, Londres Addison-Wesley (2003)
- [10] Anuncio oficial del IEEE de la ratificación del estándar 802.11n <http://standards.ieee.org/announcements/ieee802.11n_2009amendment_ratified.html>
- [10] Página oficial de OPNET <<http://www.opnet.com>>



Escola Politècnica Superior
de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

ANEXOS

TÍTULO DEL TFC: Evaluación de la tecnología IEEE 802.11n con la plataforma OPNET

TITULACIÓN: Ingeniería Técnica de Telecomunicaciones, especialidad Telemática

AUTOR: Carlos Navarrete Chávez

DIRECTOR: David Remondo Bueno

FECHA: 14 de octubre de 2009

1.1. Anexo 1: Historia de 802.11n

1.1.1. Preparación del estándar

Interesados en una extensión de altas tasas de datos de 802.11a y con motivo de la presentación del WNG SC de IEEE802.11 en enero de 2002, se describió por parte de Jones la necesidad de conseguir velocidades superiores a los 100 Mbps a través de 802.11 y en la que se describieron algunas ideas para conseguir estas altas tasas, como por ejemplo: mejoras de modulación y codificación, técnicas de diversidad espacial, multiplexación espacial y soluciones para doblar el ancho de banda.

En la reunión sostenida en marzo de 2002 en St. Louis, se presentaron análisis de capacidad para tasas altas de datos sobre los 100 Mbps, enfoque OFDM/SDM (MIMO), entre otros conceptos que luego fueron incluidos en el estándar.

Después de muchas presentaciones, en julio de 2002 se estableció el IEEE 802.11 HTSG con la finalidad de completar algunos documentos que especificasen la manera cómo conseguir velocidades de datos superiores a los 100 Mbps

1.1.2. IEEE 802.11 HTSG

La primera reunión del HTSG tuvo lugar en septiembre de 2002 y su objetivo principal fue establecer un PAR (Petición de Autorización de Proyecto) y cinco criterios para el desarrollo del estándar.

El punto de partida para la especificación de soporte de tasas de datos elevadas está basado en el alcance de mejoras a nivel MAC y PHY. Considerando que la capacidad máxima de transmisión para los sistemas 802.11 existentes hasta ese momento (802.11a y 802.11b) eran de aproximadamente 25 Mbps, representaba una mejora de cuatro veces su caudal.

Se definieron medidas de evaluación como la capacidad de transmisión, de datos a nivel SAP MAC, rango, capacidad de red agregada, consumo de energía, flexibilidad espectral, flexibilidad de coste y complejidad, compatibilidad y coexistencia.

Los cinco criterios para el desarrollo del estándar fueron:

- **Potencial extenso de mercado:** amplio campo de aplicación, múltiples fabricantes y usuarios, y costes accesibles.
- **Compatibilidad con la arquitectura IEEE 802.11 existente:** manteniendo la misma interface MAC SAP que los estándares existentes. Las nuevas mejoras estarán definidas en el mismo formato y

estructura de tal forma que puedan coexistir con los demás estándares 802.11.

- **Identidad distinta a otros estándares IEEE 802.11:** cada estándar deberá tener sus propias características que la identifiquen frente a otros estándares 802.11.
- **Viabilidad tecnológica:** aquellos dispositivos desarrollados en esta fase y posteriores deberán cumplir esta viabilidad técnica que asegure soluciones WLAN seguras.
- **Viabilidad económica:** incluye factores de coste conocidos, precios razonables para el rendimiento y consideración de gastos de instalación.

El objetivo final era crear una enmienda del estándar que diese lugar a productos comerciables pero diferenciados de otros estándares. Además de completar el PAR Y los cinco criterios anteriores, el HTSG empezó el desarrollo del nuevo modelo de canales de desvanecimiento multicamino (MIMO) y sus productos.

1.1.3. IEEE 802.11 TGn

El PAR fue aceptado y aprobado por el grupo de trabajo 802.11, creando el Task Group n (TGn) cuya primera reunión tuvo lugar en Singapur en septiembre de 2003.

Los miembros del TGn realizarían sus propuestas técnicas parciales o completas. Dichas propuestas completas seguirían un proceso de selección descendente que culminaría en una única propuesta sobre la cual estaría basada la enmienda. Las propuestas parciales, serían informativas y luego incorporadas en propuestas parciales pasado un cierto tiempo.

Por ello, el TGn comenzó el desarrollo de dos documentos: uno de requerimientos funcionales en el cual se deberían cubrir los requerimientos técnicos de las propuestas completas, y otro de comparación de criterios en el cual dichas propuestas serían comparadas entre sí.

Uno de los requerimientos funcionales era que se cumpliesen las propuestas hechas en el PAR y los cinco criterios para el desarrollo del estándar.

Un segundo requerimiento fue la necesidad de alcanzar los 100 Mbps de capacidad de transmisión a nivel MAC; pero ya que quizás no todos los dominios de regulación permitiesen que un único dispositivo utilizase múltiples canales de 20 MHz (una de las propuestas fundamentales para conseguir tasas altas), se le agregó la restricción de que estos 100 Mbps se consiguieran en un único canal de 20 Mhz.

Para respetar el uso eficiente del espectro, se añadió un tercer requerimiento para el modo de operación con eficiencia espectral de al menos 3bps/Hz.

Otro requerimiento fue que el protocolo debería operar también en la banda de 5 GHz debido a la gran disponibilidad de la misma respecto a la de 2,4 GHz. Además, se propuso que estos modos de operación fueran compatibles con sistemas 802.11a y 802.11g.

Además se agregó como parte del estándar muchas de las características de 802.11e para mejorar la calidad de servicio (QoS), ya que muchas de las aplicaciones soportadas en 802.11n están relacionadas con intercambio de voz y video en tiempo real a altas velocidades.

Teniendo en cuenta todo ello, se tomaron ciertos criterios de cambios y medidas de rendimiento como por ejemplo:

- Capacidad de soportar los requerimientos de servicio de varias aplicaciones, incluyendo QoS (a nivel MAC)
- Preámbulos, canalización, eficiencia espectral, rendimiento y capacidad (a nivel PHY)

El 17 de mayo de 2004 se llevó a cabo la convocatoria de propuestas TGn, tras varias propuestas presentadas dos equipos se erigieron como las candidaturas principales, el TGn Sync y el WwiSE.

El TGn Sync fue fundado por Intel, Cisco, Agere y Sony con el objetivo de cubrir el amplio mercado relacionado al estándar (PCs, dispositivos electrónicos de empresa y casa)

EL WWiSE estaba compuesto por las principales compañías de semiconductores como Broadcom, Conexant y Texas Instruments; interesados en una simple actualización del estándar 802.11a para su comercialización a gran escala.

Ambas propuestas tenían en común incluir en el estándar la multiplexación por división espacial y la utilización de canales de 40 Mhz para incrementar la velocidad de datos; además de la agregación de tramas para mejorar la eficiencia a nivel de MAC.

Durante los dos siguientes años, se llevaron a cabo muchos acuerdos y mejoras entre ambas propuestas, siendo finalmente elegido en mayo de 2005 la propuesta del TGn Sync, aunque luego dicha elección no fue ratificada.

1.1.4. El camino del estándar desde entonces

Luego del fallo de no ratificación en la elección de la propuesta del TGn Sync, dentro del TGn se inició una propuesta conjunta que fusionase lo mejor de ambas; pero debido a la gran cantidad de miembros y la distancia de las posturas, el proceso avanzaba muy lentamente, por lo que en octubre de 2005 se formó la EWC.

La EWC (Enhancement Wireless Consortium) estaba formada por Intel y Broadcom con el fin de realizar una especificación fuera del IEEE para poder llegar de forma más rápida al mercado.

Este hecho provocó que se rompiera el estancamiento del IEEE y que el estándar EWC fuera adoptado como propuesta conjunta y aprobado unánimemente por el TGn en enero de 2006. Esta propuesta conjunta se convirtió más adelante en el borrador de la enmienda del estándar 802.11 para altas velocidades (TGn draft 1.0)

En marzo de 2006, el TGn draft 1.0 fue puesto a votación entre los miembros del grupo de trabajo de IEEE 802.11 (no sólo miembros del TGn), siendo rechazado al no alcanzar el 75% de los votos necesarios para su aprobación.

Tras esta resolución negativa, el TGn draft 2.0 fue puesto nuevamente a votación en febrero de 2007, alcanzando esta vez su aprobación con el 83% de votos a favor.

Dado a que el grupo de trabajo deseaba recibir el menor número de votos en contra, entre marzo y septiembre de 2007 se continuó desarrollando el borrador, dando lugar al TGn draft 3.0.

Se esperaba que en marzo de 2009 finalmente se completase y aprobase por parte del grupo de trabajo IEEE 802.11 la enmienda del estándar 802.11n, teniendo como fecha de publicación oficial el pasado mes de junio de 2009; pero no se cumplieron dichas fechas, haciéndose esperar un poco más.

Finalmente el pasado día 11 de septiembre, el IEEE anunció la ratificación del estándar IEEE 802.11nTM-2009, definiendo mecanismo que proveen mejoras significativas de las tasas de transmisión para la redes WLAN.

1.2. Anexo 2: Proceso de codificación LDPC

Paso 1. Cálculo del número mínimo de símbolos OFDM.

$$N_{SYM} = m_{STBC} \times \left\lceil \frac{8 \times length + 16}{m_{STBC} \times N_{DBPS}} \right\rceil \quad (1.1)$$

Donde:

- $N_{DBPS} = N^{\circ} bits/símbolo OFDM$ Determinado por el MCS seleccionado.
- $m_{STBC} = 2$ para STBC y 1 para otros casos.
- $N_{pld} = 8 \times length + 16$, n° de payload: n° bits datos + n° bits campo SERVICE

Paso 2. Determinar el tamaño y número de palabras código.

$$N_{TBC} = N_{CBPS} \times N_{SYM} \quad (1.2)$$

Donde:

- $N_{DBPS} = N^{\circ} bits codificados/símbolo OFDM$
- $N_{SYM} = N^{\circ}_{min} símbolos OFDM$

Paso 3. Determinar el número de bits ceros reducidos

La reducción o shortening consiste en agregar 0s en la parte de información en la palabra código, antes de que calcular los bits de paridad. A continuación, éstos serán descartados para que los bits de paridad puedan ser luego concatenados a los bits de información.

El número total de bits codificados que serán llevados en todas las palabras código LDPC, es simplemente el número de palabras código multiplicado por su tamaño. Si el número total de bits de información llevados en las palabras código LDPC es mayor al número de bits útiles (payload), entonces será necesario la utilización de **Nshrt** (bits “0” de shortening).

Paso 4. Generar bits de paridad.

Si los bits de información contienen bits “0” de shortening, éstos son desechados para de cada palabra código, concatenando los bits de paridad al final de los bits de información restantes.

Paso 5. Empaquetar en símbolos OFDM.

Tras crear cada palabra código concatenando los bits de información y los bits de paridad, el número total de bits codificados es:

$$N^{\circ} total_bits_codificados = N_{pld} + N_{CW} \times N_{LDPC} \times (1 - R) \quad (1.3)$$

Si:

$$N^{\circ} total_bits_codificados > N_{TBC} \rightarrow \text{Perforación.}$$

$$N^{\circ} total_bits_codificados > N_{TBC} \rightarrow \text{Repetición.}$$

Parte 6. Análisis de flujos

Las palabras código resultantes son concatenadas juntas. A continuación, se mapea la modulación.

