

Facultad de Ingeniería

TESIS DOCTORAL EN INGENIERIA

MECANISMO DE SINTONIZACIÓN DE PARÁMETROS EDCA EN REDES WI-FI: ALGORITMO MTDA (ALGORITMO DE DIFERENCIACIÓN DE TRÁFICO MÚLTIPLE)

Doctorando: Santiago Pérez

Director de Tesis: Dr. Javier Campos

Co-Director: Dr. Raúl Moralejo

Noviembre de 2014

RESUMEN

La comunidad dedicada a la Ingeniería de Tráfico de Redes de Datos, al estudio, análisis y planificación del tráfico en los nodos de red, incorpora constantemente nuevas metodologías para interpretar y prever la conducta e impacto de los dispositivos wireless (PCs wireless, notebooks, netbooks, smartphones, tablets, etc. y otros dispositivos móviles) sobre una red LAN (Local Area Network) Cableada Ethernet y WLAN (Wireless LAN) Wi-Fi, para asegurar la mejor relación costo-performance y estabilidad de la infraestructura.

La colección de muestras o trazas del tráfico de diferentes nodos wireless, ha sido y es la forma primaria de obtener conocimiento real sobre el comportamiento de los nodos de red, de su tráfico asociado, y de la red como un todo. Otra forma altenativa de entender el funcionamiento de las redes de datos es a través de la modelación del o los protocolos involucrados. Básicamente, un modelo de sistema es una especificación del fenómeno presente en el sistema físico real (o al menos alguno de sus componentes) en términos de un conjunto de estados y eventos, en un nivel apropiado de abstracción o detalle.

Lamentablemente, algunos autores suelen llamar modelo a la interpretación de la colección de trazas. En este caso, no hay una modelación en los términos definidos previamente. Solo se obtienen conclusiones desde las trazas, buscando características del comportamiento del tráfico. La modelación usando alguna herramienta matemática o analítica (Teoría de colas, Grafos dirigidos, Redes de Petri, Redes de Actividades Estocásticas, Cadenas de Markov, etc) ha evolucionado, simultáneamente con la calidad de las herramientas de simulación subyacentes, logrando importantes resultados, según el nivel de detalle deseado.

En este trabajo de tesis, basado en la Teoría de Ingeniería de Tráfico de Redes de Datos, se ha aspirado a obtener una modelación más realista de la QoS (Calidad de Servicio – Quality of Service) en Redes de Datos Wi-Fi 802.11, combinando:

1) Estudios propios y de otros autores sobre diversas colecciones de trazas que reúnan diferentes perfiles según tiempos y frecuencias de sesión, tipos de protocolos de capa superior, movilidad, anchos de banda, etc. para cada tipo de nodo wireless en una WLAN;

2) Modelos avanzados del estándar WLAN 80211e de QoS usando Redes de Actividades Estocásticas Jerarquicas (Hierarchical Stochastic Activity Networks – HSANs); y

3) La características de la herramienta de simulación Möbius.

La implementación de estos modelos de simulación con HSANs nos ha permitido obtener diversas estadísticas que describen el comportamiento y la dinámica, para diversos contextos o escenarios de aplicación de dispositivos wireless, de la Función de Acceso al Canal Basada en Contención (EDCA) de la Función de Coordinación Híbrida (HCF) de la IEEE 802.11e en redes Wi-Fi.

Se ha concluído que:

i) El estado de la red Wi-Fi con QoS es esencialmente dinámico, y los valores de las diversas métricas de cada tráfico y de la red, dependen de las características de los tráficos presentes y de la proporción relativa entre ellos,

ii) El Algoritmo MTDA (Algoritmo de Diferenciación de Tráfico Múltiple) que se propone, responde a esa dinámica variando y adaptando los parámetros EDCA, en contraposición a mantener los valores estáticos por defecto,

iii) EDCA 802.11e, por si sola, asegura la diferenciación de tráfico y premisas de QoS para una red Wi-Fi con baja carga, mientras que el algoritmo MTDA complementa el protocolo, asegundo mayores rendimientos y la QoS demandada, para los tráficos de mayor prioridad o de tiempo real, aún en condiciones de alta carga y en escenarios de tráficos diverso.

AGRADECIMIENTOS

Es difícil encontrar las palabras apropiadas para expresar el agradecimiento a todos a quienes de una u otra manera han sido parte de este paso en mi vida, que de ninguna manera considero personal.

Este trabajo nace cuando en el año 2001, iniciando casi simultáneamente los estudios de la Maestría de Redes en la Universidad Nacional de La Plata, el Ing. Mario Distéfano me convocara para integrar un grupo novel de estudio sobre las Redes de Petri. Quiero agradecer entonces inicialmente al “Ingeniero Distéfano”, quien en diversas etapas de mi vida académica me alentara en los caminos de la docencia, la investigación y para mis estudios de posgrado. En estas breves líneas expreso mi respeto y consideración.

Y también quisiera expresar mi reconocimiento
- a mis Directores de tesis, los Doctores Javier Campos y Raúl Moralejo, por sus aportes, sugerencias y orientaciones en los pequeños y grandes detalles del presente trabajo.

- a Gustavo, Higinio, Luis, Alejandro, Carlos, Atilio, y a todos los integrantes del “Laboratorio Análisis de Tráfico y Seguridad”, por el acompañamiento en este espacio de trabajo, y sus aportes y comentarios técnicos y profesionales, que contribuyeron para mi crecimiento personal, y especialmente, humano.

- a Alicia, Leonardo, Matías, Pablo, y a los anteriores y sucesivos miembros de la “Academia CISCO”, que me ayudaron, cuando el tiempo no alcanza, para liberarme de tareas que me facilitaron otras.

Agradezco el apoyo de los miembros de GRID TICs (Grupo UTN de Investigación y Desarrollo en TICs), a los docentes de los

Departamentos de Ingeniería en Electrónica y de Sistemas de Información, y a las autoridades de la Facultad Regional Mendoza, de la Universidad Tecnológica Nacional, y de la Universidad de Mendoza, quienes contribuyeron con su apoyo y facilidades para la concreción de este proyecto.

También, quiero dejar en estas líneas un recuerdo para mi mamá Alba, que desde el Cielo, sigue y seguirá mis pasos personales y profesionales. También a mi papá Martin, a mi esposa, a mi hermano y su familia, y a tantos otros seres queridos, amigos y conocidos a quienes he intentado descuidar lo menos posible.

Y quisiera agradecerle especialmente a Dios, porque a pesar de mí y mis imperfecciones ha estado siempre conmigo.

Mendoza, noviembre de 2014.

CONTENIDOS

CONTENIDOS **5**

LISTA DE FIGURAS **11**

LISTA DE TABLAS **25**

LISTA DE ACRÓNIMOS **29**

i) VISIÓN GENERAL **35**
i.1) INTRODUCCIÓN 35
i.2) CONTEXTO DE LA INVESTIGACIÓN 37
i.2.1 Visión desde el análisis de trazas 37
i.2.2 Visión desde la modelación de tráfico 40
i.2.3 Modelación con Redes de Petri Estocásticas (SPNs) 41
i.2.4 Modelo 802.11e con Redes de Actividades Estocásticas Jerárquicas (HSANs) 43
i.2.5 Direccionamiento del trabajo de tesis 44
i.3) OBJETIVOS Y META DE LA INVESTIGACIÓN 45
i.4) CONTRIBUCIONES PRINCIPALES DE ESTA TESIS 45
i.5) MARCO TEÓRICO, EXPERIMENTOS E HIPÓTESIS 47
i.6) ESQUEMA DE LA TESIS 50

CAPITULO I
VISIÓN GENERAL DE LA EVOLUCIÓN Y LAS TENDENCIAS DE LAS TECNOLOGÍAS Y LA QoS EN REDES INALÁMBRICAS **55**

I.1) INTRODUCCIÓN 55
I.2) VISIÓN GENERAL DE LAS TECNOLOGÍAS INALÁMBRICAS 56
I.2.1 Tecnologías Inalámbricas 802.11 56
I.2.2 Tecnologías Inalámbricas WPAN, WLAN y WWAN 57
I.3) TENDENCIAS FUTURAS DE SERVICIOS DEMANDADOS EN REDES INALÁMBRICAS 63
I.4) LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN DE QoS EN REDES WIRELESS 802.11 67
I.4.1 Hacia la mejora de QoS en 802.11 67
I.4.2 Diferenciación de servicios en capa MAC 67
I.4.3 Control de admisión y reserva de ancho de banda 72
I.4.4 Adaptación de enlace en capa PHY 78
I.4.5 QoS extremo a extremo en redes heterogéneas 83
I.5) SUMARIO 84

CAPITULO II

MODELO DE SIMULACIÓN DE EDCA IEEE 802.11E y SIMULADOR MÖBIUS 85

II.1) VISIÓN GENERAL 85
II.2) JUSTIFICACIÓN DE USO DEL MODELO 86
II.2.1 Modelos analíticos 86
II.2.2 Modelos y herramientas de simulación 90
II.3) EL MODELO DE SIMULACIÓN DEL MECANISMO EDCA USANDO REDES DE ACTIVIDADES ESTOCÁSTICAS JERÁRQUICAS (HSANS) y EL SIMULADOR MÖBIUS 92
II.3.1 Visión general del Modelo 92
II.4) VALIDACIÓN DEL MODELO 100
II.4.1 Validación realizada por los autores del modelo original 101
II.4.2 Validación realizada por el tesista para este trabajo 107
II.5) SUMARIO 108

CAPITULO III

ENTENDIENDO LAS LIMITACIONES DE EDCA 802.11E: IMPACTO DE LAS PRESTACIONES ANTE LA DIVERSIDAD DE TRÁFICO WI-FI 109

III.1) INTRODUCCIÓN 109
III.1.1 Características de la Estación con QoS de Experimentación 111
III.1.2 Estación de Experimentación 113
III.2) ESCENARIOS DE EXPERIMENTACIÓN 114
III.2.1 Escenario 1 114
III.2.2 Escenario 2 114
III.3) RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN 116
III.3.1 Escenario 1 116
III.3.2 Escenario 2 140
III.4) CONCLUSIÓN 158
III.5) SUMARIO 160

CAPITULO IV

ENTENDIENDO LAS LIMITACIONES DE EDCA 802.11E: IMPACTO DE LAS PRESTACIONES ANTE LA DINÁMICA DE LOS PARÁMETROS EDCA 161

IV.1) INTRODUCCIÓN 161
IV.2) EDCA 802.11e: UNA VISIÓN MÁS DETALLADA 162
IV.2.1 Limitaciones de QoS de DCF y PCF 162
IV.2.2 802.11e Soporte de QoS Realzada para WLANs 163
IV.3) RENDIMIENTO VARIANDO LOS PARÁMETROS EDCA 166
IV.3.1 Variando el parámetro AIFSN 167

IV.3.2 Variando el parámetro CWmin 169
IV.3.3 Variando el parámetro CWmax 170
IV.3.4 Variando el parámetro TXOP 171
IV.3.5 Conclusiones 172
IV.4) ENSAYO EXPERIMENTAL CON PARÁMETROS EDCA DE MEJORA 173
IV.4.1 Escenario 1 174
IV.4.2 Escenario 2 197
IV.5) SUMARIO 217

CAPITULO V

MECANISMO DE SINTONIZACIÓN DE PARÁMETROS EDCA: ALGORITMO MTDA 221

V.1) INTRODUCCIÓN 221
V.1.1 Definición y Clasificación de Algoritmos de Sintonización 221
V.1.2 Algoritmos de Sintonización 222
V.2) ALGORITMO DE SINTONIZACIÓN MTDA 233
V.2.1 Aspectos Generales 233
V.2.2 Detalles del Algoritmo 236
V.3) ENSAYO EXPERIMENTAL DEL ALGORITMO MTDA 238
V.3.1 Escenario 1 – Estaciones con todos los tráficos presentes 238
V.3.2 Escenario 2 – 60 % estaciones de voz, 20 % de video y 20 % de mejor esfuerzo 252
V.4) SUMARIO 265

CAPITULO VI

ASPECTOS DE IMPLEMENTACIÓN 267

VI.1) LA QoS EN DISPOSITIVOS WI-FI COMERCIALES 267
VI.1.1 Introducción 267
VI.1.2 Configuración de la QoS en productos comerciales 268
VI.1.3 Algoritmos de control de admisión y de sintonización 273
VI.2) DETALLES DE FUNCIONAMIENTO DEL ESTÁNDAR 802.11E 274
VI.2.1 Elemento conjunto de parámetros EDCA 274
VI.2.2 Elemento TSPEC para señalización del control de admisión 276
VI.2.3 Caso de estudio de control de admisión con sintonización de los parámetros EDCA 278
VI.3) ASIGNACIÓN DINÁMICA DE PARÁMETROS EDCA 281
VI.3.1Previsón en el estándar EDCA 802.11e 281
VI.3.2 Ajustes en el hardware o firmware del AP y los clientes Wi-Fi 282
VI.4) IMPLICANCIAS ECONÓMICAS DE LA IMPLEMENTACIÓN 286
VI.5) SUMARIO 287

CAPITULO VII

CONCLUSIONES y TRABAJOS FUTUROS 289

VII.1) CONCLUSIONES 289
VII.2) CONTRIBUCIONES PRINCIPALES 292
VII.3) TRABAJOS FUTUROS 293

BIBLIOGRAFÍA/REFERENCIAS 295

APENDICE A

DESDE LAS REDES DE PETRI A LAS REDES DE ACTIVIDADES ESTOCÁSTICAS 313

A.1) INTRODUCCIÓN 313
A.2) REDES DE COLAS 314
A.2.1 Redes de colas básicas 315
A.2.2 Redes de colas 316
A.2.3 Notación de Kendall-Lee 319
A.3) REDES DE PETRI NO TEMPORIZADAS y TEMPORIZADAS 320
A.3.1 Redes y Sistemas Lugar/Transición (Place/Transition P/T) 322
A.3.2 Redes de Petri Temporizadas 331
A.4) REDES DE ACTIVIDADES ESTOCÁSTICAS JERÁRQUICAS 340
A.4.1 Redes de Actividad 340
A.4.2 Redes de Actividades Estocásticas Jerárquicas 346
A.5) COMPARACIÓN ENTRE LAS REDES DE COLAS, REDES DE PETRI Y REDES DE ACTIVIDADES 353
A.5.1 Similitudes y Diferencias 353
A.5.2 Hacia un formalismo de Redes de Petri y Redes de Actividad Útil prácticamente 354
A.6) SUMARIO 357

APENDICE B

TABLAS COMPARATIVAS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS TRÁFICOS DE VOZ, VIDEO Y MEJOR ESFUERZO 359

B.1) TABLA COMPARATIVA DEL COMPORTAMIENTO DEL TRÁFICO DE VOZ PARA CADA UNO DE LOS CASOS DE LOS ESCENARIOS 1 Y 2 359
B.2) TABLA COMPARATIVA DEL COMPORTAMIENTO DEL TRÁFICO DE VIDEO PARA CADA UNO DE LOS CASOS DE LOS ESCENARIOS 1 Y 2 360
B.3) TABLA COMPARATIVA DEL COMPORTAMIENTO DEL TRÁFICO DE MEJOR ESFUERZO PARA CADA UNO DE LOS CASOS DE LOS ESCENARIOS 1 Y 2 361

APENDICE C

RESULTADOS DE LAS MÉTRICAS PARA PARÁMETROS DE MEJORA.....363

C.1) ESCENARIO 1 363
C.1.1 Estaciones con todos los tráficos 363
C.1.2 Estaciones sin tráfico de voz 369
C.1.3 Estaciones sin tráfico de video 374
C.1.4 Estaciones sin tráfico de mejor esfuerzo 380
C.2) ESCENARIO 2 384
C.2.1 60 % de estaciones de voz, 20 % de video y 20 % de mejor esfuerzo 384
C.2.2 20 % de estaciones de voz, 60 % de video y 20 % de mejor esfuerzo 390
C.2.3 20 % de estaciones de voz, 20 % de video y 60 % de mejor esfuerzo 397

APENDICE D

PUBLICACIONES NACIONALES E INTERNACIONALES 405

D.1) IEEE AINA 2013, Marzo 2013, “Quantitative Analysis of EDCA 802.11e in Different Scenarios”.....405
D.2) Revista IEEE Latinoamericana, Junio 2013, “Tuning Mechanism For EDCA 80211e EDCA Optimization” 406
D.3) IEEE CONIELECOMP 2015, Febrero 2015, “An Evaluation of QoS for intensive video traffic over 802.11e WLANs – Quantitative analysis” (aprobado),.....407
D.4) IEEE COMPUTER SOCIETY - IEEE COMPUTER SOCIETY DIGITAL LIBRARY (CSDL), “Quantitative Analysis of EDCA 802.11e Different Scenarios” 408
D.5) Journal of Computer Science and Technology, Abril 2013, “Throughput Quantitative Analysis of EDCA 802.11e in Differente Scenarios”.....409
D.6) CACIC 2012, Octubre 2012, “Mejorando el Rendimiento y QoS en Wi-Fi con Sintonización de Parámetros EDCA 802.11e” 410
D.7) CACIC 2012, Octubre 2012, “Estudio sobre la Distribución de Tráfico Autosimilar en Redes Wi-Fi” 411
D.8) ECEFI 2014, Agosto 2014, “Análisis por Simulación del Impacto de los Parámetros EDCA de la norma IEEE 802.11e – Rendimento Wi-Fi” 412
D.9) Jornadas de Intercambio y Difusión de Doctorandos UTN en Ingeniería 2014, Noviembre 2014, “Mecanismo de Sintonización de Parámetros EDCA en Redes Wi-Fi – Algoritmo MTDA” 413

D.10) WICC 2012, Mayo 2012, “Un mecanismo de Sintonización de Parámetros EDCA 802.11e: Algoritmo MTDA”, ...414
D.11) WICC 2012, Mayo 2012, “Estudio sobre la distribución de tráfico autosimilar de redes wireless 802.11”, ...415

APENDICE E

DIRECCIÓN DE PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN NACIONALES E INTERNACIONALES 417

E.1) Director del Proyecto en red Internacional “Mecanismos de Mejora del Rendimiento y QoS en Redes Wi-Fi”, n° 27-54-084/13, de la Subsecretaría de Gestión y Coordinación de Políticas Universitarias del Ministerio de Educación de la Nación, Resolución de la SPU n° 207/13, y la Resolución n° 144/2014 de la UTN 417
E.2) Director del Proyecto en red Internacional “Mecanismos de Mejora del Rendimiento y QoS en Redes Wi-Fi – Fase 2”, n° 85-83-038/14, de la Subsecretaría de Gestión y Coordinación De Políticas Universitarias del Ministerio de Educación de la Nación.....418
E.3) Director del proyecto PID Consolidado “Algoritmo de Sintonización para la Optimización de Rendimiento del Estándar IEEE 802.11e EDCA en Redes Wi-Fi – Algoritmo MTDA”, identificado con el n° EIUTIME1755 de la UTN y n° 25/J089 del Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología y aprobado por resolución n° 61/2013 de la Secretaría SECyT UTN, desde enero/2013 hasta dic/2014 419
E.4) Director del proyecto PID Consolidado “Modelación del Rendimiento de Wireless LAN Ad Hoc con Diferentes Tipos de Nodos usando Redes de Petri”, identificado con el n° UTN1193 de la UTN y número 25/J070 del Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología para el programa de incentivos, y aprobado por resolución n° 71/2010 de la SECyT UTN, desde enero/2010 hasta dic/2011 420

LISTA DE FIGURAS

CAPITULO I

Figura 1.1 Tecnologías wireless en función de la cobertura y velocidad 56
Figura 1.2 Modo infraestructura en Wi-Fi 58
Figura 1.3 Modo ad hoc en Wi-Fi 59
Figura 1.4 Ejemplo de uso tecnología Bluetooh 61
Figura 1.5 Tendencias de crecimiento del tráfico de datos móvil total 64
Figura 1.6 Tendencias de diversificación a nivel de dispositivos 64
Figura 1.7 Tráficos generados por diversos dispositivos referidos a un celular básico 65
Figura 1.8 Tendencias de la proporción de los tipos de tráfico móvil futuro 66
Figura 1.9 Taxonomía de mecanismos de diferenciación de servicios 68
Figura 1.10 Taxonomía de mecanismos de control de admisión y reserva de ancho de banda 73
Figura 1.11 Taxonomía de mecanismos de adaptación de enlace 79

CAPITULO II

Figura 2.1 Vista parcial del modelo sobre la interface del Project Editor de Möbius 93
Figura 2.2 Vista parcial del modelo sobre la interface del Project Editor de Möbius 94
Figura 2.3 Vista parcial del modelo sobre la interface del Study Editor de Möbius 96
Figura 2.4 Vista parcial del modelo sobre la interface del Study Editor de Möbius 97
Figura 2.5 Vista de la interface del Simulation Editor de Möbius 98
Figura 2.6 Vista del modelo compuesto Escenario 1 del Project Editor 99
Figura 2.7 Vista del modelo compuesto Escenario 2 del Project Editor 100
Figura 2.8 Rendimiento promedio del tráfico del ensayo de Mangold . 102
Figura 2.9 Rendimiento promedio del tráfico del ensayo de TKN EDCF 103
Figura 2.10 Rendimiento promedio del tráfico del ensayo de TKN EDCA 104
Figura 2.11 Retardo promedio del tráfico del ensayo de TKN EDCA .. 104
Figura 2.12 Rendimiento promedio del tráfico de alta prioridad del ensayo de Vasques EDCA HSAN comparado con los resultados de Mangold y TKN 105

Figura 2.13 Rendimiento promedio del tráfico de prioridad media del ensayo de Vasques EDCA HSAN comparado con los resultados de Mangold y TKN 106
Figura 2.14 Rendimiento promedio del tráfico de baja prioridad del ensayo de Vasques EDCA HSAN comparado con los resultados de Mangold y TKN 106
Figura 2.15 Rendimiento promedio del tráfico del ensayo del tesista EDCA HSAN 107

CAPITULO III

Figura 3.1 Esquema de funcionamiento de DCF de 802.11 110
Figura 3.2 Retardo en DCF de los tráficos voz, video y mejor esfuerzo en función del número de estaciones 111
Figura 3.3 Escenario 1 formado por N estaciones y el submodelo de errores 115
Figura 3.4 Escenario 2 formado por estaciones sólo de voz, video o mejor esfuerzo, y el submodelo de errores 115
Figura 3.5 Rendimiento de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 1.1 117
Figura 3.6 Rendimiento relativo de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 1.1 118
Figura 3.7 Tamaño de cola de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 1.1 119
Figura 3.8 Delays de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 1.1 120
Figura 3.9 Delays de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 1.1 121
Figura 3.10 Rendimiento de los tráficos de video y mejor esfuerzo Escenario 1.2 122
Figura 3.11 Rendimiento relativo de los tráficos de video y mejor esfuerzo Escenario 1.2 123
Figura 3.12 Tamaño de Cola de los tráficos de video y mejor esfuerzo Escenario 1.2 124
Figura 3.13 Delays de los tráficos de video y mejor esfuerzo Escenario 1.2 125
Figura 3.14 Delays de los tráficos de video y mejor esfuerzo Escenario 1.2 125
Figura 3.15 Rendimiento de los tráficos de voz y mejor esfuerzo Escenario 1.3 127
Figura 3.16 Rendimiento relativo de los tráficos de voz y mejor esfuerzo Escenario 1.3 128
Figura 3.17 Tamaño de Cola de los tráficos de voz y mejor esfuerzo Escenario 1.3 129
Figura 3.18 Tamaño de Cola de los tráficos de voz y mejor esfuerzo Escenario 1.3 129

Figura 3.19 Delays de los tráficos de voz y mejor esfuerzo Escenario 1.3 130
Figura 3.20 Delays de los tráficos de voz y mejor esfuerzo Escenario 1.3 130
Figura 3.21 Rendimiento de los tráficos de voz y video Escenario 1.4 132
Figura 3.22 Rendimiento relativo de los tráficos de voz y video Escenario 1.4 133
Figura 3.23 Tamaño de Cola de los tráficos de voz y video Escenario 1.4 134
Figura 3.24 Delays de los tráficos de voz y video Escenario 1.4 134
Figura 3.25 Rendimiento del trafico de voz en cada Escenario 1 136
Figura 3.26 Rendimiento relativo del trafico de voz en cada Escenario 1 136
Figura 3.27 Rendimiento del trafico de video en cada Escenario 1 137
Figura 3.28 Rendimiento relativo del tráfico de video en cada Escenario 1 138
Figura 3.29 Rendimiento del tráfico de mejor esfuerzo en cada Escenario 1 139
Figura 3.30 Rendimiento relativo del tráfico de mejor esfuerzo en cada Escenario 1 139
Figura 3.31 Rendimiento de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.1 141
Figura 3.32 Rendimiento relativo de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.1 141
Figura 3.33 Tamaño de Cola de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.1 142
Figura 3.34 Delays de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.1 143
Figura 3.35 Delays de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.1 143
Figura 3.36 Rendimiento de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.2 145
Figura 3.37 Rendimiento relativo de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.2 146
Figura 3.38 Tamaño de Cola de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.2 146
Figura 3.39 Tamaño de Cola de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.2 147
Figura 3.40 Delays de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.2 148
Figura 3.41 Delays de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.2 148
Figura 3.42 Rendimiento de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.3 150

Figura 3.43 Rendimiento relativo de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.3 151
Figura 3.44 Tamaño de Cola de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.3 151
Figura 3.45 Delays de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.3 152
Figura 3.46 Delays de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.3 152
Figura 3.47 Rendimiento del tráfico de voz en cada Escenario 2 154
Figura 3.48 Rendimiento relativo del tráfico de voz en cada Escenario 2 155
Figura 3.49 Rendimiento del tráfico de video en cada Escenario 2 156
Figura 3.50 Rendimiento relativo del tráfico de video en cada Escenario 2 156
Figura 3.51 Rendimiento del trafico de mejor esfuerzo en cada Escenario 2 157
Figura 3.52 Rendimiento relativo del trafico de mejor esfuerzo en cada Escenario 2 158

CAPITULO IV

Figura 4.1 Arquitectura MAC 802.11 164
Figura 4.2 Esquema de funcionamiento de EDCA de 802.11e 164
Figura 4.3 Relaciones IFS 165
Figura 4.4 Rendimiento relativo del tráfico de voz en función de distintas configuraciones del parámetro AIFSN 167
Figura 4.5 Rendimiento relativo del tráfico de video en función de distintas configuraciones del parámetro AIFSN 168
Figura 4.6 Rendimiento relativo del tráfico de mejor esfuerzo en función de distintas config. del parámetro AIFSN 169
Figura 4.7 Rendimiento relativo del tráfico de video en función de distintas configuraciones del parámetro CWmin 170
Figura 4.8 Rendimiento relativo del tráfico de voz en función de distintas configuraciones del parámetro CWmax 171
Figura 4.9 Rendimiento relativo del tráfico de voz en función de distintas configuraciones del parámetro TXOP 172
Figura 4.10 Rendimiento relativo del tráfico de mejor esfuerzo en función de distintas config. del parámetro TXOP 173
Figura 4.11 Rendimiento de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 1.1 175
Figura 4.12 Rendimiento relativo de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 1.1 175
Figura 4.13 Comparación del rendimiento en Mbps del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.1 177

Figura 4.14 Comparación del rendimiento en Mbps del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.1 177
Figura 4.15 Comparación del rendimiento en Mbps del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.1..... 178
Figura 4.16 Comparación del rendimiento relativo del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.1 179
Figura 4.17 Comparación del rendimiento relativo del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.1 180
Figura 4.18 Comparación del rendimiento relativo del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.1..... 180
Figura 4.19 Rendimiento de los tráficos de video y mejor esfuerzo Escenario 1.2 182
Figura 4.20 Rendimiento relativo de los tráficos de video y mejor esfuerzo Escenario 1.2 182
Figura 4.21 Comparación del rendimiento relativo del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.2 184
Figura 4.22 Comparación del rendimiento relativo del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.2..... 184
Figura 4.23 Comparación del rendimiento relativo del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.2 185
Figura 4.24 Comparación del rendimiento relativo del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.2..... 186
Figura 4.25 Rendimiento de los tráficos de voz y mejor esfuerzo Escenario 1.3 187
Figura 4.26 Rendimiento relativo de los tráficos de voz y mejor esfuerzo Escenario 1.3 188
Figura 4.27 Comparación del rendimiento del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.3 189
Figura 4.28 Comparación del rendimiento del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.3..... 190
Figura 4.29 Comparación del rendimiento relativo del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.3 191

Figura 4.30 Comparación del rendimiento relativo del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.3 191
Figura 4.31 Rendimiento de los tráficos de voz y video Escenario 1.4 193
Figura 4.32 Rendimiento relativo de los tráficos de voz y video Escenario 1.4 193
Figura 4.33 Comparación del rendimiento del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.4 195
Figura 4.34 Comparación del rendimiento del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.4 196
Figura 4.35 Comparación del rendimiento relativo del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.4 196
Figura 4.36 Comparación del rendimiento relativo del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.4 197
Figura 4.37 Rendimiento de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.1 198
Figura 4.38 Rendimiento relativo de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.1 199
Figura 4.39 Comparación del rendimiento del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.1 200
Figura 4.40 Comparación del rendimiento del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.1 201
Figura 4.41 Comparación del rendimiento del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.1 201
Figura 4.42 Comparación del rendimiento relativo del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.1 202
Figura 4.43 Comparación del rendimiento relativo del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.1 203
Figura 4.44 Comparación del rendimiento relativo del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.1 203
Figura 4.45 Rendimiento de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.2 204
Figura 4.46 Rendimiento relativo de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.2 205

Figura 4.47 Comparación del rendimiento del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.2 207
Figura 4.48 Comparación del rendimiento del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.2 207
Figura 4.49 Comparación del rendimiento del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.2..... 208
Figura 4.50 Comparación del rendimiento relativo del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.2 209
Figura 4.51 Comparación del rendimiento relativo del tráfico de video con parámetros mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.2..... 210
Figura 4.52 Comparación del rendimiento relativo del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.2..... 210
Figura 4.53 Rendimiento de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.3 211
Figura 4.54 Rendimiento relativo de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.3 212
Figura 4.55 Comparación del rendimiento del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.3..... 214
Figura 4.56 Comparación del rendimiento del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.3..... 214
Figura 4.57 Comparación del rendimiento del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.3..... 215
Figura 4.58 Comparación del rendimiento relativo del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.3..... 216
Figura 4.59 Comparación del rendimiento relativo del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.3..... 216
Figura 4.60 Comparación del rendimiento relativo del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.3..... 217

CAPITULO V

Figura 5.1 Comparación del rendimiento del tráfico de voz usando Inicialización MTDA y el Algoritmo MTDA Escenario 1.1 243
Figura 5.2 Comparación del rendimiento del tráfico de video usando Inicialización MTDA y el Algoritmo MTDA Escenario 1.1 243
Figura 5.3 Comparación del rendimiento del tráfico de mejor esfuerzo usando Inic. MTDA y el Algoritmo MTDA Escenario 1.1 244
Figura 5.4 Comparación del tamaño de cola del tráfico de voz usando Inic. MTDA y el Algoritmo MTDA Escenario 1.1 245
Figura 5.5 Comparación del tamaño de cola del tráfico de video usando Inic. MTDA y el Algoritmo MTDA Escenario 1.1 246
Figura 5.6 Comparación del tamaño de cola del tráfico de mejor esfuerzo usando Inic. MTDA y el Algoritmo MTDA Escenario 1.1 246
Figura 5.7 Comparación de delays del tráfico de voz usando Inic. MTDA y el Algoritmo MTDA Escenario 1.1..... 247
Figura 5.8 Comparación de delays del tráfico de video usando Inic. MTDA y el Algoritmo MTDA Escenario 1.1..... 248
Figura 5.9 Comparación de delays del tráfico de mejor esfuerzo usando Inic. MTDA y el Algoritmo MTDA Escenario 1.1 248
Figura 5.10 Comparación del rendimiento del tráfico de voz usando Parámetros por Defecto y el Alg. MTDA Escenario 1.1 250
Figura 5.11 Comparación del rendimiento del tráfico de video usando Parámetros por Defecto y el Alg. MTDA Escenario 1.1 251
Figura 5.12 Comparación del rendimiento del tráfico de mejor esfuerzo usando Parámetros por Defecto y el Algoritmo MTDA Escenario 1.1 251
Figura 5.13 Comparación del rendimiento del tráfico de voz usando Inici. MTDA y el Algoritmo MTDA Escenario 2.1 255
Figura 5.14 Comparación del rendimiento del tráfico de video usando Inic. MTDA y el Algoritmo MTDA Escenario 2.1..... 256
Figura 5.15 Comparación del rendimiento del tráfico de mejor esfuerzo usando Inic. MTDA y el Algoritmo MTDA Escenario 2.1 257
Figura 5.16 Comparación del tamaño de cola del tráfico de voz usando Inic. MTDA y el Algoritmo MTDA Escenario 2.1 ... 258
Figura 5.17 Comparación del tamaño de cola del tráfico de video usando Inic. MTDA y el Algoritmo MTDA Escenario 2.1 ... 258
Figura 5.18 Comparación del tamaño de cola del tráfico de mejor esfuerzo usando Inic. MTDA y el Algoritmo MTDA Escenario 2.1 259
Figura 5.19 Comparación de delays del tráfico de voz usando Inicialización MTDA y el Algoritmo MTDA Escenario 2.1 .. 260
Figura 5.20 Comparación de delays del tráfico de video usando Inicialización MTDA y el Algoritmo MTDA Escenario 2.1 .. 260

Figura 5.21 Comparación de delays del tráfico de mejor esfuerzo usando Inic. MTDA y el Algoritmo MTDA Escenario 2.1 ... 261
Figura 5.22 Comparación del rendimiento del tráfico de voz usando Parámetros por Defecto y el Alg. MTDA Escenario 2.1 263
Figura 5.23 Comparación del rendimiento del tráfico de video usando Parámetros por Defecto y el Alg. MTDA Escenario 2.1 263
Figura 5.24 Comparación del rendimiento del tráfico de mejor esfuerzo usando Inicialización MTDA y el Algoritmo MTDA Escenario 2.1 264

CAPITULO VI

Figura 6.1 APs Aironet Serie 2600 de Cisco 268
Figura 6.2 Vista pantalla ADVANCED de configuración de las políticas de QoS APs Aironet Series 2600 de Cisco 269
Figura 6.3 Vista pantalla RADIO1-802.11A ACCESS CATEGORIES de configuración manual de los parámetros EDCA en APs Aironet Serie 2600 de Cisco 270
Figura 6.4 Vista pantalla QoS (CALIDAD DE SERVICIO) de activación o desactivación del servicio WMM APs 2700 de Linksys-Cisco 271
Figura 6.5 Certificado de Interoperabildad Wi-Fi del AP Cisco Aironet 2600 272
Figura 6.6 Certificado de Interoperabilidad Wi-Fi del AP Linksys-Cisco 2970 272
Figura 6.7 Componentes básicos de un algoritmo de control de Admisión 273
Figura 6.8 Formato general de la trama de administración 275
Figura 6.9 Vista de los campos del elemento de Conjunto de Parámetros EDCA 275
Figura 6.10 Vista del formato de campos de los Registros de Parámetros (AC_BE, AC_BK, AC_VI y AC_VO) 275
Figura 6.11 Campo ACI/AIFSN 276
Figura 6.12 Campos ECWmin y ECWmax 276
Figura 6.13 Mecanismo de señalización entre el AP y las estaciones Wi-Fi (por defecto) 277
Figura 6.14 Formato del elemento de información TSPEC 277
Figura 6.15 Procedimiento de Control de Admisión en el AP 280
Figura 6.16 Procedimiento de Control de Admisión en la STA 281
Figura 6.17 Mecanismo de señalización entre el AP y las estaciones Wi-Fi (cambio manual) 282
Figura 6.18 Mecanismo de señalización entre el AP y las estaciones Wi-Fi (cambio automático) 283
Figura 6.19 Representación de los parámetros EDCA por defecto en memoria 285

Figura 6.20 Representación de los parámetros EDCA en memoria (cambio manual) 285
Figura 6.21 Representación de los parámetros EDCA en memoria (cambio automático)..... 286
Figura 6.22 Rendimiento relativo para el tráfico de voz por defecto o con el Algoritmo MTDA 287

APÉNDICE A

Figura A.1 Un simple sistema de cola..... 315
Figura A.2 Ilustración de una red de colas abierta..... 316
Figura A.3 Ilustración de los mecanismos de mezcla y división 317
Figura A.4 Ilustración de una red de cola cerrada 317
Figura A.5 Ilustración de una red de cola multiclase..... 318
Figura A.6 Un sistema de red Lugar/Transición (P/T) y sus matrices incidentes..... 324
Figura A.7 Auto loops 325
Figura A.8 Sintetización del modelo de la Figura 2.6 (a) un modelo refinado (b) como una sincroniz. de dos submodelos..... 328
Figura A.9 Conflictos y conflictos estructurales..... 330
Figura A.10 Conflictos no igual y confusión 330
Figura A.11 Transiciones inmediatas y temporizadas..... 337
Figura A.12 Grafica de representación de una Red de Actividad 344
Figura A.13 Representación de una Actividad macro 348
Figura A.14 Ejemplo de modelo HSAN..... 348
Figura A.15 Vista de interface del simulador SANBuilder 352
Figura A.16 Vista de interface del simulador Möbius..... 353

APÉNDICE C

Figura C.1 Tamaño de Cola de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 1.1 364
Figura C.2 Delays de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 1.1 364
Figura C.3 Delays de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 1.1 365
Figura C.4 Comparación del tamaño de cola del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.1 366
Figura C.5 Comparación del tamaño de cola del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.1 367
Figura C.6 Comparación del tamaño de cola del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.1..... 367

Figura C.7 Comparación de delays del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.1 368
Figura C.8 Comparación de delays del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.1 368
Figura C.9 Comparación de delays del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.1 369
Figura C.10 Tamaño de Cola de los tráficos de video y mejor esfuerzo Escenario 1.2 370
Figura C.11 Tamaño de Cola de los tráficos de video y mejor esfuerzo Escenario 1.2 370
Figura C.12 Delays de los tráficos de video y mejor esfuerzo Escenario 1.2 371
Figura C.13 Delays de los tráficos de video y mejor esfuerzo Escenario 1.2 371
Figura C.14 Comparación del tamaño de cola del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.2 372
Figura C.15 Comparación del tamaño de cola del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.2 373
Figura C.16 Comparación de delays del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.2 373
Figura C.17 Comparación de delays del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.2 374
Figura C.18 Tamaño de Cola de los tráficos de voz y mejor esfuerzo Escenario 1.3 375
Figura C.19 Tamaño de Cola de los tráficos de voz y mejor esfuerzo Escenario 1.3 375
Figura C.20 Delays de los tráficos de voz y mejor esfuerzo Escenario 1.3 376
Figura C.21 Delays de los tráficos de voz y mejor esfuerzo Escenario 1.3 376
Figura C.22 Comparación del tamaño de cola del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.3 378
Figura C.23 Comparación del tamaño de cola del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.3 378