A continuación en la Fig. 1.1, se puede observar el proceso completo de la codificación LDPC.

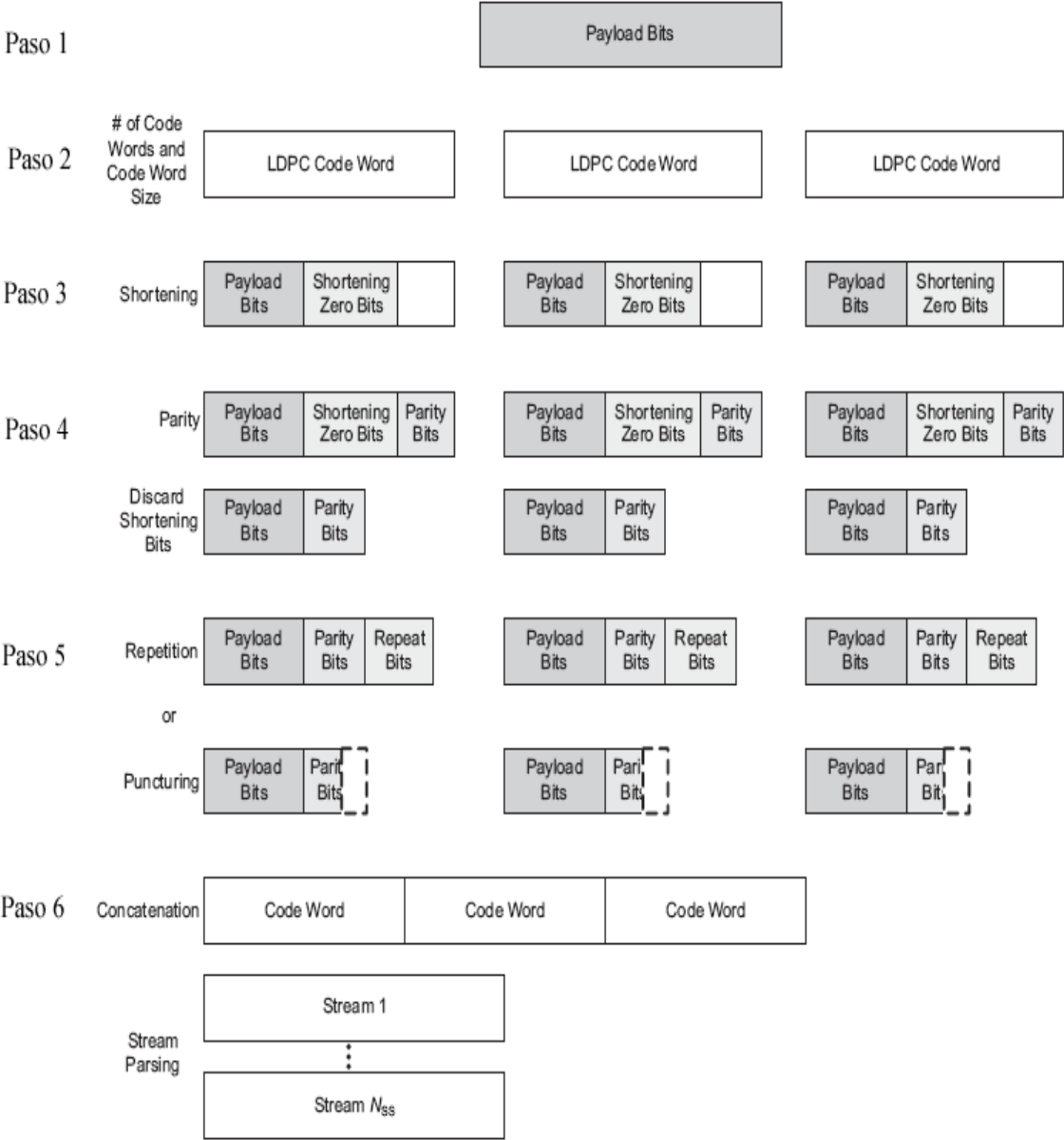


Fig.5.1 Mapeo de TC a AC [1]

1.3. Anexo 3: Capa MAC 802.11

El estándar IEEE 802.11 especifica dos mecanismos de acceso al medio: una función de coordinación distribuida obligatoria (DCF) y una función coordinada opcional (PCF)

1.3.1. DCF (Función de coordinación distribuida)

Este mecanismo trabaja en un esquema tipo “escuchar antes de hablar” basado en CSMA/CA donde las estaciones escuchan el medio para determinar cuando éste está libre.

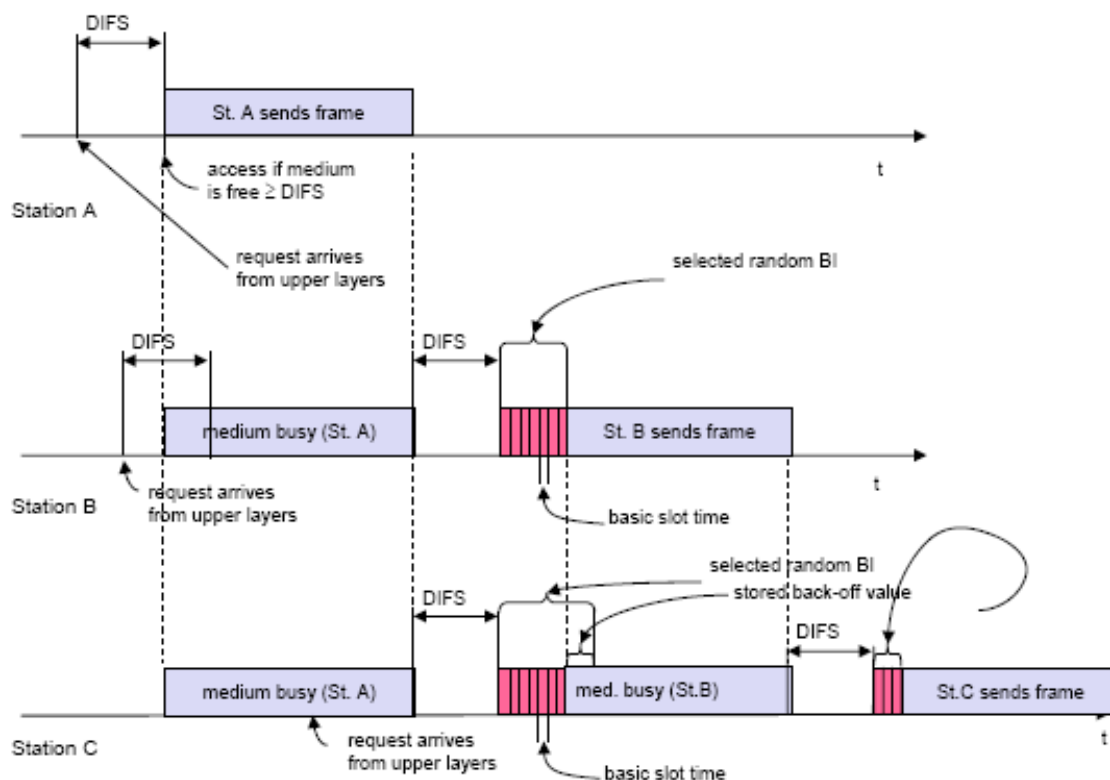


Fig. 5.2 Mecanismo DCF [9]

En la **Fig 5.2** se muestra el mecanismo DFC; antes de iniciar una transmisión, cada estación necesita “escuchar” el medio. Si el medio está desocupado y continúa así durante un intervalo de tiempo DIFS, la estación puede comenzar a transmitir la trama.

Si el medio ya estuviera ocupado o pasara a estarlo antes de transcurrir el periodo DIFS, se añade un tiempo de backoff o disputa, tras el cual intentaría transmitir nuevamente la trama.

Si otra estación ocupara el medio durante el tiempo de backoff, la estación almacenará el tiempo (ranuras) que le queda por esperar. Tras ello esperará un

intervalo DIFS, para luego esperar sólo el tiempo de backoff almacenado para empezar a transmitir la trama.

El tiempo de backoff ranurado se genera aleatoriamente entre un valor de 0 y el tamaño de la ventana de contención (CW). En un primer intento, CW es igual a su valor mínimo (CW_{\min}) y por cada transmisión fallida, irá aumentando el doble de su tamaño anterior hasta llegar a su valor máximo (CW_{\max}). Si la transmisión es exitosa, el valor de la CW se resetea a 0.

Si dos estaciones finalizan su proceso de backoff simultáneamente y detectan el medio libre, se producirá una colisión ya que ambas transmitirán al mismo tiempo. Por ello es necesaria la confirmación de la correcta recepción de cada trama con un ACK; de tal forma que permita al emisor, programar la retransmisión de la trama si no se recibe esta confirmación pasado un tiempo determinado.

Limitaciones:

Debido a que sólo estaba pensada para ofrecer servicios “Best effort”, no hay diferenciación de servicios entre tipos diferentes de flujos; lo cual es un problema de QoS para las aplicaciones multimedia.

1.3.2. PCF (Función de coordinación puntual)

Este mecanismo provee una transmisión libre de contención introducido para dar soporte a las aplicaciones multimedia, aunque sólo puede usarse en modo infraestructura debido a que está basado en un esquema de polling.

El mecanismo PCF ilustrado en la **Fig 5.3**, el tiempo es dividido en intervalos periódicos llamados intervalos de beacon, compuestos por un periodo de contención (CP) y otro periodo libre de contención (CFP). Durante un CP, el punto de acceso mantiene una lista de estaciones registradas sobre las cuales realiza periódicamente una “encuesta” Sólo después que una estación sea encuestada podrá comenzar a transmitir.

El tamaño de cada trama de datos está limitado por el tamaño máximo de trama MAC (2304 bytes)

El tiempo usado por el punto de acceso para generar las tramas de beacon (TBTT) y el siguiente TBTT es anunciado por el punto de acceso dentro de la trama actual de beacon.

Para brindar una mayor prioridad a PCF, se utiliza un intervalo de tiempo más pequeño llamado PIFS.

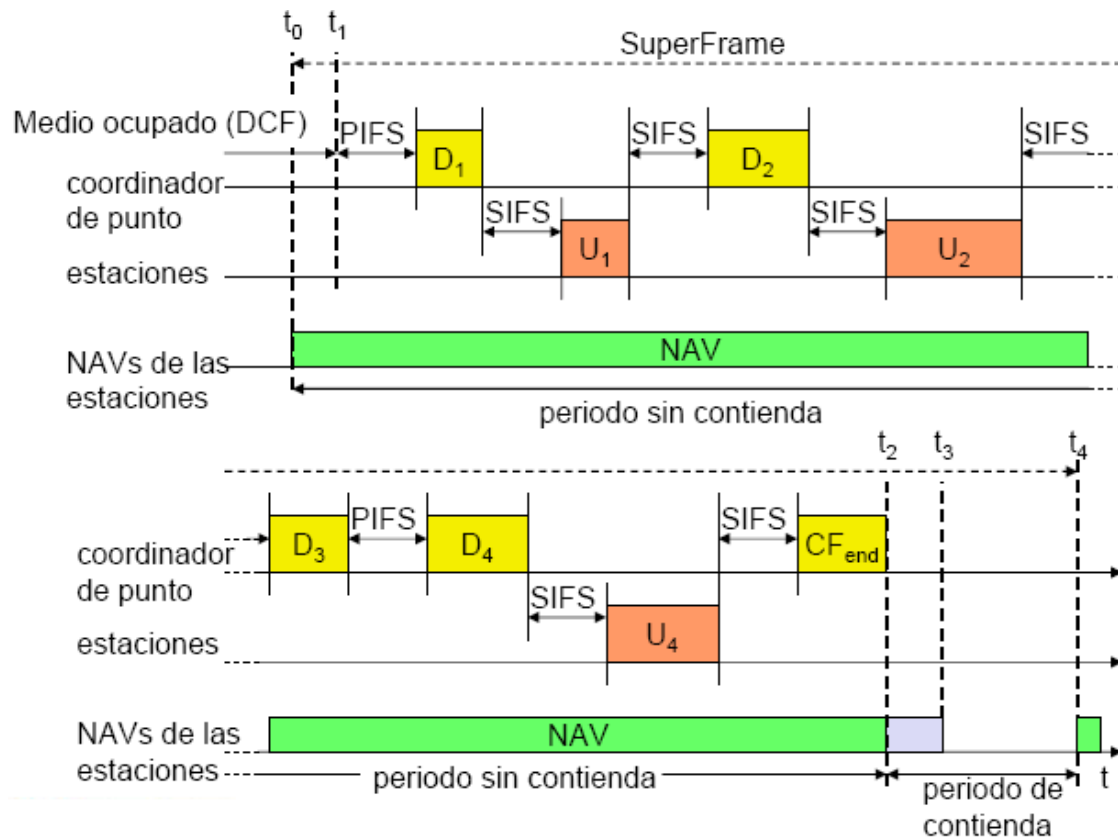


Fig. 5.3 Mecanismo PCF [9]

Limitaciones:

Sólo se define un esquema de Round – Robin, el cual no tiene en cuenta los requerimientos de cada tipo de tráfico.

El punto de acceso programa cada transmisión de un beacon en cada TBTT pero tiene que competir para acceder al medio; por lo que, dependiendo si éste está desocupado o lleno, la trama de beacon puede retrasarse.

Es difícil controlar la transmisión de una estación encuestada ya que el tiempo de transmisión es variable debido al tamaño de los datos y, particularmente a que la tasa de datos a nivel físico puede variar dependiendo de las condiciones del canal.

1.4. Anexo 4: Manual del simulador OPNET

Debido a que en la utilización de este simulador me he encontrado con más dificultades de las esperadas, me he tomado la libertad de incluir en este apartado de Anexos un pequeño manual de OPNET.

Este manual recoge las partes más importantes del simulador e intenta explicar un poco la metodología que sigue el simulador hasta la generación de las simulaciones.

1.4.1. Introducción

OPNET es un lenguaje de simulación orientado a las comunicaciones, utilizado por grandes empresas de telecomunicaciones. Siendo capaz de simular una gran variedad de redes, flujos de datos, paquetes perdidos, mensajes de control, caídas de los enlaces; entre otras opciones.

Por ello OPNET proporciona a las universidades e ingenieros la forma más efectiva para demostrar los diferentes tipos de redes y protocolos; a través del uso de librerías, facilitando el estudio del desarrollo de los modelos mediante la conexión de diferentes tipos de nodos.

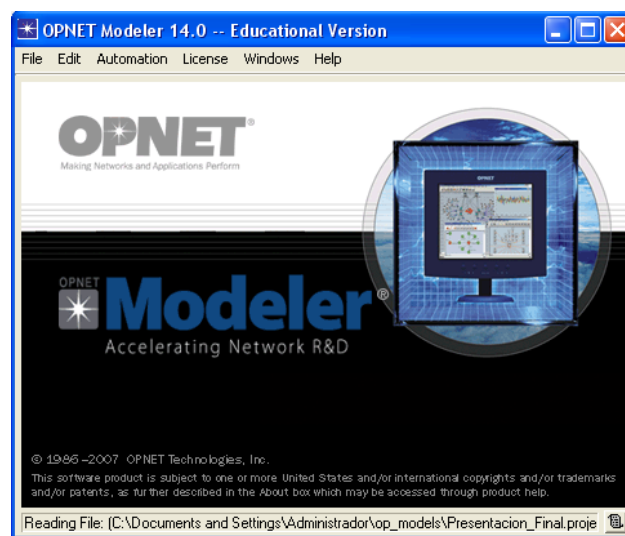


Fig. 5.4 OPNET Modeler

1.4.2. Partes del simulador OPNET Modeler

Project Editor

El Project Editor es el área principal del simulador en la que podemos crear una simulación de red. Además, nos permite construir el modelo de la red utilizando librerías estándar incorporadas.

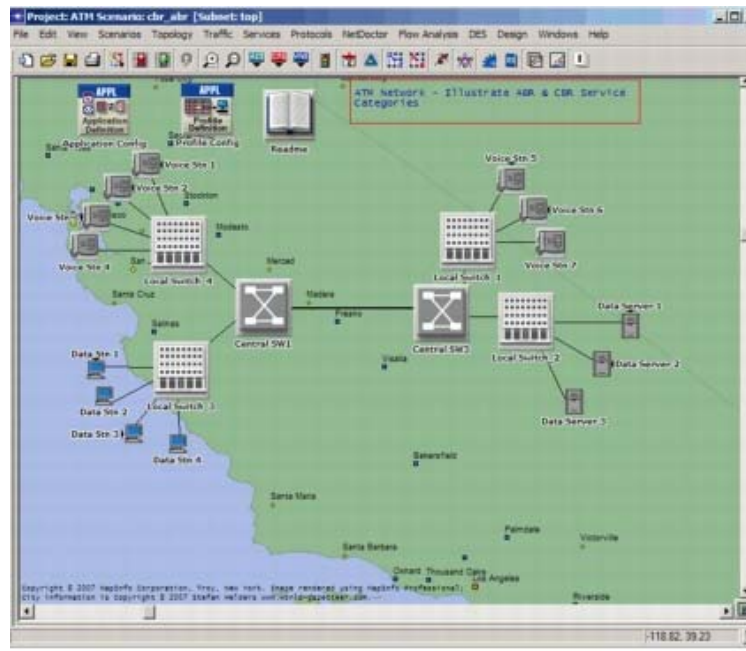


Fig. 5.5 Project Editor

Node Editor

Permite definir el comportamiento de cada elemento de la red. Utiliza diferentes módulos, cada uno de los cuales tiene aspectos internos del comportamiento del nodo como: creación y almacenamiento de datos, etc.

Los módulos están conectados mediante **flujos de paquetes** o **cables estadísticos**.

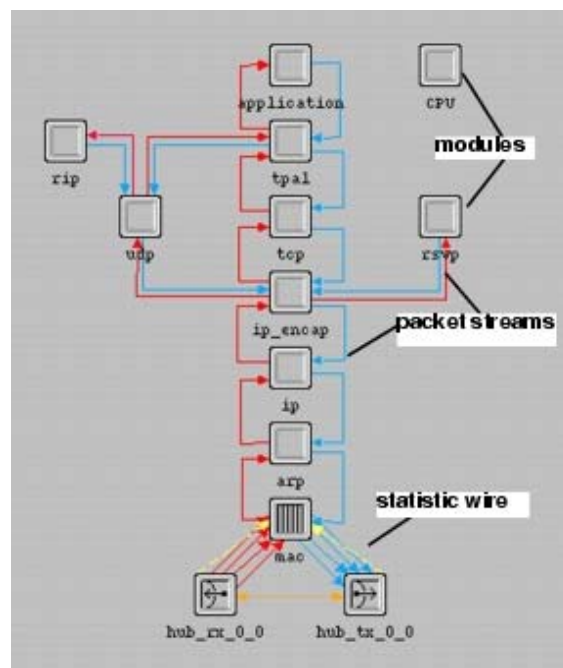


Fig. 5.6 Node Editor

Process Model Editor

Permite crear diversos modelos de procesos, los cuales son definidos como funcionalidades internas de capa de los modelos creados en el Node Editor.

Estos modelos de procesos están representados por FSM (Máquinas de estados finitos), y creados con íconos y líneas que representan los estados y sus transiciones, respectivamente.

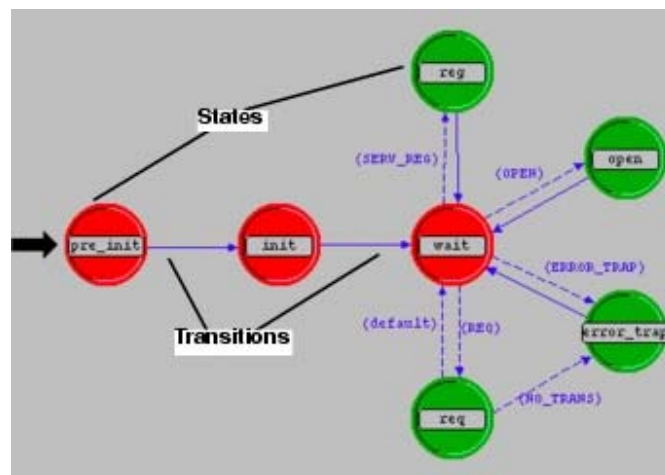


Fig. 5.7 Process Model Editor

Link Model Editor

Permite crear nuevos tipos de enlaces de objetos, los cuales tienen diferentes atributos y representación de interfícies.

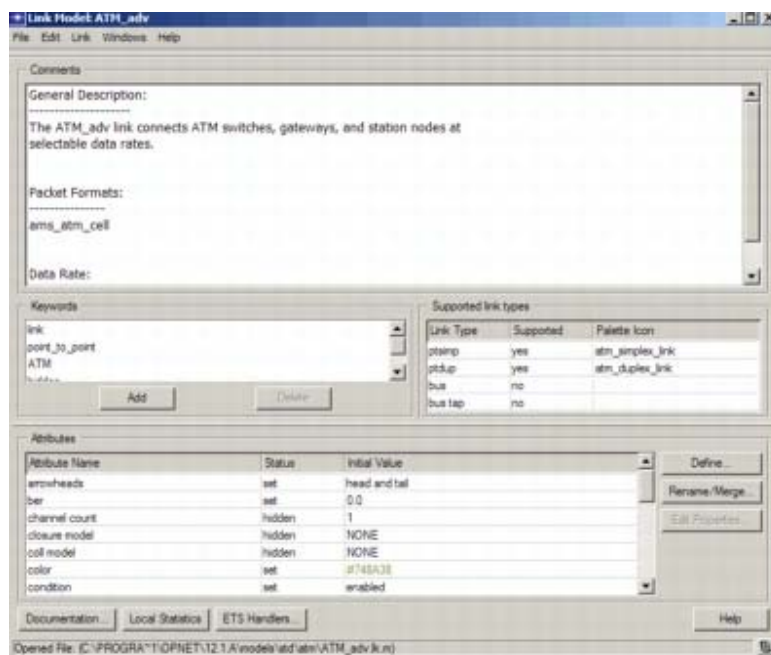


Fig. 5.8 Link Model Editor

Path Editor

Permite crear nuevas rutas de objetos que definen rutas de tráfico.