Figura C.24 Comparación de delays del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.3 379
Figura C.25 Comparación de delays del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.3 379
Figura C.26 Tamaño de Cola de los tráficos de voz y video Escenario 1.4 380
Figura C.27 Delays de los tráficos de voz y video Escenario 1.4..... 381
Figura C.28 Comparación del tamaño de cola del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.4 382
Figura C.29 Comparación del tamaño de cola del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.4 383
Figura C.30 Comparación de delays del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.4 383
Figura C.31 Comparación de delays del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.4 384
Figura C.32 Tamaño de Cola de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.1 385
Figura C.33 Delays de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.1 385
Figura C.34 Delays de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.1 386
Figura C.35 Comparación del tamaño de cola del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.1 387
Figura C.36 Comparación del tamaño de cola del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.1 388
Figura C.37 Comparación del tamaño de cola del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.1..... 388
Figura C.38 Comparación de delays del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.1 389
Figura C.39 Comparación de delays del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.1 389

Figura C.40 Comparación de delays del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.1 390
Figura C.41 Tamaño de Cola de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.2 391
Figura C.42 Tamaño de Cola de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.2 391
Figura C.43 Delays de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.2 392
Figura C.44 Delays de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.2 392
Figura C.45 Comparación del tamaño de cola del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.2 394
Figura C.46 Comparación del tamaño de cola del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.2 394
Figura C.47 Comparación del tamaño de cola del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.2 395
Figura C.48 Comparación de delays de cola del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.2 395
Figura C.49 Comparación de delays de cola del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.2 396
Figura C.50 Comparación de delays de cola del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.2 396
Figura C.51 Tamaño de Cola de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.3 397
Figura C.52 Tamaño de Cola de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.3 398
Figura C.53 Delays de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.3 398
Figura C.54 Delays de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.3 399
Figura C.55 Comparación del tamaño de cola del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.3 400
Figura C.56 Comparación del tamaño de cola del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.3 401

Figura C.57 Comparación del tamaño de cola del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.3 401
Figura C.58 Comparación de delays del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.3 402
Figura C.59 Comparación de delays del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.3 402
Figura C.60 Comparación de delays del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.3 403

LISTA DE TABLAS

CAPÍTULO II

Tabla 2.1 Comparación de algunos modelos analíticos EDCA..... 90
Tabla 2.2 Cont. comparación de algunos modelos analíticos EDCA... 90
Tabla 2.3 Parámetros usados para validación del modelo básico..... 101
Tabla 2.4 Máximo rendimiento según tamaño de la trama y la prioridad en [Mbps] 102
Tabla 2.5 Comparación del máximo rendimiento según tamaño de la trama y la prioridad en [Mbps] en el orden [TKN/Mangold]. 103
Tabla 2.6 Comparación del máximo rendimiento según tamaño de la trama y la prioridad en [Mbps] en el orden [TKN/Mangold/tesista]..... 108

CAPÍTULO III

Tabla 3.1 Tamaños de paquetes y rates de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo..... 110
Tabla 3.2 Conjunto de Parámetros DCF y EDCA por defecto 113
Tabla 3.3 Parámetros 802.11a en 36 Mbps y EDCA por defecto utilizados en la experimentación 113
Tabla 3.4 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 1.1..... 121
Tabla 3.5 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 1.2..... 126
Tabla 3.6 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 1.3..... 131
Tabla 3.7 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 1.4..... 135
Tabla 3.8 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 2.1..... 144
Tabla 3.9 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 2.2..... 149
Tabla 3.10 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 2.3..... 153

CAPÍTULO IV

Tabla 4.1 Parámetros EDCA de mejora utilizados Escenario 1.1 174
Tabla 4.2 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 1.1..... 176
Tabla 4.3 Parámetros EDCA de mejora utilizados Escenario 1.2 181
Tabla 4.4 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 1.2..... 183
Tabla 4.5 Parámetros EDCA de mejora utilizados Escenario 1.3..... 186
Tabla 4.6 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 1.3..... 188

Tabla 4.7 Parámetros EDCA de mejora utilizados Escenario 1.4 192
Tabla 4.8 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 1.4 194
Tabla 4.9 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 2.1 199
Tabla 4.10 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 2.2 206
Tabla 4.11 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 2.3 213
Tabla 4.12 Resumen de las diferencias porcentuales de las métricas en los puntos críticos 219

CAPÍTULO V

Tabla 5.1 Rango de parámetros EDCA utilizados en MTDA 235
Tabla 5.2 Valores de los parámetros EDCA utilizados Escenario 1.1 y 2 235
Tabla 5.3 Valores de los parámetros EDCA utilizados Escenario 1.2.. 235
Tabla 5.4 Valores de los parámetros EDCA utilizados Escenario 1.3.. 236
Tabla 5.5 Valores de los parámetros EDCA utilizados Escenario 1.4.. 236
Tabla 5.6 Evolución del algoritmo MTDA Escenario 1.1 241
Tabla 5.7 Valores iniciales y finales de los parámetros del algoritmo MTDA Escenario 1.1 241
Tabla 5.8 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 1.1 249
Tabla 5.9 Resumen de las comparaciones de rendimiento Escenario 1.1 252
Tabla 5.10 Evolución del algoritmo MTDA Escenario 2.1 254
Tabla 5.11 Valores iniciales y finales de los parámetros del algoritmo MTDA Escenario 2.1 254
Tabla 5.12 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 2.1 262
Tabla 5.13 Resumen de las comparaciones de rendimiento Escenario 2.1 264

CAPÍTULO VI

Tabla 6.1 Los valores por defecto de los campos CWmin, CWmax y TXOP 270

APÉNDICE A

Tabla A.1 Descripción de las compuertas G1 y G2 344
Tabla A.2 Descripción de la compuerta ChkFull 349
Tabla A.3 Sumario de comparación: Similitudes..... 354
Tabla A.4 Sumario de comparación: Diferencias 354
Tabla A.5 Sumario de comparación: Similitudes y Diferencias 356

APÉNDICE B

Tabla B.1 Tabla comparativa del comportamiento del tráfico de voz Escenarios 1 y 2 359
Tabla B.2 Tabla comparativa del comportamiento del tráfico de video Escenarios 1 y 2 360
Tabla B.3 Tabla comparativa del comportamiento del tráfico de mejor esfuerzo Escenarios 1 y 2 361

APÉNDICE C

Tabla C.1 Parámetros EDCA de mejora utilizados Escenario 1.1 363
Tabla C.2 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 1.1 365
Tabla C.3 Parámetros EDCA de mejora utilizados Escenario 1.2 369
Tabla C.4 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 1.2 372
Tabla C.5 Parámetros EDCA de mejora utilizados Escenario 1.3 374
Tabla C.6 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 1.3 377
Tabla C.7 Parámetros EDCA de mejora utilizados Escenario 1.4 380
Tabla C.8 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 1.4 381
Tabla C.9 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 2.1 386
Tabla C.10 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 2.2 393
Tabla C.11 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 2.3 399

LISTA DE ACRÓNIMOS

Acrónimo	Descripción
AACA	Adaptive Acquisition Collision Avoidance
AC	Access Category
ACK	Acknowledge-Reconocimiento
AIFS	Arbitration Interframe Space
AIFSN	Arbitration Interframe Space Number
AODV	Ad Hoc On Demand Distance Vector
AP	Access Point
ARME	Assured Rate MAC Extension
ARPA	Advance Research Projects Agency-Agencia de Proyectos de Avanzada
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
BB	Black-Burst
BEB	Binary Exponential Backoff-Retroceso Exponencial Binario
BER	Bit Error Rate
BK	Background
BLAM	Binary Logarithmic Arbitration Method
BS	Bucket Size
BSS	Basic Service Set
BT	Bluetooth
BTPS	Busy Tone Priority Scheduling
CABEB	Capture Avoidance Binary Exponential Backoff
CAGR	Compound Annual Growth Rate
CAP	Controlled Access Phase
CATER	Code Adapts To Enhance Reliability
CBR	Constant Bit Rate
CF	Contention Free
CFP	Contention Free Period
CIM	Computer Integrated Manufacturing
CIP	Control Information Protocol
CIR	Carrier-to-Interference Ratio
COTS	Commercial Of-The-Shelf
CoV	Coefficient of Variation
CP	Contention Period
CPNs	Coloured Petri Nets-Redes de Petri Coloreadas
CSMA	Carrier Sense Multiple Acces-Acceso Multiple con Sensado de Portadora
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
CSMA/CA	CSMA with Collision Avoidance- CSMA con Prevención de Colisiones
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CSMA/CD	CSMA with Collision Detection-CSMA con Detección de Colisiones

CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection
CTMC	Continuous Time Markov Chains-Cadenas de Markov de Tiempo Contínuo
CTS	Clear to Send-Listo para Enviar
CTS	Clear to Send
CW	Contention Window
DCF	Distributed Control Function-Función de Control Distribuída
DCR	Deterministic Contention Resolution
DDRR	Round Robin de Deficit Distribuido
DEDS	Discrete Event Dinamic Systems-Sistemas Dinámicos de Eventos Discretos
DFS	Distributed Fair Scheduling
DIFS	DCF Inter Frame Space-Espacio Intertrama DCF
DMS	Delay Measurement System
DS	DiffServ Servicios Diferenciados
DSPNs	Deterministic and Stochastic Petri Nets-Redes de Petri Determinística y Estocástic
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
DWFQ	Cola Distribuida de Ponderacion Equitativa
EB	Energy-Burst
EBBS	Energy-burst for Bit Separation
ECs	Elementary Cycles
EDCA	Enhanced Distributed Channel Access
EDF	Earliest Deadline First
EDR	Enhanced Data Rate
EIFS	Extended Inter Frame Space-Espacio Interframe extendido
EMI	Electromagnetic Interference
EPSG	Ethernet Powerlink Standardization Group
EQuB	Ethernet Quality of Service Using Black Bursts
ESS	Extended Service Set
FCFS	First Come First Served- Primero en Llegar Primero en ser Atendido
FCS	Frame Check Sequence
FDM	Frecuency Division Multiplexing-Multiplexación por división de frecuencia
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
FIFO	First Input First Ouput-Primero en Entrar Primero en Salir
FTDMA	Flexible TDMA
FTP	File Tranfer Protocol-Protocolo de tranferencia de ficheros
FTT	Flexible Time-Triggered
GDCF	Gentle DCF
GSM	Global System for Mobile Communications
GSPNs	Generalized Stochastic Petri Nets-Redes de Petri Estocásticas Generalizadas

GSPP	Generalizad Switched Poisson Process-Procesos de Poisson Comnutados General
HC	Hybrid Coordinator
HCCA	HCF Controlled Channel Access
HCF	Hybrid Coordination Function
HID	Human Interface Device
HIMD	Harmonic-Increase and Multiplicative Decrease
HLPNs	High Level Petri Nets-Redes de Petri de Alto Nivel
HSANs	Hierarchical SANs
IBSS	Independent BSS
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers-Instituto de ingenieros eléctricos
IEETA	Institute of Electronics and Telematics Engineering of Aveiro
IFS	Interframe Space
IP	Internet Protocol
IPP	Interrupted Poisson Process-Procesos de Poisson Interrumpidos
IS	IntServ Servicios Integrados
ISM	Industrial, Scientific, and Medical
ISO	International Organization for Standardization
LAN	Local Area Network-Red de Area Local
LCFS	Last Come First Served-Último en Llegar Primero en ser Atendido
LIFO	Last Input First Ouput-Último en Entrar Primero en Salir
LLC	Logical Link Control-Control de enlace lógico
LLPNs	Low Level Petri Nets-Redes de Petri de Bajo Nivel
LS	Latest Time
M2M	Machine-to-Machine
MAC	Medium Access Control-Control de Acceso al Medio
MACA	Multiple Access with Collision Avoidance-Acceso Múltiple con Prevención de
MACAW	Wireless MACA-MACA Inalambrica
Mbps	Mega bits per second
MCU	MicroController unit
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MLF	Minimum-Laxity-First
MMPP	Markov Modulated Poisson Process-Procesos de Poisson Modulado de Markov
MP	Multipurpose
MPNs	Markov Petri Nets-Redes de Petri Markoviana
MSDU	MAC Service Data Unit
MSP	Message Stream Period
NAV	Network Allocation Vector
NCP	Network Control Packet
NCS	Networked Control Systems

NFC	Near Field Communication
NIC	Network Interface Card
NNTP	Network News Transfer Protocolo-Protocolo de Transferencia de Nuevas Redes
ODVA	Open DeviceNet Vendors Association
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OSI	Open Systems Interconexión-Interconexión de sistemas abiertos
PAN	Personal Area Network
PC	Point Coordinator
PCF	Puntual Coordination Function-Función de Coordinación Puntual
PCF	Point Coordination Function
PCM	Pulse Code Modulated
PCSMA	Predictable CSMA
P-DCF	DCF con Factor de Persistencia
PDU	Protocol Data Unit
PER	Packet Error Rate
PERFORM	Performability Engineering Research Group
PHY	Physical
PIFS	Point Interframe Space
PLC	Programmable Logical Computer-Computador Lógico Programable
PN	Pseudonoise
PRD	Preempt Repeat Different-Preferido Repetir Diferente
PRI	Preempt Repeat Identical-Preferido Repetir Idéntico
QoS	Quality of Service
RG	Reachability Graph-Grafo de Alcanzabilidad
RP	Refresh Period
RSS	Received Signal Strength
RSVP	Resource Reservation Protocol
RT	Real-Time
RT-EP	Real-Time Ethernet Protocol
RTR	Ready-to-Receive
RTS	Request to Send-Petición de Envío
SANs	Stochastic Activity Nets
SCFQ	Self-Clocked Fair Queueing
SDM	Space Division Multiplexing
SRW	Short Range Wireless
SI	Service Interval
SIFS	Short Inter Frame Space-Espacio Intertrama corto
SIRO	Service in random order-Servicio en Orden Aleatorio
SMTP	Simple Mail Tranfer Protocol-Protocolo Simple de Tranferencia de correo
SNR	Signal-to-Noise Ratio

SSID	Servide Set Identifier
SoC	Start of Cycle
SPN	Stochastic Petri Net
SPNs	Stochastic Petri Nets-Redes de Petri Estocásticas
STA	Statios
SWNs	Stochastic Well-formed Nets-Redes Estocásticas bien formadas
TDM	Time Division Multiplexing-Multiplexación por División de Tiempo
TDMA	Time Division Multiple Access
TKN	Telecommunications Network Group
TM	Trigger Message
TS	Traffic Stream
TSF	Time Sincronization Function-Function de Sincronización de tiempo
TSm	Traffic Separation mechanism
TSPEC	Traffic Specification
TTP	Time-Triggered Protocol
TXOP	Transmission Opportunity
UP	User Priority
VBR	Variable Bit Rate
VI	Video
VID	Virtual Identification
VLAN	Virtual Local Area Network
VMAC	Virtual MAC
VO	Voice
VoIP	Voice over IP
VPL	Virtual Polling List
VPP	Virtual Polling Period
VPRP	Voice Packet Resolution Period
VS	Virtual Source
VTCSMA	Virtual Time CSMA
VTP	Virtual Token Passing
WAN	Wide Area Network-Red de Area Amplia
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLANs	Wireless LANs-LANs Inalambricas
WMM	Wireless Multimedia
WNs	Well-formed Nets-Redes bien formadas
WPAN	Wireless PAN
WWAN	Wireless WAN
WTRP	Wireless Token Ring Protocol

i) VISIÓN GENERAL

Esta tesis aspira a ser una contribución para el avance del estado del arte de la QoS, en el contexto de las comunicaciones en las redes WLAN 802.11, con dispositivos wireless (o flujos) de diferentes características y proporciones relativas. Este capítulo provee una visión general del alcance de investigación de esta tesis y sus objetivos. También indica las mayores contribuciones del trabajo de investigación.

i.1) INTRODUCCIÓN

La demanda para los servicios de comunicaciones en WLAN se ha incrementado durante los últimos años. El dominio de aplicación se extiende desde las aplicaciones de oficina, hasta las aplicaciones industriales de tiempo real. En tales casos, el mayor requerimiento de la red es soportar comunicaciones confiables. Por ejemplo, en aplicaciones de VoIP (voice over IP), de video en tiempo real, o de sistemas de automatización, las tramas de datos deben transferirse periódicamente de acuerdo a estrictas reglas de transferencia. Las aplicaciones pueden requerir tiempos de respuestas predecibles y limitadas, y cualquier violación de estos tiempos de respuesta puede tener consecuencias severas. Otras aplicaciones pueden tolerar pérdidas ocasionales. Sin embargo, en general para ambos casos, es necesario tener un retardo de comunicación casi constante y bajo jitter.

Esta tesis se direcciona hacia el análisis, en diversos contextos, del rendimiento de las redes WLAN 802.11 con QoS que soportan servicios de comunicaciones de variados dispositivos, con sus propias características y requerimientos.

El mayor desafío concerniente al diseño de arquitecturas de protocolos para este tipo de redes es que el canal es un recurso compartido.

Por lo tanto, hay una necesidad de priorizar el tráfico de datos cuando tales tráficos comparten la misma infraestructura de comunicación con tráfico multipropósito genérico. Así, el acceso a este recurso compartido necesita coordinarse de manera centralizada o distribuida. Los protocolos de Control de Acceso al Medio (Medium Access Control-MAC) son los únicos responsables del control de acceso.

Realmente, el protocolo MAC es la clave en cualquier red de acceso aleatoria broadcast. El protocolo para redes LAN IEEE 802.3 (Ethernet) fue uno de los protocolos de acceso aleatorio más usados en

ambientes cableados (se sabe que las transmisiones de hoy en día son full dúplex), mientras que en wireless están basados sobre los protocolos IEEE 802.11 (Wi-Fi). Hay una fuerte similitud entre estos dos protocolos. Ambos usan el mecanismo de Acceso Múltiple con Sensado de Portadora (Carrier Sense Multiple Access - CSMA) para administrar el acceso al medio. La desventaja principal de ambos protocolos es el no determinismo del algoritmo de resolución de contención probabilística, dado que si ocurre una colisión, serializa los mensajes que compiten por el medio.

Ethernet es una tecnología de red bien conocida y ampliamente usada. La primera versión estandarizada fue aprobada y liberada en 1985 en el estándar ANSI/IEEE 802.3. Cuando las redes Ethernet comenzaron a ser usadas, la mayor motivación fue alcanzar la más alta velocidad y bajo costo para los controladores de comunicación.

La familia IEEE 802.11 de protocolos es uno de los conjuntos más usados de Redes de Área Local Inalámbricos (Wireless Local Area Networks - WLANs). Fue estandarizada en 1999 por la IEEE como el estándar IEEE 802.11, que fue luego reafirmado en 2003. Más recientemente, el estándar IEEE 802.11e (entre otros) ha sido publicado como un adicional al estándar original. Este agregado fue pensado para proveer niveles diferenciados de QoS para las aplicaciones soportadas, incluyendo el transporte de voz y video sobre WLANs.

La demanda para redes wireless de altas prestaciones se incrementó significativamente en los últimos años. Esto es una consecuencia del reciente desarrollo tecnológico que requiere acceso wireless en ambientes de oficina, en hot-spots públicos, industriales y en ambientes domésticos. En la actualidad se hacen constantes esfuerzos para trasladar las redes cableadas a wireless. Por lo tanto, es razonable esperar que en el futuro cercano, la amplia disponibilidad de soluciones wireless IEEE 802.11 generará efectos similares y el seguimiento tecnológico que ocasiona y ocasione Ethernet en las redes LAN cableadas.

Una de las principales razones para esto es que la familia de protocolos 802.11 es capaz de reemplazar fácilmente Ethernet de una manera transparente, implementando las dos capas inferiores del modelo TCP/IP, y provee todas las funcionalidades requeridas para habilitar el soporte del Protocolo Internet (Internet Protocol - IP), que es virtualmente la base para las aplicaciones sobre redes Ethernet.

Sin embargo, debe tenerse en cuenta que cualquier nuevo participante 802.11 puede intentar acceder al medio de comunicaciones

en cualquier instante, de acuerdo a las reglas MAC, y establecer sus propios canales de comunicación. Además, el ambiente de comunicaciones wireless es susceptible a las interferencias creadas por otros sistemas, no solo de aquellos usando la misma tecnología, sino también de otras tecnologías que trabajan en la misma banda de frecuencias. Como una consecuencia, la carga del sistema no puede ser predicha en tiempos de configuración del sistema, ni puede ser efectivamente controlada durante el tiempo de ejecución del sistema.

Se pretende que a través de la tesis, se vuelva más evidente que el uso de dispositivos wireless IEEE 802.11 de diversas características en cuanto a su tráfico, no será tan transparente como en Ethernet, como enunciado precedentemente, ni mantendrá el comportamiento en cuanto a las prestaciones, cambiando el paradigma de la QoS que conocemos sobre Ethernet.

i.2) CONTEXTO DE LA INVESTIGACIÓN

En esta tesis, se investiga el impacto cuantitativo de los distintos dispositivos wireless, con tráficos característicos, y proporciones diversas entre ellos, sobre las prestaciones de una red WLAN 802.11 con QoS. Además, se evalúa el comportamiento del protocolo 802.11e, con el objeto de proponer mecanismos que aseguren el máximo rendimiento posible a los tráficos rígidos (como la voz y el video), y también al de datos si lo permiten los primeros, especialmente en la zona de saturación.

i.2.1 Visión desde el análisis de trazas

Las grandes Redes LAN (cableadas y/o wireless) están ampliamente instaladas, y la combinación de ambas propuestas ha ganado rápidamente popularidad. Además, una parte de los nodos de red han conmutado a nodos wireless, y en conjunto, crecen proporcionalmente con el número de nodos, su variedad y los requerimientos de los servicios demandados. En este escenario, ha aumentado la importancia de entender la conducta de los nodos cableados y wireless.

La colección de trazas de Redes LAN, en la comunidad de investigación, ha sido la técnica primaria y habitual para obtener conocimiento fundamental de sus nodos. En el vasto espacio para investigación potencial, a partir de la colección de las trazas, se plantea cómo hacer un modelo de conducta de los nodos en particular, y de la red en general, que también tenga en cuenta los patrones de comportamientos similares entre subgrupos, y cómo los nodos de red en diferentes ambientes difieren en estos aspectos.

La colección de trazas, y la posterior modelación de la red, son importantes porque:

1) El análisis de la conducta del usuario y los patrones de uso habilitan el exámen exacto de la utilización de la red, y ayudan en el desarrollo de mejores técnicas de entendimiento y mejor capacidad de decisiones planeadas,
2) El análisis de trazas es también un primer paso necesario para hacer modelos realistas que son cruciales para el diseño, simulación y evaluación de protocolos de redes,
3) Cada nueva tecnología evoluciona, entendiendo fundamentalmente la conducta de los nodos de red, y se vuelve esencial para el desarrollo exitoso de las mismas.

En ese sentido, hay bastantes trabajos de investigación dirigidos al objetivo general de entender la conducta de los nodos de red, con focos diferentes y aplicaciones potenciales en mente.

La principal contribución de [1] es una métrica de similitud usando una representación matricial para indicar las preferencias de movilidad. El objetivo es reducir la dinámica espacio-temporal de los usuarios en unos pocos vectores. De esta forma, se analizan patrones de conducta de usuarios sobre bases de datos extensivas de logs en dos campos universitarios. Se determinó una conducta mutimodal en más del 60% de los usuarios en ambas universidades.

En [2] se presentan resultados de trazas coleccionadas durante 4 semanas en un gran ambiente corporativo, con 177 puntos de acceso (Access Points-APs) y 1366 usuarios. En él se estudian la distribución de usuarios y carga a través de los APs. Se comparan los resultados con aquellos de estudios previos para extraer y explicar algunas características de usos de la red y la movilidad. Por ejemplo, confirmando aspectos como que la carga está desigualmente distribuida a través de los APs, e influida más por los usuarios que están activos, que por el número de usuarios. Además, clasifican a las trazas por las duraciones de sesión, y por la frecuencia con que los usuarios visitan varias locaciones, y estableciendo que las distribuciones de probabilidad de ambas medidas siguen comportamientos habituales.

Otros trabajos, en base a la repetitividad de las conductas, se han focalizado sobre la capacidad de predicción que puede obtenerse a partir de las trazas de tráfico Wireless. En [3] se estudió la evolución de la movilidad de los usuarios usando trazas de red extensivas coleccionadas durante 5 años. Se determinó que a mayor movilidad, los usuarios se vuelven menos predecibles. Además, se evaluaron diferentes

granularidades de éxito en la predicción para medir como contribuyen a la predicción total de los usuarios móviles.

En [4] se usaron mediciones reales sobre una gran red wireless, con el objeto de capturar la variación de la demanda, tanto en el dominio espacial como temporal, de forma que escale bien con el tamaño de otras redes wireless. La carga de tráfico se modeló con un grafo, en términos de sesiones y flujos, y a los edificios se los consideró entidades de agregación de demanda en la dimensión espacial. Se combinó técncias de heurística con clustering para agrupar edificios en clusters con características de tráfico similar.

Un interesante trabajo de investigación usando trazas se describe en [5]. Propone un método novedoso para el análisis de prestaciones de los protocolos de retranmisión oportunistas, usando los archivos logs de los nodos móviles. El método propone un trabajo modular que inicialmente filtra los contactos que tienen coordenadas y reglas de retransmisión establecidas. Con estos contactos se dibuja un gran grafo ralo espacio-tiempo. Y finalmente, se ejecutan algoritmos de camino más corto para derivar métricas de rendimiento típicas.

Alternativamente, algunos trabajos utilizan técnicas matemáticas avanzadas para el agrupamiento de las trazas. En [6] se analizan trazas WLAN de tres mayores campus universitarios para entender los aspectos comunes y diferentes, aplicando las técnicas de análisis de componentes principales. Los autores proponen un índice de similitud que es usado para identificar grupos de usuarios wireless con tendencias comunes.

Otro estudio de trazas interesante por su magnitud, que focaliza sobre trazas wireless coleccionadas desde campus universitarios y redes corporativas, se discute en [7]. Se obtuvieron trazas wireless desde 4 fuentes diferentes, incluyendo 12000 usuarios distintos, y más de 1300 APs. Además, se proponen métricas para describir las conductas individuales, y se encontraron hechos significativos, como por ejemplo, que los modelos de movilidad convencionales, aleatorios, generados sintéticamente, no son adecuados para un ambiente heterogéneo, tal como un campus de universidad y corporaciones.

Así, en los trabajos mencionados precedentemente, y en otros [8-12] se han propuesto diversas definiciones de métricas para entender la conducta individual o grupal del nodo: a) Actividad online de los usuarios, b) Movilidad de largo plazo de los usuarios, c) Movilidad de corto plazo de los usuarios, d) Patrón de asociación repetitivo de los usuarios, o Patrón de asociación de grupo, e) Tráfico de los usuarios, f) Prevalencia de APs, g) Persistencia de APs, etc.

Y afortunadamente, buena parte de los investigadores y analistas de tráfico de red wireless, dejan disponibles para otros trabajos, sus bases de datos de trazas, o las reúnen en depósitos comunitarios. Tal es el caso del proyecto CRAWDAD (Community Resource for Archiving Wireless Data at Dartmouth) [13], que actualmente utilizan más de 340 Universidades del mundo.

El estudio de la colección de muestras del tráfico de diferentes nodos wireless, propias o de bases de datos accesibles, dieron conocimiento real sobre el comportamiento de los nodos de red y de su tráfico asociado, datos que fueron usados en la definición de los escenarios propuestos en la presente tesis.

i.2.2 Visión desde la modelación de tráfico

Otra forma de efectuar el análisis de performance de las redes de comunicaciones IEEE 802.11e ha sido desarrollando modelos de evaluación desde dos puntos de vista distintos: analítico y simulación. Los modelos analíticos [14-33] (serán discutidos en más detalle en el Capítulo 2) tienen la ventaja de proveer expresiones/formalismos analíticos que ayudan a analizar la influencia de diferentes parámetros. Además, ellos también usualmente proveen resultados rápidos. Sin embargo, este tipo de solución típicamente obliga a la adopción de suposiciones de simplificación. O bien, la conducta del protocolo se simplifica o se asumen los escenarios de carga especifica (por ejemplo, saturación). Por ello, las características de los modelos analíticos usualmente limitan tanto la naturaleza y el número de las medidas de prestaciones que pueden obtenerse.

Para escenarios más realistas, son necesarias las técnicas de simulación. Algunos análisis de simulación han sido hechos usando herramientas como: Network Simulator (NS-2/3) [34], OPNET [35], QualNet [36], o IP Traffic [37], entre otras. La herramienta NS es un simulador de eventos discretos de código abierto, mientras que la herramienta OPNET ha sido desarrollada por OPNET Technologies, Inc (recientemente adquirida por Riverbed). QualNet e IP Traffic son productos comerciales, con bonificaciones especiales para las instituciones académicas. Todas son especialmente apropiadas para analizar el rendimiento de las redes de comunicaciones, tanto cableadas como inalámbricas. Aunque debe tenerse especialmente en cuenta sus particularidades operativas, los protocolos soportados, y las características de sus implementaciones. [38] es un trabajo de investigación que evalúa EDCA IEEE 802.11e en condiciones de no-saturación usando NS-2; mientras que en [39] se analiza el rendimiento de un protocolo de routing sobre EDCA, efectuando los ensayos

experimentales con QualNet Simulator. En la mayoría de los trabajos de investigación que hacen simulaciones, se utiliza habitualmente NS-2/3, porque es de libre disponibilidad y se tiene acceso a las librerías.

En uno de los trabajos preliminares sobre la norma IEEE 802.11e [40], la herramienta NS-2 fue inicialmente seleccionada para simular la conducta de protocolos IEEE 802.11. Sin embargo, surgieron varias dudas acerca de la validación del modelo, dado que es difícil entender cómo son modelados tanto el protocolo y las características de temporización. Los autores continuaron con la línea de investigación, pero cambiaron la herramienta de modelación a Redes de Petri. Ulteriormente, algunas inconsistencias del modelo EDCA IEEE 802.11e, usando NS-2, han sido identificadas y explicadas en [41], que incrementan las dudas acerca de la exactitud de los resultados obtenidos para algunas implementaciones que se encuentran disponibles en las librerías. Simultáneamente, distintos autores han expresado la dificultad que se presenta en NS-2/3 para implementar cualquier leve modificación de los protocolos o de sus características de temporización. Para escenarios complejos y/o donde se quiera utilizar distribuciones probabilísticas de los espacios intertramas, fuera de las comunes, las dificultades se extienden proporcionalmente. En estos casos se necesita bastante trabajo de implementación en el simulador.

i.2.3 Modelación con Redes de Petri Estocásticas (Stochastic Petri Nets-SPNs)

Las Redes de Petri son una herramienta de modelación matemática y gráfica que habilita la descripción y análisis de sistemas dinámicos donde están presentes las actividades concurrentes, asincrónicas, distribuidas, paralelas, temporizadas, no determinísticas y estocásticas [42-51](Las Redes de Petri serán discutidas en más detalle en Capítulos posteriores y, especialmente, en el Apéndice A). Estas propiedades caracterizan a los Sistemas de Eventos Discretos (discrete-event systems -DEDS's), como los sistemas industriales automatizados, los sistemas de comunicaciones y los sistemas basados en computadoras. En la última década, las Redes de Petri Estocásticas (Stochastic Petri Nets-SPNs) se han vuelto un framework ampliamente usado para la evaluación de rendimiento y dependebilidad de varias clases de sistemas por varias razones [52-57]:

- Permite Una descripción grafica e intuitiva de la conducta del sistema, que puede ser usada como una ayuda de comunicación visual entre diferente usuarios;
- Ofrece una representación de sistemas complejos por modelos muy compactos usando una notación no ambigua y simple;

- Tiene una base formal, donde es posible establecer ecuaciones algebraicas y otros modelos matemáticos (por ejemplo, procesos estocásticos) reflejando la dinámica del sistema;
- Brinda la oportunidad para obtener diferentes tipos de soluciones usando el mismo modelo;
- Dispone de una gran independencia entre el modelo desarrollado y las múltiples herramientas de soporte disponibles para el análisis y la solución.

El uso de las SPNs, para obtener modelos de prestaciones, puede realizarse desde dos puntos de vista, de acuerdo al tipo de solución requerida: 1) Analítica: cuando las SPNs, respondiendo a ciertas reglas estructurales y procesos algebraicos/analíticos pueden generarse y resolverse automáticamente; o 2) Simulación: en este caso las facilidades previas no están presentes, y un número significativo de extensiones de modelación de SPNs están disponibles para reducir la complejidad del modelo. Dado que la semántica de SPNs está formalmente bien establecida, los modelos se construyen fácilmente y con menos errores que con los programas de simulación custom.

A pesar de ello, hay pocos documentos disponibles que usen SPNs como un formalismo de modelación para analizar los protocolos de comunicaciones IEEE 802.11 [58-60]. En general, en estos trabajos de los mismos autores, se presenta una modelación de la Función de Coordinación Distribuida (Distributed Coordination Function-DCF) 802.11 original de las WLAN, usando las Redes de Petri como herramienta matemática, para obtener las prestaciones y tiempos medios para varias configuraciones. Se trata de una modelación sintética, desde las reglas del protocolo, que considera un nodo wireless promedio. Los resultados se han obtenido desde modelos de simulación compactos y detallados, para diferentes opciones de capa física, velocidades, y la influencia de parámetros del sistema.

En [58], se proponen modelos de SPN, tanto de simulación y analíticos, para evaluar la performance del IEEE 802.11. Estos modelos describen la conducta mínima de DCF: Acceso Básico basado en un handshasing de dos vías, y Request-to-Send/Clear-to-Send (RTS/CTS) basado en una handshaking de 4 vías. El modelo de simulación tiene el requerido detalle para describir las características principales del protocolo, mientras que el modelo analítico es mucho más compacto y más simple, en orden para obtener una solución factible analíticamente. Ambos modelos asumen las condiciones de canal ideales y no consideran, o bien, retransmisiones o Espacios Intertrama Extendidos (Extended Interframe Spaces - EIFS). Además, ellos incluyen algunas

inexactitudes/simplificaciones, particularmente en la manera como se modelan los procedimientos backoff y timeouts.

En [59-60], el modelo de simulación previo se extiende para incorporar otros aspectos, tales como tramas Beacons y EIFS. El modelo analítico mantiene las mismas características, pero con una mejor definición de algunos parámetros. Sin embargo, estos nuevos modelos sufren de los mismos problemas como el primero.

Aunque desde el punto de vista de la modelación, los modelos previos fueron contribuciones importantes, su implementación en la mayoría de las herramientas SPNs no puede hacerse sin algunas dificultades. Esto ocurre debido a la ausencia, en esas herramientas, de un formalismo que ayude a construir automáticamente algunas réplicas del modelo. Esto es esencial en la evaluación de escenarios compuestos por algunas estaciones (modelos). De otro modo, es necesario replicar manualmente cada modelo, lo que puede ser una tarea fuente de error y de un importante consumo de tiempo.

i.2.4 Modelo 802.11e con Redes de Actividades Estocásticas Jerárquicas (Hierarchical Stochastic Activity Networks-HSAN)

Distintos trabajos de investigación y el de la presente tesis, han adoptado un modelo de simulación tipo SPNs [61], que comprende una implementación precisa y detallada de la función de Acceso de Canal Distribuida Realzada (Enhanced Distributed Channel Access - EDCA) asociada a las estaciones de QoS, considerando tanto su perspectiva funcional como temporal. Este modelo ha sido validado por los autores y en la presente tesis, con contrastes realizados sobre los trabajos de [62-64]. A mayor conocimiento del tesista, este es el único modelo que implementa EDCA 802.11e usando una variante de Redes de Petri

El modelo fue implementado usando la herramienta Möbius [65-67], que soporta una extensión de SPNs, conocidas como HSAN [68]. Ellas proveen una aproximación de modelación jerárquica que se combina con soluciones analíticas de estado del arte y simulación. El formalismo de modelación es completamente similar a las SPN clásicas, con cuatro objetos primitivos: lugares, actividades, compuertas de entrada (input gates) y compuertas de salida (output gates). Las interacciones (flujo de datos) entre estos objetos se describen por medio de arcos. Ulteriores detalles se pueden encontrar en [68-74]. (Las Redes de Actividades Estocásticas Jerárquicas serán discutidas en más detalle en Capítulos posteriores y, especialmente, en el Apéndice A).

La herramienta Möbius permite variar el modelo y construir réplicas automáticamente del o los modelos. Esto es fundamental en la evaluación de escenarios compuestos por algunas estaciones, variando su proporción relativa y con tráfico diverso, tal como se aspiraba en la presente tesis.

En el presente trabajo de tesis se usó, para todos los escenarios de simulación, variantes realizadas sobre el modelo EDCA HSAN, corriendo sobre el simulador Möbius.

i.2.5 Direccionamiento del trabajo de tesis

Uno de los problemas principales en la diversidad de las aplicaciones sobre estaciones de trabajo wireless es la coexistencia de estaciones demandantes de distintos requerimientos de QoS, en el mismo dominio de la red. Por ello, son objeto de constante estudio los trabajos que planteen conclusiones y/o propongan variantes a los mecanismos de acceso wireless.

El medio físico en este caso, es un ambiente de comunicación relativamente abierto, y donde cualquier nueva estación puede comenzar una transferencia de tráfico de acuerdo a las reglas de acceso del medio. Por ello, uno de los objetivos principales de los trabajos de investigación, es cómo garantizar los requerimientos de temporización de las aplicaciones wireless, y las prestaciones esperadas, cuando el medio de comunicación es compartido por diverso tráfico multipropósito.

En la tesis, los modelos de simulación han sido usados para evaluar la conducta y proponer mecanismos que den seguridades de QoS, en diversos escenarios de comunicaciones WLAN, propuestos al efecto. La mayor parte del trabajo de investigación presentado en esta tesis se ha focalizado sobre la conducta promedio de las estaciones wireless modeladas, como el rendimiento, rendimiento relativo, retardos o tamaño de cola promedio. La razón principal para esta opción es que las aplicaciones objetivos son usualmente intolerantes a las pérdidas. Por ejemplo, la transferencia de un stream de video puede ser especificado para tolerar un promedio máximo de pérdidas del 10% de tramas, si las tramas perdidas estan “adecuadamente espaciadas”. Otros ejemplos de aplicaciones tolerantes a pérdidas son las aplicaciones de Voz sobre IP (Voice over IP-VoIP), donde un retardo de paquete promedio por debajo de 150 ms y un jitter promedio menor a 50 ms, es aceptable para la mayoría de las aplicaciones de usuario.

i.3) OBJETIVOS Y META DE LA INVESTIGACIÓN

Para el desarrollo de este trabajo, se proponen los siguientes objetivos y meta.

Los objetivos se han organizado como general y específicos. Estos últimos pretenden otorgar una mirada analítica al proceso de trabajo de investigación.

Objetivo general:

Demostrar que el algoritmo de sintonización EDCA MTDA, tiene en cuenta el estado dinámico del sistema, y por lo tanto, siempre trabaja en puntos de mejora de las consignas dadas de QoS, indiferente de los cambios aleatorios en el tráfico WLAN 802.11.

Objetivos específicos:

- Establecer las condiciones de diferenciación de tráfico dinámica que incremente la prioridad (y así la protección) de los flujos de tiempo real, manteniendo niveles de rendimiento o de pérdidas establecidos,
- Maximizar el rendimiento agregado obtenido en la red para los diferentes flujos, incluyendo los otros no prioritarios elásticos, y
- Asegurar la adaptación a los cambios sobre el estado de la WLAN (definido como la mezcla instantánea de los flujos activos) encontrando la asignación más apropiada de los recursos del canal en cada situación.