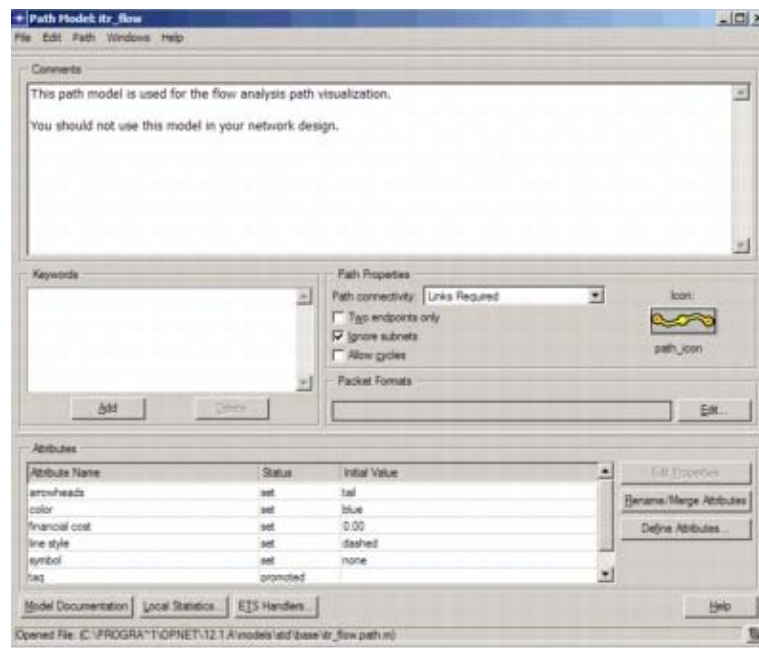


Fig. 5.9 Path Editor

Demand Editor

Permite definir modelos solicitados, los cuales determinan los atributos de interfície, presentación y comportamiento.

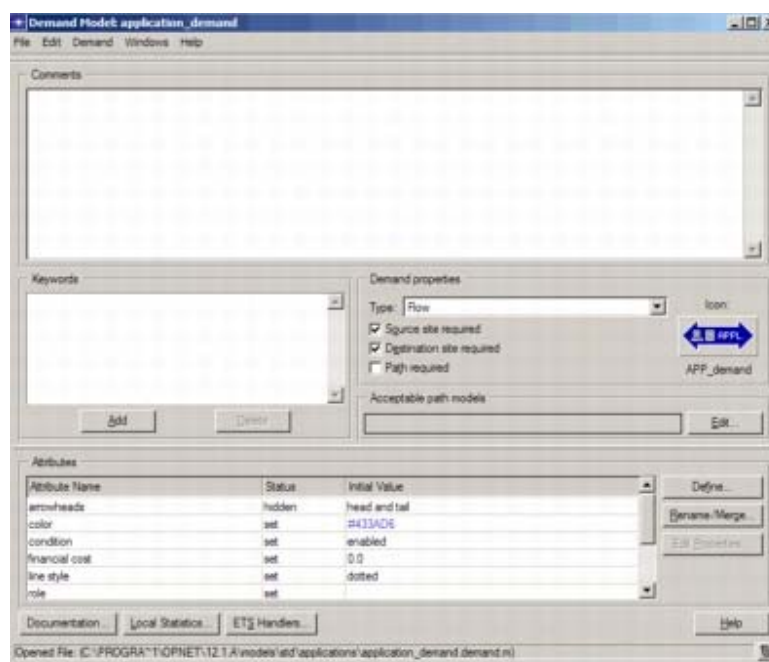


Fig. 5.10 Demand Editor

Probe Editor

Permite especificar las estadísticas a recoger durante la simulación, las cuales pueden ser de: enlace, nodo, atributos; además de estadísticas globales y tipos de animación.

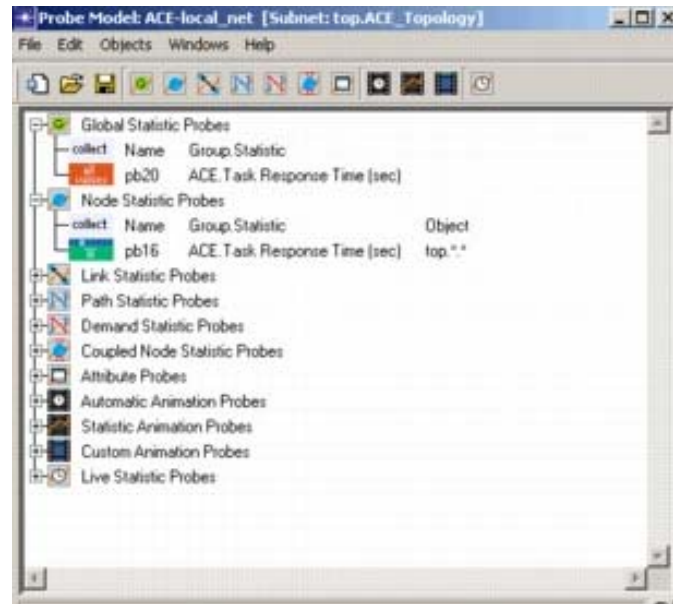


Fig. 5.11 Probe Editor

Simulation Sequence Editor

Permite especificar limitaciones adicionales en la simulación.

Las secuencias de simulación son representadas por íconos de simulación que contienen un conjunto de atributos para controlar las características ejecutables en la simulación.

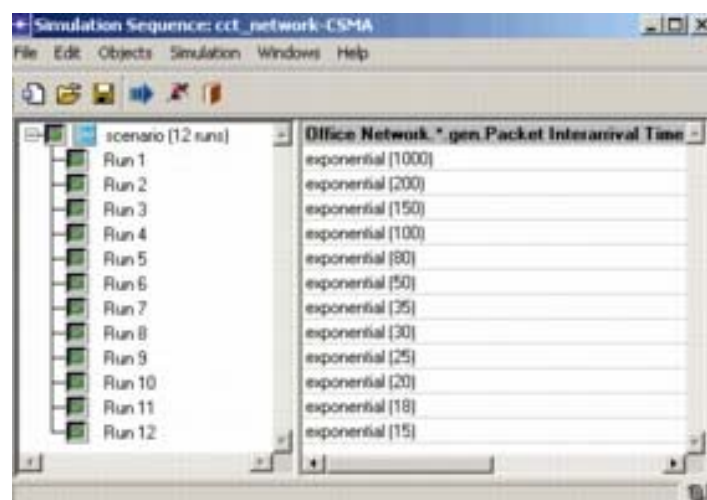


Fig. 5.12 Simulation Sequence Editor

Antenna Pattern Editor (con funcionalidad Wireless)

Permite modelar las propiedades de dirección y ganancia dependiente de las antenas.

Puede usar patrones de ganancia para determinar valores de ganancia, dando un conocimiento de las posiciones relativas de los nodos.

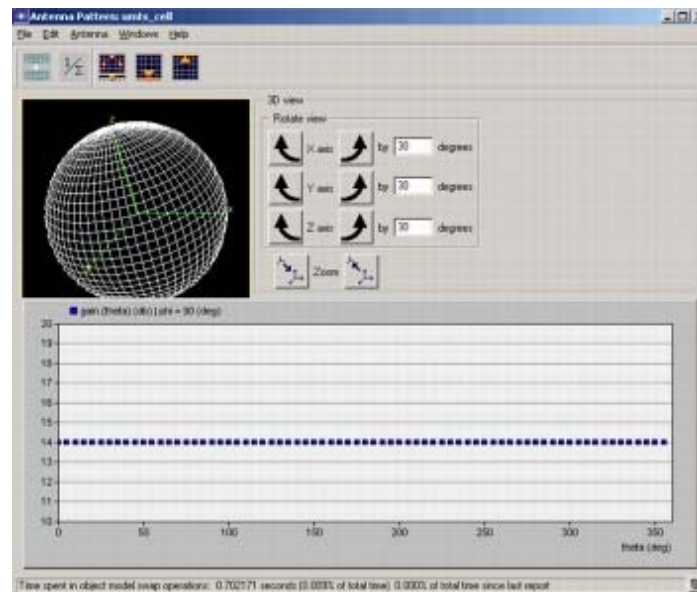


Fig. 5.13 Antenna Pattern Editor

Filter Editor

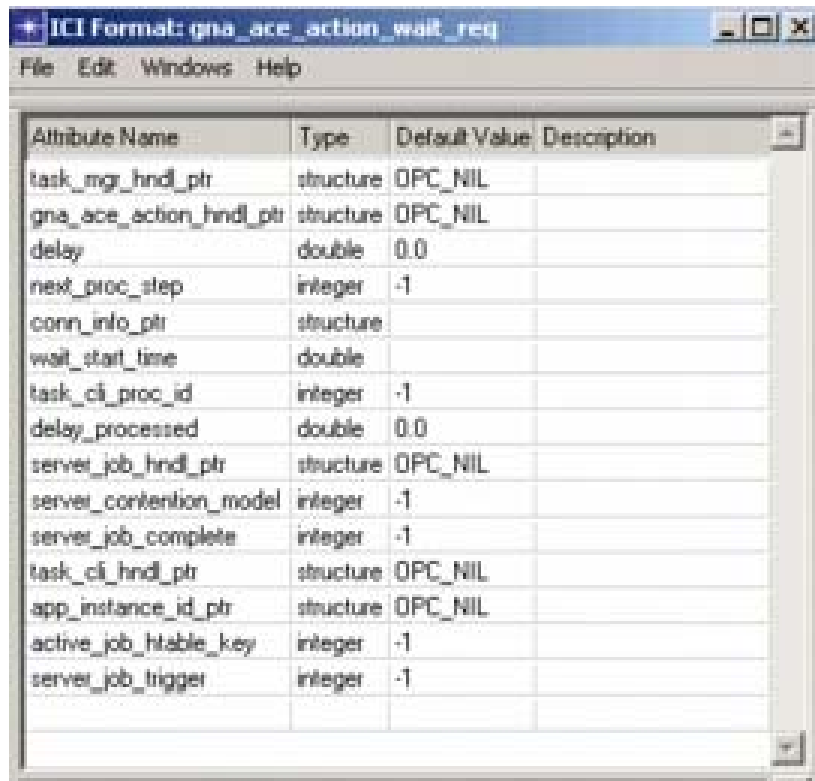
Permite crear nuevos modelos de filtros, combinando otros existentes.



Fig. 5.14 Filter Editor

ICI Editor (Información de Interface de Control)

Este editor es usado cuando deseamos formalizar las comunicaciones interproceso basados en interrupciones.



The screenshot shows a window titled 'ICI Format: gna_ace_action_wait_req'. It contains a table with the following data:

Attribute Name	Type	Default Value	Description
task_mgr_hndl_ptr	structure	OPC_NIL	
gna_ace_action_hndl_ptr	structure	OPC_NIL	
delay	double	0.0	
next_proc_step	integer	-1	
conn_info_ptr	structure		
wait_start_time	double		
task_cli_proc_id	integer	-1	
delay_processed	double	0.0	
server_job_hndl_ptr	structure	OPC_NIL	
server_contention_model	integer	-1	
server_job_complete	integer	-1	
task_cli_hndl_ptr	structure	OPC_NIL	
app_instance_id_ptr	structure	OPC_NIL	
active_job_hstable_key	integer	-1	
server_job_trigger	integer	-1	

Fig. 5.15 ICI Editor

Modulation Curve (con funcionalidad Wireless)

Permite crear funciones de modulación para caracterizar la vulnerabilidad de un código de información o el esquema de modulación al ruido.

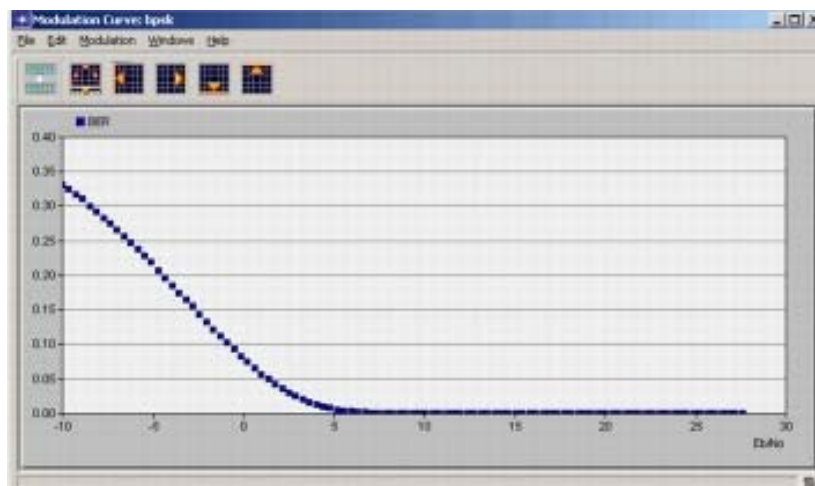


Fig. 5.16 Modulation Curve

Packet Format Editor

Permite definir la estructura interna de un paquete como un conjunto de campos, los cuales están representados por rectángulos de colores de un tamaño proporcional al número de bits contenidos.

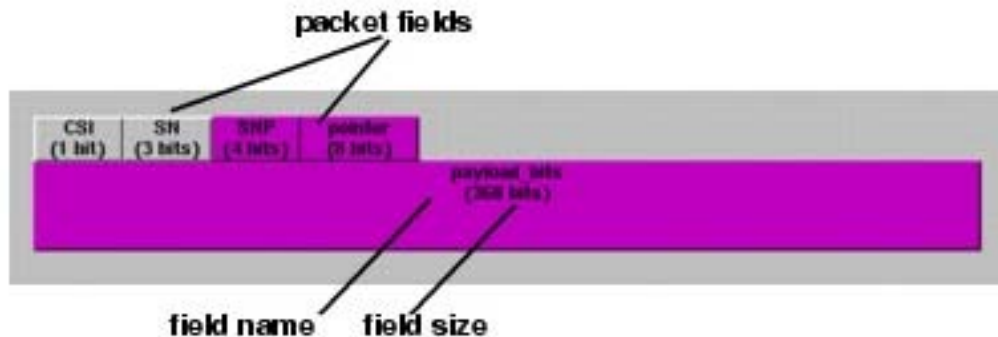


Fig. 5.17 Packet Format Editor

PDF Editor (Función Densidad de Probabilidad)

Puede modelar las probabilidades asociadas con el tiempo de llegada entre paquetes o la probabilidad de error en la transmisión.

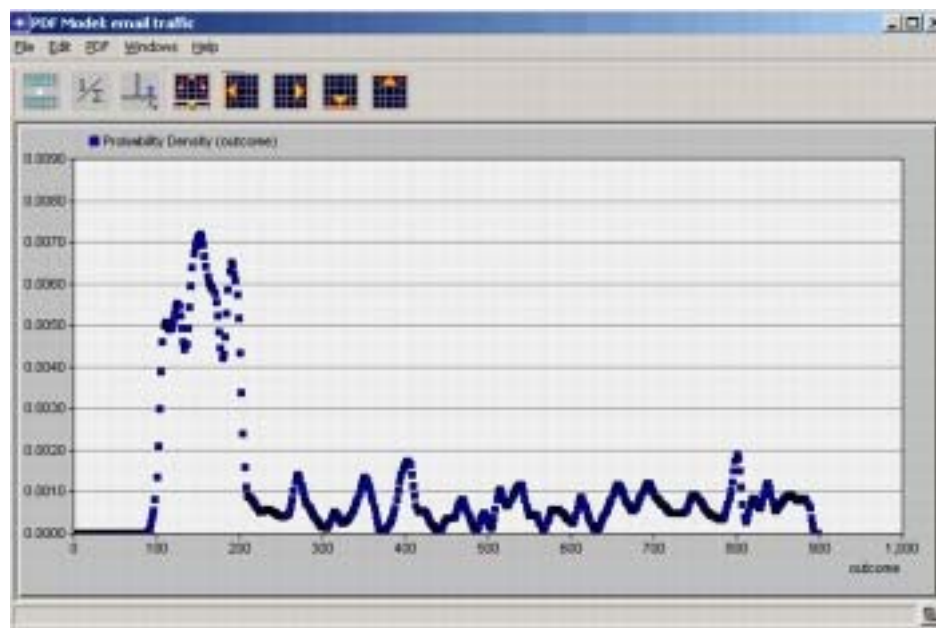


Fig. 5.18 PDF Editor

1.4.3. Modelado de una nueva red

Recogida de estadísticas

Para la recogida de estadísticas podemos elegir entre dos tipos:

- **Estadísticas de objeto**

Clic derecho sobre un elemento de la red → **Choose Individual DES Statistics/**

Seleccionar una opción a desplegar y marcar la deseada

- **Estadísticas globales**

Clic derecho sobre el Workspace → **Choose Individual DES Statistics**

Seleccionar **Global Statistics** / Seleccionar una opción a desplegar y marcar la deseada

Iniciar simulación

Pulsamos el botón **Configure/Run Discrete Event Simulation...**



En la ventana **Detailed** que nos aparece a continuación, podemos configurar las siguientes opciones:

- **Duration:** duración de la simulación
- **Update Interval:** calcula el número de eventos/s de datos
- **Kernel Simulation:** Kernel de la simulación
- **Development:** recoge datos de simulación o debuta los modelos
- **Optimize:** opción para acelerar la silmulación

Botón **Run...**

Al finalizar la simulación, el contenido de la pestaña mensajes aparecerá por lo que debemos pulsar el botón **Close**

Observar los resultados

- **Estadísticas de objeto**

Clic derecho sobre el elemento de la red → **View Results**

Expandir elemento, marcar resultado a ver y pulsar botón **Show**

- **Estadísticas globales**

Clic derecho sobre el Workspace → **View Results**

Marcar resultado a ver en **Global Statistics** y pulsar botón **Show**

Marcar resultado a ver de un determinado elemento en **Object Statistics** y pulsar botón **Show**

Configuración de aplicaciones

Disponemos de dos elementos que nos permiten configurar una determinada aplicación:

- **Application Configuration Object:** nos permite configurar una aplicación en común a un grupo de estaciones. Existen 8 aplicaciones definidas por defecto.

Pulsamos el botón **Object Palette**  / Arrastramos al Workspace un elemento **Application Configuration**



Clic derecho sobre este elemento para configurarlo → **Edit Attributes**
Aquí podemos configurar las siguientes opciones:

- **Name:** podemos elegir entre las 8 aplicaciones estándar (en modo heavy o Light, cada una de ellas)
 - **Start Time Offset:** tiempo de inicio de simulación
 - **Duration:** duración en segundos de la simulación
- **Profile Configuration Object:** aplicado a configurar una determinada estación o servidor, de tal forma que especifica las aplicaciones usadas por un grupo de usuarios.

Pulsamos el botón **Object Palette**  / Arrastramos al Workspace un elemento **Profile Configuration**




Clic derecho sobre este elemento para configurarlo → **Edit Attributes**
Aquí podemos configurar las siguientes opciones:

- **Application:** podemos seleccionar una de las aplicaciones antes definidas en el Application Configuration
- **Operation Mode:** Simultaneous o Serial
- **Start Time:** seleccionar el inicio de la simulación

Construyendo una subred

Una subred es un objeto único de red que contiene otros elemento de red, simplificando la vista de una red compleja mediante la abstracción.

Para crear una subred, pulsamos el botón **Object Palette**  y arrastramos el ícono **Subnet** en el sitio donde queramos situarla.



Si deseamos configurarla haríamos: clic derecho sobre la subred y seleccionamos **Edit Attribute (Advanced)**

Si deseamos configurar los elementos de dicha subred, haríamos doble clic sobre ella e iríamos al menú **View / Background / Set Properties...**

Web Reporting

Esta opción nos permite observar los resultados de las simulaciones de diversas formas, permitiendo que no sólo sean accesibles desde el programa sino que otras puedan observarlas.

Para seleccionar el reporte tras una simulación, pulsaríamos el menú **DES / Outputs** y seleccionamos la opción **Reports / Statistics Reports / Generate Web report for simulations results**.

Para generar el reporte Web iríamos al menú **DES / Results / Generate Web Report...**, seleccionamos la opción **Specify Report / Include graphed results**.

Para ver el reporte Web generado → menú **DES / Results / Launch Last Web Report**

Importar tráfico

Si deseamos revisar un modelo de tráfico existente, iríamos al menú **File / Open / Project** y dentro de la carpeta **Basic**, encontraríamos los modelos estándar.

Dentro de OPNET, podemos encontrar los siguientes tipos de tráfico:

- **Tráfico generado explícitamente:** creado por el usuario, se especifica el tamaño de las transacciones y el número de transacciones/s según la distribución. Este tráfico se generaría a través de los objetos **Application y Profile Definition**.
- **Flujo de tráfico:** para crear objetos especiales que especifiquen un tráfico punto-punto o entre nodos. Se realizaría yendo al menú **Traffic / Import Traffic Flows**

- **Carga de enlace Baseline:** especifica el tráfico background en bits/s.
Iríamos al menú **Traffic / Import Baseline Loads**.

Para obtener valores estadísticos como el retardo o el tiempo de respuesta en la red, es necesario haber especificado antes un tráfico.

Servicio Experto de Predicción

Esta opción sirve para especificar un cierto nivel de servicio (SLA) en diferentes escenarios.

Para examinar el tráfico en un modelo determinado, pinchamos el botón **Open Traffic Center**



Para escoger un umbral SLA → Menú **DES / Export Service prediction / Define SLA**. A continuación, escogeríamos un parámetro y definiríamos el SLA

Para aplicar SLA a un escenario → Menú **DES / Configure / Run Discrete Event Simulation... / Detailed....** Aquí expandimos el menú **Outputs / Reports** y seleccionamos el SLA a aplicar.

Características varias

Configurar dispositivos y guardarlos → Menú **Topology / Create Custom Device Model....** A continuación, expandimos hasta encontrar el modelo deseado y guardaríamos en la paleta que deseemos.