Meta:

El presente trabajo de tesis permitirá avanzar en el desarrollo de nuevas técnicas y metodologías para el estudio del comportamiento, análisis de tráfico y evaluación del rendimiento en WLANs con QoS.

Y en consecuencia, en sucesivos pasos de investigación, se pretende contribuir a precisar el impacto de las WLAN con QoS sobre:

1) las redes WLAN con infraestructura, y desde una perspectiva más general sobre
2) las redes LAN (cableadas) existentes, y
3) la QoS extremo a extremo en redes heterogéneas.

i.4) CONTRIBUCIONES PRINCIPALES DE ESTA TESIS

Las contribuciones principales de esta tesis son:

1. La especificación de un nuevo algoritmo de sintonización que llamamos MTDA (Algoritmo de Diferenciación de Tráfico Múltiple) que selecciona los parámetros EDCA futuros dados los valores

actuales y el estado corriente de la WLAN, con una inicialización efectiva, de rápida convergencia y diferenciación eficiente de múltiples tráficos wireless (voz, video y de mejor esfuerzo con distribución Pareto). Este es el primer algoritmo que ofrece un análisis más realista con estaciones combinando tráfico de voz, video y mejor esfuerzo [75-77].

2. Las conclusiones experimentales obtenidas del algoritmo MTDA evaluado por simulación utilizando múltiples escenarios sobre la capa física IEEE 802.11a con una velocidad de datos de 36 Mbps, en presencia de ruido de 1.10^{-4} BER. Se establecen con precisión las mejoras en las métricas de prestaciones y el grado de convergencia del algoritmo para encontrar el funcionamiento de mejora para el cumplimiento de las consignas de QoS. Los escenarios de simulación propuestos, analizan la conducta de las categorías de acceso más altas (voz y video) del mecanismo EDCA, cuando estas categorías interactúan entre sí, en presencia o ausencia de fuentes de tráfico de mejor esfuerzo. Se presentan conclusiones detalladas de diversas métricas [78-80].

3. La especificación y experimentación de un nuevo tipo de escenario que plantea la evaluación de las métricas cuando se cambia la proporción relativa de los tipos de tráficos en la red. Dentro del escenario se plantearon diferentes situaciones, según la proporción del tipo de estaciones, a saber:
   a. 60 % de estaciones de voz, 20 % de video y 20 % de mejor esfuerzo,
   b. 20 % de estaciones de voz, 60 % de video y 20 % de mejor esfuerzo,
   c. 20 % de estaciones de voz, 20 % de video y 60 % de mejor esfuerzo.

   Este es el primer trabajo que ofrece un análisis detallado usando variantes de escenarios conocidos, y que incorpora distintas situaciones de un nuevo escenario basado en la proporcionalidad. [78-80].

4. La especificación y experimentación de una nueva metodología de análisis cuantitativo para determinar el grado de impacto diferenciado de los parámetros EDCA (AIFSN, CWmin, CWmax y TXOP) para garantizar prioritariamente el rendimiento de voz, obteniendo los rendimientos de video y de mejor esfuerzo máximos posibles, mientras lo permita el tráfico de voz. La experimentación se realizó sobre los mismos escenarios descriptos en el apartado anterior. La metodología obtiene rápidamente conclusiones determinantes sobre la conveniencia de usar dinámicamente otros

parámetros a los estáticos usados por defecto en las redes IEEE 802.11e [81].

5. La determinación de los valores de los parámetros EDCA de mejora que aseguran mayores rendimientos y pueden utilizarse para la configuración manual de los mismos en los dispositivos Wi-Fi certificados WMM (Wi-Fi MultiMedia). La Alianza Wi-Fi y los líderes industriales de red en el mundo, definieron en 2004 los requerimientos fundamentales de la QoS en Wi-Fi a través de su certificación EDCA/WMM, adoptando el estándar IEEE EDCA 802.11e [81].

6. La demostración de que las características de mecanismo estándar EDCA IEEE 802.11e combinado con un algoritmo de sintonización son apropiadas para soportar todo tipo de tráfico de datos multimedia, de tiempo real y control automático en los ambientes administrativos e industriales de próxima generación [75-77].

7. La implementación de variantes del modelo de simulación sobre el simulador Möbius que describe EDCA IEEE 802.11e (Enhanced Distributed Channel Access – EDCA). Las variantes del modelo fueron usadas para el análisis de prestaciones de diversas métricas en cada una de las situaciones descritas en los apartados anteriores. A mayor conocimiento del tesista, éste es el primer trabajo que utiliza esta técnica de modelación como herramienta matemática para las contribuciones enumeradas [75-81].

i.5) MARCO TEÓRICO, EXPERIMENTOS E HIPÓTESIS

Hay un interés creciente en entender la conducta de los nodos de red (usuarios y dispositivos activos), y extender tal entendimiento a estudiar y mejorar el rendimiento, y productividad de las redes.

El escaso entendimiento del comportamiento de los nodos de red cableados e inalámbricos puede conducir a conclusiones o interpretaciones simplificadas, del estado de las redes en servicio o del diseño de las futuras redes, con la consiguiente falta de estabilidad en su infraestructura.

Se detallan a continuación las leyes teóricas, experimentales y de contrastación primarias y vinculadas con el presente trabajo, que involucran el desarrollo de nuevas metodologías y técnicas para la evaluación del comportamiento de las redes WLAN 802.11e, resolviendo la incertidumbre y acotando las estimaciones.

Marco Teórico

El trabajo de tesis es parte de la Teoría de Ingeniería de Tráfico de Redes de Datos. La Teoría de Tráfico de Redes es la aplicación de la teoría de la probabilidad a la solución de los problemas relacionados con: la planificación, la evaluación de performance, la operación, y el mantenimiento de los sistemas de comunicaciones.

El objetivo de la teoría es hacer medible el tráfico usando modelos matemáticos, derivar relaciones entre el grado de servicio y la capacidad del sistema, y convertir la teoría en una herramienta para la planificación de la inversión. Y el objetivo final de la Teoría de Redes de Datos es diseñar sistemas a un costo tan efectivo como sea posible, con un grado predefinido de servicio, cuando se conoce la demanda de tráfico futuro, y la capacidad de los elementos del sistema.

La tarea del Ingeniero de Tráfico de Redes es especificar métodos para controlar que el grado de servicio real satisfaga los requerimientos, y especificar acciones de emergencia cuando los sistemas estén sobrecargados u ocurran fallas técnicas. Para esta tarea se requieren métodos para predecir la demanda (medidas de tráfico), métodos para calcular la capacidad de los sistemas, y especificación de medidas cuantitativas para el grado de servicio.

El análisis de un sistema de comunicaciones requiere de un modelo del sistema. El modelo requiere conocimiento del sistema técnico, conocimiento de herramientas matemáticas disponibles, y la implementación del modelo en una computadora.

El modelo contiene 3 componentes principales: la estructura del sistema, la estrategia operacional, y las propiedades estadísticas del tráfico. La estructura del sistema está determinado técnicamente, y se puede obtener con cualquier nivel de detalle. La estrategia operacional se refiere a que un sistema físico dado puede usarse de diferentes formas para adaptar el sistema a la demanda de tráfico. Por ejemplo, en un sistema de comunicaciones, se aplican estrategias para dar prioridades y rutear el tráfico al destino, o en los sistemas telefónicos clásicos se usó lógica cableada para las estrategias, mientras en los sistemas modernos se hace por software, con mayor flexibilidad y adaptación. Finalmente, las propiedades estadísticas del tráfico son parte del modelo dado que las demandas del usuario o de las aplicaciones se modelan con propiedades estadísticas del tráfico.

Los modelos pueden clasificarse en tres clases:

- Modelos matemáticos o analíticos: son generales y frecuentemente aproximados. Optimizan los parámetros analíticamente o numéricamente. Son rápidos en los análisis.
- Modelos de simulación: donde pueden usarse datos medidos o datos artificiales desde distribuciones estadísticas. Son más demandantes de recursos y tiempo dado que no son generales. Cada caso individual debe simularse.
- Modelos físicos o prototipos: son mucho más demandantes de recursos y tiempo que un modelo de simulación.

Por sus características, se prefieren los modelos matemáticos, pero a veces es necesario aplicar simulación para desarrollarlos. Los prototipos se construyen algunas veces para testing final.

En este trabajo de tesis se ha aplicado la Teoría de la Ingeniería de Redes de Datos utilizando un modelo de simulación para la evaluación de las prestaciones y la operación del protocolo IEEE 802.11e de las Redes Wi-Fi, y establecer sugerencias técnicas para la mejora del rendimiento y el aseguramiento de la QoS.

Efectivamente, el punto de partida fundamental hacia el modelado es que el protocolo de red EDCA de la IEEE 802.11e, como todos los protocolos, se comporta y puede describirse como una máquina de estado finito. Esta máquina puede representarse con diversas herramientas matemáticas correspondientes a la teoría de colas, grafos dirigidos o cadenas de Markov. Se prefiere las SPNs (o más precisamente HSANs), como paradigma de modelación para sistemas de eventos discretos concurrentes, por las siguientes características:

1) Es un modelo matemático formal para describir los *estados* y *acciones,*
2) Tiene representación gráfica (un grafo con algunos tipos de elementos básicos: *lugares, transiciones y compuertas de entrada y salida*),
3) Es similar a los modelos de cola *clásicos* (representación distribuida de un estado),
4) Tiene s*implicidad* (muy pocas y muy simples entidades matemáticas en su definición),
5) Tiene g*eneralidad* (valida para la modelación de secuencias, elecciones, concurrencia, sincronizaciones, etc.)
6) Tiene a*decuación* (valida para expresar todas las posibles semánticas de concurrencia: intercalación, semántica de pasos, semántica de orden parcial, etc.),
7) Tiene *localidad* de estados y acciones (posibilidad de modelación progresiva, refinamiento y composición modular),

8) Existen técnicas de análisis para *validar* (cualitativamente) las propiedades del sistema (vivacidad, limitación, ausencia de abrazo mortal, etc.),
9) Posibilidad de interpretación temporizada (estocástica), obteniendo un formalismo válido para *evaluación de prestaciones* (análisis cuantitativo), y
10) Existen *herramientas* de diseño y análisis que implementan las técnicas de análisis cualitativo y cuantitativo.

Por lo expuesto, la HSAN asociada al protocolo EDCA 802.11e puede marcar índices de prestaciones o rendimiento, uno de los objetivos del presente trabajo.

Leyes Experimentales

La colección de muestras o trazas del tráfico de diferentes nodos wireless, y su ulterior modelación es la forma habitual de obtener conocimiento realista sobre el comportamiento o la conducta de los nodos de red y de su tráfico asociado, y de la red como un todo.

Casos de Contrastación

Se contrastaron los modelos con otros tipos de estudios resultantes de colecciones de trazas puras, de estudios analíticos o de modelaciones con otras herramientas matemáticas.

Hipótesis

La variación en la proporción relativa de diferentes tipos de tráficos de nodos wíreless con QoS tendrá un efecto diferenciado sobre el comportamiento y estado general de la red WLAN que integran.

i.6) ESQUEMA DE LA TESIS

El trabajo de tesis está organizado en los siguientes capítulos:

- El **Capítulo I** es una visión general de las tecnologías WLAN IEEE 802.11, Bluetooth y WiMAX; luego se analizan las tendencias futuras de crecimiento del trafico móvil total, y previsiones de la distribución de los dispositivos y de los tipos de tráficos futuros; y finalmente, se ha incluido un relevamiento de diversas propuestas de investigación de QoS en el estándar 802.11, resaltando que la línea específica en este caso es sobre el protocolo EDCA.

- En el **Capítulo II** se efectúa una visión general del modelo adoptado HSAN EDCA y del simulador Möbius sobre el cual se evalúa. El modelo HSAN sobre Möbius implementa la función EDCA principal en gran detalle, siguiendo cerradamente las especificaciones del estándar. Es también el primer modelo que cubre este protocolo usando una extensión de Redes de Petri (HSANs). Se demuestra que se ha podido repetir y validar la funcionalidad del modelo de Vasques EDCA HSAN, y comparar los resultados de rendimiento con autores de reconocida trayectoria internacional.

- En el **Capítulo III** se analiza la conducta del mecanismo EDCA, cuando interactúan entre si diferentes tipos de tráficos (voz, video, mejor esfuerzo, etc.), bajo una configuración por defecto. A conocimiento del tesista, esta es la primera experiencia de análisis exhaustivo, incluyendo nuevos escenarios de estudio. Se demuestra que la variación en la proporción relativa de diferentes tipos de tráficos de nodos wíreless con QoS tiene un efecto diferenciado sobre el comportamiento y estado general de la red WLAN que integran. Las variaciones en algunas métricas pueden alcanzar valores muy significativos. Por ejemplo, los rendimientos máximos de los tráficos de voz o video podrían variar un 20%.

- En el **Capítulo IV** se evalúan las limitaciones del mecanismo EDCA cuando se usan los parámetros estáticos por defecto. Con dicho objeto, se plantea una metodología en búsqueda de los valores de los parámetros que aseguren un mejor comportamiento. Se demuestra, en los diferentes escenarios, que con una selección apropiada de los parámetros, pueden alcanzarse mejoras individuales significativas de las métricas para cada tráfico y de la red toda. Se presentan los resultados de las métricas comparando la configuración de mejora con la configuración por defecto.

- En el **Capítulo V** se describe la propuesta y experimentación por simulación de un algoritmo de sintonización llamado MTDA. Se demuestra su funcionamiento en escenarios más realistas, combinando tráfico de voz, video y mejor esfuerzo. El algoritmo posee un arranque efectivo y rápida convergencia, y tiene en cuenta el estado dinámico del sistema, variando y adaptando los parámetros EDCA, en contraposición a mantener los valores estáticos por defecto. Pueden obtenerse en algunos escenarios ganancias significativas en las métricas de rendimiento, del orden del 45% para la red y del 70% para el tráfico de voz, como ejemplo particular. Además, MTDA complementa el protocolo EDCA

802.11e, para cumplir con las restricciones de QoS, aún en las condiciones de alta carga.

- En el **Capítulo VI** se presenta una secuencia de temas vinculados a la implementación práctica del algorimto MTDA, sus costos asociados, y las ganancias técnicas y económicas. Se discute la certificación EDCA/WMM introducida por la Alianza Wi-Fi y líderes industriales de las comunicaciones de red, que aseguran el soporte del estándar EDCA 802.11e. También se realiza un análisis de los mecanismos previstos en este estándar sobre el control de admisión de tráfico, y del posible cambio manual o automático de los parámetros EDCA. Luego, se presenta la ventaja que significa que el firmware almace en la memoria de los dispositivos las variables que contienen los parámetros EDCA. Efectivamente, como una consecuencia de ello, la implementación del código correspondiente al algoritmo de sintonización puede realizarse sin modificaciones (o con cambios menores) en el módulo del código de la función EDCA. Y por ello, se concluye que la optimización de la red y el cumplimiento de las restricciones de QoS, actualizando dinamicamente los parámetros EDCA, se realizaría a un costo relativamente bajo.

- Finalmente, en el **Capítulo VII** se discuten las conclusiones y se presentan las direcciones posibles que pueden surgir desde este trabajo.

El cuerpo principal de la tesis se completa con 4 Apéndices.

En los **Apéndices B y C** se presentan Figuras y Tablas adicionales a los análisis efectuados en los **Capítulos III y IV.**

En el **Apéndice A** se presenta sucesivamente las definiciones fundamentales de las Redes de Colas, las Redes de Petri y las Redes de Actividad con sus variantes. Se culmina con los modelos HSANs, dado que proveen facilidades para componer jerarquías de submodelos SANs, es decir, estructuras complejas, como es el caso de los escenarios de simulación utilizados para la evaluación del protocolo 802.11e. Estas herramientas de modelación son ampliamente usadas en los más variados ámbitos de aplicación.

Y en el **Apéndice D** se presentan las siguientes publicaciones vinculadas al presente trabajo de tesis:

- IEEE AINA 2013, Marzo 2013 "Quantitative Analysis of EDCA 802.11e in Different Scenarios",
- Revista IEEE Latinoamericana, Junio 2013, "Tuning Mechanism For EDCA 80211e EDCA Optimization" ,
- IEEE CONIELECOMP 2015, Febrero 2015, "An Evaluation of QoS for intensive video traffic over 802.11e WLANs - Quantitative analysis",
- Librería Digital IEEE Computer Society – Digital Libraty (CSDL), Marzo 2013, "Quantitative Analysis of EDCA 802.11e Different Scenarios",
- Journal of Computer Science and Technology (JCS&T), Abril 2013, "Throughput Quantitative Analysis of EDCA 802.11e in Differente Scenarios",
- CACIC 2012, Octubre 2012, "Mejorando el Rendimiento y QoS en Wi-Fi con Sintonización de Parámetros EDCA 802.11e",
- CACIC 2012, Octubre 2012, "Estudio sobre la Distribución de Tráfico Autosimilar en Redes Wi-Fi",
- ECEFI 2014, Mayo 2014, "Análisis por Simulación del Impacto de los Parámetros EDCA de la norma IEEE 802.11e - Rendimento Wi-Fi"
- WICC 2012, Mayo 2012, "Un mecanismo de Sintonización de Parámetros EDCA 802.11e: Algoritmo MTDA",
- WICC 2012, Mayo 2012, "Estudio sobre la distribución de tráfico autosimilar de redes wireless 802.11", y
- WICC 2012, Mayo 2012, "Impacto de las configuraciones de seguridad y el tipo de tráfico en redes WLAN 802.11".

CAPITULO I

VISIÓN GENERAL DE LA EVOLUCIÓN Y LAS TENDENCIAS DE LAS TECNOLOGÍAS Y LA QoS EN REDES INALÁMBRICAS

El capítulo suministra una breve discusión de la evolución y clasificación de las tecnologías inalámbricas y de las tendencias de los servicios que serán demandados desde dispositivos fijos o móviles sobre las mismas. Además, se presentan taxonomías de las diversas líneas de investigación cuyo objeto ha sido y es contribuir a la mejora del soporte de QoS en redes WLAN 802.11

I.1) INTRODUCCIÓN

A comienzo de la presente década, se vendieron más smartphones que computadoras personales, y los servicios y las aplicaciones Web integraron la gran mayoría de los nuevos programas que se desarrollaron. Por otro lado, la proliferación de dispositivos móviles y aplicaciones Web subraya el hecho de que los sistemas de información electrónicos influyen cada vez más en la vida privada de las personas, y en sus actividades profesionales y/o empresariales.

Además, las comunicaciones inalámbricas ofrecen mucho más que movilidad, y son susceptibles de ser vistas como una parte esencial de una infraestructura de red empresarial cuando:

- Se necesitan comunicaciones móviles,
- La comunicación debe tener lugar en un terreno hostil o donde se hacen difíciles las comunicaciones cableadas,
- El sistema de comunicaciones debe desplegarse rápidamente,
- Las facilidades de comunicaciones deben instalarse a un bajo costo inicial, y
- La misma información debe transmitirse a muchos lugares.

Sin embargo, los diseñadores y administradores de redes de datos no pueden pasar por alto las desventajas de las comunicaciones inalámbricas relativas a los medios guiados: i) La comunicación inalámbrica opera en un entorno menos controlado y es, por lo tanto, más susceptible a las interferencias, a la pérdida de la señal, el ruido, y escuchas, y ii) En general, las instalaciones inalámbricas tienen menores tasas de datos que las instalaciones guiadas.

En el caso de las tecnologías inalámbricas, caracterizadas por su extrema dependencia de las condiciones de entorno y su baja eficiencia en escenarios con múltiples dispositivos móviles, es crítico el soporte a niveles apropiados de la QoS.

En este Capítulo se plantea sucesivamente: La visión general de las tecnologías inalámbricas, Las tendencias futuras de servicios demandados en redes inalámbricas, y las líneas de investigación de QoS en redes wireless 802.11.

I.2) VISIÓN GENERAL DE LAS TECNOLOGÍAS INALÁMBRICAS

I.2.1 Tecnologías Inalámbricas

Los sistemas de comunicación inalámbricos cubren todas las posibilidades imaginables, desde los sistemas de menor cobertura, aplicables a las redes denominadas PAN (Personal Area Network), como puede ser Bluetooth, hasta sistemas que pueden cubrir la totalidad del globo terráqueo, como sistemas de comunicación basados en satélites. Esta evolución nos lleva a un entramado de siglas que resumen las posibilidades de conexión inalámbricas: Bluetooth, WiFi, WiMAX, 3G, GSM, ZigBee, etc. En la Figura 1.1 mostramos un análisis cualitativo de estas tecnologías según la cobertura y la velocidad proporcionada.

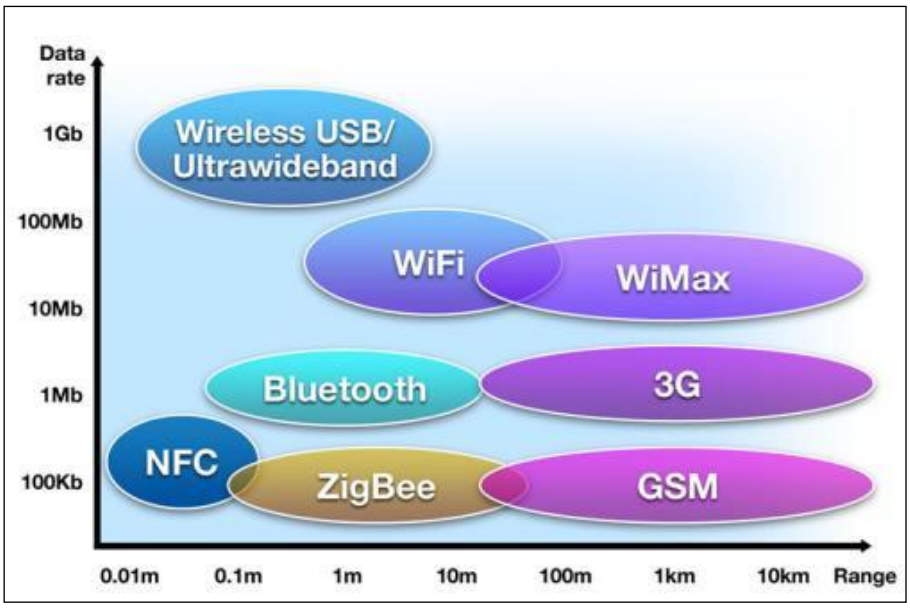


Figura 1.1 Tecnologías wireless en función de la cobertura y velocidad

I.2.2 Tecnologías Inalámbricas WPAN, WLAN y WWAN

Las redes inalámbricas (wireless) pueden clasificarse en tres grandes categorías Redes Wireless de Área Personal (Wireless Personal Area Networks - WPAN), Redes Wireless LAN (Wireless LANs - WLANs), y Redes Wireless WAN (Wireless Wide Area Networks - WWANs). Las WPANs operan en el rango de unos pocos metros, mientras que las WLANs operan en el rango de unos pocos cientos de metros, y las WWANs más allá de eso. De hecho, las wireless WWANs pueden operar en un amplio rango en cuanto a distancias, como: un área metropolitana, una jerarquía celular, o aún sobre enlaces interciudades a través de transmisiones microondas.

Las tecnologías representativas para las áreas WPAN, WLAN, y WWAN son: Bluetooth (BT), la IEEE 802.11 WLAN (frecuentemente conocida como Wi-Fi®), y WiMAX, respectivamente.

I.2.2.1 Tecnología WLAN

El Instituto de Ingenieros en Electricidad y en Electrónica (Institute of Electrical and Electronic Engineers - IEEE) definió tres mayores tipos de redes WLANs en 802.11–802.11 b y g, las cuales operan en la banda de frecuencias de 2.4 GHz, y la 802.11a, que opera en la banda de frecuencia de 5 GHz. Las bandas y frecuencias asignadas en 2.4 y 5 GHz están en la parte libre de licencias del espectro electromagnético, para ser usadas en aplicaciones industriales, científicas y médicas (Industrial, Scientific, and Medical - ISM), de modo que estas operaciones son frecuentemente llamadas de bandas ISM. Más recientemente, se ha propuesto una 802.11 WLAN de alta velocidad, conocida como 802.11n, que opera en ambas bandas de 2.4 y 5 GHz.

El modo más común de operación en 802.11 es el modo infraestructura (Figura 1.2), donde las estaciones se comunican con otras estaciones wireless y redes cableadas (típicamente Ethernet) a través de un punto de acceso (access point - AP). El otro modo es el modo ad hoc (Figura 1.3), donde las estaciones pueden comunicarse directamente, cada una con las otras sin la necesidad de un AP.

En el nivel MAC, las WLANs 802.11 involucran el uso de la técnica de Acceso Múltiple con Sensado de Portadora/Prevención de Colisiones (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance - CSMA/CA). Las estaciones vuelven al estado de escucha o reposo si detectan que otra estación está transmitiendo sobre el canal. La estación entonces espera un periodo aleatorio, después del final de la transmisión, antes que intente transmitir sobre el canal. En otro modo operativo, se usan tramas de

control tales como Request to Send (RTS) y Clear to Send (CTS), para facilitar la transferencia de datos reales. La trama de control CTS tiene la duración por la cual se le permite transmitir al nodo emisor. Otras estaciones sensan esta trama y esperan al menos la duración especificada, antes de sensar el enlace de radio nuevamente.

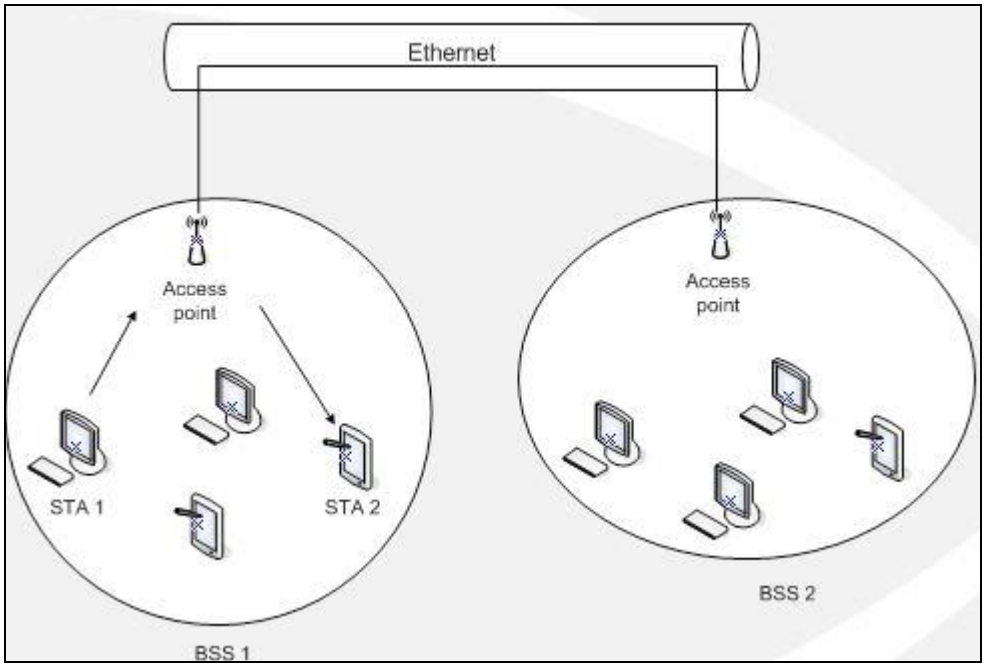


Figura 1.2 Modo infraestructura en Wi-Fi

Cuando los APs se conectan a una LAN, el sistema entero se conoce como Sistema de Distribución. Los APs realizan una función de integración, es decir, unen las LANs cableadas y wireless. En este escenario, las tramas de control wireless y las tramas de datos terminan en el AP, o son tuneladas desde los APs a un controlador centralizado sobre Ethernet (Figura 1.2).

Las estaciones se conectan a los APs a través de un proceso de escaneado. El escaneado puede ser pasivo o activo. En el modo pasivo, las estaciones buscan los APs para encontrar la mejor señal de AP (el cual contiene el Identificador de Conjunto de Servicios [Service Set Identifier – SSID], velocidades de datos y así, sucesivamente).

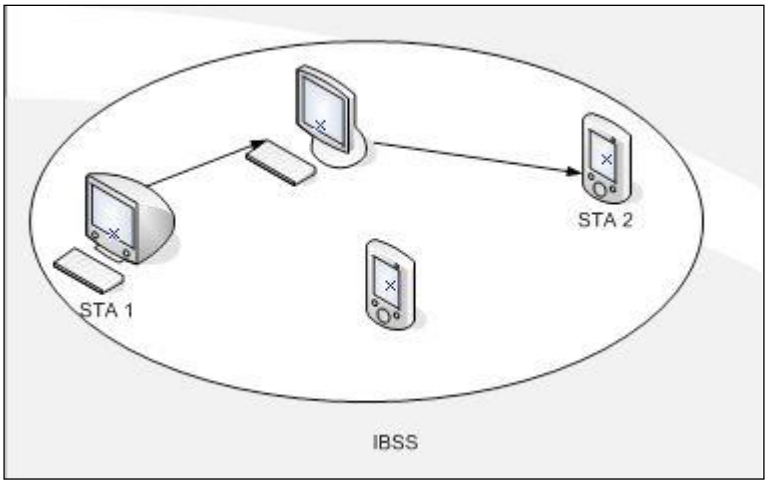


Figura 1.3 Modo ad hoc en Wi-Fi

Las tramas de AP, que las estaciones observan, son tramas de administración conocidas como la trama beacon o de prueba. En el modo activo, las estaciones inician el proceso difundiendo una trama de prueba. Todos los APs que reciben la prueba, envían una respuesta de prueba, ayudando a la estación a construir una lista de APs. La secuencia de una estación “conectándose” a un AP involucra dos pasos. El primero es de autenticación, donde la estación envía una trama de requerimiento de autenticación al AP. Dependiendo del modo de autenticación configurado, el AP puede aceptar o rechazar el requerimiento con una respuesta de autenticación. El segundo paso es de asociación, que es necesario para determinar las velocidades de datos soportadas entre el AP y la estación. Al finalizar la asociación, la estación puede transmitir o recibir tramas de datos.

Basados en el espaciado intertramas, el preámbulo, la encapsulación de header, y los reconocimientos requeridos para las tramas, el rendimiento real para los datos de usuario, estaría cerca del 50% de las velocidades absolutas.

A nivel físico, aunque las primeras versiones de 802.11 usaron Espectro Expandido por Salto de Frecuencias (Frequency Hopping Spread Spectrum - FHSS), 802.11b típicamente usó Espectro Expandido de Secuencia Directa (Direct Sequence Spread Spectrum - DSSS) para las velocidades de 1, 2, 5.5, y 11 Mbps. Ambos esquemas involucran la transmisión de una señal de banda ancha sobre un rango de frecuencias más amplio para mitigar la posibilidad de interferencia en cualquier frecuencia. Los nodos y los APs típicamente transmiten en la velocidad más alta posible, basadas sobre la relación señal a ruido existente.

La Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (Orthogonal Frequency-Division - OFDM) se usa en la tecnología subyacente en 802.11g y 802.11a. OFDM es una forma de Multiplexación por División de Frecuencia; normalmente, FDM usa múltiples canales de frecuencia para transportar la información de diferentes usuarios, en un simple transmisor y un simple receptor. OFDM usa una aproximación, donde las portadoras son totalmente independientes cada una de las otras. El ancho de banda total consumido con OFDM es el mismo con sistemas de simple portadora, aun cuando se usen múltiples portadoras, a causa de que la señal original se divide en varias señales. OFDM es más efectivo en manipular la interferencia de banda ancha y los problemas relacionados al desvanecimiento multitrayectoria, simplificando la construcción de los sistemas receptor.

Uno de los aportes significativos del estándar wireless 802.11n son las antenas Multiple Entrada Múltiple Salida (Multiple Input Multiple Output- MIMO). La transmisión de varios streams de datos sobre diferentes canales espaciales, algunas veces conocidos como Multiplexación por División Espacial (Space Division Multiplexing - SDM), también permite enviar una mayor cantidad de datos sobre el aire.

Wi-Fi se ha constituido en la tecnología de acceso inalámbrico por excelencia para las redes LAN, y será la tecnología objetivo del presente trabajo de tesis.

I.2.2.2 Tecnología BLUETOOTH

Bluetooth comenzó como un protocolo de reemplazo cableado para la operación a cortas distancias. Un ejemplo típico es la conexión de un teléfono a una PC, la cual a su vez, usa el teléfono como un modem (Figura 1.4). La tecnología opera en la banda no licenciada de 2.4 GHz ISM. El estándar usa tecnología FHSS.

Bluetooth responde a una categoría de tecnologías Wireless de Rango Corto (Short Range Wireless - SRW) originalmente pensada para remplazar los cables para conectar dispositivos electrónicos fijos y portátiles. Es típicamente usada en teléfonos móviles, handset sin cables, y headset de manos libres (aunque no limitadas a estas aplicaciones). Las especificaciones detallan la operación en tres clases diferentes de potencias: para distancias de 100 metros (rango largo), 10 metros (rango ordinario) y 10 cm (rango corto).

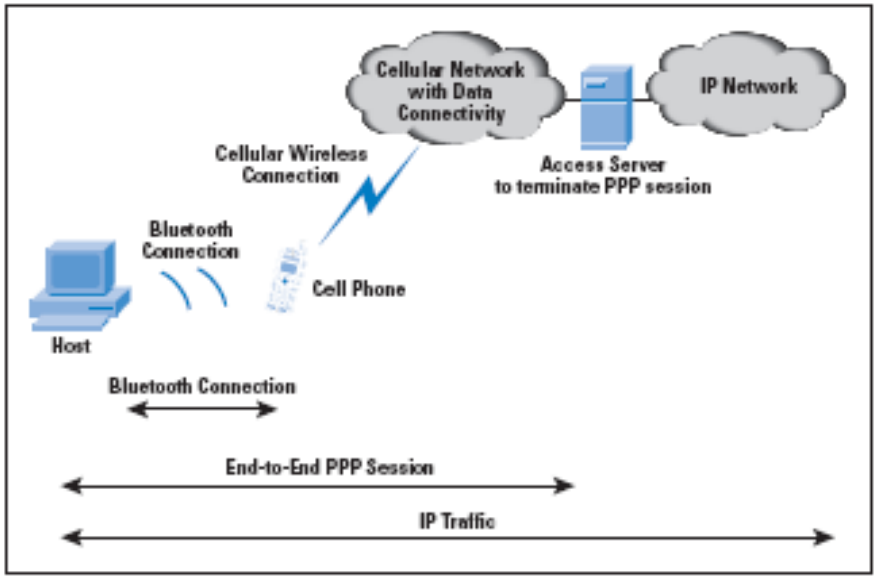


Figura 1.4 Ejemplo de uso tecnología Bluetooth

Bluetooth puede operar en los modos lógicos point-to-point y point-to-multipoint. Los dispositivos que usan el mismo canal Bluetooth son parte de una piconet que incluye un master y uno o más esclavos. Bluetooth incluye múltiples perfiles que se correlacionan con el tipo de servicios que están disponibles dentro de los nodos Bluetooth. Por ejemplo, el perfil de una fuente de audio, el perfil headset, el perfil de impresión básico, el perfil de networking dialup, un perfil de fax, un perfil de telefonía cordless, un perfil de dispositivo de Interface humana (Human Interface Device - HID), y así sucesivamente.

El rango de Bluetooth puede variar desde un rango de baja potencia (1 mW) para dispositivos Class 3, 10 metros (2.5 mW) para dispositivos Class 2, a 100 metros (100 mW) para dispositivos Class 1. La versión 1.2 de Bluetooth ofrece una velocidad de datos de 1 Mbps, y la versión 2.0 con Velocidad de Datos Realzada (Enhanced Data Rate - EDR) soporta una velocidad de datos de 3 Mbps.

Hace unos pocos años, alguna literatura comercial enfatizó que Bluetooth y Wi-Fi eran tecnologías en competencia. Aunque ambas operan en el espectro ISM, fueron inventadas por razones diferentes. Mientras Wi-Fi fue frecuentemente vista como un Ethernet wireless, Bluetooth fue inicialmente vista como una tecnología de reemplazo de cable. Usos tales como networking dialup y headsets wireless direccionaron este modo de uso. Recientemente, la discusión se ha focalizado más sobre la coexistencia que sobre la competencia, a causa de que ellas sirven primariamente a diferentes propósitos. Hay aún

algunos compromisos relacionados a su coexistencia, debido a que operan sobre la misma banda ISM de 2.4 GHz.

I.2.2.3 Tecnología WIMAX

WiMAX significa Worldwide Interoperability for Microwave Access y está definido bajo el grupo de trabajo IEEE 802.16. Dos estándares existen para WiMAX: 802.16d de 2004 para acceso fijo, y 802.16e de 2005 para estaciones móviles. El forum WiMAX certifica los sistemas para compatibilidad bajo estos dos estándares, y también define la arquitectura de red para la implementación de redes basadas en WiMAX.

WiMAX puede ser clasificada como una tecnología de acceso de última milla similar a DSL, con un rango típico de 3 a 10 km y velocidades de hasta 5 Mbps por usuario, con una cobertura sin línea visual.

Las redes de acceso WiMAX pueden operar sobre el espectro licenciado y no licenciado, en varias regiones o países, aunque las implementaciones de espectro licenciado son más comunes. La operación WiMAX está definida sobre frecuencias entre 2 y 66 GHz.

Las redes WiMAX son frecuentemente usadas para concentración de datos de APs Wi-Fi. De hecho ellas están frecuentemente visualizadas como reemplazo para las implementaciones actuales de redes metro Wi-Fi, que usan 802.11b/g para acceso a clientes y 802.11a para conectar a las otras partes de la red.

El estándar 802.6d de 2004 usa OFDM similar a 802.16a y 802.16g, mientras que 802.16e de 2005 usa una tecnología llamada Acceso Multiplexado por División de Frecuencia Ortogonal Escalable (Scalable Orthogonal Frequency Division Multiplexed Access- (S-OFDMA). Esta tecnología es más apropiada para los sistemas móviles a causa de que usa subportadoras que habilitan los nodos móviles para concentrar la potencia sobre las subportadoras, con las mejores características de propagación (a causa de que un ambiente móvil tiene más variables dinámicas).

WiMAx fue pensado para soportar voz, servicios multimedia y servicios prioritarios, tales como llamadas de emergencia voz. También para soportar interface con gateways de internetworking y de medios, que el servicio permita más que una sesión de voz por abonado, como así también sesiones de voz y datos simultáneos. Y el soporte a los servicios de broadcast y multicast IP sobre redes WiMAX.

Además, WiMAX fue evaluado como un reemplazo para los servicios celulares. Aunque luego, WiMAX se posicionó como una opción de conectividad de datos para locaciones remotas, especialmente donde sería difícil instalar nuevos cables de cobre u óptico.

Aunque existen implementaciones de algunos Kms en Wi-Fi, es una simplificación pensar que WiMAX y Wi-Fi son equivalentes. WiMAX opera en el espectro licenciado y usa una arquitectura de red diferente. Wi-Fi está en un espectro no licenciado y usa un AP a la arquitectura Ethernet cableada.

I.3) TENDENCIAS FUTURAS DE SERVICIOS DEMANDADOS EN REDES INALÁMBRICAS

Los servicios de datos wireless móviles están en camino a satisfacer las necesidades de muchos usuarios de la red. Los servicios de voz con dispositivos móviles ya son considerados como una necesidad por la mayoría de la gente. Y los dispositivos móviles para los servicios de datos, video y TV se están convirtiendo rápidamente en una parte esencial de la vida de los consumidores.

La posibilidad de acceso wireless a la red, ha demostrado ser un fenómeno transformador y ampliamente utilizado por los consumidores, y como así también por segmentos empresariales, con impresionantes captaciones tanto en los países desarrollados y los mercados emergentes. Los suscriptores móviles están creciendo rápidamente y la demanda de ancho de banda debido a los datos y video va en aumento.

El tráfico de datos móvil total se espera que crezca a 15.9 Exabytes por mes en 2018, 11 veces más que en 2013 (Figura 1.5), y el tráfico de datos móvil crecerá en una tasa compuesta de crecimiento anual (Compound Annual Growth Rate - CAGR) de 61 % desde 2013 a 2018. (Un Exabytes son 1000 millones de Gbytes). Durante 2014, la cantidad de dispositivos móviles conectados excederá la población mundial. Los smartphones alcanzarán el 66% del tráfico de datos móviles en el año 2018 (Fuente: Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2013–2018)

La Figura 1.6 muestra la diversificación a nivel de dispositivos responsables del crecimiento de tráfico de datos. Las laptops y las netbooks continuarán generando una cantidad importante de tráfico, pero las más nuevas categorías de dispositivos, tales como smartphones, tablets y nodos M2M (machine-to-machine) comenzarán a sumar una porción más significativa del tráfico para el 2018. Globalmente, los

dispositivos móviles y las conexiones crecerán a 10.2 billones para el 2018 en un CAGR del 8 %.

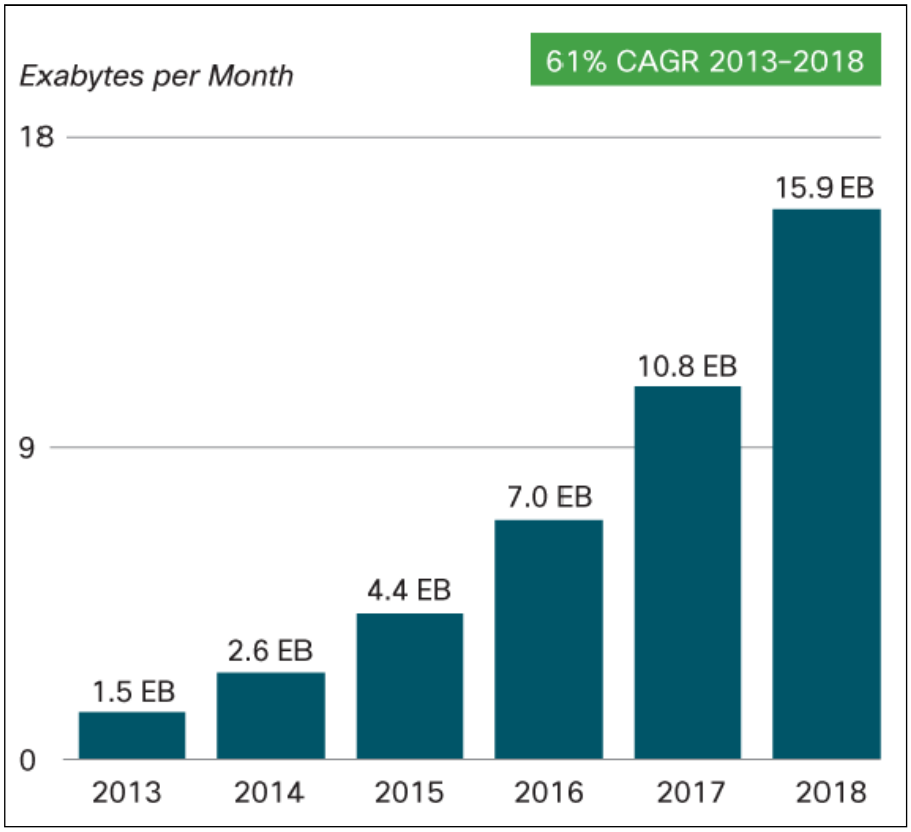


Figura 1.5 Tendencias de crecimiento del tráfico de datos móvil total

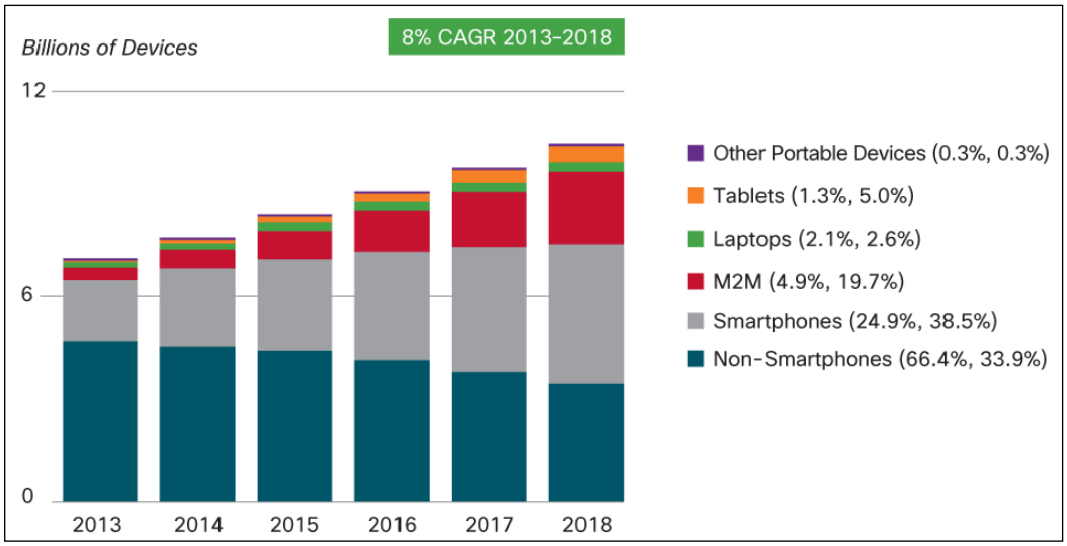


Figura 1.6 Tendencias de diversificación a nivel de dispositivos

La proliferación de handsets, tablets y laptops sobre redes móviles es un mayor generador de tráfico, a causa de que estos dispositivos ofrecen al consumidor contenidos y aplicaciones no soportadas por generaciones previas de dispositivos móviles. Con muestra la Figura 1.7, un simple Smartphone puede generar tanto tráfico como 49 teléfonos celulares de características básicas; un tablet tanto como 127 teléfonos celulares, y una simple laptop como 227.

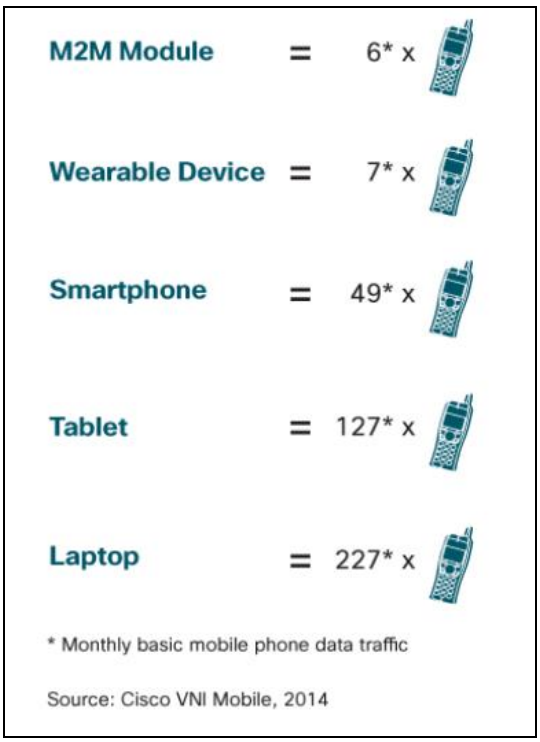


Figura 1.7 Tráficos generados por diversos dispositivos referidos a un celular básico

El tráfico promedio por dispositivos wireless se incrementará rápidamente en los próximos años. Los dispositivos móviles incrementan el tiempo de contacto individual con la red, y será común que este contacto eleve los minutos totales por usuario. Pero debe destacarse que no todo el incremento en el tráfico de datos móvil podrá atribuirse a la migración a la red móvil desde la red fija. Es de esperar que surjan varias aplicaciones exclusivamente móviles, tales como servicios basados en la ubicación, o aplicaciones de comercio móviles, por ejemplo.

Las proyecciones de los próximos 5 años muestran un crecimiento sin cesar de vídeo móvil, pese a las condiciones macroeconómicas en muchas partes del mundo. A causa de que los contenidos de video móvil tienen mucho más altas tasas de bits que otros tipos de contenidos móviles, el video móvil generará mucho del crecimiento de tráfico móvil futuro. El video crecerá a un CAGR de 61 % por ciento entre 2013 y 2018,

con el crecimiento más alto de cualquier categoría de aplicación móvil. De los 15.9 Exabytes por mes que circularán en la red móvil por el año 2018, 11 Exabytes serán debido a video (Figura 1.8).

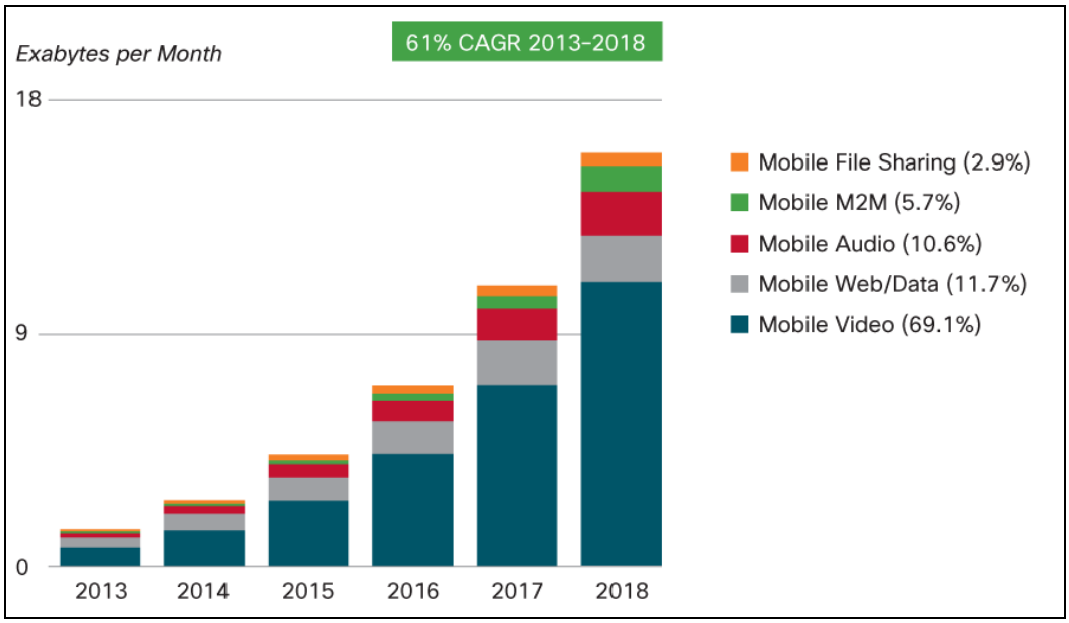


Figura 1.8 Tendencias de la proporción de los tipos de tráfico móvil futuro

La capacidad de la red debe aumentar para disponer de más banda ancha móvil. El acceso de los consumidores a los datos, a los servicios de vídeo y de voz de dispositivos wireless puede apoyar eficazmente las tendencias de uso móvil y mantener los costos de expansión de la infraestructura.

Las tecnologías inalámbricas, como objetivo, ofrecerán experiencias anteriormente sólo disponibles a través de las redes cableadas. Los próximos años serán cruciales para los operadores y proveedores de servicios para planear futuras implementaciones de red, que deberán crear una plataforma adaptable sobre la cual desplegar la multitud de móviles, y otros dispositivos, con capacidad de aplicaciones del futuro.

En el trabajo de tesis se evaluaron diversos escenarios, en los que no están ausentes las tendencias en la diversidad de dispositivos inalámbricos y el impacto creciente del tráfico de video en la proporción relativa del tráfico móvil.

I.4) LINEAS DE INVESTIGACIÓN DE QoS EN REDES WIRELESS 802.11

I.4.1 Hacia la mejora de QoS en 802.11

Comparada con una infraestructura cableada, las LAN wireless (WLAN) tienen ventajas únicas, tales como una capacidad de ancho de banda amplia y bajo costo de despliegue. Gracias a la tecnología provista por la IEEE 802.11, el mercado WLAN ha experimentado un crecimiento explosivo combinado con las LAN cableadas, o en hot spots privados y/o públicos, para mencionar algunas aplicaciones. Con el despliegue de las WLANs de una forma ilimitada usando APs, los usuarios wireless pueden acceder a servicios de tiempo real e Internet, virtualmente en cualquier momento, en cualquier lugar, mientras suman la flexibilidad de movilidad y conectividad garantizada.

IEEE 802.11 se diseñó para únicamente servicios de mejor esfuerzo. La ausencia de un mecanismo incorporado para soportar servicios de tiempo real hacía muy difícil proveer garantías de QoS para aplicaciones multimedia sensibles al rendimiento y los retardos. Por lo tanto, fue necesaria la modificación del estándar 802.11 existente.

Aunque el IEEE 802.11e [82] fue una propuesta para realzar la diferenciación de servicio, la garantía de QoS en 802.11 incluyó amplios estudios en diversos aspectos, que tradicionalmente se han organizado en: a) diferenciación de servicio en la capa MAC, b) control de admisión y reserva de ancho de banda en MAC, y c) adaptación de enlace en la capa física. Los diferentes esquemas de QoS, no consideran aquellos basados en capas superiores dado que 802.11 especifica las tecnológicas de acceso en las capas MAC y PHY.

I.4.2 Diferenciación de servicios en capa MAC

Las propuestas de los diversos mecanismos investigados para la provisión de soporte efectivo de diferenciación de servicios se basan en la DCF original. Salvando EDCA 802.11e, estos mecanismos no proveen por si solos cualquier garantía de QoS, sino solo mejoras al servicio de mejor esfuerzo, y evitan un rediseño total del protocolo MAC original.

La Figura 1.9 muestra una taxonomía jerárquica de los mecanismos de QoS que habilitan la diferenciación de servicio en 802.11. Básicamente, la diferenciación de servicio se obtiene por dos métodos principales: basados en prioridades y basados en planificación equitativa [83]. Mientras la primera forma limita el acceso al canal a diferentes clases de tráfico por parámetros de contención priorizada, la última particiona el

ancho de banda del canal equitativamente regulando los tiempos de espera de las clases de tráfico en proporción a los pesos dados. Los parámetros sintonizables para ambas aproximaciones son el tamaño de la venta de contención CW, el algoritmo backoff y los espacios intertrama.

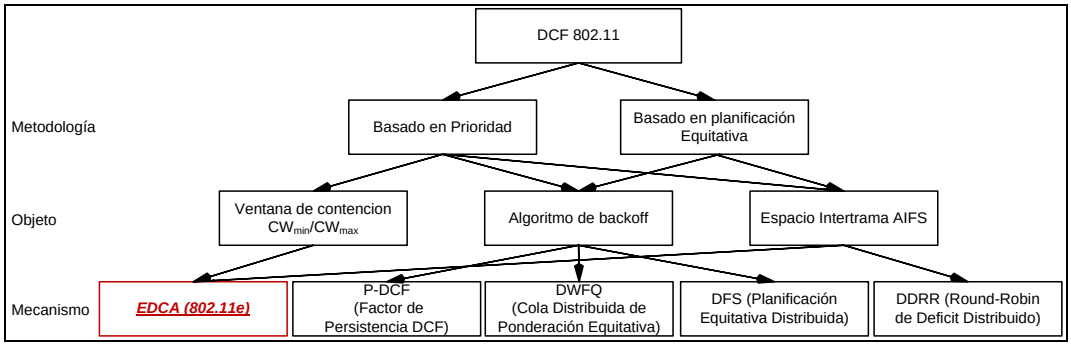


Figura 1.9 Taxonomía de mecanismos de diferenciación de servicios

Los mecanismos de diferenciación de servicio específicos son:

I.4.2.1 DCF Realzada (EDCA) [82]

El mecanismo EDCA (previamente conocida como EDCF) pasó de la investigación a ser una parte principal del estándar 802.11e para la diferenciación de servicio. Prioriza las categorías de trafico TC o de acceso AC, a través de diferentes parámetros de contención EDCA, incluyendo el espacio intertrama de arbitrio AIFS (arbitrary interframe space - AIFS), el tamaño de ventana de backoff máximo CWmax y mínimo CWmin, y las oportunidades de transmisión TXOP, entre otros. Aunque todas las categorías de tráfico se mantienen usando el mismo método de acceso, tienen diferentes probabilidades de ganar la contención del canal diferenciando los parámetros del mecanismo. EDCA permite cualquier combinación de estos parámetros de contención de acuerdo a las necesidades del proveedor de servicio. Ha sido habitual adoptar las sugerencias del estándar sobre el uso de valores estáticos por defecto de estos parámetros. El presente trabajo de tesis se focalizó sobre este mecanismo EDCA, en la búsqueda de la combinación dinámica de los parámetros de mejora que aseguren el cumplimiento de consignas de QoS para las clases de tráficos presentes en la red WLAN (Figura 1.9).

En los siguientes apartados se repasan algunos mecanismos complementarios que fueron oportunamente propuestos para dar QoS a la DCF original. Estos mecanismos quedaron relegados, dado que EDCA 802.11e se constituyó en norma, planteando un nuevo componente de la capa MAC para Wi-Fi.

I.4.2.2 DCF con Factor de Persistencia (P-DCF) [84]

En este algoritmo, se utiliza una versión p-persistente del protocolo MAC 802.11 para múltiples clases de tráfico con QoS. La probabilidad de transmisión usada en la versión p-persistente se convierte al valor del temporizador del backoff de retransmisión en 802.11. Cada clase de trafico tienen asociada un factor de persistencia P (las clases de más alta prioridad tienen un P más pequeño). En una etapa backoff, en cada tiempo de slot, se genera un número aleatorio r distribuido uniformemente. Cada flujo detiene el backoff y comienza la transmisión solamente si r>P, en el tiempo de slot actual, sino ocurrió ninguna transmisión en los tiempos de slots previos. Por lo tanto, el intervalo de backoff es una variable aleatoria distribuida genéricamente con parámetro P. Con el uso de resultados analíticos, cada estación puede realizar una sintonía fina de las probabilidades de transmisión para las diferentes clases de tráfico.

I.4.2.3 Cola Distribuida de Ponderación Equitativa (DWFQ) [85-86]

En esta propuesta se distribuye proporcionalmente por ponderación el ancho de banda disponible, entre los flujos que compiten por una transmisión. La compatibilidad hacia atrás con las terminales 802.11 sin QoS se obtiene con el uso de pesos por defecto. Se han propuesto dos algoritmos diferentes que usan esta propuesta. En el primero, el tamaño de la ventana de backoff CW de un flujo de tráfico cualquiera, se ajusta en base a la diferencia entre el rendimiento real y el esperado. Si el rendimiento real es más bajo que el rendimiento esperado, CW se decrementará para incrementar la prioridad del flujo, y viceversa. En el segundo algoritmo, se calcula una relación Li=Ri/Wi, donde Ri es el rendimiento actual y Wi el peso correspondiente de la estación i-esima. Una estación puede ajustar su CW, comparando su propio Li con los de otras estaciones; por ejemplo, si su Li es más pequeño que aquellos de otras estaciones, decrementará su CW.

I.4.2.4 Planificación Equitativa Distribuida (DFS) [85-87]

La idea principal de DFS se basó en la planificación equitativa, pero asignando la ponderación de los flujos de paquetes que comparten el canal, sobre el intervalo backoff de cada tráfico. El intervalo de backoff (BI) depende de la longitud de paquete y la clase de tráfico, y con este algoritmo se permite la transmisión de la estación con BI más pequeño. Para el flujo i-esimo, BI=ρ.escala.factor.Li/ϕ*i*, donde BIi es el intervalo backoff, Li es la longitud de paquete, ϕ*i* es el peso (los pesos de las clases de rendimiento más altas son más grandes que aquellos de las clases más bajas) y ρi es una variable aleatoria distribuida uniformemente en [0.9, 1.1]. ρi se introduce para minimizar la colisión causada por las

múltiples estaciones con el mismo intervalo de backoff. Dos características interesantes de esta propuesta es que puede ser implementada sin usar un coordinador centralizado, para arbitrar el acceso al medio, y con simples modificaciones del estándar IEEE 802.11.

I.4.2.5 Round Robin de Déficit Distribuido (DDRR) [88]

En este mecanismo se propuso una asignación de ancho de banda basada en una planificación round robin de déficit distribuido, que traslada los requerimientos de rendimiento del usuario en valores del parámetro espacio intertrama MAC. Este seria otro ejemplo, de una alternativa que ofrece como ventaja su baja complejidad en la implementación. En el algoritmo, a la clase de rendimiento i-ésimo de la estación j-ésima se asigna una tasa de *quantum de servicio* (*Qi,j*) igual al rendimiento que requiere, y un contador de déficit (DC*i,j*) que acumula la tasa de *Qi,j* y se decrementa por la longitud de paquete, si se transmite un paquete. DC*i,j* se usa para calcular el espacio intertrama (IFS*i,j*), el cual es el tiempo de espera antes de que comience la transmisión o el backoff, dependiendo si se usa backoff. Un DC*i,j* mayor resulta en un más pequeño IFS*i,j*. Además, para minimizar la colisión entre las estaciones con el mismo contador de déficit, puede adoptarse la randomización de IFS*i,j* sino se usa un esquema de backoff.

Comparando los esquemas basados en planificación equitativa, los mecanismos basados en prioridad requieren simultáneamente menos modificaciones del método de acceso DCF existente y proveen soporte de QoS para las aplicaciones de tiempo real. Con la demanda imperativa de transmitir datos de video/voz sobre las WLANs, la función EDCA del estándar IEEE 802.11e ganó el interés de la mayoría de los miembros de la comunidad de investigación. Y luego de establecido el estándar, diversas líneas de investigación han continuado la búsqueda de su optimización, para asegurar QoS con las técnicas de diferenciación de servicios.

I.4.2.6 Visión general de la diversidad de trabajos de mejora de IEEE EDCA 802.11e desde la diferenciación de servicios

Diversos trabajos han analizado el comportamiento de los parámetros EDCA, utilizándolos como variables de ajuste en sus modelos de simulación. En [89] se analiza las prestaciones de la capa MAC IEEE 802.11e utilizando la herramienta NS-2, y una combinación de tráfico de audio, video MPG4 y TCP. En el trabajo se verificó que pequeños valores de contención producen altos niveles de caída de paquetes y aumentan la probabilidad de colisión. Mientras que en [90] se propone un algoritmo que asigna valores aleatorios para la ventana de contención y para los

espacios de intertrama de arbitrio, en función de la probabilidad de acceso exitoso y de colisiones que le corresponde a una categoría determinada de tráfico. Y en el artículo [91] donde se muestra analíticamente y por simulación el rendimiento del retardo y del tráfico sensible puede mejorarse con escalar los parámetros CWmin y TXOP en igual proporción. La modelación es analítica considerando un escenario de 6 estaciones con tráfico de voz y de mejor esfuerzo con tráfico de distribución Poisson.

Otros trabajos recientes se han focalizado sobre mejoras a nivel MAC, proponiendo agregados o ajustes sobre los estándares IEEE 802.11. Por ejemplo, en [92] se propone un algoritmo de detección de estaciones con conductas desordenadas (maliciosas) que permite identificarlas y aplicarles penalizaciones no enviando paquetes ACK (reconocimiento). Así se propone una provisión ordenada de los recursos compartidos. Se modeló el estándar IEEE 802.11e usando NS2 y escenarios de 8 estaciones móviles de tráfico CBR. Otro caso es el trabajo descrito en [93] donde se presentan tres versiones de un nuevo protocolo MAC para las redes IEEE 802.11 que se basa en un procedimiento de reserva de dos pasos. En el primer paso se ataca el problema de las estaciones ocultas y en el segundo se asegura la compatibilidad entre EDCA IEEE 802.11e y IEEE 802.11. El modelo se simuló sobre NS2 con estaciones de tres tipos de tráfico CBR, en un ambiente sin errores.

Mientras que en [94] se propone un mecanismo para resolver el problema de la colisión interna (Mechanism Internal Collision - MIC) para mejorar las prestaciones de EDCA. El objetivo principal es decrementar el tiempo backoff de la categoría de acceso (AC) con baja prioridad. Se utiliza un modelo de cadenas de Markov y se contrasta usando el simulador NS-2. En [95] se presenta un protocolo WLAN que resuelve la contención basada en tonos por señalización fuera de banda. El trabajo también incluye un estudio de prestaciones con resultados obtenidos analíticamente y por simulación. Entre estos trabajos, resulta de interés el artículo [96] que propone un nuevo modelo de decremento backoff que conserva la simplicidad de los modelos DCF tradicionales, teniendo en cuenta la posible correlación que puede presentarse cuando bajo condiciones de saturación el slot inmediatamente siguiente a una transmisión exitosa puede ser solo obtenido por la estación que ha transmitido. La modelación se realiza con cadenas de Markov.

Finalmente, existe una gama amplia de trabajos concentrados en variantes o análisis de las técnicas de modelación. Por ejemplo, en [97] se plantea una alternativa a los modelos analíticos de EDCA cuyas estadísticas son probabilidades de transmisión y colisión por slots. En el

trabajo se propone y describe una metodología que calcula estadísticas en puntos fijos generales de computación del modelo, e incluye métricas de bajo nivel. El escenario incluye modelación analítica y con NS2. Los flujos de tráfico se clasifican de baja y alta prioridad. Mientras que en [98] se sugiere el uso del test chi-cuadrado para detectar las malas conductas de backoff en las redes EDCA IEEE 802.11e, y se lo compara con otros métodos conocidos en la literatura. Para los ensayos se supone estaciones con tráficos de voz, video y mejor esfuerzo usando el simulador NS-2.

Como una variante a las técnicas habituales de modelación, en [99] se propone un modelo analítico de CSMA con ventana de contención de tamaño fijo para caracterizar el funcionamiento de EDCA. Se establecen resultados del rendimiento y retardo para CSMA p-persistente, usando diversas combinaciones de los parámetros EDCA. Y en [100] se presenta un modelo de DCF IEEE 802.11 usando fuentes de tráfico heterogéneas con colas M/M/1/k. Los resultados muestran el impacto de la presencia de diferentes tipos de fuentes de tráfico y bajo diferentes cargas de red. El modelo combina cadenas de Markov y teoría de colas, y las estaciones transmiten tráfico Poisson y CBR.

En esta enumeración y visión general de artículos referenciales, se han excluido los modelos analíticos y los algoritmos de sintonización de EDCA IEEE 802.11e, que serán tratados con más detalle en los Capítulos 2 y 5, respectivamente.

I.4.3 Control de admisión y reserva de ancho de banda

La diferenciación de servicio no trabaja bien bajo condiciones de altas carga de tráfico [101]. Los retardos por saturación extremadamente grandes pueden conducir a fallas en las aplicaciones de soporte multimedia, especialmente aquellas con estrictas demandas de QoS. En este caso, se vuelve necesario introducir el control de admisión, y la reserva de ancho de banda para garantizar la QoS de tráfico existente.

A diferencia de lo que sucede en las redes cableadas, especialmente las conmutadas, en las redes wireless IEEE 802.11, un nodo wireless tiene un pobre conocimiento de la condición exacta de la red, y así no puede tomar una decisión exacta sobre si se debe o no admitir un nuevo flujo. Además, con el mecanismo de acceso de canal CSMA/CA basado en contención de 802.11, la provisión de ancho de banda es casi imposible, conduciendo solo a garantizar una débil QoS. A causa de estas dos mayores diferencias, es completamente difícil el control de admisión y la reserva de ancho de banda en una red wireless IEEE 802.11e. La Figura 1.10 muestra una taxonomía jerárquica de los

mecanismos de QoS, basados en algunas propuestas tempranas para habilitar el control de admisión y la reserva de ancho de banda en 802.11.

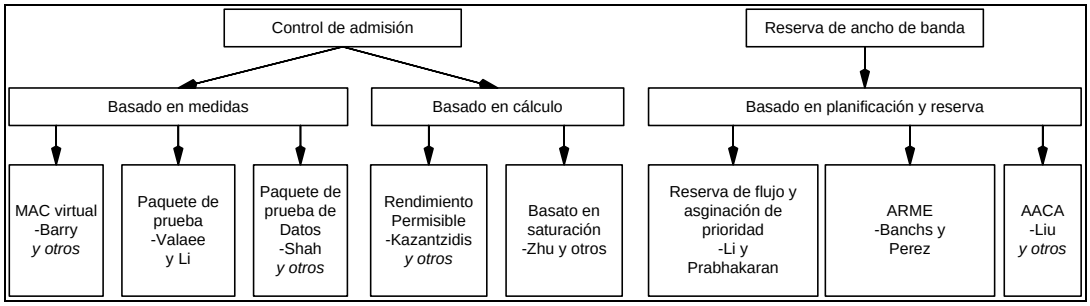


Figura 1.10 Taxonomía de mecanismos de control de admisión y reserva de ancho de banda

En general, los esquemas de control de admisión requieren menos modificaciones a los estándar 802.11 que los esquemas de reserva de ancho de banda. Básicamente, los esquemas de control de admisión pueden ser ampliamente clasificados en métodos basados en medidas y métodos basados en cálculo. En los esquemas basados en medidas, las decisiones de control de admisión se hacen en base a las mediciones del estado de la red existente, tales como rendimiento y retardo. En el otro extremo, los esquemas basados en cálculo construyen ciertas métricas o criterios de performance para evaluar el estado de la red [102]. Algunos algoritmos normalmente computan la cantidad total de recursos disponibles en la red, lo que es normalmente impráctico al momento de la implementación. Otros evalúan si hay suficientes recursos para satisfacer la demanda de ancho de banda para un nuevo requerimiento entrante que se quiere sumar a la carga actual.

A continuación se describen brevemente algunos algoritmos fundamentales, dentro de la taxonomía, que introdujeron aspectos relevantes para contribuir a la QoS sobre DCF, y a las normas e implementaciones reales. Y lógicamente, para la definición de los algoritmos de control de admisión asociados a la norma EDCA 802.11e, cuyo detalles se presentarán en otros capítulos.

I.4.3.1 Control de admisión basada en mediciones

I.4.3.1.1 MAC Virtual [103]

Este mecanismo se basa en dos algoritmos de estimación distribuida. Un algoritmo de MAC virtual (VMAC) monitorea pasivamente el canal de radio y estima localmente los niveles de servicio disponibles. El algoritmo aproxima estadísticas relacionadas a QoS como retardos, colisión de paquetes, paquetes perdidos y variación de retardo. Además,

un algoritmo de Fuente Virtual (VS) utiliza el algoritmo VMAC para estimar la QoS a nivel de aplicación, permitiendo la sintonización de los parámetros de aplicación de acuerdo a las condiciones dinámicas del canal.

I.4.3.1.2 Paquete de Prueba [104]

El algoritmo que se propuso se basa en la provisión de una curva de servicio. Este utiliza medidas tomadas con una secuencia de paquetes de prueba. La curva refleja el estado de la red y depende del número de estaciones, su actividad y el procedimiento de backoff utilizado para la resolución de la contención. Para el control de admisión, la curva de servicio debe estar por debajo de una función llamada la curva de servicio universal, que actúa como una curva de referencia del peor caso.

I.4.3.1.3 Paquete de Prueba de dato [105]

Este mecanismo planteó un esquema de control de admisión y gestión dinámica de ancho de banda. El planificador usa pesos y los ajusta dinámicamente según las variaciones de las características de red y de tráfico. Para obtener estos pesos, se convierten los requerimientos de ancho de banda de la aplicación en un requerimiento de tiempo del canal. Cada flujo controla su velocidad de transmisión de paquete, y solo ocupa el canal por la fracción del tiempo asignado por el gestor de ancho de banda. En lugar de usar los paquetes de prueba, se propuso un esquema de control de admisión basado en mediciones usando paquetes de datos para medir la carga de la red.

I.4.3.2 Control de admisión basada en cálculo

I.4.3.2.1 Rendimiento permitible [106]

Se trata de una solución heurística que usa un simple parámetro, llamado rendimiento permisible, como el criterio de decisión de admisión. Se utiliza un mecanismo de realimentación de capa de red. Estas mediciones de rendimiento permisible del par fuente-destino se propaga en redes ad hoc multihop, usando el protocolo de routeo de vector de distancia en demanda ad hoc (Ad Hoc On Demand Distance Vector - AODV), y descubriendo el cuello de botella a lo largo del paso. Esta aproximación provee como característica el control de la red. La sobrecarga necesaria para mantener las mediciones sobre la red es mínima.

I.4.3.2.2 Basado en saturación [87]

Ofrece un protocolo de control de admisión distribuido basado en cálculo. Aquí, las estaciones pueden efectivamente determinar si ellas se están aproximando a las condiciones de saturación basadas sobre información reunida, incluyendo el número de estaciones activas, sus correspondientes velocidades de bit de tráfico, y las longitudes de paquete promedio. En este protocolo, las decisiones de control de admisión se hacen dinámicamente, tanto en las estaciones fuente y destino de una manera totalmente distribuida. Puede predecir la saturación y prevenir que suceda.

I.4.3.3 Control de admisión basada en planificación y reserva

I.4.3.3.1 Reserva de flujo y asignación de prioridad [107]

Esta propuesta introdujo un esquema de control de admisión y reserva de flujos de capa MAC. Se caracteriza por usar un método de reasignación de prioridades dinámicas para la mejora del rendimiento del sistema, trabajando con la mayoría de las estrategias de planificación distribuida como DCF, sin ninguna modificación del mecanismo subyacente. Tiene bajo impacto para los mecanismos de control centralizado como PCF. El esquema reside entre la capa MAC y la capa superior.

I.4.3.3.2 ARME [85]

Se basa en un algoritmo de contención modificado que corre sobre la Función de Coordinación Distribuida; como sabemos esta sólo soporta el servicio de mejor esfuerzo, sin garantía de rendimiento. La propuesta es conocida como ARME (Assured Rate MAC Extension), y ha sido pensada como una extensión del estándar MAC IEEE 802.11. Incluye dos CWs para dar curso prioritario al tráfico que demanda más calidad y garantías sobre el de mejor esfuerzo.

I.4.3.3.3 AACA [108]

El mecanismo define una clase de protocolos de acceso MAC múltiples, incluyendo AACA (Adaptive Acquisition Collision Avoidance). Integra el concepto de reserva multicanal y aleatoria que resuelve el problema de terminales ocultas causado en las arquitecturas multihop. El AACA adoptó el método de acceso RTS/CTS sobre un canal común solamente para propósitos de reserva. Después de una reserva exitosa, la estación puede transmitir los paquetes ininterrumpidamente en el canal reservado.

I.4.3.4 Visión general de la diversidad de trabajos de mejora de IEEE EDCA 802.11e desde el control de admisión y reserva del ancho de banda

Se presenta a continuación una serie de trabajos que nos ubican en el estado de situación general de los algoritmos de control de admisión y de reserva de ancho de banda.

En [109-110] se resumen, desde dos perspectivas diferentes, el propósito, los componentes básicos y clasificaciones de algoritmos de control de admisión en general, y específicamente los esquemas de control de admisión propuestos para EDCA y HCCA IEEE 802.11e. Estos esquemas se discuten de acuerdo a diferentes categorías: Basados en medidas, Basados en modelos e Híbridos, indicando ventajas y desventajas. También se proponen algoritmos de control de admisión para redes con tráfico heterogéneo, simples y lo más exactos posibles. En otros casos, se plantean modelos de QoS necesarios para el uso eficiente de los recursos de la red. Su tarea es estimar su estado y decidir que flujos de datos de aplicación pueden ser admitidos.

En [111] se propone una técnica de diferenciación adaptativa que considera el estado de la red ajustando la ventana de contención. Y un algoritmo de control de admisión que manipula el factor CW para garantizar el rendimiento y el retardo. Para el trabajo se utilizó modelación analítica evaluada con el simulador NS-2. El escenario de experimentación estaba definido con 50 estaciones suministrando 4 flujos de datos CBR. En [112] se presenta otro algoritmo de control de admisión. Se considera una alternativa híbrida (basado sobre un modelo analítico y medidas) para EDCA. La propuesta fue analizada por simulación usando cadenas de Markov y NS-2 usando 400 estaciones con flujos de datos CBR. Y para la evaluación de un algoritmo de control de admisión, en [113] se focaliza sobre un modelo analítico para IEEE 802.11e, que plantea superar las limitaciones de lagunas propuestas precedentes, y cuyo objetivo es la predicción del rendimiento y el retardo. El modelo fue validado tanto por cálculos como por simulaciones. Se utilizaron cadenas de Markov y Matlab. El escenario consideró 4 estaciones y tráfico con distribución Poisson.

También se han realizado propuestas de algoritmos de control de admisión dirigidos a contextos particulares de flujos de tráfico. Por ejemplo, en [114] se realiza un estudio para maximizar el número de usuarios concurrentes de tráfico de VoIP, teniendo en cuenta especialmente la dependencia del retardo extremo a extremo. Los autores presentan para estos casos el criterio de admisión de forma explícita, estableciendo los requerimientos de QoS a nivel de enlace. Y describen

los mecanismos de control de admisión basado en medidas y la adaptación de velocidad.

Mientras que en [115] se describe el diseño de un algoritmo de control de admisión para voz multivelocidad, que cuantifica los recursos consumidos para las sesiones de llamadas corrientes y utiliza su conducta histórica para contabilizar los cambios de velocidad potencial y tomar una decisión de control de admisión. El modelo analítico es simulado en NS-3 usando un escenario de 60 estaciones con tráfico CBR. Finalmente, en [116] se presenta un algoritmo de control de admisión basado en modelo para soportar servicios de voz y video concurrentes. Se utiliza un modelo analítico para la predicción de estos tráficos, que fue validado numéricamente con simulaciones usando NS-2.

Otras propuestas han estado dirigidas al control de admisión con escenarios particulares. Tal es el caso de [117] donde se analiza la provisión de garantías de servicio de estaciones EDCA 802.11e combinadas con estaciones comunes. El planteo fue analizar la competencia dada teniendo en cuenta que la ventana de contención en las estaciones DCF está predefinida y no pueden modificarse, y por lo tanto, su impacto no puede controlarse. Con dicho objeto se utilizan ACKs fallidos intencionalmente para incrementar las ventanas de contención de las estaciones DCF cuando sea necesario y favorecer el tráfico EDCA. Para la modelación analítica se utilizaron cadenas de Markov.

Otro interesante estudio particular dado en [118] estudia el aseguramiento de la QoS para redes multivelocidad y multisalto. El desafío se presenta cuando es necesario mantener niveles de rendimiento elevados con flujos de tiempo real, con movilidad de los dispositivos y cambio de ruta frecuente. La propuesta incluye métricas especiales como confiabilidad de ruta y ancho de banda de ruta disponible. Para la evaluación se usó el simulador NS-2 sobre un escenario con 50 estaciones de flujos de datos CBR.