Para nombrar un dispositivo utilizaremos la nomenclatura:

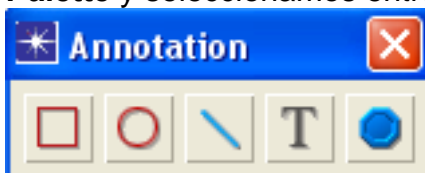
Dispositivo genérico → **<protocolo soportado>_<función>_<modelo>**

Dispositivo de fabricante → **<fabricante>_<modelo>_<protocolo>**

Crear una instancia de un modelo existente para usarla cuando deseemos →

Abrimos la paleta con el botón **Object Palette** , seleccionamos el objeto / **Model details / Derive new**. Luego en el menú **Attributes**, seleccionamos un atributo y en **Initial value /Edit**

Activar la paleta de anotaciones → Menú **Topology / Open Annotation Palette** y seleccionamos entre los íconos de anotación



1.4.4. Node Editor

Los modelos de nodo están conformados por uno o más módulos conectados a través de flujos de paquetes o cables estadísticos.

Cada uno de los nodos contiene en su interior varios modelos de proceso que describen un determinado comportamiento.

A continuación, podemos ver los módulos y conexiones lógicas que nos ofrece el simulador:



Fig. 5.19 Módulos y conexiones lógicas del Node Editor

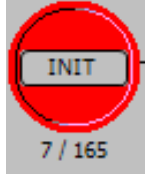
- **Create Processor:** crear módulo de procesado.
- **Create Queue:** crear módulo de procesado de cola.
- **Create Packet Stream:** transportar los paquetes entre módulos.
- **Create Statistic Wire:** interface para compartir datos entre módulos proporcionar información de su estado.
- **Create Logical Tx/Rx Association:** indicar la relación que existe entre módulos. No transportan datos.
- **Create Point-to-point Receiver:** módulo de receptor punto a punto.
- **Create Point-to-point Transmitter:** módulo de transmisor punto a punto.
- **Create Bus Receiver:** módulo de receptor bus
- **Create Bus Transmitter:** módulo de transmisor bus.
- **Create Radio Receiver:** módulo de receptor radio.
- **Create Radio Transmitter:** módulo de transmisión radio.
- **Create Antenna:** módulo para transmisiones vía satélite
- **Create External System Module:** módulo esys

1.4.5. Process Model Editor

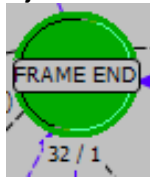
Un modelo de proceso es una FSM que representa la lógica y el comportamiento de un módulo. Este FSM define los estados del módulo y el criterio para cambiar de estado.

Cada estado contiene una entrada y una salida ejecutora, descritas en lenguaje de programación C o C++, ejecutada cuando un proceso entra o sale de un estado, respectivamente. Un estado puede ser:

- **No forzado:** retorna el control de la simulación al kernel después de ejecutar las ejecuciones de entrada.



- **Forzado:** no retorna el control pero instantáneamente ejecuta las ejecuciones de salida y las transiciones a otro estado.



Existen dos tipos de transiciones: **condicionales** y **default**.

A continuación podemos ver las principales opciones del menú del Process Model Editor:



Fig. 5.20 Opciones de Menú Process Model Editor

- **Create State:** crear un estado.
- **Create Transition:** crear transacciones entre los estados.
- **Set initial State:** establece como estado inicial.
- **Edit State Variable:** mantienen sus valores de invocación a invocación.
- **Edit Temporary Variable:** no mantienen sus valores entre invocaciones.
- **Edit Header Block:** se declaran las variables, macros, tipos de datos.
- **Edit Function Block:** se crean las funciones en C++.
- **Edit Diagnostic Block:** contiene funciones sobre estado de la simulación.
- **Edit Termination Block:** se establecen funciones ejecutadas antes de terminar la simulación.
- **Compile Process Model:** compilación del código.

1.5. Anexo 5: Configuración de la red

En este anexo intentaré explicar detalladamente el proceso seguido para crear y configurar esta red WLAN en OPNET Modeler.

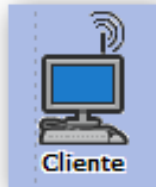
1.5.1. Selección de los elemento de la red

Como se comentó en el **Capítulo 4**, el escenario está compuesto por 3 estaciones que transmiten diferentes aplicaciones con determinada prioridad simultáneamente a un único punto de acceso.

Para añadir los elementos al Workspace, deberemos pulsar el botón **Object**

Palette . A continuación añadiremos los siguientes elementos:

- **Estaciones** → wlan_wkstn_adv (Mobile Node)



- **AP** → wlan_server_adv (Mobile Node)



- **Configuración de Aplicaciones** → Application Config



- **Configuración de Perfiles** → Profile Config



1.5.2. Configuración de las aplicaciones

Para definir las diferentes aplicaciones que utilizarán las estaciones, hemos de pulsar el elemento **Application Config** y hacer clic derecho sobre éste para seleccionar la opción **Edit Attributes**, donde nos aparecerá la siguiente pantalla que se muestra en la **Fig 5.21**:

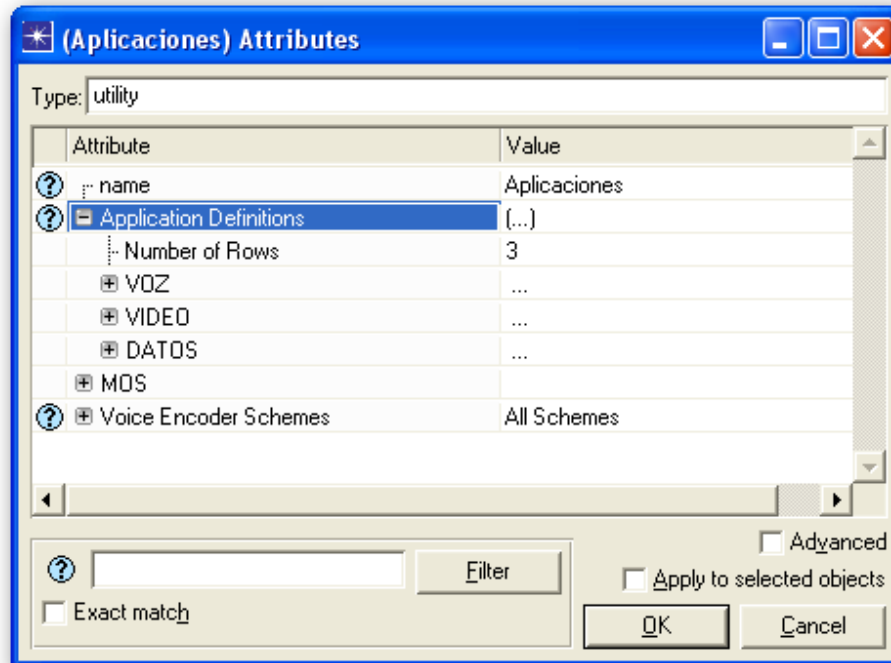


Fig. 5.21 Ventana configuración de Application Config

En ella se cambió el nombre del elemento a **Aplicaciones**, y se añadieron las 3 aplicaciones que se utilizarán para las estaciones: **VOZ, VIDEO Y DATOS**, haciendo clic en el parámetro **Application Database** y cambiando el número de filas a 3.

Tras ello se configuraron cada una de las 3 aplicaciones como se muestra a continuación en las **Fig. 5.22, 5.23 y 5.24**. En ellas se detalla el servicio a utilizar con los parámetros especificados en el **Capítulo 4**, pero hacemos particular énfasis en la configuración del parámetro **Type of Service**, el cual define el TS del estándar 802.11d que comentábamos en anteriores capítulos.

Una vez configuradas las 3 aplicaciones pulsamos OK.

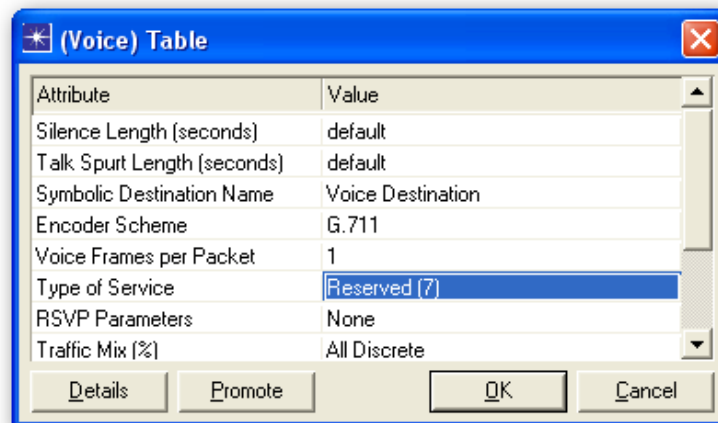


Fig. 5.22 Configuración de la aplicación de VOZ

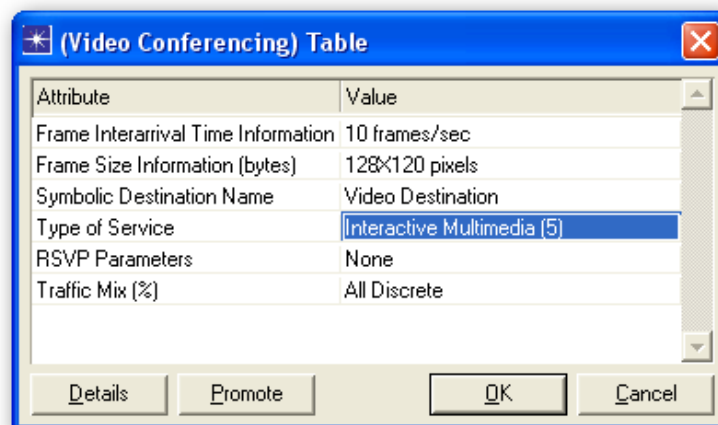


Fig. 5.23 Configuración de la aplicación de VIDEO

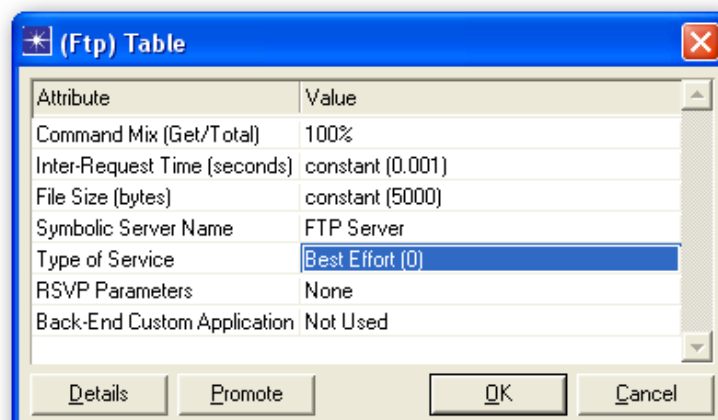


Fig. 5.24 Configuración de la aplicación de DATOS

1.5.3. Configuración de los perfiles

Para definir ahora los perfiles que definen el comportamiento de las estaciones, hemos de pulsar el elemento **Profile Config** y hacer clic derecho sobre éste para seleccionar la opción **Edit Attributes**, donde nos aparecerá la siguiente pantalla que se muestra en la **Fig 5.25** y que contiene los parámetros de comportamiento de las 3 aplicaciones.