Como es de esperar, hay interesantes propuestas dirigidas también a la administración del ancho de banda. En [119] se presenta un novedoso algoritmo de control de admisión distribuido ponderado (Distributed Weighted Fair Queuing - DWFQ). El algoritmo utiliza la función de coordinación distribuida realzada (Enhanced Distributed Coordination Function - EDCF). Para distribuir el ancho de banda entre diferentes tráficos se propone un algoritmo DWFQ de flujos múltiples, asignando cada categoría de acceso (AC) de acuerdo a sus pesos relativos. El análisis se realizó usando modelación analítica con 100 estaciones. Mientras que en [120] se propone un protocolo de ruteo para la utilización eficiente del ancho de banda en redes IEEE 802.11e. El

protocolo asigna diferentes tráficos con prioridades diferentes a las colas específicas. A partir de ello, la capa de ruteo obtiene información acerca del ancho de banda disponible desde la capa MAC e incorpora al mismo como costo. Se obtienen múltiples pasos para cada sesión.

Finalmente, se presentan casos particulares como los dados en [121-122]. En [121] se trata un planificador HCCA IEEE 802.11e para aplicaciones multimediales. El planteo del trabajo está dirigido a perfeccionar la QoS dada por el planificador de referencia IEEE 802.11. El objeto es evolucionar a un funcionamiento que no sólo tenga en cuenta el tráfico CBR, sino también el tráfico VBR, típico de las aplicaciones de tiempo real. Se analiza un algoritmo de planificación llamado Planificador de Desplazamiento de Tiempo no Usado (Unused Time Shifting Scheduler - UTSS). El análisis del comportamiento se realizó con modelación analítica y verificado con NS-2. El escenario consideró 7 estaciones: un tráfico de voz, un tráfico de video de videoconferencia LectureHQ-Reisslein, y 5 streamings de video: Jurassic Park, Silence of the lambs, Mr. Bean, Die hard III, y Robin Hood. Mientras que en [122] se discute una aproximación de administración de recursos de radio (Radio Resource Management - RRM), llamada RRM común (Common RRM - CRRM) que relaciona la administración del ambiente donde el dispositivo móvil puede conectarse a diferentes celdas. El objetivo es usar algoritmos y estrategias para redes heterogéneas o convergentes para integrar múltiples interfaces de radio físicas para soportar diferentes velocidades de datos, movilidad y tráfico. El control de admisión en una CRRM se usa para seleccionar el acceso wireless más apropiado basado sobre el tipo de servicio, la preferencia del usuario y la carga de la red. De esta forma se obtiene un balance entre el tráfico de tiempo real y no real. El desarrollo requiere una plataforma apropiada de acoplamiento de las redes de acceso.

I.4.4 Adaptación de enlace en capa PHY

El estándar 802.11 especifica diferentes velocidades de transmisión, dejando disponible la adaptación de velocidad y de mecanismos de señalización, de acuerdo a las condiciones del canal. Por ello, siempre es deseable un mecanismo de adaptación de enlace apropiado, para maximizar el rendimiento bajo condiciones de canal que cambian dinámicamente.

La Figura 1.11 muestra una taxonomía jerárquica de algunos mecanismos de QoS que habilitan la adaptación de enlace. La mayoría de los mecanismos de adaptación de enlace se focalizan sobre algoritmos para conmutar entre velocidades de transmisión especificadas, sin la necesidad de modificar los estándares existentes. Sin embargo, también

hay otros que demandan leves modificaciones de la DCF y EDCA. Las métricas usadas en los diversos algoritmos de adaptación de enlace propuestos incluyen la relación señal a ruido (signal-to-noise ratio- SNR), la relación de portadora a interferencia (carrier-to-interference ratio- CIR), nivel de potencia recibida (Received signal strength – RSS), longitud de la carga de datos promedio, los reconocimientos de transmisión, o sus combinaciones.

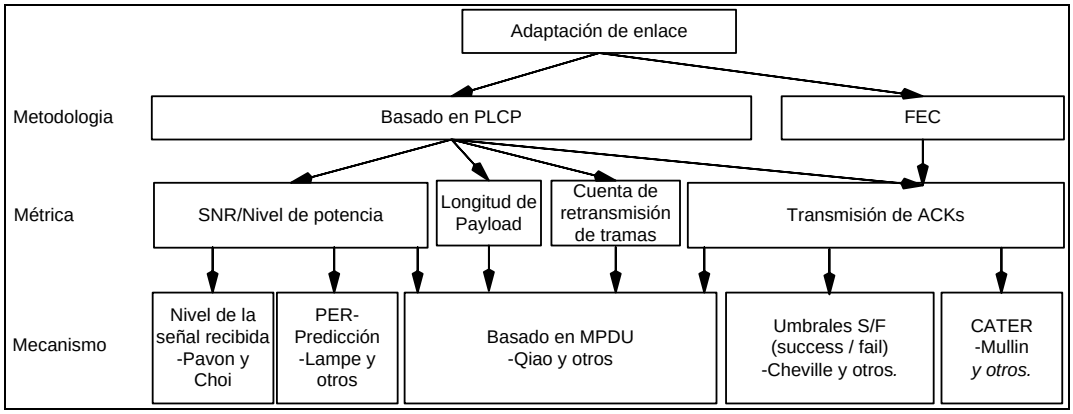


Figura 1.11 Taxonomía de mecanismos de adaptación de enlace

A continuación se repasan algunos algoritmos propuestos, dentro de la taxonomía, para contribuir a la mejora de la QoS, en un contexto dinámico que obliga a la adaptación del enlace.

I.4.4.1 Potencia de la señal recibida (Received signal strength - RSS) [123]

La propuesta usa como métrica la potencia de la señal recibida, para el algoritmo de adaptación. Dicha potencia se mide en las tramas recibidas, y por lo tanto, no requiere ningún cambio en cualquier implementación de la capa MAC IEEE 802.11. Los autores también asumieron una relación lineal entre la RSS y SNR promedio. Un algoritmo de adaptación de velocidad en cada estación mantiene sus propios 12 umbrales RSS y velocidades de transmisión correspondientes. En base a la medida de RSS, la estación dinámicamente conmuta a una velocidad de transmisión apropiada.

I.4.4.2 PER-predicción [124]

Se propuso un esquema de adaptación de enlace en el que las decisiones se hacen en base a la predicción de la tasa de error por paquete (packet error rate- PER). La mayoría de los esquemas de adaptación de enlace realizan la predicción de PER en base a las

métricas de SNR y CIR. En ciertas circunstancias, como en un escenario multipaso, la SNR no describe adecuadamente la calidad del canal. Una contribución principal de este articulo es que la predicción de PER no sólo utiliza los valores de SNR y CIR, sino también una función de transferencia de canal momentánea.

I.4.4.3 Basada en MPDU [125]

Se presentó un método genérico para analizar la performance de 802.11 como una función de la longitud de la carga de datos, la cuenta de retransmisiones de tramas, las condiciones del canal wireless, y la velocidad de transmisión de datos seleccionada. Se trata de un algoritmo en el que se prestablece una tabla de modo PHY indexada por el estado del sistema. En tiempos de ejecución, una estación wireless determina el modo PHY más apropiado para el siguiente intento de transmisión.

I.4.4.4 Con umbral de éxito/falla (success/fail - S/F) [126]

En este mecanismo, un transmisor es capaz de detectar si la calidad del enlace se está mejorando o deteriorando, y en función de ello conmutar a una velocidad de transmisión más alta o más baja. Para determinar la calidad del enlace, se usan los ACKs de las tramas transmitidas. Es decir, se trata de información disponible localmente. Por lo tanto, esta propuesta puede implementarse sin cambios al estándar IEEE 802.11. La idea básica de este algoritmo es que si el número de transmisiones exitosas consecutivas excede S, la velocidad de transmisión se incrementa. De otro modo, si el numero de transmisiones fallidas consecutivas excede F, la velocidad de transmisiones se decrementa.

I.4.4.5 Adaptación de Código para Realzar la Confiabilidad (Code Adapts To Enhance Reliability - CATER) [127]

Se trata de un mecanismo que permite reconfigurar los transceivers de las estaciones que se comunican, para el uso de un código de pseudoruido mayor (pseudonoise- PN), cuando aparecen retransmisiones no exitosas sobre un canal degradado. Este algoritmo mejora el rendimiento bajo condiciones de canal de alta tasa de error de bit (bit error rate- BER). Sin embargo, debido a la sobrecarga de señalización adicional del esquema propuesto, el rendimiento bajo condiciones de canal de BER bajas es menor que en el estándar 802.11b.

I.4.4.6 Visión general de la diversidad de trabajos de mejora de IEEE EDCA 802.11e desde la capa física

A continuación se presenta una breve discusión de trabajos referidos a la capa física que nos ubican en el estado de situación general en este aspecto de las normas IEEE 802.11.

En [128] se presenta un relevamiento de diversas soluciones MAC para resolver, directamente o indirectamente, el problema de nodo oculto en las redes ad-hoc. El trabajo ofrece un entendimiento de la profundidad de los progresos realizados en esta área, presentando una comparación detallada de los diferentes protocolos presentados.

También se presentan propuestas referidas a ajustes MAC cuando se trata de tráfico específico. En el desarrollo [129] se efectúa la evaluación de performance de tráfico de voz sobre IP (VoIP) de alta prioridad sobre EDCA en redes multivelocidad. En estos ambientes, el AP cambia la velocidad de transmisión física cuando las estaciones se acercan o alejan de él. La adaptación se realiza sobre cada trama de acuerdo a la condición del canal o calidad de la señal. El trabajo experimental se realizó sobre radios IEEE 802.11b usando QualNet como herramienta de modelación y simulación, y con un escenario de 8 estaciones de VoIP y 3 tipos diferentes de codecs. En [130] se realiza un análisis empírico de tráfico de video multicast sobre Wi-Fi. El estudio está dirigido especialmente a determinar si los dispositivos Wi-Fi comerciales operan correctamente como está definido en el estándar y qué comportamiento real en la práctica puede inducirse desde dicha operación. Por ejemplo, los autores verificaron que no todos los dispositivos comerciales respetan el estándar con respecto a la operación de ahorro de potencia. Y también que la operación cumpliendo el estándar puede causar retardos significativos del tráfico de VoIP, cuando coexiste con tráfico de video multicast.

Otras líneas de investigación están referidas a la asignación dinámica de la velocidad o canal del enlace. En [131] se describe la adaptación de enlace IEEE 802.11n usando un ensayo experimental práctico. Los resultados del trabajo concluyen que las extensiones triviales de los algoritmos desarrollados para IEEE 802.11g suministran beneficios mínimos para los sistemas IEEE 802.11n; que el uso de antenas múltiples en la práctica no siempre conducen a rendimientos más altos; y que tanto la selección de stream como de antena son esenciales para alcanzar los beneficios completos de las tecnologías MIMO. Mientras que en [132] se plantean nuevas técnicas de asignación de canal para redes Wi-Fi. El trabajo se direcciona, como tantos, a la optimización del control y administración de potencia. Con dicho objeto, se propone un modelo del

sistema para las redes Wi-Fi infraestructura cuyo objeto es el estudio para reducir el consumo de potencia, introduciendo un esquema de asignación de canal para WLANs bajo el criterio de conservación de energía.

En la misma línea de búsqueda de la eficiencia energética, en [133] se investigó el caso de WLANs basadas en IEEE 802.11, mostrando la diversidad existente de consumo de potencia entre dispositivos móviles, realizando una asignación ordenada de recursos. Se derivó una expresión formal para la configuración óptima de la WLANs respecto a criterios de eficiencia de energía. Se validó la propuesta mediante simulaciones. Mientras que en [134] se planteó la conveniencia de estudiar el consumo de energía de las interfaces wireless con el objeto de disponer de orientaciones para el diseño e implementación de nuevos protocolos e interfaces. En el trabajo se analiza las prestaciones de rendimiento de una red Wi-Fi, usando un modelo analítico y escenarios heterogéneos con dispositivos diferentes con características de consumos de potencia diferentes.

También existe una línea de investigación que se ha consolidado sobre plataformas wireless programables. En [135] se analiza la evolución del estándar y dispositivos IEEE 802.11, y se propone una solución arquitectónica para hacer programable la capa MAC. En este trabajo se discute un simple ejemplo de capa MAC, no soportada por las tarjetas 802.11 actuales, que puede agregarse para explotar la propuesta de los autores. En [136] se introduce la noción de procesadores MAC como aquellos que soportan un conjunto de comandos MAC que pueden programarse en tiempos de ejecución, para proveer la operación de protocolo MAC deseado, en lugar de usar un stack de protocolo MAC específico. El trabajo práctico se plantea a través de tres casos de estudio. Con la misma orientación, en diversos trabajos de investigación, se proponen nuevas arquitecturas de interfaces wireless programables, para dar flexibilidad y adaptabilidad de acceso. Y en [137] se propone una arquitectura que soporta un conjunto de servicios programables a aplicar sobre una red y escenarios de aplicación específicos. La aproximación considera que las necesidades prácticas requieren que las características de adaptación a las particularidades de una red pueden obtenerse por medio de interfaces avanzadas y programables, incluyendo las capas de orden superior, además de la física.

Finalmente, en [138] se propone una técnica de predicción de la velocidad de error de paquetes (Packet Error Rate - PER) para sistemas múltiple-entrada múltiple-salida (Multiple-Input Multiple-Output - MIMO) y con multiplexación por división de frecuencia ortogonal (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing - OFDM). La predicción es muy importante en la adaptación del enlace. El trabajo presenta una

aproximación puramente analítica, con exactitud comparable a los métodos tradicionales no tan prácticos cuando crece el número de esquemas de configuración.

I.4.5 QoS extremo a extremo en redes heterogéneas [139]

Con cada vez más aplicaciones multimedia de tiempo real suscriptas a usuarios móviles, hay una urgente demanda para garantizar la QoS extremo a extremo soportada en redes heterogéneas cableadas e inalámbricas. Corrientemente, hay algunas aproximaciones que focalizan sobre la interoperabilidad entre la IEEE 802.11 y los servicios diferenciados (DiffServ) o los servicios integrados (IntServ).

En [140] se propuso una arquitectura de QoS extremo a extremo colaborativa a través de una WAN cableada, LAN cableada y WLAN basadas en DiffServ, IEEE 802.11D/Q y IEEE 802.11e, respectivamente. Las tramas MAC 802.3 transportan los valores de prioridad de usuario vía el tag de VLAN 802.1Q. Estas prioridades de usuario son retransmitidas a través del puente MAC 802.1D a MAC 802.11e y usadas por EDCA para diferenciar los flujos. Para realizar esto, es necesario establecer correspondencias entre los valores en DiffServ (DiffServ code point - DSCP), definidos en el campo DiffServ (DS), y la identificación de categoría de tráfico (traffic category identification - TCID), definida en 802.11e.

La propuesta de [141] se basa en una reserva de flujo de capa MAC y un protocolo de control de admisión en WLAN IEEE 802.11, llamada WRESV. Sugirieron integrar RSVP y WRESV para el soporte de IntServ en redes heterogéneas cableadas y wireless. En su aproximación, son cuidadosamente consideradas las características de reserva (Resource Reservation Protocol - RSVP) y las características del medio wireless. Dado que WRESV puede trabajar con la mayoría de los planificadores MAC existentes, tales como DVF, EDCF, EDCA y DFS, este esquema de integración es más general y deja espacio para realce ulterior.

El trabajo de tesis tuvo especialmente en cuenta el estudio de distintas propuestas de mejora del mecanismo EDCA 802.11e, y su interacción con los algoritmos de control de admisión, para dar ciertas seguridades de QoS en Wi-Fi. Aunque la meta del mismo considera el análisis de otros aportes, dentro de la clasificación general de las taxonomías presentadas, las líneas de investigación actuales, y su impacto en el funcionamiento de las redes heterogéneas cableadas y wireless, y las consignas de QoS extremo a extremo.

I.5) SUMARIO

Inicialmente, en este capítulo, se ha provisto una visión general para las tecnologías WLAN IEEE 802.11, Bluetooth y WiMAX, y su rol para que los nodos de estas redes se conecten a una red IP. Estas tecnologías sirven frecuentemente funciones complementarias para la conectividad extremo a extremo.

Luego, se presentó un análisis de las tendencias futuras de crecimiento de tráfico móvil total, y una distribución de los dispositivos y de los tipos de tráficos utilizados. Se planteó el crecimiento de los suscriptores móviles, con una mayor demanda de ancho de banda, que se focalizarán especialmente sobre video.

Finalmente, se incluyó un relevamiento de diversas propuestas de investigación de QoS en 802.11, clasificadas por: diferenciación de servicio en la capa MAC, el control de admisión y la reserva de ancho de banda en las capas MAC y más altas, y la adaptación de enlace en la capa física. El tratamiento de los modelos analíticos y de los algoritmos de sintonización se realizará en Capítulos posteriores. Además, se repasaron algunos propuestas para resolver los problemas de QoS extremo a extremo que aparecen en redes heterogéneas.

El trabajo de tesis se direccionó sobre el mecanismo de diferenciación de servicios en capa MAC, adoptado por estándar IEEE 80211e. El objetivo ha sido una propuesta de algoritmo que dinámicamente selecciona la combinación de los parámetros EDCA Wi-Fi de mejora que aseguran un incremento en el rendimiento y el cumplimiento de consignas de QoS, independientemente de la proporción de los tráficos presentes.

CAPITULO II

MODELO DE SIMULACIÓN DE EDCA IEEE 802.11E y SIMULADOR MÖBIUS

En este Capítulo se analiza un modelo HSAN del mecanismo EDCA de la norma IEEE 802.11e. El modelo se ejecuta sobre el simulador Möbius. También se presentan las validaciones realizadas por los autores originales del modelo y por el tesista, efectuando comparaciones de rendimiento con trabajos realizados por investigadores de la Universidad de Tecnología de Aachen (Alemania), en Philips Research (USA y Alemania), del TKN (Telecommunication Networks Group) de la Universidad Técnica de Berlín (Alemania), y en la Universidad de Tübingen (Alemania). Estos trabajos de reconocido prestigio internacional son admitidos como referencia en la mayoría de la bibliografía científica técnica

II.1) VISIÓN GENERAL

Con el objeto de entender las limitaciones del mecanismo EDCA, se adoptó un modelo de simulación implementado en Redes de Actividades Estocásticas Jerárquicas (HSAN) que describe la dinámica de la función EDCA del estándar IEEE 802.11e, que se ejecuta sobre el simulador Möbius. Este modelo comprende una implementación precisa y detallada de la función EDCA asociada a las estaciones con QoS, considerando tanto su perspectiva funcional y temporal.

Entre las funcionalidades implementadas, se distinguen:

- Implementación exacta de los procedimientos backoff,
- Inclusión de la Retransmisiones de tramas,
- Timeouts y Espacios Intertramas Extendidos (EIFS) modelados de acuerdo a las especificaciones del estándar,
- Previsión de las oportunidades de transmisión (TXOPs),
- Inclusión de Errores de comunicación debido a las colisiones o a interferencias externas configurables de los diversos ambientes de trabajo, y
- Capacidad de modelación de cualquier distribución estadística de los tráficos presentes de forma independiente.

Además, y desde el punto de vista de la modelación, el modelo también exhibe una importante flexibilidad en los siguientes aspectos:

- Facilidad para incluir modificaciones o refinamientos. El modelo fue construido de forma modular, con cada módulo

implementando una funcionalidad específica. Por lo tanto, su topología ayuda a localizar los módulos donde las modificaciones o refinamientos deberían incluirse,
- Pueden obtenerse un gran número de medidas de rendimiento de diferentes tipos, desde el mismo modelo sin modificaciones estructurales,
- El modelo puede ser usado como una estructura base para construir modelos más complejos y de más alto nivel.

Se utilizaron versiones de este modelo basado en HSANs, para la evaluación de performance del protocolo IEEE 802.11e en diferentes escenarios. Específicamente, los modelos de simulación derivados permitieron el análisis y la evaluación del impacto al ajustar parámetros de temporización y otros del protocolo, en diversas configuraciones de red.

II.2) JUSTIFICACIÓN DE USO DEL MODELO

Como se indicó en Capítulos anteriores, el análisis de prestaciones de los protocolos de las redes de comunicaciones, y también en el caso específico del estándar IEEE 802.11e, ha sido realizado desarrollando modelos de evaluación desde dos puntos de vista distintos: analíticos y de simulación.

II.2.1 Modelos analíticos

II.2.1.1 Visión General

Dos tipos de modelos analíticos existen en la literatura. El primero basado en los modelos de cadena de Markov discretos y el segundo basado sobre el análisis de valores medios. Estos últimos omiten importantes detalles y necesitan un alto número de suposiciones, aunque presentan un bajo nivel de complejidad computacional. Mientras que las cadenas de Markov presentan un mejor comportamiento general, y han ganado un gran protagonismo en el campo de la modelación de 802.11e.

Además, los modelos analíticos pueden clasificarse en modelos bajo condiciones de saturación y modelos bajo todas las condiciones de red. La condición de saturación, que supone siempre un paquete en la cola de transmisión, evita la necesidad de modelar detalladamente las características del tráfico, aunque lógicamente afecte la calidad de las métricas obtenidas. Por ello, se prefieren las modelaciones que complementan las mediciones bajo saturación y no saturación para lograr un mejor entendimiento general del mecanismo EDCA.

En [14] se presenta una tabla con un estudio comparativo de las características principales de los modelos analíticos más representativos. De esta tabla, se deducen dos conclusiones principales:

(1) Casi todos los modelos analíticos tienen en cuenta la diferenciación AIFS y CW, pero desafortunadamente desprecian el uso de TXOPLimit diferentes. El parámetro de diferenciación TXOPLimit es muy importante como ha sido mostrado en el análisis hecho en [15]. Se demostró que tiene efecto apreciable sobre la performance global.

(2) Casi todos los modelos analíticos EDCA no consideran exactamente la operación de cuenta descendente backoff modificado en el 802.11e EDCA. Este debería cooperar con la operación de cuenta descendente AIFS. Después que cada contador se "congela" en el backoff, el canal debe sensarse libre durante el periodo AIFS completo, antes que el procedimiento de cuenta descendente backoff comience nuevamente. Varios de los modelos presentados no retoman correctamente la cuenta descendente de AIFS, antes de "descongelar" el contador backoff. Realmente, estos modelos que sólo son cadenas de Markov bidimensionales (uno para la etapa backoff y otro para el contador backoff) no pueden cubrir este proceso de cooperación a causa de esta limitación. Por lo tanto, para una modelación más apropiada se requiere mínimamente una cadena de Markov tridimensional.

Entre los modelos analíticos propuestos para EDCA 802.11e, debe observarse que cada uno tiene su propias particularidades y mejoras, en la búsqueda de las prestaciones medidas a través de ciertos indicadores o en ciertos contextos operativos. Aunque, por lo tanto, cada versión también tiene sus limitaciones. Estas desventajas han sido analizadas en [14,16] y son explicadas por los siguientes hechos, que puedan darse en parte o de manera concurrente, según el modelo:

1) Los modelos no implementan una o más de las características del Protocolo,
2) Los modelos muestran una mala interpretación de la especificación del estándar o uso de una versión vieja,
3) Las condiciones del canal son ideales,
4) La probabilidad de colisión es constante para una carga de tráfico dada, aunque pueda diferir entre AC,
5) Los modelos no tienen en cuenta los cuatro parámetros EDCA de diferenciación,
6) No soportan otra distribución de tráfico que no sea Poisson o CBR,

7) No incluyen una mezcla heterogénea de tráfico de red (voz, video y mejor esfuerzo), dado que la red puede tener una o dos ACs,
8) Tráficos distintos pueden tener el mismo tamaño de paquete,
9) Cada nodo sólo puede transmitir un tipo de tráfico, entre otras.

La suposiciones 3) y 4) son estándar para los estudios de performance de 802.11 usando modelos analíticos. Y específicamente la 4) se usa habitualmente para los modelos saturados y no saturados. Mientras que algunas de las restantes suposiciones pueden directamente no utilizarse, y otras son inevitables para esta herramienta de modelación.

Es justo rescatar que algunos trabajos, como los dados en [14,16], han superado varias de las limitaciones enunciadas, a costa de su complejidad, y se constituyen en valiosos aportes para el desarrollo de esta línea de investigación, y su aplicación, por ejemplo, en los algoritmos de control de admisión. Sin embargo, no quedan excluidos de las observaciones que son comunes a los modelos analíticos.

Efectivamente, para el desarrollo de escenarios realistas como los previstos en este trabajo, se consideró que el uso de modelos analíticos no era una aproximación adecuada por las siguientes razones:

a) las simplificaciones usualmente empleadas sobre estos modelos impiden estudios de precisión, con resultados concluyentes,
b) Ni obtener apropiadamente importantes aspectos y comportamientos de las variables del sistema, objeto de nuestra evaluación,
c) No se obtienen las diversas métricas que se alcanzan por simulación,
d) Los modelos asumen fuentes de tráfico Poisson, dificultando la modelación exacta de otras fuentes de tráfico,
e) Las fuentes de error y/o interferencia deben ser parte de un modelo realista,
f) Es imposible alcanzar una gran flexibilidad para configurar las estaciones, y/o comparar complejos escenarios de experimentación.

II.2.1.2 Contexto en el que se desenvuelven los modelos analíticos

Se pueden ilustrar algunos trabajos para mostrar la diversidad de implementaciones de los aspectos enumerados en el apartado anterior. Por ejemplo, en [17] se ha modelado con cadenas de Markov la red EDCA IEEE 802.11e no saturada. El modelo fue verificado usando el simulador 802.11e TU-Berlín con la versión NS-2.28. Los parámetros EDCA se han modelado con sus valores por defecto, con tamaño de

paquete constante y dos ACs. Se ha asumido arribo Poisson. Mientras que en [18] se ha modelado con una cadena de Markov tridimensional múltiples estaciones con un número arbitrario de diferentes ACs en un escenario saturado. El modelo considera la diferenciación con tamaños de ventanas de contención CW y los espacios intertrama de arbitrio (AIFSN), y el mecanismo de colisión virtual. Y en [19] presenta un modelo con cadenas de Markov en un ambiente no saturado, cuya comparación se ha hecho con NS-2. Se plantean dos escenarios: uno con sólo VoIP y otro combinado tráfico de VoIP y flujos UDP.

Otros trabajos presentan algunas diferenciaciones más extensas. Por ejemplo, en [20] se introduce un modelo de Markov que analiza redes Wi-Fi transportando llamadas de voz, descarga de archivos TCP y tráfico de streaming de video. Para ello, proponen un modelo pentadimensional. Los resultados analíticos fueron comparados con los del simulador Qualnet. En este modelo se han realizado las siguientes suposiciones: una trama llega a la cola de transmisión cuando esta está vacía y sigue vacía inmediatamente después de la transmisión, y el número de estaciones y la velocidad de arribo de los paquetes es fijo. También en [21], [22] y [23] se discuten modelos no saturados. En [21] se utiliza cadenas de Markov para la modelación y se compara con los resultados dados en NS-2, transmitiendo tráfico de voz y de mejor esfuerzo multiplexado. Mientras que en [22] se introduce una tasa de error en el canal. El modelo permite el análisis de los mecanismos de acceso básico y de acceso RTS/CTS. Se supone que el número de estaciones es finito y fijo, y que existen N diferentes categorías de acceso de tráfico. Y finalmente en [23] se modela específicamente la disminución del tiempo libre del canal, e incrementa el rendimiento para un número mínimo de estaciones, bajo condiciones de un BER alto. Todos los trabajos se contrastaron usando NS-2.

También aparecen otros trabajos de investigación donde se soporta tanto el funcionamiento saturado y no saturado. En [24] se analiza un modelo de EDCA IEEE 802.11e dirigido al análisis de los nodos con malos comportamientos de backoff. Se han aplicado las siguientes simplificaciones: el tráfico generado es exclusivamente Poisson, las tramas son de igual longitud, el parámetro EDCA TXOP no se usa y el medio es libre de error. Sin embargo, en el trabajo [25] las suposiciones son bastantes similares, pero focalizadas al análisis del rendimiento para cada AC en una red multihop.

En este panorama general, también se observan trabajos dirigidos que plantean aspectos innovativos usando modelos analíticos con cadenas de Markov. En [26] se propone un modelo con consideraciones más realistas planteando condiciones de canal individuales para cada

estación, y la corrección del error en la trama debido al ruido del canal para esa estación individual. Y en [27] se introduce el análisis del concepto de calidad de experiencia (Quality of Experience – QoE) para ajustar cuantitativamente CW. Es decir, en lugar de usar parámetros tales como pérdida de paquetes o su retardo, se basa en la percepción del usuario. El modelo se implementa con cadenas de Markov.

Finalmente, en las Tablas 2.1 y 2.2 se resumen las características principales de algunos modelos existentes, discutidos más extensamente en [16]. El estudio comparativo es muy útil para entender rápidamente el contexto general en que se encuentran y desenvuelven los modelos analíticos. También se observan las características erróneas, las limitaciones y los faltantes que deberían completarse para obtener un modelo analítico más evolucionado.

Modelo	Valores de los Parámetros de Acceso EDCA/DCF	Comparación con otros modelos	Simulador	Mbps del Canal	Máximo número de nodos	Máximo número de ACs simultáneos	Tamaño de paquete
Peng [28]	No estándar	No comparado	ns-2	11	200	4	Fijo
Inan [29]	No estándar	No comparado	ns-2	54	54	2	Fijo
Hu [30]	No estándar	No comparado	ns-2	11	10	4	Fijo
Hwang [31]	CWmax no existe	No comparado	ns-2	11	60	2	Fijo
Lim [32]	No estándar	Comparado con otro	ns-2	11	40	2	Fijo
Daneshgaran [33]	Estándar	No comparado	Propietario y ns-2	no especificado	20	1	Fijo
Kosek-Szott [16]	Estándar	Comparado con otros dos	ns-2	11	200	4	Variable

Tabla 2.1 Comparación de algunos modelos analíticos EDCA

Modelo	Tipo MAC	Límite de TXOP	AIFSN	Condiciones de red	Simple Complejo	RTS/CTS
Peng [28]	EDCA	Soportado	Soportado	Saturación	Complejo	Soportado
Inan [29]	EDCA	Soportado	Soportado	Saturación y no saturación	Complejo	Soportado
Hu [30]	EDCA	Soportado	Soportado	No saturación	Complejo	No soportado
Hwang [31]	EDCA	No soportado	Soportado	Saturación	Complejo	Soportado
Lim [32]	EDCA	No soportado	Soportado	No saturación	Complejo	Soportado
Daneshgaran [33]	DCF	No soportado	No soportado	No saturación	Complejo	Soportado
Kosek-Szott [16]	EDCA	No soportado	Soportado	Saturación y no saturación	Simple	Soportado

Tabla 2.2 Cont. comparación de algunos modelos analíticos EDCA

II.2.2 Modelos y herramientas de simulación

Para escenarios más realistas, se han diseñado modelos de protocolos de red que se ejecutan en simuladores (NS-2, OPNET, Qualnet, etc.). También se han construido modelos IEEE 802.11 usando Redes de Petri Estocásticas (SPNs) (como se describió en el Capítulo inicial). Cada modelo se construye de acuerdo a la herramienta matemática de modelación o de programación subyacente. En general, la principal limitación ha sido y son los simuladores.

Este aspecto es muy crítico, más allá del nivel de exactitud del modelo que se utilice, cuando se pretende simular diferentes escenarios jerárquicos con numerosas estaciones, cada una de ellas con sus particularidades de configuración y/o tráfico. Ayuda que el simulador elegido permita liberar al analista de las complejidades de programación típicas de bajo nivel (como sucede en la mayoría de los simuladores basados en programación), para ajustes en el modelo o los escenarios de experimentación. Es deseable que el simulador oriente el trabajo a un más alto nivel, y el analista pueda abocarse a reconfiguraciones paramétricas en cada contexto bajo estudio y a la obtención de las métricas de prestaciones de la forma más sencilla posible, más allá de la complejidad de la situación. Además, es particularmente favorable que estas tareas de modelación puedan realizarse en un simulador que soporte entorno gráficos, de fácil utilización. Finalmente, se tiene como una característica favorable que la herramienta pueda instalarse en diferentes plataformas de sistemas operativos, no siendo esta una restricción adicional para el anaista.

Por lo expuesto, se adoptó un modelo base, usando HSANs, que cubre EDCA IEEE 802.11e, y que se ejecuta sobre el simulador Möbius. Combinados subsanan las observaciones discutidas previamente.

Möbius es una herramienta para modelar la conducta de sistemas complejos. Es usado para un amplio rango de sistemas de eventos discretos, desde reacciones bioquímicas dentro de los genes hasta los efectos de ataques maliciosos en sistemas de computación seguros. Su flexibilidad y potencia se debe a que permite múltiples formalismos de modelación de alto nivel y técnicas de solución. La flexibilidad les permite a los ingenieros y científicos representar sus sistemas en los lenguajes de modelación apropiados al dominio de sus problemas, y luego, resolverlos exacta y eficientemente usando las técnicas de solución más apropiadas al tamaño y complejidad de los mismos.

Los tipos de modelos soportados incluyen extensiones estocásticas de las Redes de Petri, Cadenas de Markov y extensiones, y Álgebras de Procesos Estocásticos. Utiliza un paradigma de modelación jerárquica, tal que primero se especifica la conducta de los componentes individuales (modelos atómicos), y luego, se los combina para crear el sistema completo (modelo compuesto). Es muy fácil combinar los componentes de múltiples formas, para alcanzar cualquier complejidad deseada.

Pueden construirse expresiones detalladas para medir la información exacta deseada sobre el sistema, como confiabilidad, disponibilidad, rendimiento y seguridad. Estas expresiones puede evaluarse en puntos de tiempo específicos, sobre periodos de tiempo, o

cuando el sistema alcanza su estado estable. La conducta de cualquier sistema puede analizarse sobre una variedad de condiciones operativas.

La modelación de las variables discretas aleatorias pueden realizarse utilizando una amplia variedad de distribuciones estadísticas, a saber: Pareto, Erlang, Uniforme, Hiperexponencial, Weibull, Triangular, Weibull Condicional, Exponencial, Normal, Gamma, Binormal, Lognormal, Beta, entre otras. Además, permite la creación de funciones custom.

II.3) EL MODELO DE SIMULACIÓN DEL MECANISMO EDCA USANDO REDES DE ACTIVIDADES ESTOCÁSTICAS JERÁRQUICAS (HSANS) y EL SIMULADOR MÖBIUS

II.3.1 Visión general del Modelo

La documentación completa acerca del modelo [61] está en el sitio web ubicado en [142]. Este modelo ha sido usado por el Grupo de Trabajo de la Universidad de Porto (Portugal) para la investigación del comportamiento de la norma EDCA IEEE 802.11e, en comunicaciones industriales, con sus parámetros por defecto [143-145].

Las siguientes Figuras muestran el modelo sobre el simulador Möbius. El simulador, de la Universidad de Illinois (EEUU), con sus manuales de uso, puede accederse para fines académicos desde el sitio web ubicado en [65].

La Figura 2.1 muestra la interface del Project Editor que tiene cargado el modelo atómico station (estación). En la Figura se observa una fracción del modelo que implementa el arribo de las tramas desde las capas de protocolo superior a las colas asociadas a cada categoría AC, y también su administración.

La actividad temporizada t_TACi modela el tiempo de interarribo de las tramas a la cola ACi. El tiempo interarribo representa el patrón de generación de tráfico y está definido por una función de distribución, la cual es totalmente configurable por el usuario.

Las funciones típicas empleadas son: exponencial para modelar tráfico Poisson, determinísticas para modelar trafico periódico, erlang o normal para modelar trafico periódico con jitter o Pareto para modelar tráfico hiperbólico.

Cuando la actividad t_TACi se completa, una nueva trama arriba a la cola ACi. Las cuatro colas AC están representadas por el lugar

extendido ac_q, cuyo marcado ac_q(i) indica el número de tramas esperando por transmisión en la cola ACi.

Si la cola no esta llena, la trama espera en la cola por transmisión posterior, y entonces el marcado de ac_q(i) se incrementa en uno. Si la cola esta llena, el lugar extendido ac_q_discard(i) es marcada con un token. Estas actividades se configuran en la compuerta de salida o_Taci.

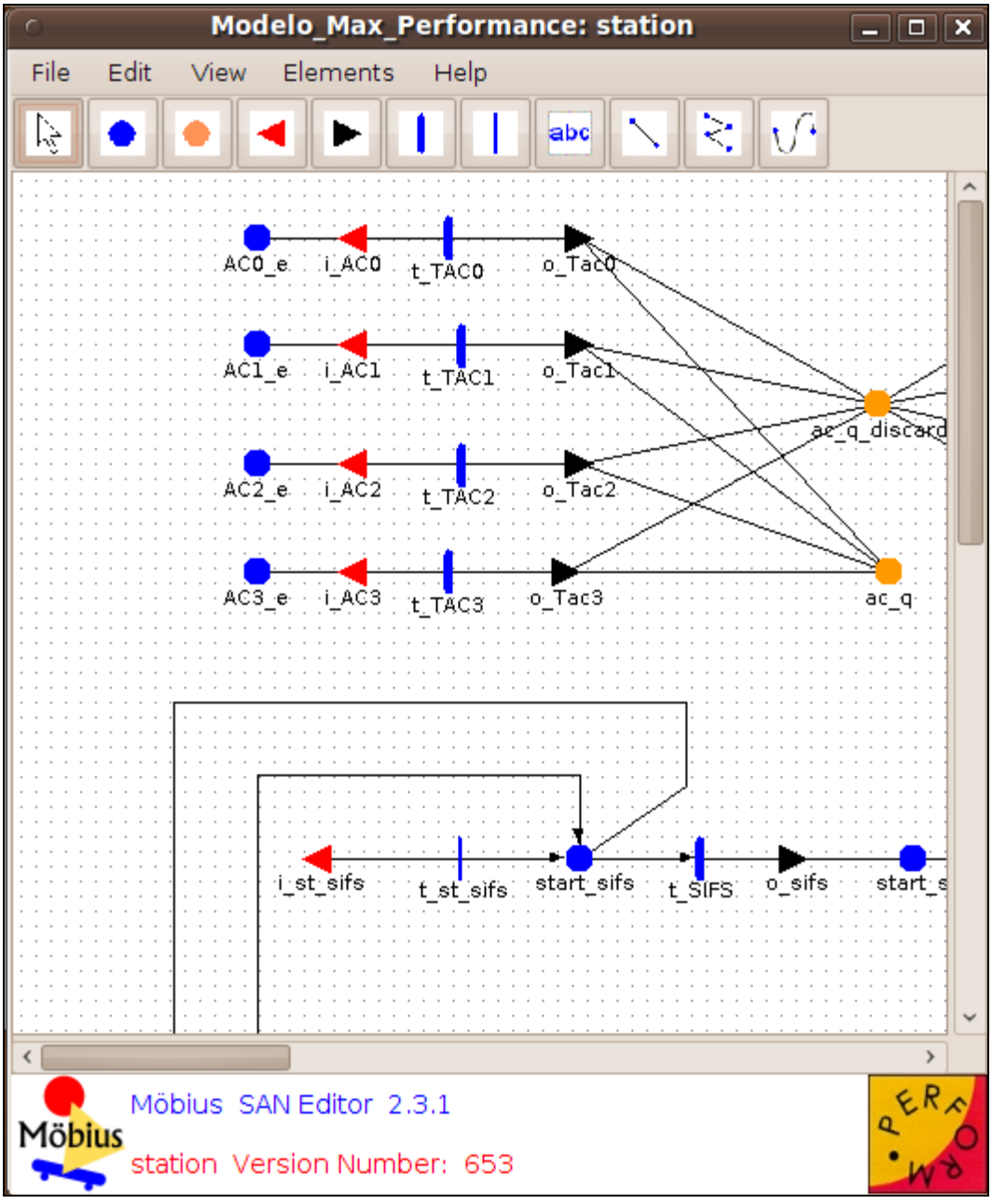


Figura 2.1 Vista parcial del modelo sobre la interface del Project Editor de Möbius

La Figura 2.2 muestra otra parte del modelo. La compuerta de entrada i_ACi_q_discard testea si hay un token en ac_q_discard(i). Es un artificio de modelación para la evaluación del número de tramas descartadas desde cada una de las colas individuales.