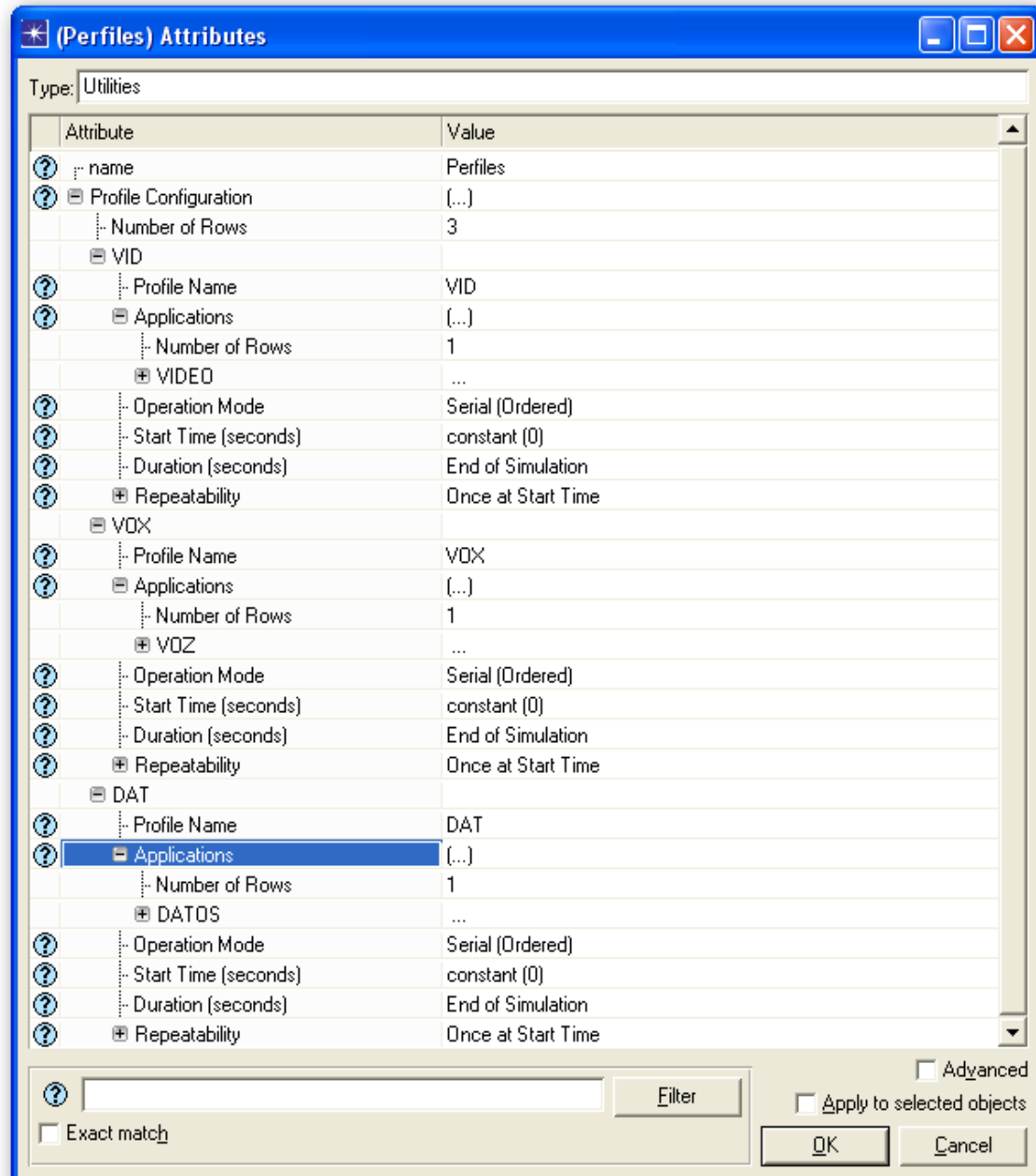


Fig. 5.25 Ventana configuración de Profile Config

Podemos observar que todas las aplicaciones comienzan simultáneamente para ver claramente el comportamiento del entorno inalámbrico utilizando la priorización de servicios.

1.5.4. Configuración de las estaciones

Para que las estaciones puedan utilizar el comportamiento del modelo de proceso MAC HCF, deberemos forzarlo haciendo doble clic sobre cualquier estación para acceder a la pantalla del **Node Editor**, dentro de ésta hemos de seleccionar el módulo **wireless_lan_mac** y dar clic derecho para seleccionar **Edit Attributes** y elegir que el parámetro **process model** sea el del proceso que hemos configurado a partir del modelo incorporado del estándar.

Para configurar cada una de las 3 estaciones, deberemos seleccionarla y dar clic derecho sobre ésta, para luego pulsar la opción **Edit Attributes**. En la Fig. 5.26, se muestra la ventana de configuración de la estación.

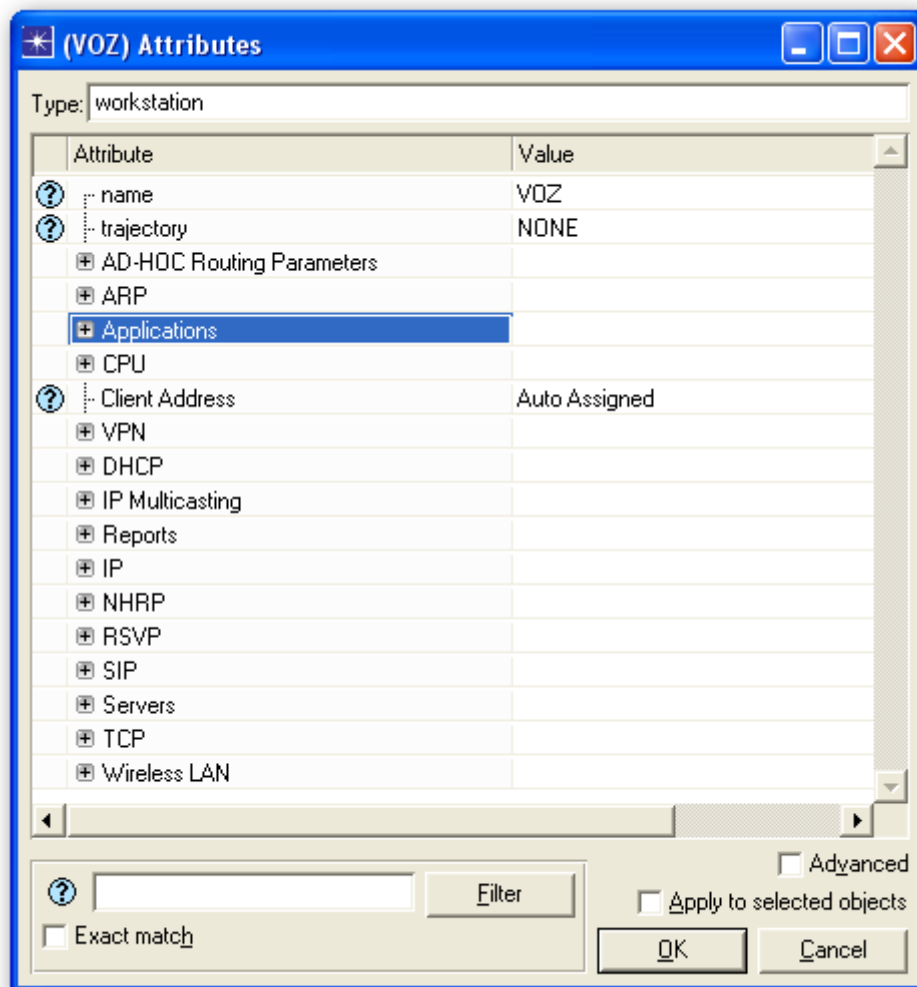


Fig. 5.26 Ventana de configuración de las estaciones

En primer lugar, deberemos modificar el parámetro **name** para poder identificar cada estación por la aplicación que hace servir.

A continuación describiremos la configuración de los parámetros **Application** y **Wireless LAN**.

Configuración de los parámetros Applications

Accediendo el menú **Application**, desplegamos el campo **Destination Preferences** y añadiremos una nueva fila para poder definir la aplicación que utilizará cada estación. En la **Fig. 5.27** se muestra como ejemplo la configuración para la estación **VOZ**.



Fig. 5.27 Configuración de la aplicación de **VOZ** en la estación

Como vemos en la figura anterior, debemos introducir el nombre de la aplicación tal y como la definimos en el **Application Config**. Además, para definir que envíe dicha aplicación al punto de acceso, haremos clic en el campo **Actual Name**, donde aparecerá la siguiente pantalla mostrada en la **Fig. 2.28**, donde introduciremos en el campo **Name** el nombre del punto de acceso configurado en el parámetro **Server Address** que veremos más adelante.



Fig. 5.28 Configuración de la aplicación de la estación al punto de acceso

Luego hemos de configurar el campo **Supported Profiles**, en el que únicamente es necesario modificar el parámetro **Profile Name** como se muestra en la **Fig. 5.29**, para que pueda acceder al perfil antes configurado.



Fig. 5.29 Configuración del perfil de **VOZ** en la estación

Finalmente, configuramos el campo **Transport Protocol Specification** para que funcione sobre el protocolo **UDP**.

Configuración de los parámetros WLAN

Para configurar que las 3 estaciones tengan los mismos parámetros WLAN, configuraremos todas a la vez, seleccionando una de ellas para luego hacer clic derecho y eligiendo la opción **Select Similar Nodes**, luego de lo cual veremos que se seleccionan todas las estaciones.

Haremos clic derecho nuevamente pero elegiremos la opción **Edit Attributes**, en la venta que aparece deberemos clic la opción **Apply to selected objects** para que todos los cambios se vean reflejados en las 3 estaciones.

Desplegando la opción **Wireless LAN / Wireless LAN Parameters**, podremos observar los parámetros WLAN que debemos configurar como se muestra en la **Fig. 5.30**.

Aquí podemos destacar que la tecnología a utilizar está basada en el estándar 802.11 original con el fin de que la comparación entre las pruebas hechas con el escenario normal y el nuevo agregando las opciones MAC introducidas por el EDCA.

La tasa máxima de transmisión a nivel físico será de 11 Mbps, por lo que hemos hecho de que nuestras aplicaciones en conjunto generen muchísimo más tráfico que el soportado por esta tasa para generar un escenario donde se produzca **saturación**.

Para el escenario EDCA, deberemos configurar también los parámetros HCF, introduciendo los valores estándar para cada uno de los ACs, tal y como se indicaba en el **Capítulo 4** y se muestra en la **Fig. 5.31** a continuación

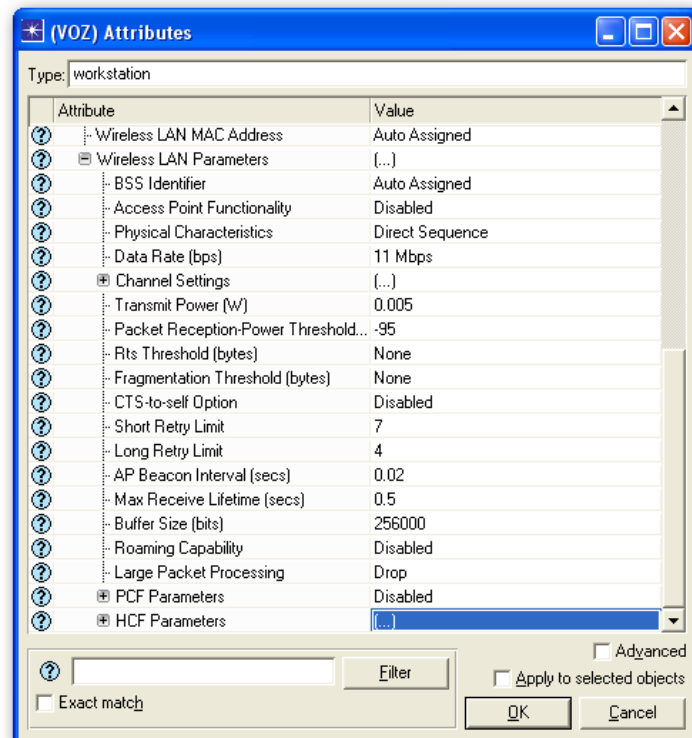


Fig. 5.30 Configuración los parámetros WLAN de una estación

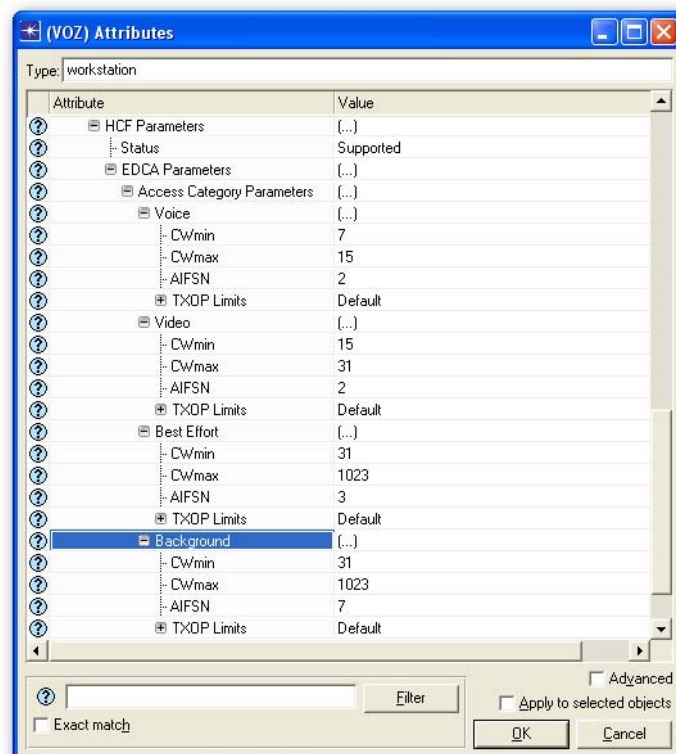


Fig. 5.31 Configuración los parámetros EDCA de una estación

1.5.5. Configuración del punto de acceso

La configuración del punto de acceso es casi idéntica a la de las estaciones, sólo varía en la configuración de las aplicaciones como describiremos a continuación.

Para configurar cada el punto de acceso, deberemos seleccionarlo y dar clic derecho sobre éste, luego pulsar la opción **Edit Attributes**. En la **Fig. 5.32**, se muestra la ventana de configuración del punto de acceso.

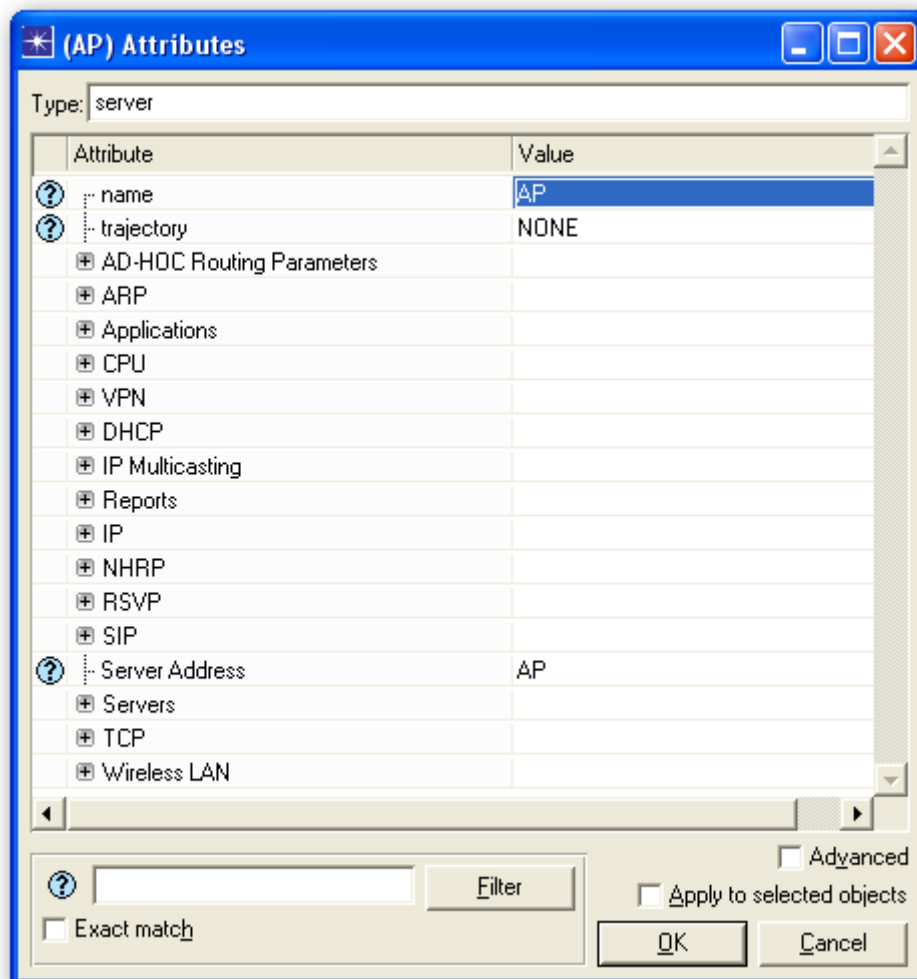


Fig. 5.32 Ventana de configuración del punto de acceso

En esta pantalla es importante modificar el parámetro **Server Address**, ya que define el nombre que le damos a nuestro punto de acceso para que las estaciones puedan conectarse a éste..

Configuración de los parámetros Applications

Accediendo el menú **Application**, desplegamos el campo **Supported Preferences** y añadiremos una nueva fila para poder definir las aplicaciones

que soportará el punto de acceso de las estaciones, como se muestra en **Fig. 5.33**.



Fig. 5.33 Ventana de configuración de aplicaciones soportadas por el AP

1.5.6. Elección de las estadísticas a simular

Como comentamos en el **Capítulo 4**, nuestro objetivo es analizar el comportamiento de una red WLAN utilizando el estándar 802.11e. Para ello compararemos los resultados de los parámetros **Throughput** y **Delay** de un escenario con y sin EDCA.

Haremos clic derecho sobre el Workspace / eligiendo la opción **Choose Individual DES Statistics**, tras lo cual nos aparecerá la ventana siguiente mostrada en la **Fig. 5.34**. En ella deberemos seleccionar los parámetros mencionados anteriormente en el menú **WLAN** y **WLAN (HCF)**.

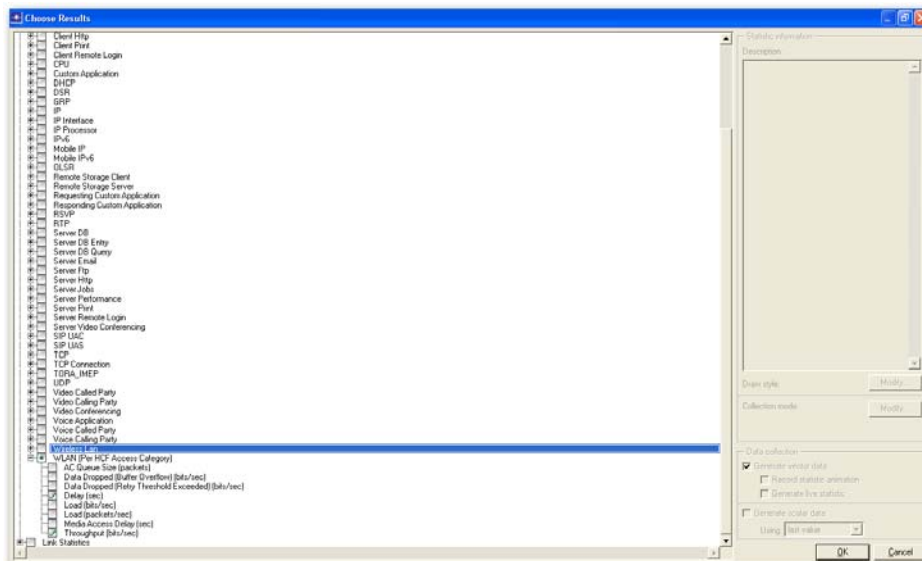


Fig. 5.34 Ventana de selección de parámetros a simular

1.5.7. Configuración de la simulación

Finalmente, iniciamos la simulación pulsando el botón **Configure/Run Discrete**

Event Simulation...



En la **Fig.5.35** se muestra la pantalla de configuración en la que únicamente modificaremos la duración de la misma a 5 minutos.

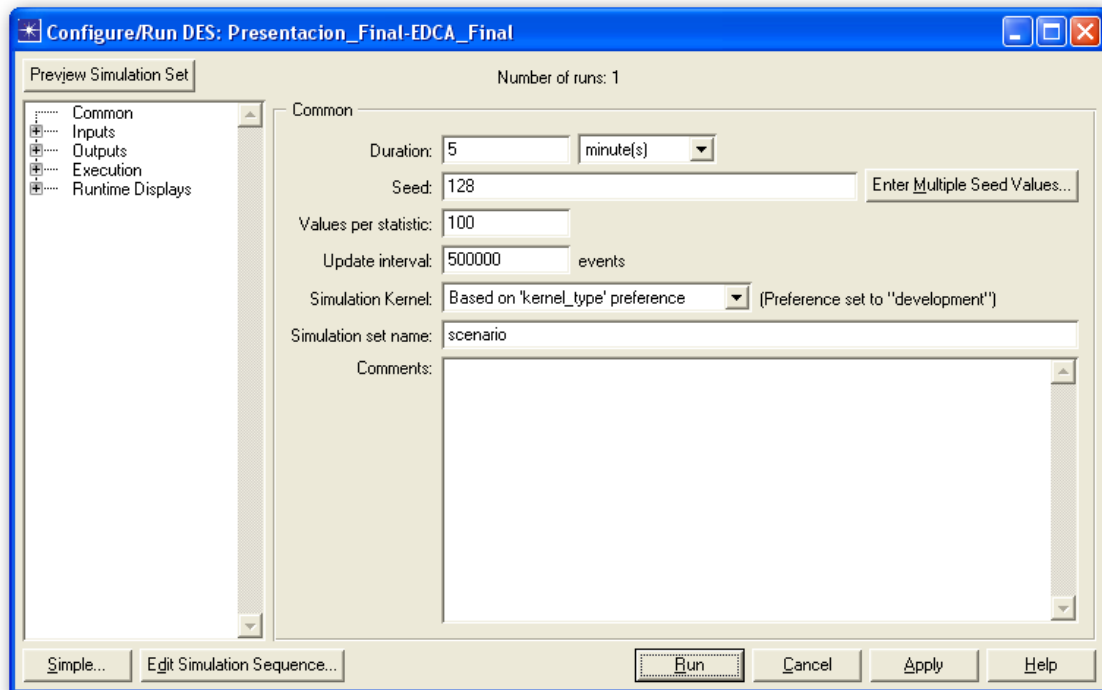


Fig. 5.35 Ventana de configuración de la simulación