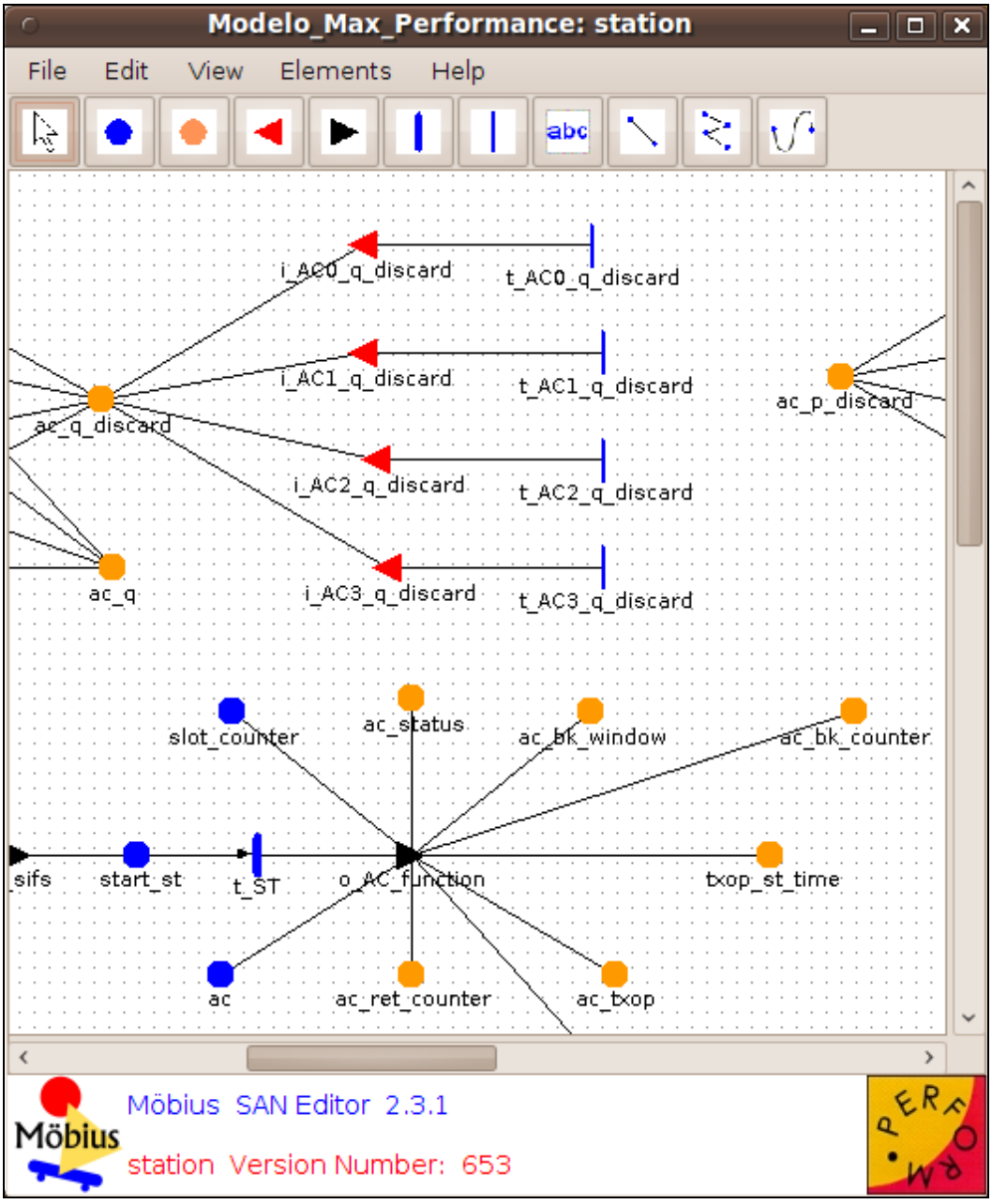


Figura 2.2 Vista parcial del modelo sobre la interface del Project Editor de Möbius

Las Figuras 2.3 y 2.4 muestra la interface del Study Editor, y los valores de diferentes parámetros correspondientes a una configuración dada del modelo atómico station (estación).

Con el Study Editor se pueden hacer diferentes estudios o experimentos de los escenarios, cambiando la configuración de los parámetros. Möbius soporta dos tipos de estudios: estudios de rango y estudios de conjunto. Un estudio de rango permite asignar a cada variable global un valor fijo o un rango de valores. Y un estudio de conjunto permite ingresar valores fijos para cada variable global. Este último caso es útil cuando las variables globales no cambian de manera regular. En las Figuras se observan partes de las variables definidas para el modelo atómico, su tipo y valor asociado para un estudio o experimento particular. Por ejemplo, aparecen los valores de los parámetros EDCA para cada uno de los cuatro tráficos que soporta la norma. Para la categoría de tráfico AC0 el experimento asigna:

- AIFSN0 = 5
- CWmax0 = 1023
- CWmin0 = 63
- TXOP0 = 15040

Mientras que para el mismo tráfico AC0, el máximo tamaño de cola MaxQ0 se ha configurado a 50 paquetes, y el tamaño de paquete TPACKET0 a 1500 bytes.

La Figura 2.5 muestra la interface del Simulation Editor, y el conjunto de parámetros que afectan su ejecución. Se observa en este caso que se encuentra habilitada la opción de *Steady State Simulation* para especificar el tipo de simulación.

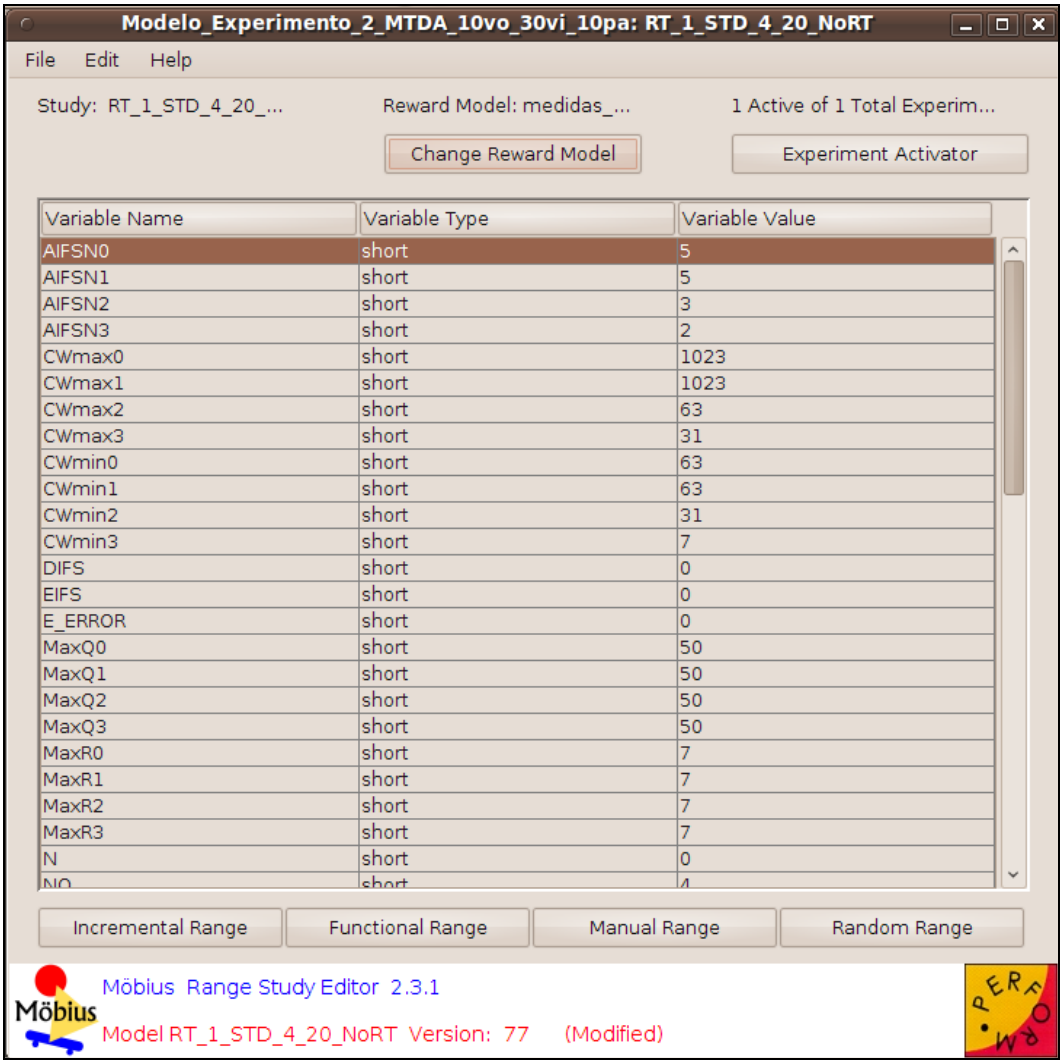


Figura 2.3 Vista parcial del modelo sobre la interface del Study Editor de Möbius

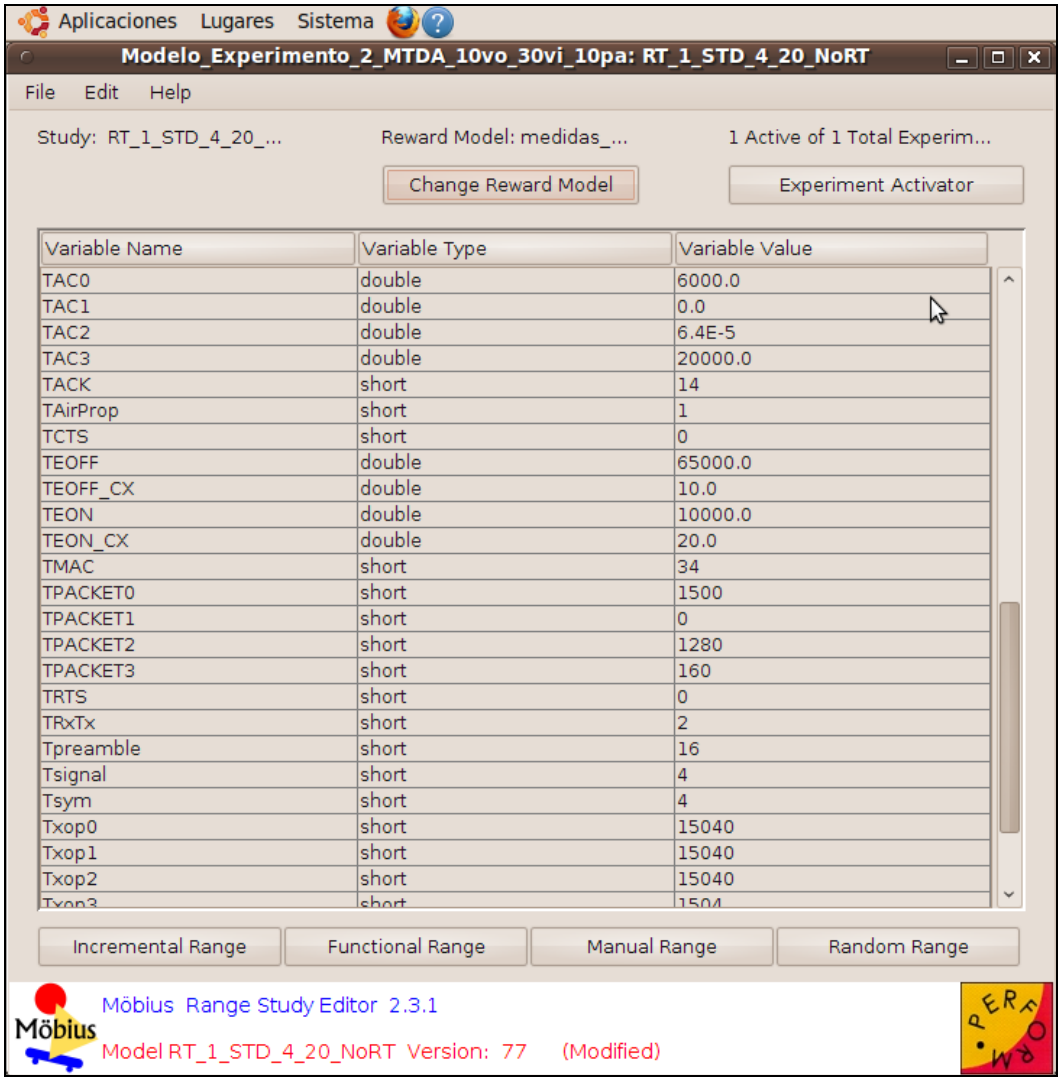


Figura 2.4 Vista parcial del modelo sobre la interface del Study Editor de Möbius

Además, para la configuración se muestran el valor *Lagged Fibonacci* para la opción del Generador de Números Aleatorios, el valor *31415* (que es el defecto del campo Semilla de Números Aleatorios), el valor *1000* para Batches Máximos y Mínimos, el valor *100* para el campo Número de Batches para actualización de datos y actualización de display, y el valor *Optimize* para Tipo de Compilación.

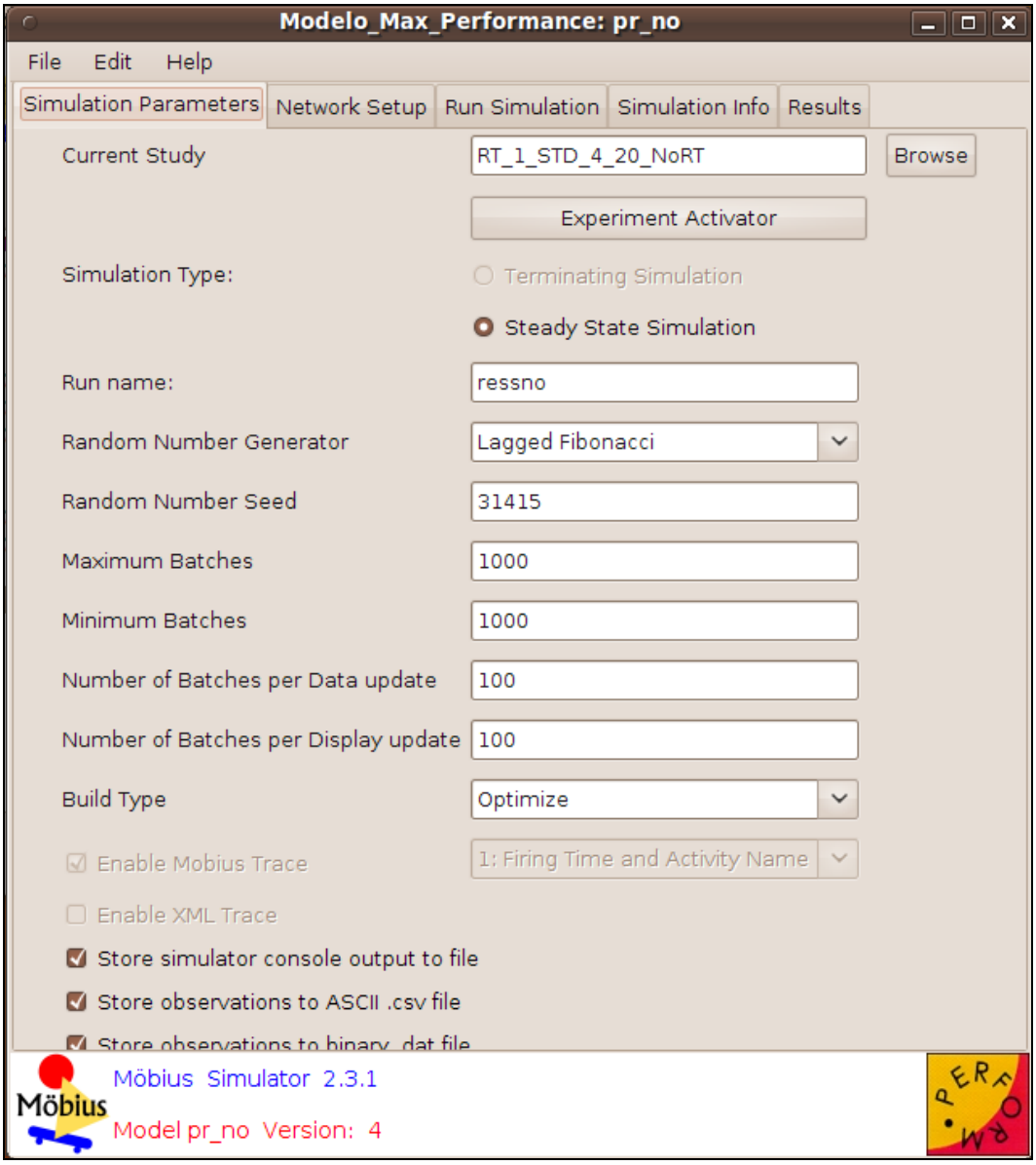


Figura 2.5 Vista de la Interface del Simulation Editor de Möbius

Las Figuras 2.6 y 2.7 muestran la interface del Project Editor en que se observan dos modelos compuestos distintos. En el primer caso (Escenario 1), aparece el modelo atómico errores combinado con el modelo atómico estación, replicado a su vez N veces. En el segundo caso (Escenario 2), se presenta el modelo atómico errores combinado con Nestacionesvoz réplicas del modelo atómico estacionvoz, con Nestacionesvideo réplicas del modelo atómico estacionvideo, y con Nestacionesbesteffort réplicas del modelo atómico estacionbesteffort. Los valores de N, Nestacionesvoz, Nestacionesvideo y Nestacionesbesteffort son parámetros enteros a configurar según cada escenario a evaluar.

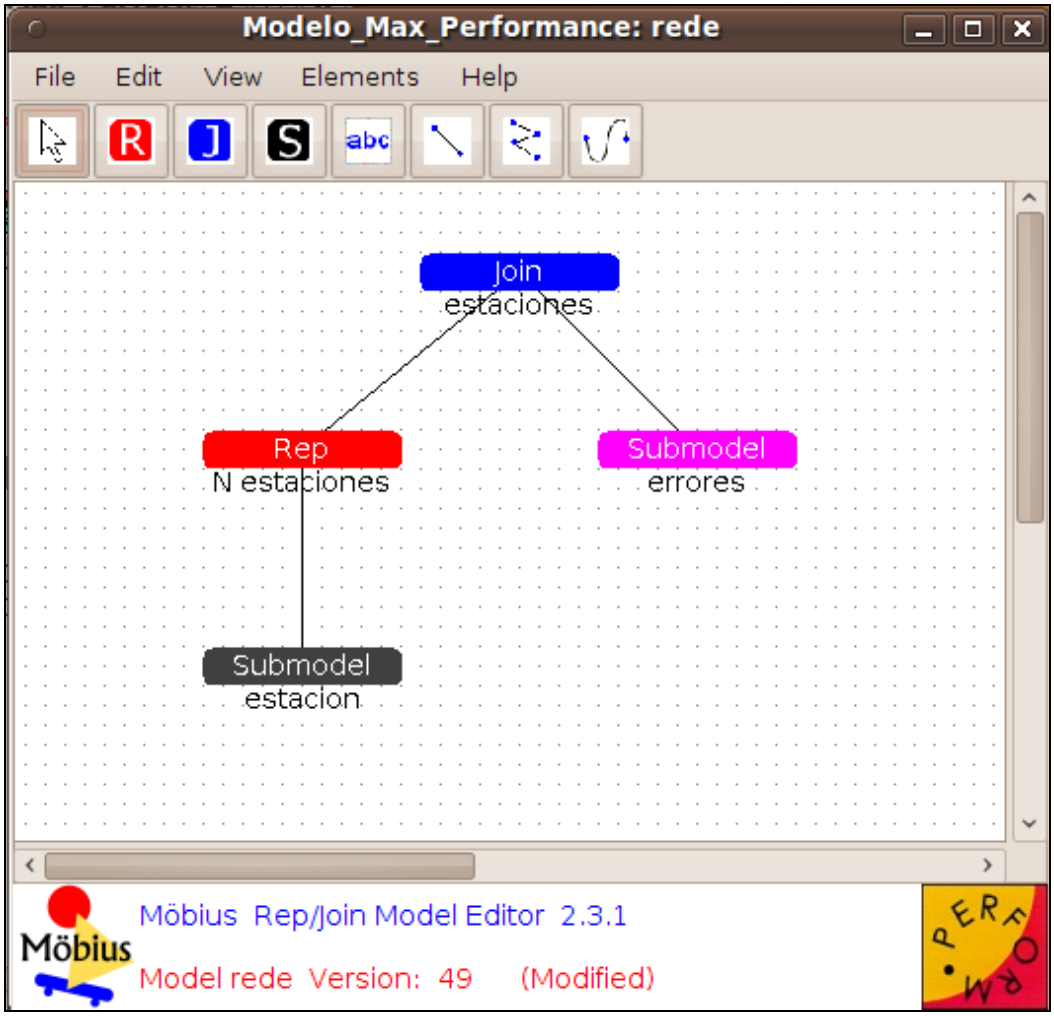


Figura 2.6 Vista del modelo compuesto Escenario 1 del Project Editor

La evaluación de performance se realiza en Möbius definiendo un conjunto de medidas en el modelo. Las métricas de prestaciones se derivan de dos tipos de mediciones: velocidades e impulsos. Las velocidades y tasas (rates) están asociadas con los marcados de los lugares de la HSAN. Con este tipo de medida es posible obtener probabilidades de ocupación, número promedio de tokens en cada lugar, etc. Los impulsos están asociados con los disparos de las transiciones, que son coleccionados cuando las mismas se activan. Con este tipo de métricas es posible obtener, para cada tráfico, valores de rendimiento, tamaño de colas, descarte de tramas, etc. Algunas otras medidas pueden derivarse desde las mencionadas previamente. Por ejemplo, el rendimiento relativo o el retardo de cola.

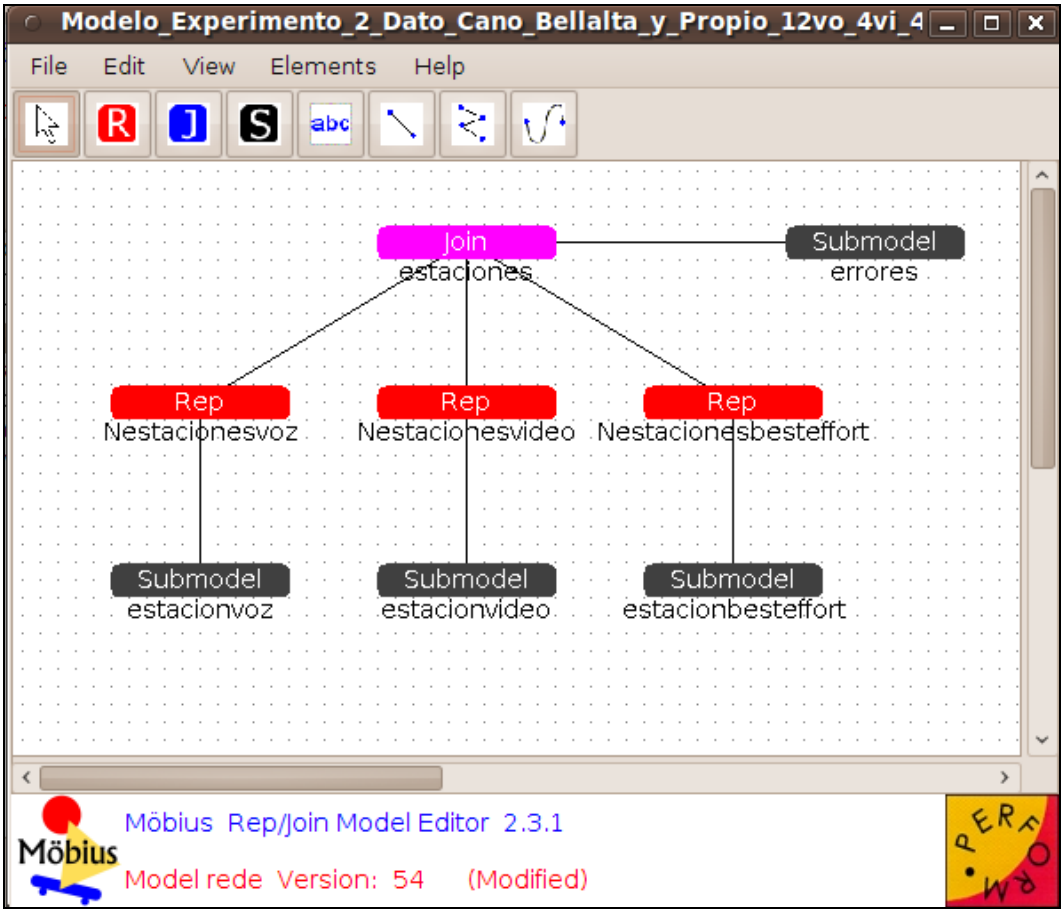


Figura 2.7 Vista del modelo compuesto Escenario 2 del Project Editor

II.4) VALIDACIÓN DEL MODELO

El Grupo de Trabajo IEEE 802.11e (IEEE 802.11e Working Group - WG) se estableció en 1999. Y el IEEE 802.11e se publicó como una mejora al estándar original sólo en diciembre de 2005. Durante el proceso de estandarización, se incorporaron un conjunto de modificaciones, iniciadas en las primeras versiones del borrador hasta el final. Además, se desarrollaron un número de modelos durante este periodo representando la conducta EDCF (referida en la versión draft) o la función EDCA (como esta referida en la versión final) asociada a las estaciones con QoS. Los modelos más representativos se conocieron en las publicaciones dadas en [62-64,146-147].

Esta sección discute la validación del modelo básico EDCA HSAN usando Möbius, realizada por los autores del mismo, y repetida para el presente trabajo, mostrando su funcionalidad con trafico de diferentes

ACs, y su conducta cuando el sistema cambia desde el área no saturada al área saturada.

II.4.1 Validación realizada por los autores del modelo original

El modelo fue validado por los autores desde dos perspectivas diferentes. Inicialmente, y la más importante, fue intensivamente depurado usando algunas técnicas, para una comparación sistemática contra la especificación IEEE 802.11e [82].

Luego, dado un escenario de simulación, compararon sus resultados con los obtenidos previamente por otros autores. En esta tarea, se siguió la misma metodología aplicada en [63-64], donde estos autores validaron tanto los modelos TKN EDCF y TKN EDCA contra los resultados presentados por Mangold [62]. Mangold implementó un modelo de simulación EDCF y realizó algunas evaluaciones de performance. Utilizó la capa física IEEE 802.11a con una velocidad de datos de 24 Mbps.

Para el test de la EDCA HSAN fueron elegidos los mismos escenarios de simulación de [62-64], donde el rendimiento de cada categoría de trafico (TC) es la métrica comparada en todas las simulaciones. El escenario consiste de una red ad hoc formado por estaciones, donde todas están en el rango de las otras, sin estaciones móviles u ocultas. Las estaciones transmiten 3 diferentes TCs: un flujo isócrono de alta prioridad a 128 kbps y 80 bytes de payload de datos; dos flujos Poisson de media y baja prioridad, con cada uno a 160 kbps y 200 bytes para el payload de datos. El número de estaciones se incrementó continuamente en 1, en cada simulación, desde 1 a 15. Los parámetros principales usados se muestran en la Tabla 2.3.

	High	Medium	Low
AIFSN	2	4	7
CWmin	7	10	15
CWmax	7	31	255
Paquete	80 bytes	200 bytes	200 bytes
rate	128 Kbps	160 Kbps	160 Kbps
803.11a 24 Mbps			

Tabla 2.3 Parámetros usados para validación del modelo básico

Las conclusiones más importantes de Mangold y coautores [62] (2001), de las Universidad de Tecnología de Aachen (Alemania) y Philips Research (USA y Alemania), sobre el comportamiento de EDCF, usando simulaciones estocásticas, se representan en la Figura 2.8 y en la Tabla 2.4. La Figura, tal cual la presenta Mangold en su trabajo, muestra el

rendimiento promedio de cada tráfico en función del número de estaciones. Y la Tabla presenta los resultados de un ensayo adicional del máximo rendimiento según el tamaño de la trama y la prioridad de tráfico. Todas las pruebas se obtuvieron con un error relativo limitado máximo del 5%.

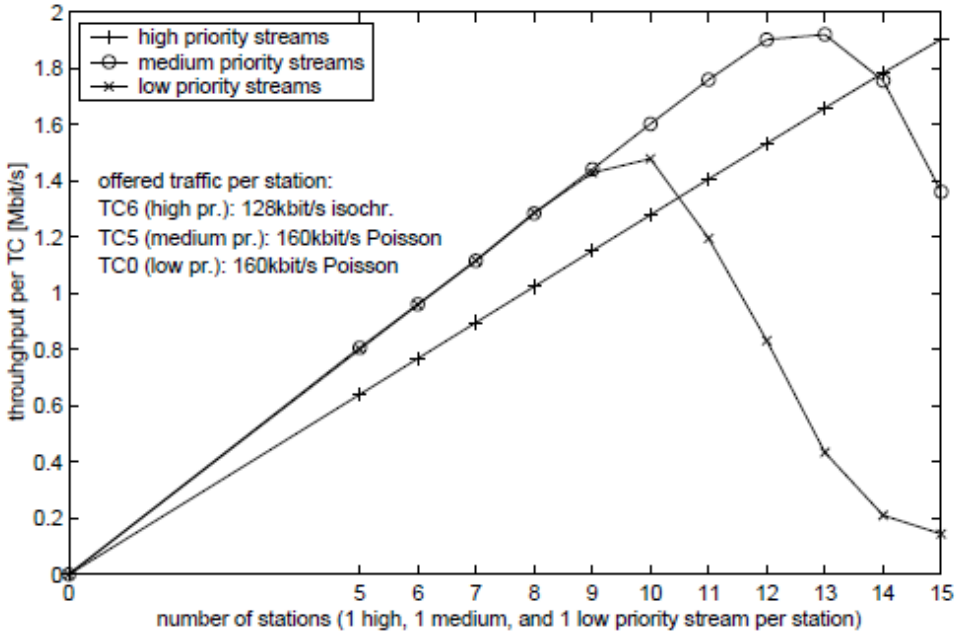


Figura 2.8 Rendimiento promedio del tráfico del ensayo de Mangold

Prioridad/Tamaño	80 bytes	200 bytes	2304 bytes
Alta	3.50	------	19.81
Media	------	6.22	19.16
Baja	------	5.21	18.22

Tabla 2.4 Máximo rendimiento según tamaño de la trama y la prioridad en [Mbps]

Conclusiones similares, se obtuvieron por Sven Wiethölter y Christian Hoene [63] del TKN (Telecommunication Networks Group) de la Universidad Técnica de Berlín (Alemania), sobre el comportamiento de EDCF, usando el simulador NS-2. Los resultados de rendimiento de los tráficos en función del número de estaciones y el máximo rendimiento según el tamaño de la trama y la prioridad, se representan en la Figura 2.9 y en la Tabla 2.5, respectivamente. La Figura es la misma presentada por los autores en su trabajo. En la Tabla se muestra la comparación del máximo rendimiento de los autores de TKN respecto a los resultados de Mangold, que se ubican a la derecha de la barra. Para la prueba de la

EDCF se eligió un nivel de confianza del 90% y una precisión del 10%. Mientras que para la simulación de rendimiento máximo se usó un nivel de confianza del 95% y un valor de precisión media del 5%.

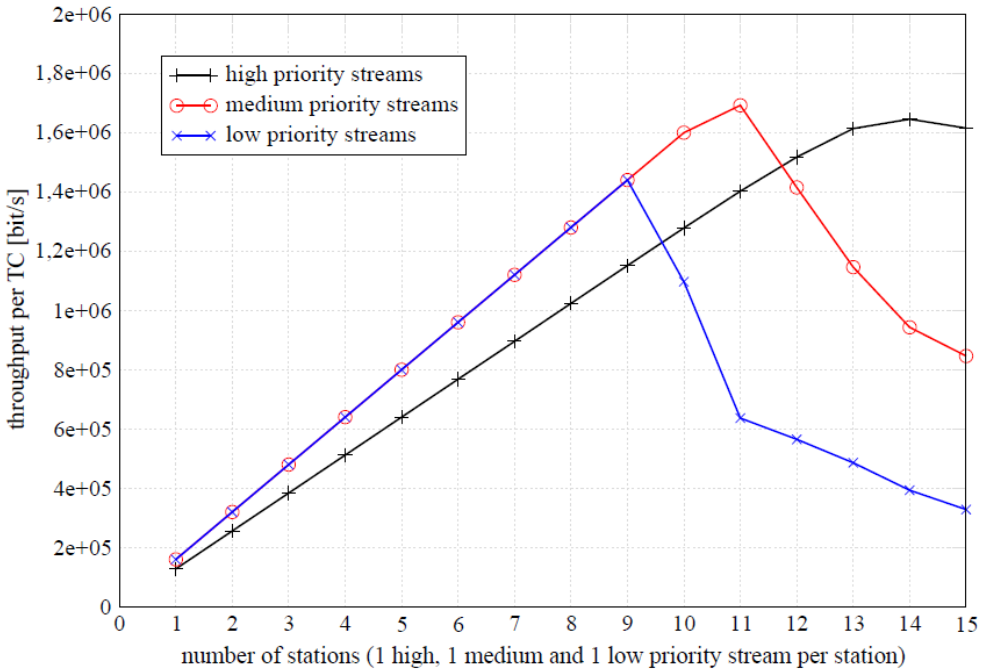


Figura 2.9 Rendimiento promedio del tráfico del ensayo de TKN EDCF

Prioridad/Tamaño	80 bytes	200 bytes	2304 bytes
Alta	3.52 / 3.50	------	19.98 / 19.81
Media	------	6.32 / 6.22	19.32 / 19.16
Baja	------	5.29 / 5.21	18.37 / 18.22

Tabla 2.5 Comparación del máximo rendimiento según tamaño de la trama y la prioridad en [Mbps] en el orden [TKN/Mangold]

Posteriormente, Sven Wiethölter y coautores [64] (2006) del TKN (Telecommunication Networks Group) de la Universidad Tecnica de Berlín (Alemania) y de la Universidad de Tübingen (Alemania), alcanzaron similares conclusiones, pero en este caso, sobre el comportamiento de EDCA, usando el simulador NS-2. Los resultados se representan en las Figuras 2.10 y 2.11. En la figura 2.11 se muestran los resultados del retardo medio de cola en función de la cantidad de estaciones. Los procesos de simulación se realizaron con un nivel de confianza de 95% y con un error relativo por debajo del 5%.

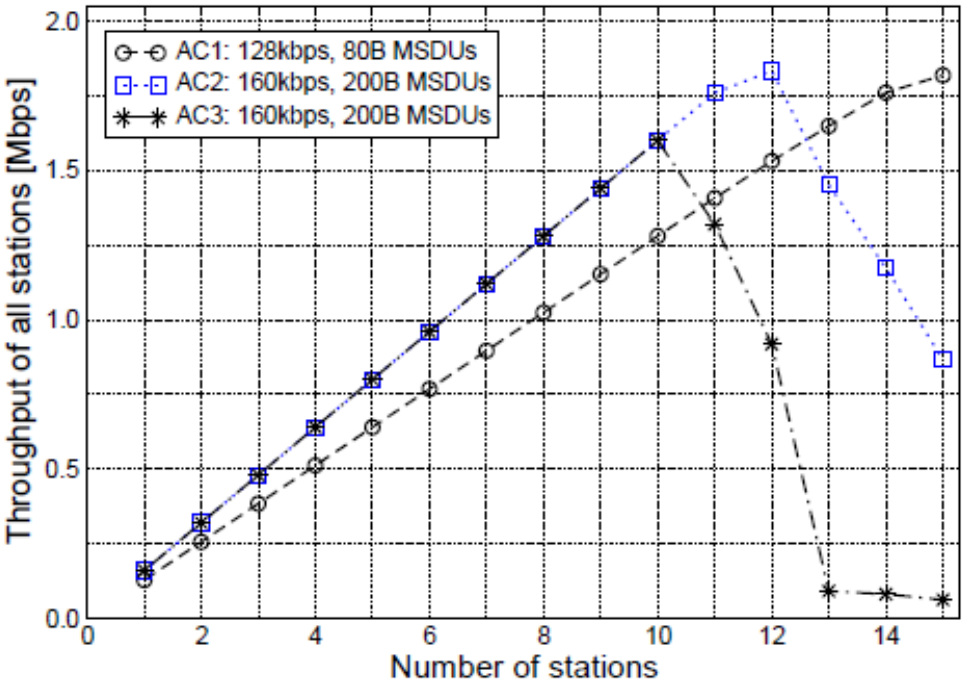


Figura 2.10 Rendimiento promedio del tráfico del ensayo de TKN EDCA

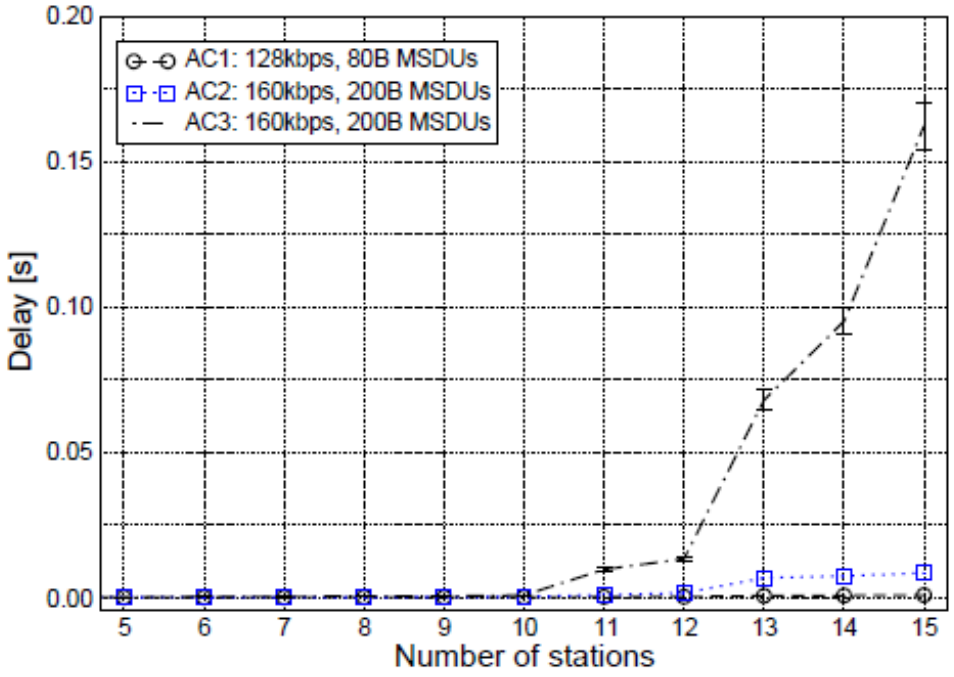


Figura 2.11 Retardo promedio del tráfico del ensayo de TKN EDCA

Los resultados de Vasques y coautores [61,142] (2007), sobre el modelo EDCA HSAN usando Möbius, se obtuvieron usando un intervalo de confianza del 95% y un margen de error del 5%. Las Figuras 2.12, 2.13 y 2.14, tomadas del trabajo original de Vasques, muestran los resultados para los niveles de alta, media y baja prioridad, respectivamente. Se observa que se efectúa la comparación con los resultados de Mangold y TKN.

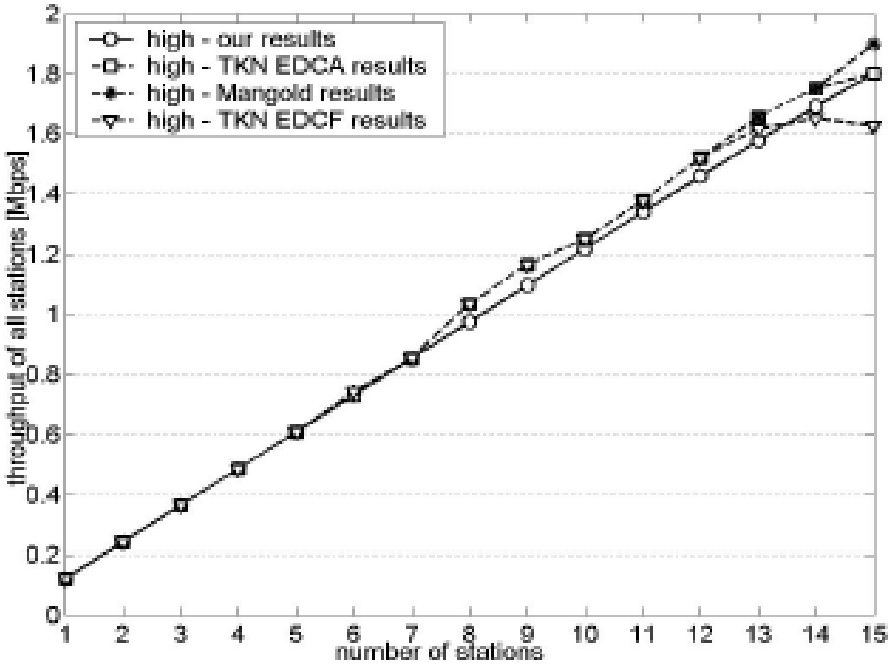


Figura 2.12 Rendimiento promedio del tráfico de alta prioridad del ensayo de Vasques EDCA HSAN comparado con los resultados de Mangold y TKN

Es claro que el modelo EDCA HSAN implementado por Vasques obtiene resultados similares al trabajo de Mangold [62]. Ulteriormente, estos resultados también son similares a los de TKN**.** Es digno de mención que los modelos de simulación de TKN son ampliamente usados por la comunidad científica. Por lo tanto, se asumió al modelo como verificado y correcto. El modelo se continúa usando por los autores en sus líneas de investigación para uso industrial hasta la fecha [143-145].

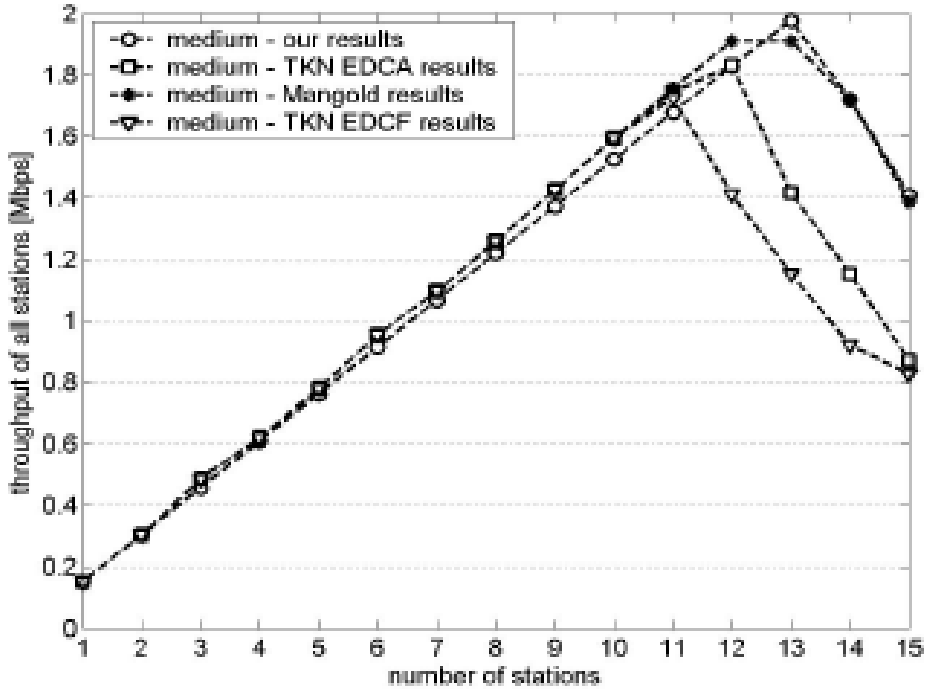


Figura 2.13 Rendimiento promedio del tráfico de prioridad media del ensayo de Vasques EDCA HSAN comparado con los resultados de Mangold y TKN

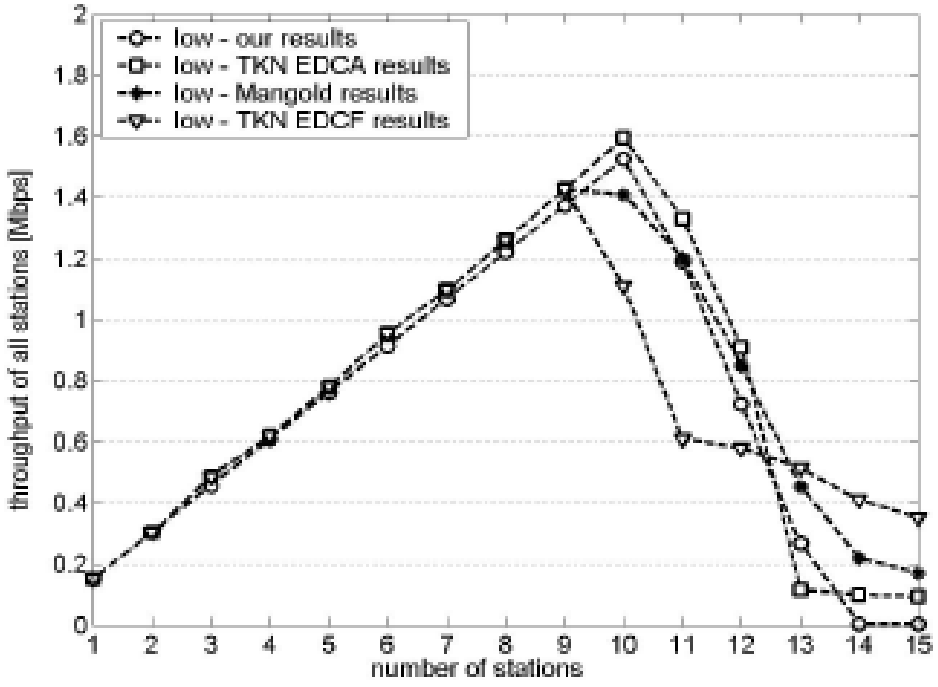


Figura 2.14 Rendimiento promedio del tráfico de baja prioridad del ensayo de Vasques EDCA HSAN comparado con los resultados de Mangold y TKN

II.4.2 Validación realizada por el tesista para este trabajo

El modelo también fue validado por el tesista, obteniendo las mismas conclusiones del apartado anterior, tal como se muestra en la Figura 2.15. Además, se realizó otro ensayo adicional para obtener por simulación el rendimiento máximo posible, tal cual lo realizaron Mangold [62] y otros autores TKN [63-64].

El rendimiento en 802.11 depende del tamaño de las tramas de datos. Mientras más grande es el tamaño de la trama, mayor es el rendimiento obtenido. También se observa que los streams de prioridad más alta también obtienen rendimientos más altos, debido a valores de los parámetros EDCA AIFS, CWmin y CWmax más pequeños.

Para el test de máximo rendimiento del modelo EDCA HSANs con Möbius, se eligió el mismo escenario de simulación de los otros autores, usando 802.11a en 24 Mbps. Se trata de una única estación que transmite un tipo de tráfico, variando el tamaño de la trama de datos y la prioridad.

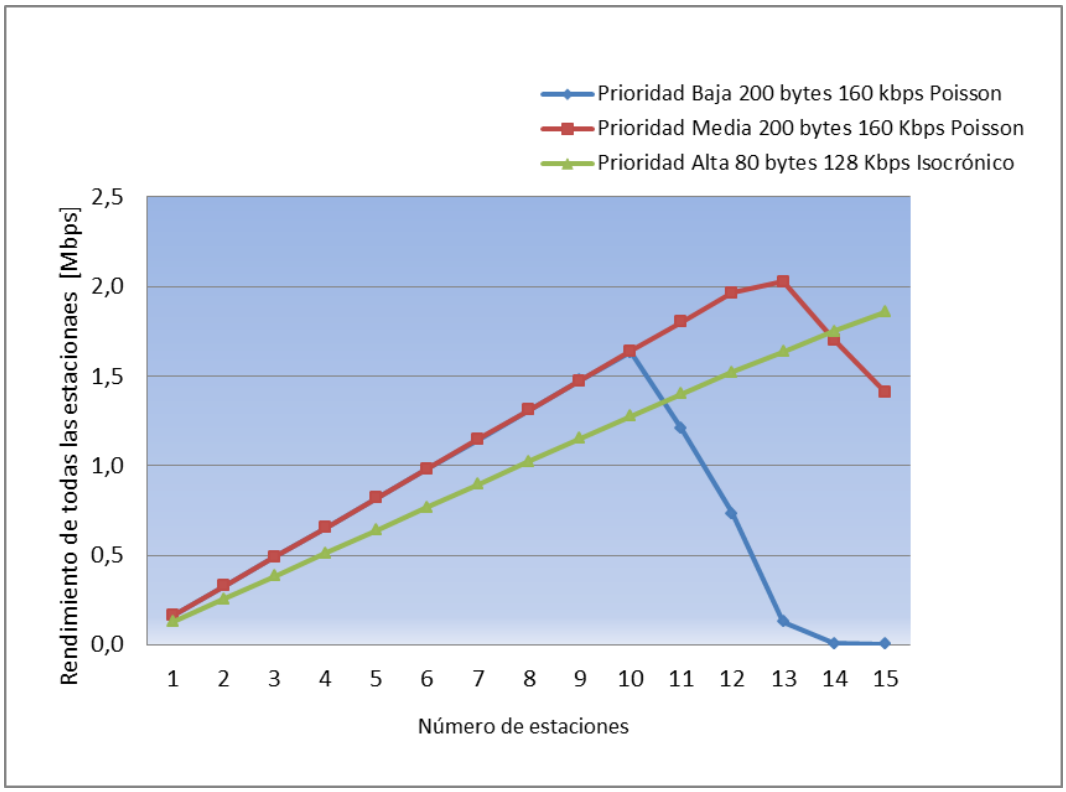


Figura 2.15 Rendimiento promedio del tráfico del ensayo del tesista EDCA HSAN

Los resultados obtenidos de máximo rendimiento del modelo EDCA HSAN usando Möbius se representan en la Tabla 2.6, y se comparan con los resultados de los otros autores (ver Tabla 2.5). Se alcanzaron valores muy similares, lo que permite asumir la validez del modelo y el dominio del mismo para su uso en nuevos escenarios, objeto del presente trabajo de tesis. Las mínimas diferencias, expresadas en valores relativos sobre la media de los otros autores, están en el orden del 5% de margen de error del modelo EDCA HSAN. Además, seguramente reflejan las singularidades de implementación de cada trabajo enumeradas en II.2 y II.3; por ejemplo, algunos autores modelaron EDCF en lugar de EDCA, utilizaron distintos modelos de error, usaron simplificaciones en la modelación del tráfico Poisson, y/o desarrollaron sus experimentos con niveles de confianza diverso en la simulación de los ensayos, entre otros aspectos. Este criterio también es aplicable a las curvas de rendimiento.

Tamaño Prioridad	80 bytes	Dif	200 bytes	Dif	2304 bytes	Dif
Alta	3.52/3.50/3.91	11,40%	------		19.98/19.81/20.16	1,33%
Media	------		6.32/6.22/6.80	8,45%	19.32/19.16/19.50	1,35%
Baja	------		5.29/5.21/5.61	6,86%	18.37/18.22/18.52	1,23%

Tabla 2.6 Comparación del máximo rendimiento según tamaño de la trama y la prioridad en [Mbps] en el orden [TKN/Mangold/tesista]

II.5) SUMARIO

El modelo HSAN sobre Möbius implementa la función EDCA principal en gran detalle, siguiendo cerradamente las especificaciones del estándar. Cuando se lo compara con otros modelos de simulación usados corrientemente, provee una implementación más exacta de algunos aspectos (por ejemplo, timeouts y conductas EIFS), una implementación flexible y una facilidad de uso, que incluye la posibilidad de obtener una interesante variedad de medidas de prestaciones. Es también el primer modelo que cubre este protocolo usando una versión de Redes de Petri (HSANs).

Se ha demostrado que se ha podido repetir y validar la funcionalidad del modelo de Vasques EDCA HSAN, y comparar los resultados de rendimiento de acuerdo al escenario propuesto por Mangold, con los de TKN, autores de reconocida trayectoria internacional. Además, se ha efectuado el ensayo de máximo rendimiento con resultados bastantes similares a pesar de la diferencias en los aspectos de implementación.

CAPITULO III

ENTENDIENDO LAS LIMITACIONES DE EDCA 802.11E: IMPACTO DE LAS PRESTACIONES ANTE LA DIVERSIDAD DEL TRÁFICO WI-FI

En el presente Capítulo, se analiza la conducta del mecanismo EDCA, cuando interactúan entre si diferentes tipos de tráficos (voz, video, mejor esfuerzo, etc.), manteniendo fija o cambiando la proporción relativa entre ellos. El análisis se efectúa determinando las métricas de prestaciones sobre diversos escenarios propuestos al efecto. Se demostrará la hipótesis de la tesis sobre que la variación en la proporción relativa de diferentes tipos de tráficos de nodos wíreless con QoS tendrá un efecto diferenciado sobre el comportamiento y estado general de la red WLAN que integran.

III.1) INTRODUCCIÓN

Los autores de [147-148] fueron unos de los tantos que avanzaron sobre la discusión de las ventajas del framework EDCA 802.11e, las debilidades de la configuración por defecto, y la flexibilidad provista por el estándar para ulterior mejora de la performance sobre las configuraciones de parámetros básicas.

En DCF 802.11, solo se provee el servicio de mejor esfuerzo (best effort). Sin embargo, las aplicaciones multimedia limitadas en tiempo (por ejemplo, voz sobre IP, videoconferencias) requieren ciertas garantías de ancho de banda, retardo y jitter.

El punto es que con DCF, todos los tráficos de datos de capa superior de una estación compiten por ser transmitidos al medio compartido con la misma prioridad, como se esquematiza en la Figura 3.1. Es decir, los paquetes de tráfico diverso comparten una cola común. No hay mecanismo de diferenciación para proveer mejor servicio para el tráfico multimedia y de tiempo real que para las aplicaciones de datos generales.

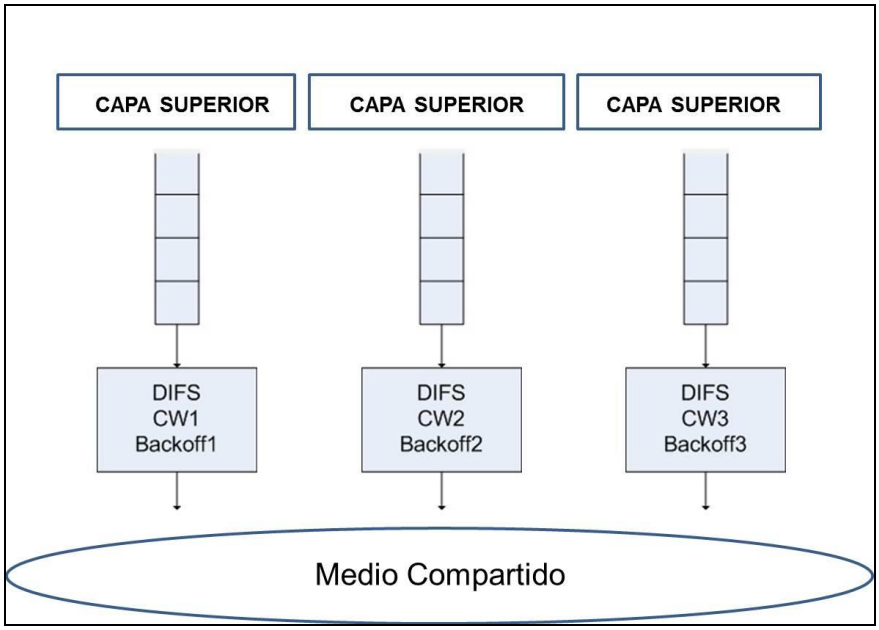


Figura 3.1 Esquema de funcionamiento de DCF de 802.11

Para ilustrar el problema de DCF, los autores de [148] realizaron el siguiente ensayo usando el simulador de red NS-2 (Network Simulador 2). Ubicaron un número variable de STAs dentro de un área donde no había terminales ocultas. Ellas operaban en el modo ad hoc. La velocidad de datos de capa PHY de cada STA se configuró a 802.11a en 36 Mbps. Cada STA transmitía tres tipos de flujos de tráfico (flujos de datos de voz, video y best effort) usando UDP como el protocolo de capa de transporte. El flujo de voz se eligió como un streams de modulación de pulsos codificados (pulse code modulated-PCM), con periodos fijos de 20 ms. La velocidad de transmisión del flujo de video fue de 640 Kbps con un tamaño de paquete de 1280 bytes y distribución Poisson. Y la velocidad de transmisión de tráfico de mejor esfuerzo fue 1024 Kbps, con tamaño de paquete de 1500 bytes, y también con distribución Poisson. Los valores se resumen en la Tabla 3.1

	Voz	Video	Mejor Esfuerzo
Paquete	160 bytes	1280 bytes	1500 bytes
Rate	64 Kbps	640 Kbps	1024 Kbps
803.11a 36 Mbps			

Tabla 3.1 Tamaños de paquetes y tasas de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo

Los autores variaron la carga al incrementar el número de STAs desde 2 a 18. La Figura 3.2 muestra los retardos promedio de los tres tipos de tráfico en función del número de STAs.

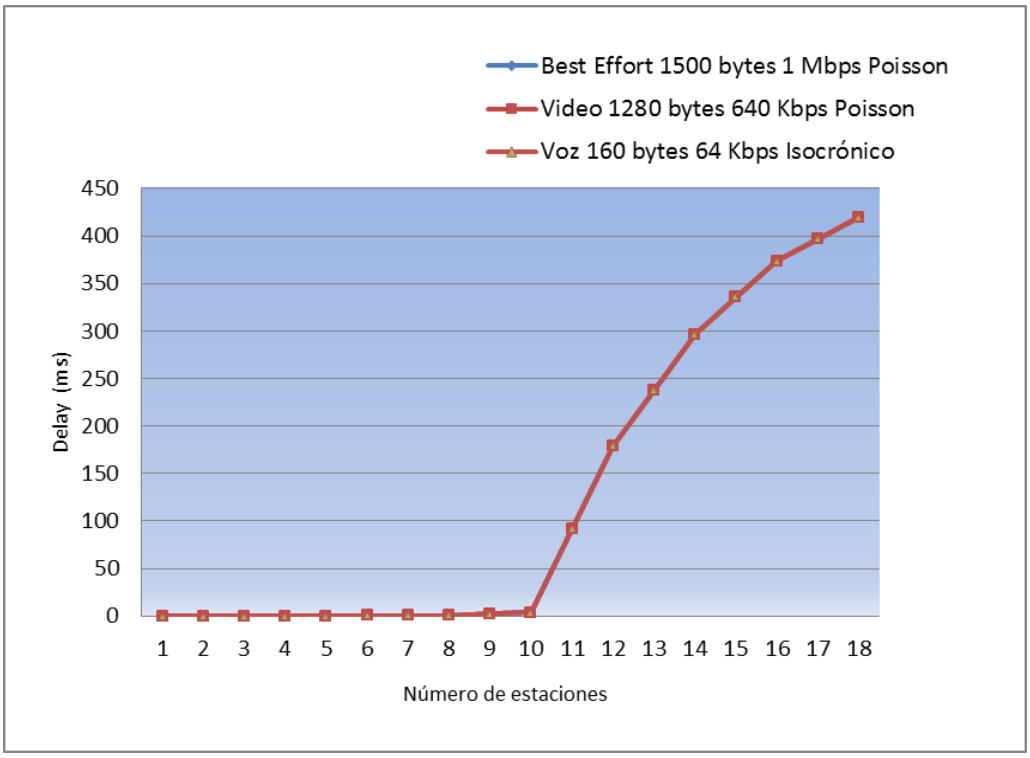


Figura 3.2 Retardo en DCF de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo en función del número de estaciones

El retardo medio de los flujos de voz, video y mejor esfuerzo no alcanzó los 4 ms cuando la carga del canal era menor al 70% (el número de STAs estaba por debajo de 10). Sin embargo, cuando el número de STAs excedió 10, los retardos medios de los tres tipos de flujos se incrementaron hasta cerca de los 420 ms, y evolucionaron de la misma manera para los diferentes tipos de flujos. Con este experimento demostraron que en DCF no hay diferenciación de servicio entre los diferentes tipos de flujos, lo que causa un problema de QoS para las aplicaciones multimedia cuando la carga de tráfico es alta.

III.1.1 Características de la Estación con QoS de Experimentación

Inicialmente, y a los fines de favorecer el análisis planteado y las comparaciones, se adoptaron los parámetros generales 802.11a en 36 Mbps, y los tipos de tráfico propuestos por los autores [147-148] (Tabla 3.1). Se tomó dicha experiencia sobre la DCF como el punto de partida, en búsqueda de mejores alternativas para favorecer la diferenciación de servicio con QoS.

Además, con el objeto de aproximar los ensayos a escenarios lo más realistas posibles, se introdujeron las siguientes variantes:

- Ambiente con tasa de error de 10^{-4} , y
- Tráfico de mejor esfuerzo con distribución Pareto.

III.1.1.1 Ambiente con tasa de error de 10^{-4}

Se adoptó el estudio de la conducta de la red 802.11e en presencia de interferencias. Para ello, se uso el submodelo de error incluido en el modelo básico EDCA HSAN. Se trata de una variante del modelo de error de Gilbert-Elliot. El canal esta siempre en uno de dos estados: Good o Bad. Este modelo asume que los errores de bits son independientes, con una tasa de error fija, y un tiempo distribuido logarítmicamente normal en cada estado.

De acuerdo a [149-150], este modelo es realista para las transmisiones wireless en un ambiente con ruido. Y para su parametrización, han sido adoptados los mismos valores de dicho trabajo, con una duración media de estado Good de 65 ms, y una duración media del estado Bad de 10 ms. Además, el coeficiente de variación (CoV) para los tiempos de mantenimiento de estado Bad ha sido configurado a 10, y para el estado Good a 20. Se asume que los errores sólo ocurren en el estado malo.

Se define un BER medio de 10^{-4}, y así, durante los estados de canal Bad, el BER estará cerca de 0,00075, y no se producirán errores en el estado Good. Las probabilidades de estado estable de encontrar el canal en estado Bad son del 13,3%.

III.1.1.2 Tráfico de mejor esfuerzo con distribución Pareto

El análisis de colas ha sido y es de enorme utilidad para los diseñadores de redes y analistas de tráfico, a efectos de planificar las capacidades de los elementos de red y predecir su rendimiento. Además, los modelos exactos del tráfico Ethernet y Wireless 802.11 son importantes para modelar las aplicaciones de capa superior, y los buffers de memoria de switchs y otros dispositivos activos. Sin embargo, muchos resultados predichos a partir del análisis de colas difieren significativamente del rendimiento observado en la realidad. En [77-151], se demostró que para algunos entornos el patrón de tráfico Ethernet y Wireless 802.11 es autosimilar, en lugar de Poisson.

En dichos artículos se han relacionado los temas de autosimilitud, la distribución de Pareto y la prueba de Kolmogorov-Smirnov sobre redes Wi-Fi, con el mismo criterio que se hizo sobre tráfico Ethernet. Y se ha

verificado a través del estudio experimental que el tráfico de datos Wireless 802.11 responde efectivamente a la distribución Pareto, estableciéndose los valores de los parámetros de dicha distribución. En diversos trabajos de investigación como los presentados en [152-154] han sido estudiados estos aspectos.

Atento a ello, se configuró el tráfico de mejor esfuerzo simulado con una distribución Pareto con factor de forma 1.9, en lugar de Poisson (con rendimiento medio equivalente a la distribución Poisson).

III.1.2 Estación de Experimentación

Por lo expuesto en apartados anteriores e ilustrar el comportamiento EDCA, se realizaron simulaciones usando el modelo de estación EDCA HSAN sobre el simulador Möbius, configurado de acuerdo a los parámetros por defecto y valores resumidos en las Tablas 3.2 y 3.3.

Parameters		CWmin	CWmax	DIFS/AIFSN
DCF		aCWmin	aCWmax	2
EDCA	AC_BK	aCWmin	aCWmax	7
	AC_BE	aCWmin	aCWmax	3
	AC_VI	(aCWmin+1)/2-1	aCWmin	2
	AC_VO	(aCWmin+1)/4-1	(aCWmin+1)/2-1	2

Tabla 3.2 Conjunto de Parámetros DCF y EDCA por defecto

	Voz	Video	Best Effort
AIFSN	2	2	3
CWmin	3	7	15
CWmax	7	15	1023
Paquete	160 bytes	1280 bytes	1500 bytes
Rate	64 Kbps	640 Kbps	1024 Kbps
TXOP	1,504 ms	3,008 ms	----
Rate 803.11a		36 Mbps	
aSIFSTime		16 µs	
aSlotTime		9 µs	
ACCATime		4 µs	
aAirPropagationTime		1 µs	
aRxTxTuranroundTime		2 µs	
aPreambleLenght		16 µ	
aPLCPHeaderLength		4µ	
Tamaño máximo de cola		50	
$N°_{max}$ retransmisiones		7	
BER_{medio}		10^{-4}	

Tabla 3.3 Parámetros 802.11a en 36 Mbps y EDCA por defecto utilizados en la experimentación

III.2) ESCENARIOS DE EXPERIMENTACIÓN

Los escenarios de simulación propuestos, analizan la conducta de las categorías de acceso más altas (voz y video) del mecanismo EDCA, cuando estas categorías interactúan entre sí, en presencia o ausencia de fuentes de tráfico de mejor esfuerzo, y/o al cambiar la proporción relativa de estaciones de diferentes tipos de tráficos en la red. Para proponer instancias de comparación en las diferentes configuraciones de los escenarios propuestos, se decidió establecer los siguientes puntos críticos o de verificación:

- Rendimiento Promedio Máximo,
- Caída o Pérdida del 1, 5 y 10 % del Rendimiento Relativo Promedio,
- Retardo de Cola Promedio en Rendimiento Máximo
- Retardo de Cola Promedio en 10 estaciones,
- Retardo de Cola Promedio (máximo) en 20 estaciones,
- Tamaño de Cola Promedio para 10 estaciones, y
- Tamaño de Cola Promedio para 20 estaciones

III.2.1 Escenario 1

El primer escenario considera la carga de tráfico generada por estaciones operando en la misma banda de frecuencias, variando la carga al incrementar el número de estaciones activas desde 1 a 20, como indica la Figura n° 3.3. Se observa la red formada por el submodelo de estación experimental, replicado N veces, y el submodelo de errores. Todas las estaciones transmiten una mezcla de los mismos tipos de tráficos.

Dentro de este escenario se plantearon diferentes situaciones, según el tipo de tráfico inyectado por las estaciones, a saber:

- Estaciones con todos los flujos de trafico presentes (voz, video y best effort),
- Estaciones sin tráfico de voz,
- Estaciones sin tráfico de video, y
- Estaciones sin tráfico de mejor esfuerzo

III.2.2 Escenario 2

El segundo escenario considera la carga de tráfico generada por estaciones operando en la misma banda de frecuencias, variando la carga al incrementar el número de estaciones activas desde 1 a 45, pero manteniendo la proporción relativa de estaciones de diferentes tipos de tráficos en la red, como indica la Figura 3.4. Se observa la red formada por los submodelos de estación experimental de voz, de video y de mejor

esfuerzo, replicados según la proporción deseada, y el submodelo de errores. Las estaciones transmiten uno de los siguientes tráficos: voz, video o mejor esfuerzo.

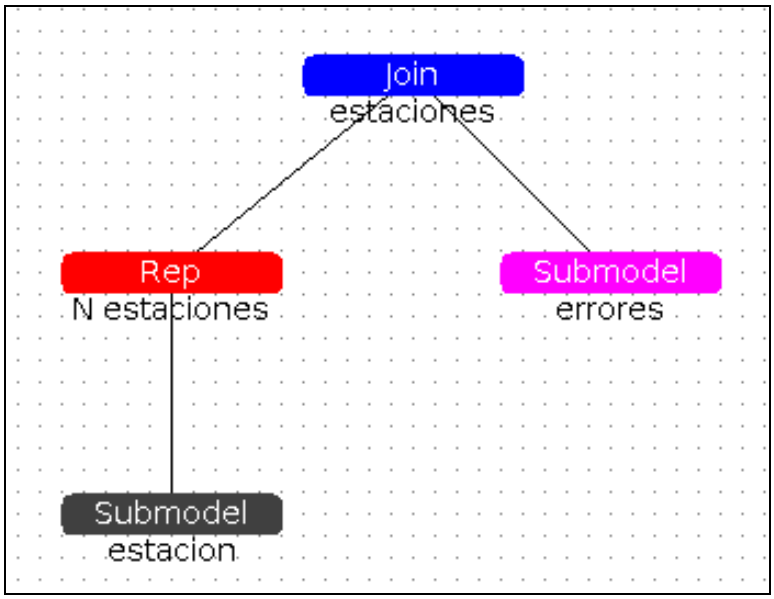


Figura 3.3 Escenario 1 formado por N estaciones y el submodelo de errores

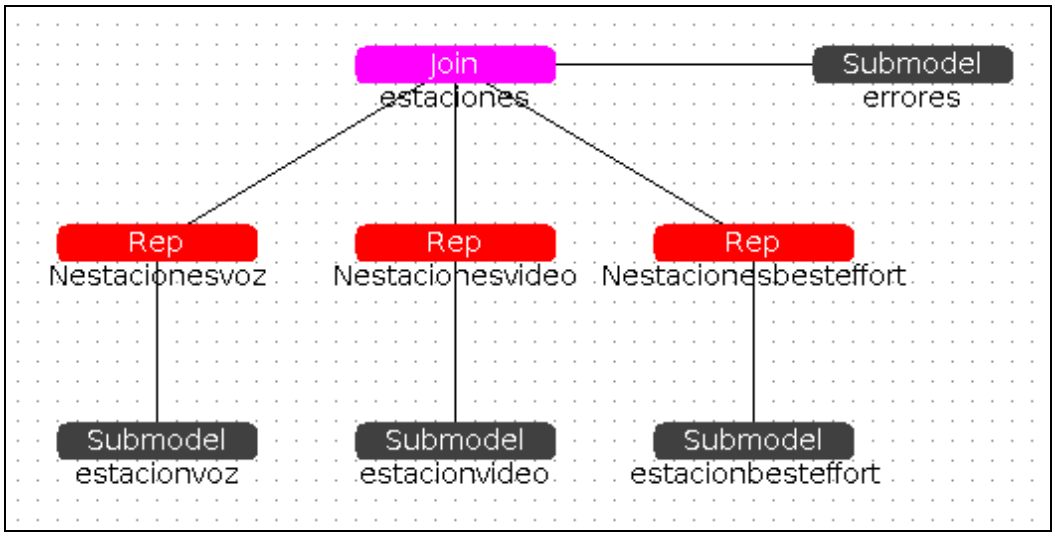


Figura 3.4 Escenario 2 formado por estaciones sólo de voz, video o mejor esfuerzo, y el submodelo de errores

Dentro de este escenario se plantearon diferentes situaciones, según la proporción del tipo de estaciones, a saber:

- 60 % de estaciones de voz, 20 % de video y 20 % de mejor esfuerzo,
- 20 % de estaciones de voz, 60 % de video y 20 % de mejor esfuerzo,
- 20 % de estaciones de voz, 20 % de video y 60 % de mejor esfuerzo.

Salvando la primera situación del escenario 1, a conocimiento del tesista, esta es la primera experiencia de análisis exhaustivo, con las variantes del escenario 1. Además, se incluye con el escenario 2 una nueva propuesta variando la proporción relativa de los tipos de tráfico presentes en la red, incluyendo sus variantes respectivas.

III.3) RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN [78-80].

Todas las simulaciones han sido obtenidas usando el modelo de simulación EDCA HSAN, previamente descrito, y configurado de acuerdo a la Tabla 3.3, y los perfiles de tráfico de cada escenario, con un intervalo de confianza del 95% y una precisión del 5 %.

Las métricas de prestaciones analizadas incluyen: rendimiento absoluto, rendimiento relativo, pérdida de paquetes, retardo de cola promedio y tamaño de cola promedio. El rendimiento directo o absoluto indica el número de paquetes transmitidos exitosamente expresado en Mbps. El rendimiento relativo es la relación entre el número total de paquetes transmitidos exitosamente y el número total de paquetes generados por cada stream de tráfico. La pérdida de paquetes se calcula como (1-rendimiento relativo)*100, y representa el porcentaje de paquetes que se pierden para cada stream de tráfico. El retardo de cola promedio es el retardo promedio requerido para transferir un paquete, medido desde el comienzo de su generación en la capa de aplicación hasta la finalización de la transferencia del paquete. Por último, el tamaño de cola promedio representa la ocupación promedio de la cola o buffer de salida.

III.3.1 Escenario 1

III.3.1.1 Estaciones con todos los tráficos

Como un primer paso, se realizaron las simulaciones para caracterizar la conducta de la red, cuando todas las estaciones están transfiriendo mensajes con todos los tipos de tráficos, en el medio de comunicación.

Los valores promedio obtenidos para el rendimiento directo, rendimiento relativo, tamaño de cola y retardo de paquete, variando la carga de 1 a 20 estaciones, se muestran en las Figuras 3.5, 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9.

En la Figura 3.5 se destaca que EDCA provee la diferenciación de servicio esperado entre los diferentes tipos de tráfico. Además, que el rendimiento de los flujos de voz y de video (de más alta prioridad) se mantiene más estable que el flujo de mejor esfuerzo (de más baja prioridad). El flujo de voz alcanza un pico de 0,924 Mbps en la estación 19. Mientras que en la estación 10, el tráfico de mejor esfuerzo alcanza un pico de 10,285 Mpbs, y luego decae rápidamente. También decae el rendimiento del tráfico de video, aunque más levemente y a partir de la estación 18. En dicha estación alcanza un rendimiento máximo de 10,856 Mbps.

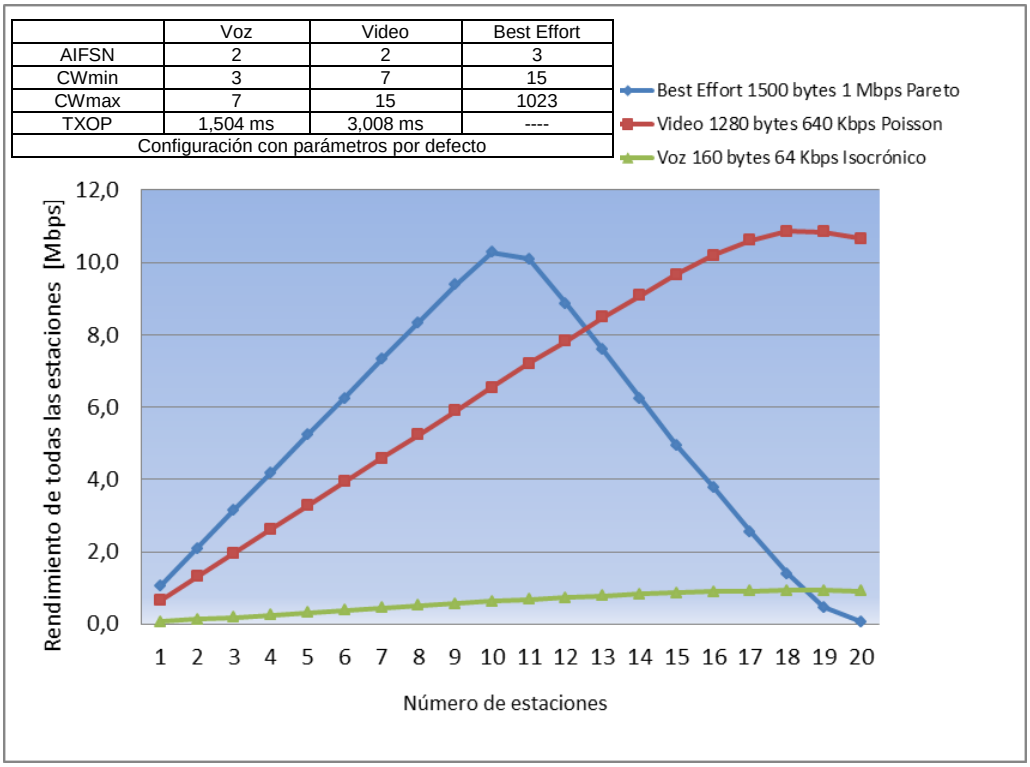


Figura 3.5 Rendimiento de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 1.1

La Figura 3.6 muestra el rendimiento relativo. El mismo aparece prácticamente sin pérdidas significativas hasta la estación 8, independientemente del flujo que se trate. Los flujos de voz y de video alcanzan en la estación 20 una pérdida de 28,06% y 18,70%, respectivamente; mientras que el de mejor esfuerzo ya pierde un 30 % de rendimiento en la estación 12. Además, a partir de la estación 8 el tráfico

de voz cruza el umbral del 0,5% de caída del rendimiento. Desde la estación 10 el tráfico de voz cruza el umbral del 1 %. Y para 15 estaciones, el rendimiento relativo del tráfico de voz cae un 10%, lo cual es inaceptable para la mayoría de las aplicaciones de voz. Esto confirma que los mecanismos de diferenciación de trafico pueden proteger una clase de más alta prioridad de una clase de más baja prioridad, pero no puede reducir la influencia de los flujos de tráfico dentro de la misma clase de prioridad cuando la carga de tráfico crece progresivamente.

Para el caso del tráfico de video, la caída de umbral de 5% se produce a partir de la estación 18.

La figura 3.7 presenta el tamaño de cola promedio de las estaciones. Se observa el crecimiento brusco del tamaño de la cola para el tráfico de mejor esfuerzo a partir de la estación 9, en concordancia con las métricas anteriores. Los tamaños de cola para el tráfico de voz y video permanecen por debajo de la unidad en la estación 20, lo que nos indica que todos los tiempos límites se satisfacen.

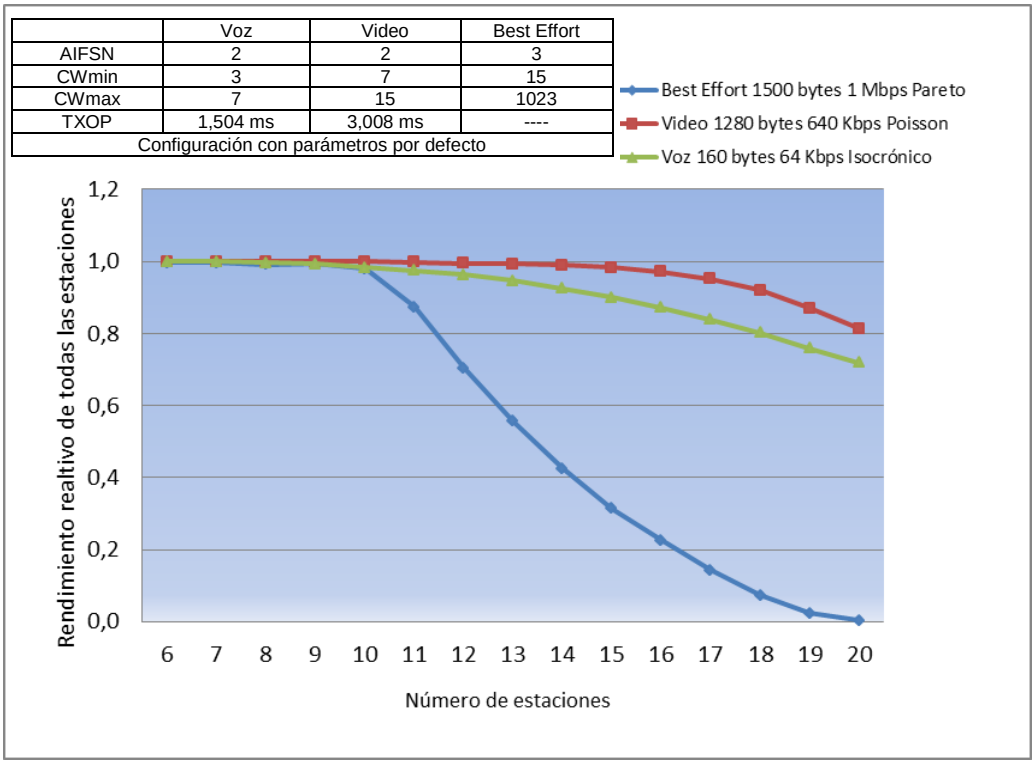


Figura 3.6 Rendimiento relativo de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 1.1

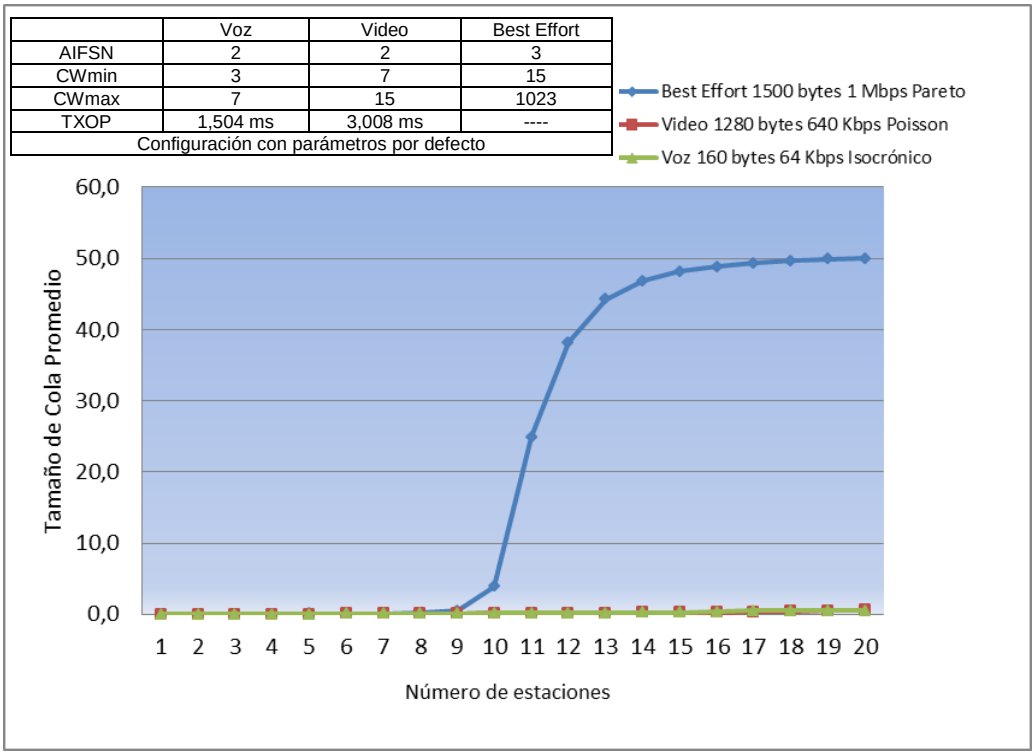


Figura 3.7 Tamaño de cola de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 1.1

Finalmente, en las Figuras 3.8 y 3.9 se presentan los retardos o delays de los tráficos de las estaciones. El retardo promedio de voz es de 15 ms para 20 estaciones, y es más pequeño que el periodo del mensaje de 20 ms. Sin embargo, el retardo promedio del flujo de mejor esfuerzo ha crecido rápidamente desde la estación 10.

El análisis de simulación para este escenario muestra que: i) El número creciente de estaciones en el dominio de red influye fuertemente en la conducta del tráfico, produciendo un tamaño de cola promedio siempre creciente, aunque acotado a la unidad para el tráfico de voz y video, y un rendimiento relativo decreciente, independientemente del tráfico; ii) El tamaño de cola promedio de voz se incrementa, hasta dos órdenes de magnitud, cuando la carga se incrementa a 20 estaciones; se observa entonces el efecto indeseado que se tiene en el rendimiento de voz, cuando se trata de aplicaciones muy estrictas en sus requerimientos; en todos los casos se ha verificado primero el umbral de pérdida de rendimiento, antes que se alcance el umbral de retardo especificado. Igual criterio se verificó para el tráfico de video; iii) El mayor impacto sobre la calidad de las comunicaciones es debido a las colisiones virtuales y reales, a las pérdidas y a la propia configuración del protocolo EDCA 802.11e; las características de error configuradas en el medio wireless tienen un impacto significativamente menor; iv) El tráfico de mejor

esfuerzo, de menor prioridad, resulta afectado sensiblemente en todas sus métricas a partir de la estación 10, en beneficio de los otros tráficos. La caída drástica de las prestaciones de mejor esfuerzo se da aproximadamente en el mismo punto, común para todos los tráficos, cuando el escenario corre sobre DCF (ver Figura 3.2).

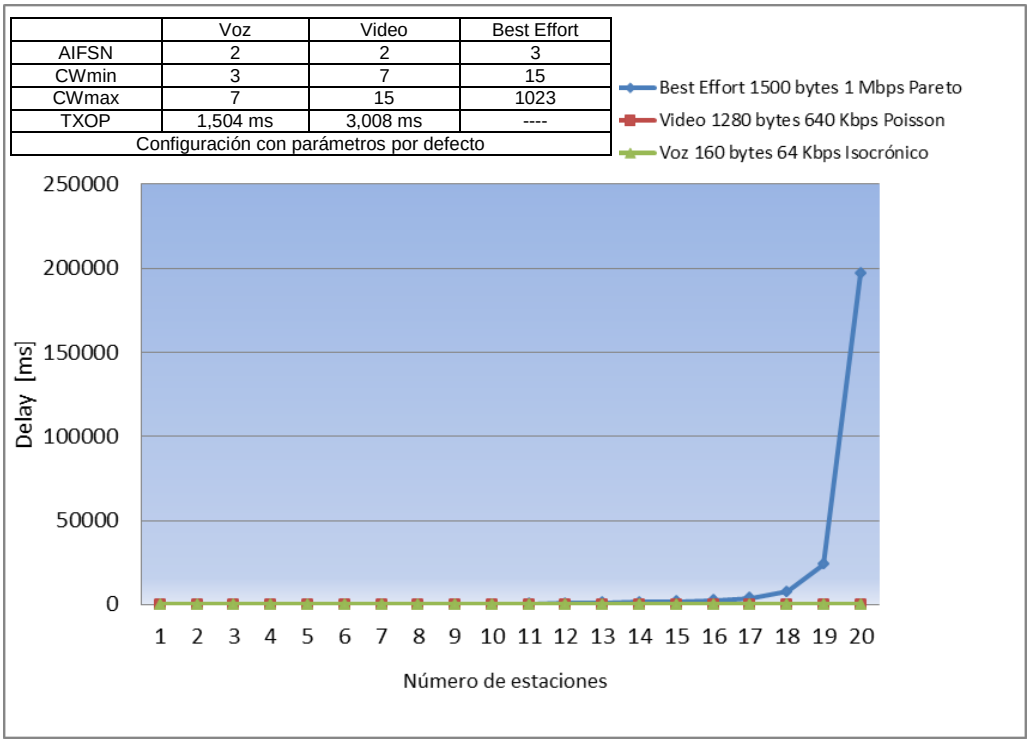


Figura 3.8 Delays de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 1.1

La Tabla 3.4 resume las características más importantes de este escenario cuando están presentes todos los tráficos, variando la cantidad de estaciones de 1 a 20.

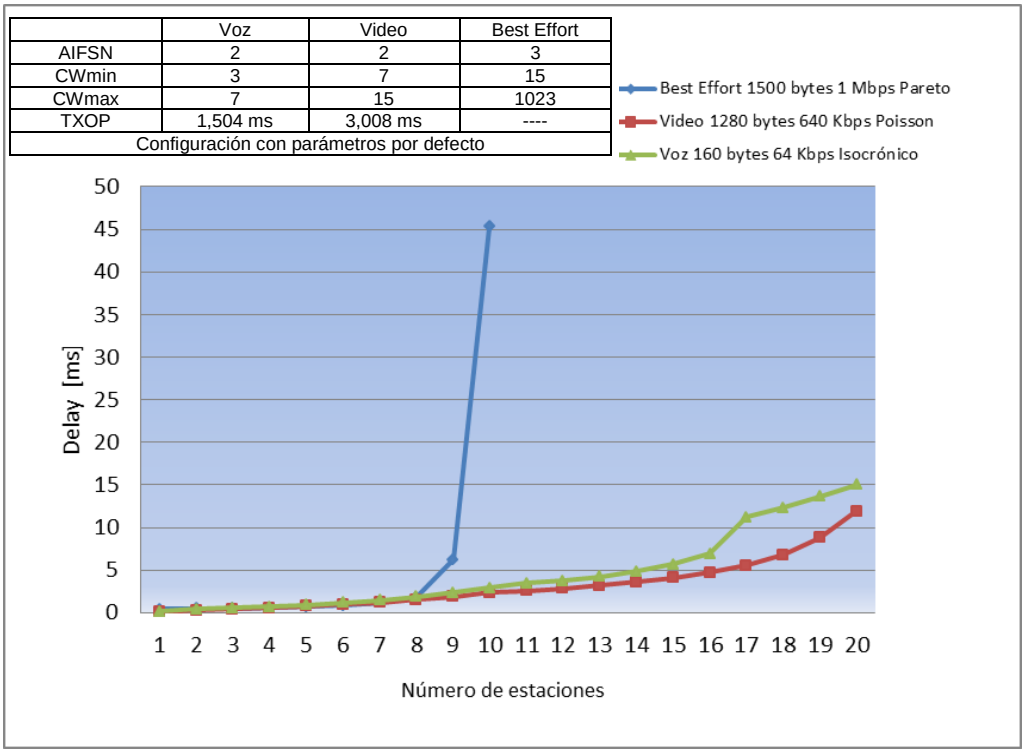


Figura 3.9 Delays de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 1.1

	Voz	Video	Best Effort
Rendimiento Máximo [Mbps]	0,924	10,856	10,285
Pérdida 0,5% Rendimiento	8° estación	10° estación	7° estación
Pérdida 1% Rendimiento	10° estación	15° estación	9° estación
Pérdida 5 % Rendimiento	13° estación	18° estación	10° estación
Pérdida 10 % Rendimiento	15° estación	19° estación	11° estación
Retardo de Cola en Rendimiento Máximo [ms]	13,637	6,777	45,303
Retardo de Cola para 10 estaciones [ms]	2,889	2,330	45,303
Retardo Máximo de Cola 20 estaciones [ms]	14,944	11,912	197000,000
Tamaño de Cola para 10 estaciones [paquetes]	0,142	0,148	3,912
Tamaño Máximo de Cola 20 estaciones [paquetes]	0,539	0,619	~50

Tabla 3.4 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 1.1

III.3.1.2 Estaciones sin tráfico de voz

En este escenario, se realizaron las simulaciones para caracterizar la conducta de la red, cuando todas las estaciones están transfiriendo mensajes de video y mejor esfuerzo, pero sin tráfico de voz.

Los valores promedios obtenidos para el rendimiento directo, rendimiento relativo, tamaño de cola y retardo de paquete, variando la carga de 1 a 20 estaciones, se muestran en las Figuras 3.10, 3.11, 3.12, 3.13 y 3.14.

Se observa en la Figura 3.10 que el rendimiento de flujo de video de más alta prioridad se mantiene estable, al contrario del flujo de mejor esfuerzo, de más baja prioridad. El flujo de video alcanza un pico de 13,071 Mbps en la estación 20. Mientras que el tráfico de mejor esfuerzo alcanza un pico de 12,391 Mpbs en la estación 13, y luego decae rápidamente. Ambas tráficos alcanzan picos superiores de rendimiento, con un mayor número de estaciones presentes, en ausencia de tráfico de voz. Comparativamente al escenario III.3.1.1, el rendimiento del tráfico de video se mantiene mucho más estable, mientras que el tráfico de mejor esfuerzo decae, pero más suavemente.

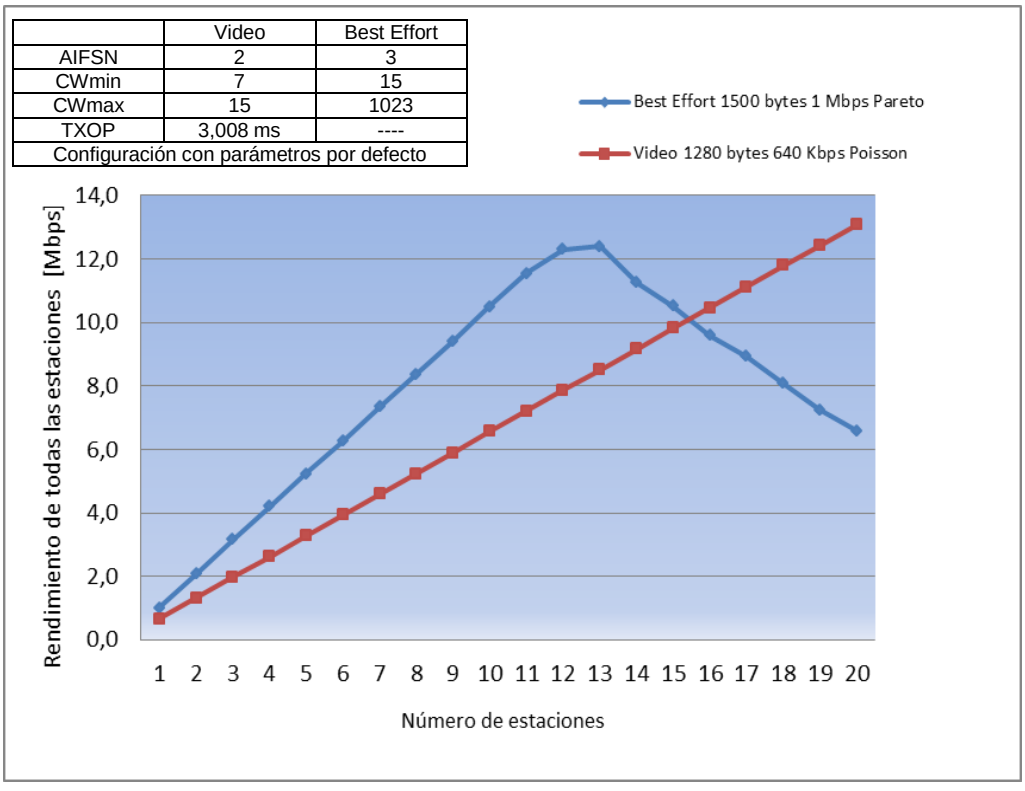


Figura 3.10 Rendimiento de los tráficos de video y mejor esfuerzo Escenario 1.2

En la Figura 3.11 se presenta el rendimiento relativo para este escenario. Se nota que el rendimiento relativo de los flujos aparece prácticamente sin pérdidas significativas hasta la estación 12, independientemente del flujo que se trate. El flujo de video no supera el 1 % de pérdida, aún en la estación 20; mientras que el de mejor esfuerzo pierde un 30 % de rendimiento, pero ahora recién en la estación 15. Los mecanismos de diferenciación de tráfico, como es de esperar, protegen el tráfico de video sobre el de mejor esfuerzo.

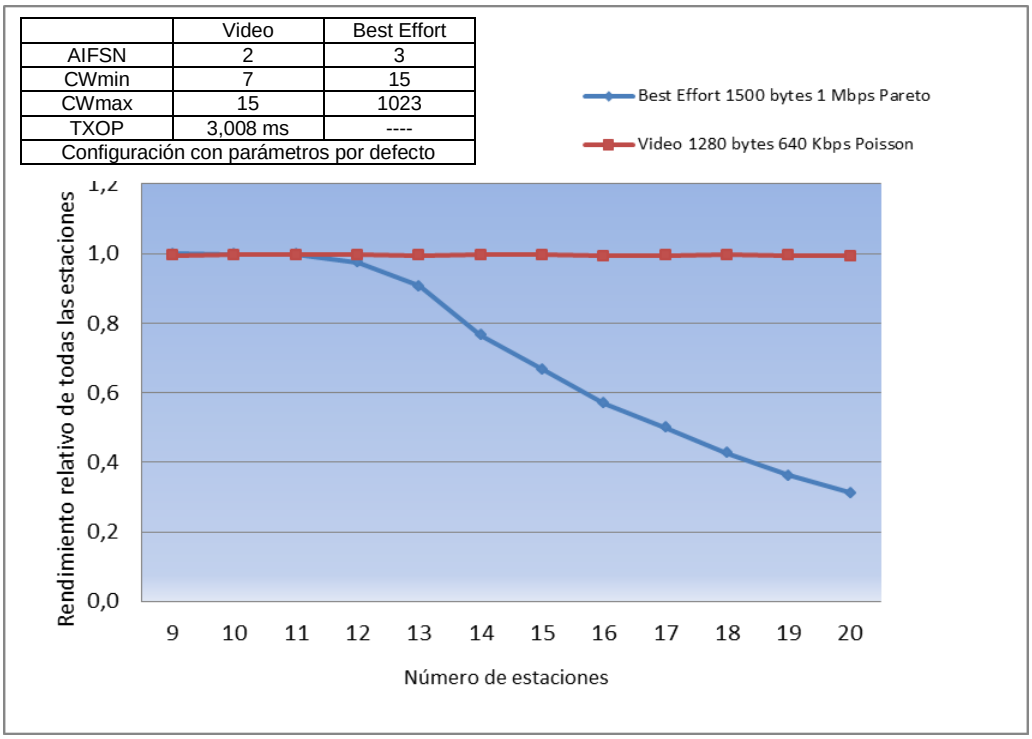


Figura 3.11 Rendimiento relativo de los tráficos de video y mejor esfuerzo Escenario 1.2

En la Figura 3.12 se observa el crecimiento brusco del tamaño de la cola para el tráfico de mejor esfuerzo, ahora recién a partir de la estación 12. El tamaño de cola para el tráfico de video permanece por debajo de la unidad en la estación 20.

Finalmente, en las Figuras 3.13 y 3.14 se presentan los delays de los tráficos de las estaciones. El retardo promedio de video es de 3 ms para 20 estaciones; mientras que para el flujo de mejor esfuerzo ha crecido rápidamente desde la estación 12.

Efectuando un análisis que destaque las principales diferencias para este escenario en particular (comparado a cuando están presentes todos los tráficos) se deduce que: i) El tamaño de cola promedio de video

se incrementa, hasta un orden de magnitud, cuando la carga se incrementa a 20 estaciones, pero siempre por debajo de la unidad, y ii) El tráfico de mejor esfuerzo, de menor prioridad, resulta afectado menos sensiblemente en todas sus métricas a partir de la estación 12, en beneficio del tráfico de video.

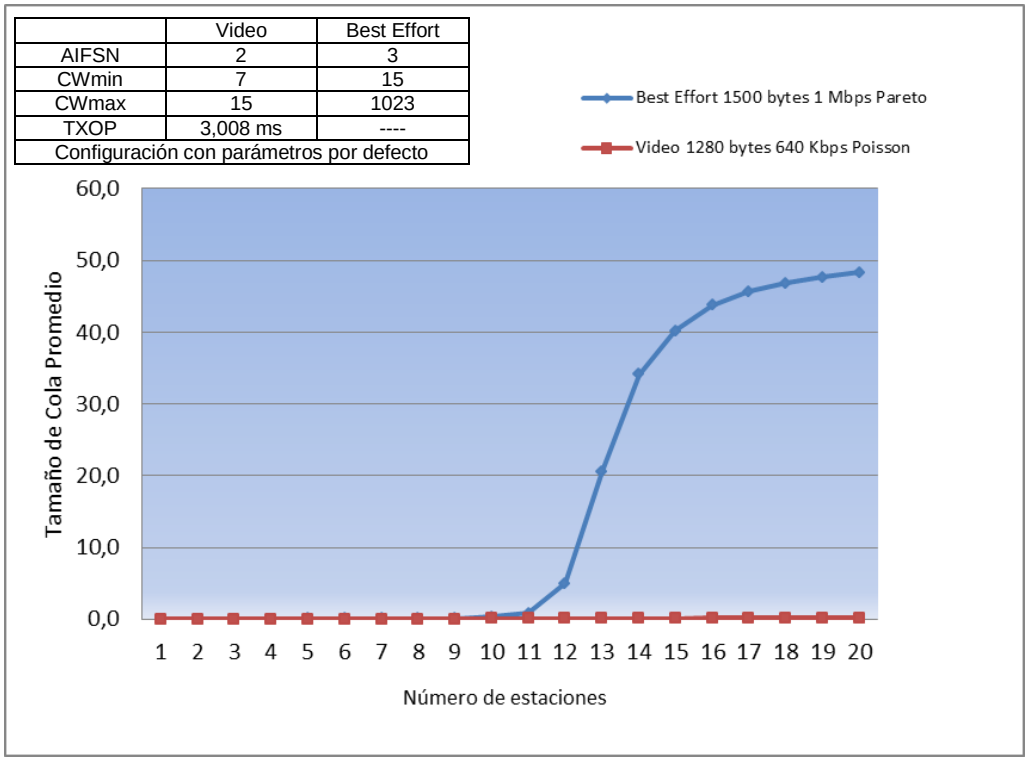


Figura 3.12 Tamaño de Cola de los tráficos de video y mejor esfuerzo Escenario 1.2

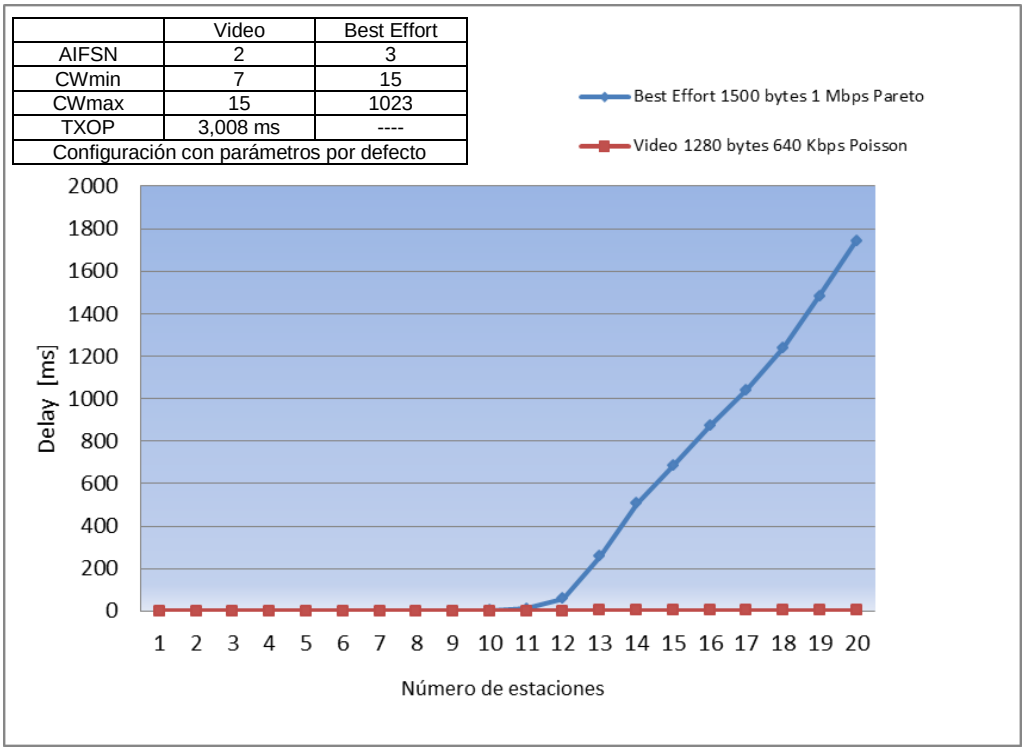


Figura 3.13 Delays de los tráficos de video y mejor esfuerzo Escenario 1.2

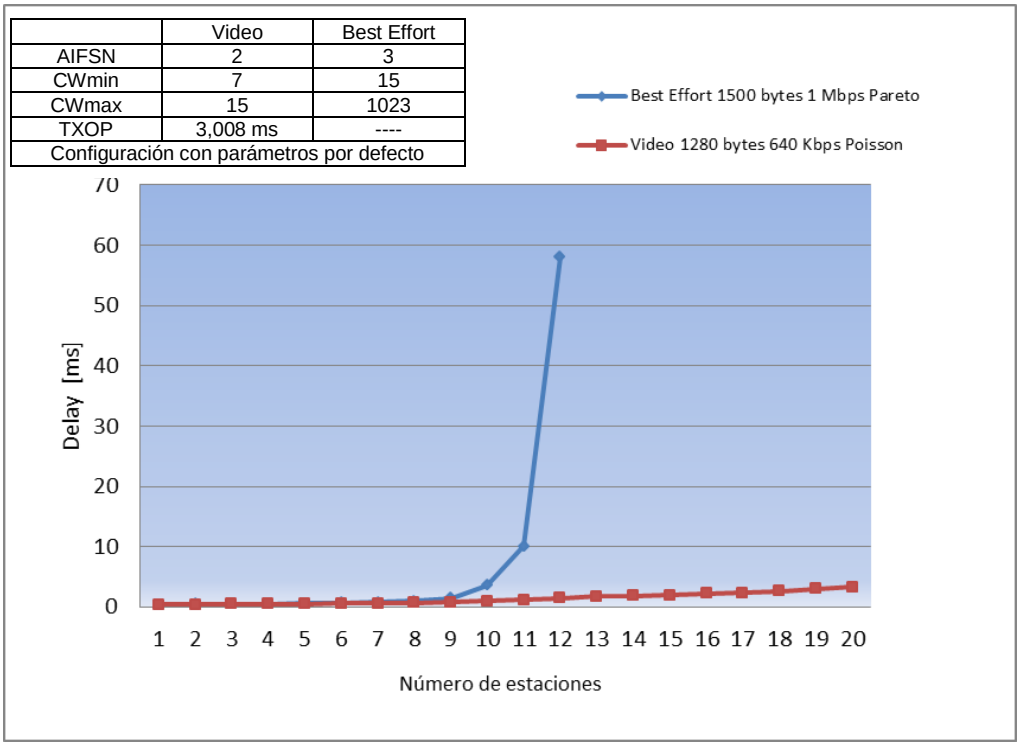


Figura 3.14 Delays de los tráficos de video y mejor esfuerzo Escenario 1.2

La Tabla 3.5 resume las características más importantes de este escenario, cuando están presentes los tráficos de video y de mejor esfuerzo, en ausencia del tráfico de voz, variando la cantidad de estaciones de 1 a 20.

	Video	Best Effort
Rendimiento Máximo [Mbps]	13,071	12,391
Pérdida 1% Rendimiento	-	12° estación
Pérdida 5 % Rendimiento	-	13° estación
Pérdida 10 % Rendimiento	-	14° estación
Retardo de Cola en Rendimiento Máximo [ms]	3,269	258,869
Retardo de Cola para 10 estaciones [ms]	0,942	3,556
Retardo Máximo de Cola 20 estaciones [ms]	3,269	1743,13
Tamaño de Cola para 10 estaciones [paquetes]	0,060	0,310
Tamaño de Cola para 20 estaciones [paquetes]	0,208	48,286

Tabla 3.5 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 1.2

III.3.1.3 Estaciones sin tráfico de video

En este escenario, se realizaron las simulaciones para caracterizar la conducta de la red, cuando todas las estaciones están transfiriendo mensajes de voz y mejor esfuerzo, pero sin tráfico de video.

Los valores promedios obtenidos para el rendimiento directo, rendimiento relativo, tamaño de cola y retardo de paquete, variando la carga de 1 a 20 estaciones, se muestran en las Figuras 3.15, 3.16, 3.17, 3.18, 3.19 y 3.20.

Como es de esperar, se observa en la Figura 3.15 que el rendimiento de flujo de voz de más alta prioridad se mantiene estable, al contrario del flujo de mejor esfuerzo, de más baja prioridad. El flujo de voz alcanza un pico de 1,133 Mbps en la estación 20. Mientras que el tráfico de mejor esfuerzo alcanza un pico de 15,524 Mpbs en la estación 16, y luego decae. Ambas tráficos alcanzan picos superiores de rendimiento, con un mayor número de estaciones presentes, en ausencia de tráfico de video. Comparando con el escenario III.3.1.1, el rendimiento del tráfico de voz se mantiene mucho más estable, mientras que respecto al escenario III.3.1.2 el tráfico de mejor decae, pero aún más suavemente.

	Voz	Best Effort
AIFSN	2	3
CWmin	3	15
CWmax	7	1023
TXOP	1,504 ms	----
Configuración con parámetros por defecto		

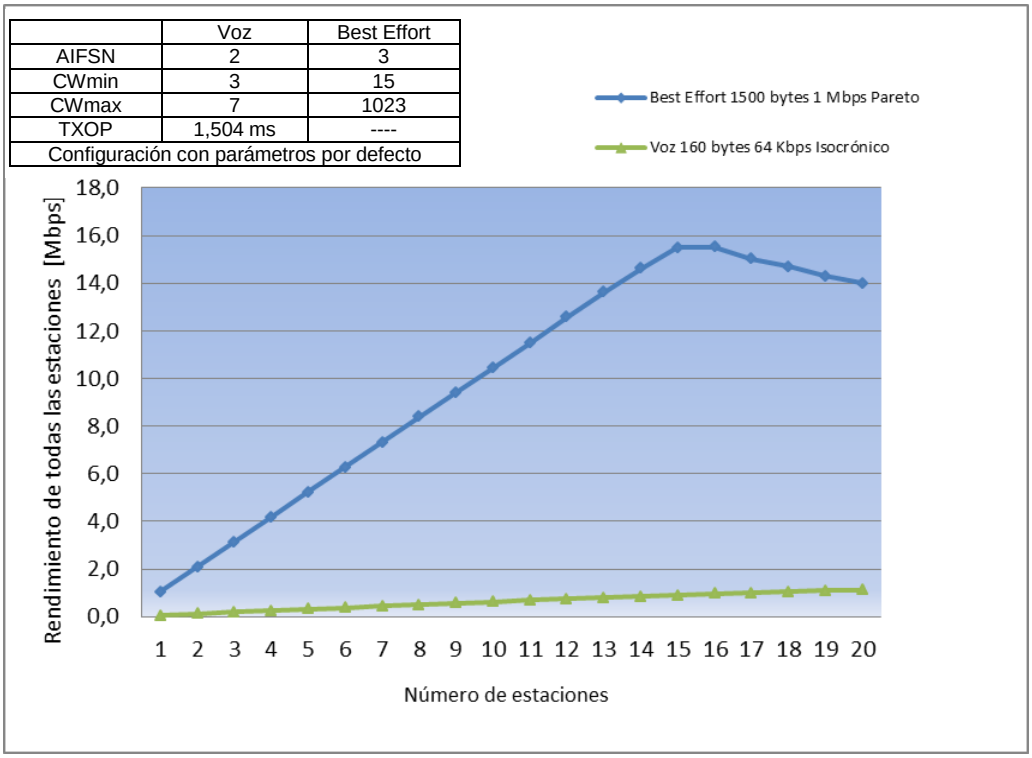


Figura 3.15 Rendimiento de los tráficos de voz y mejor esfuerzo Escenario 1.3

En la Figura 3.16 se observa el rendimiento relativo para este escenario sin tráfico de video. Se nota que el rendimiento relativo de los flujos aparece prácticamente sin pérdidas significativas hasta la estación 12, independientemente del flujo que se trate. El flujo de voz alcanza un pérdida del 11 % en la estación 20; mientras que el de mejor esfuerzo pierde un 29 % de rendimiento, pero ahora recién en la estación 19. Los mecanismos de diferenciación de tráfico, como es de esperar, protegen el tráfico de voz sobre el de mejor esfuerzo.

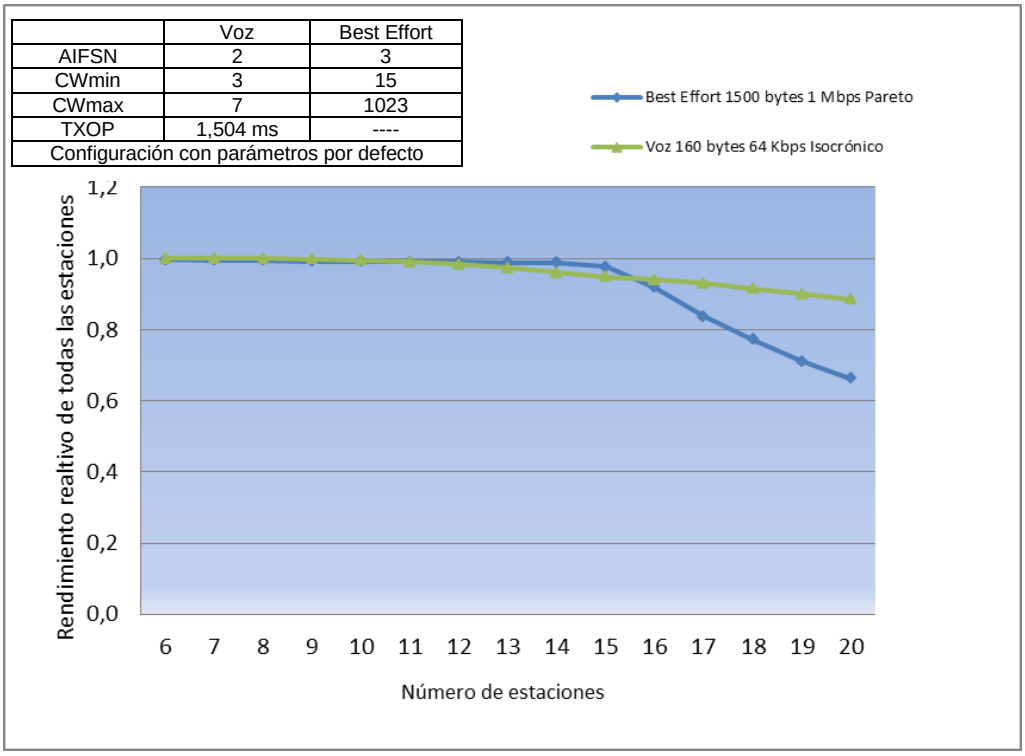


Figura 3.16 Rendimiento relativo de los tráficos de voz y mejor esfuerzo Escenario 1.3

En las Figuras 3.17 y 3.18 se observa el crecimiento brusco del tamaño de la cola para el tráfico de mejor esfuerzo, ahora recién a partir de la estación 15. El tamaño de cola para el tráfico de voz permanece por debajo de la unidad en la estación 20.

Finalmente, en las Figuras 3.19 y 3.20 se presentan los delays de los tráficos de las estaciones. El retardo promedio de voz es de 4 ms para 20 estaciones; mientras que para el flujo de mejor esfuerzo ha crecido rápidamente desde la estación 15.

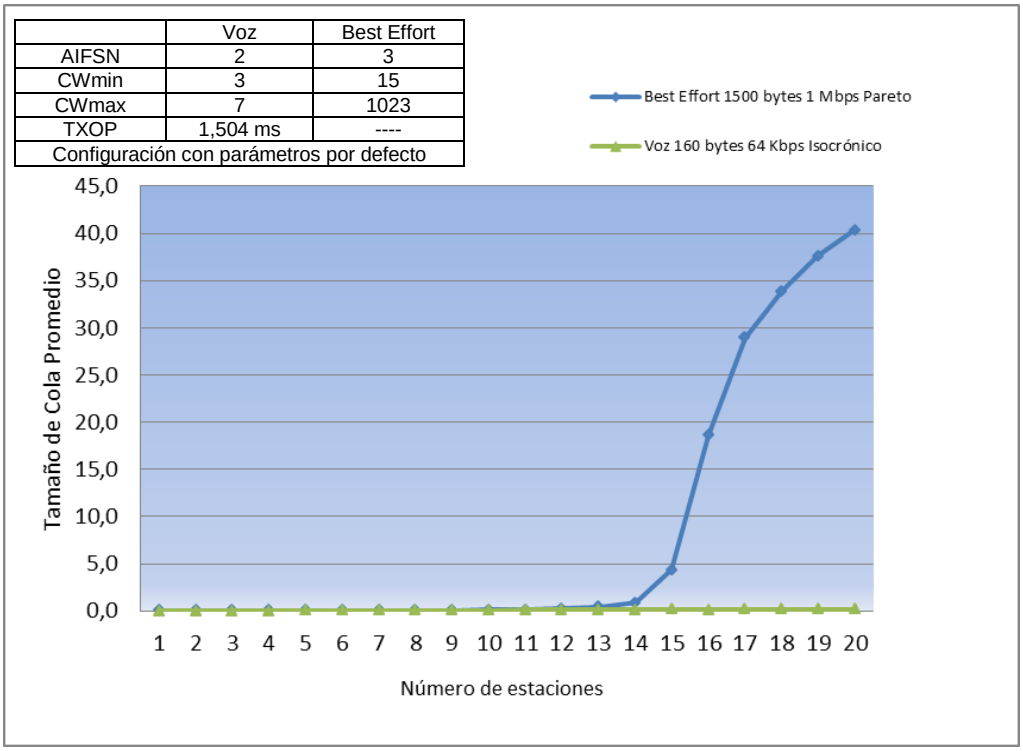


Figura 3.17 Tamaño de Cola de los tráficos de voz y mejor esfuerzo Escenario 1.3

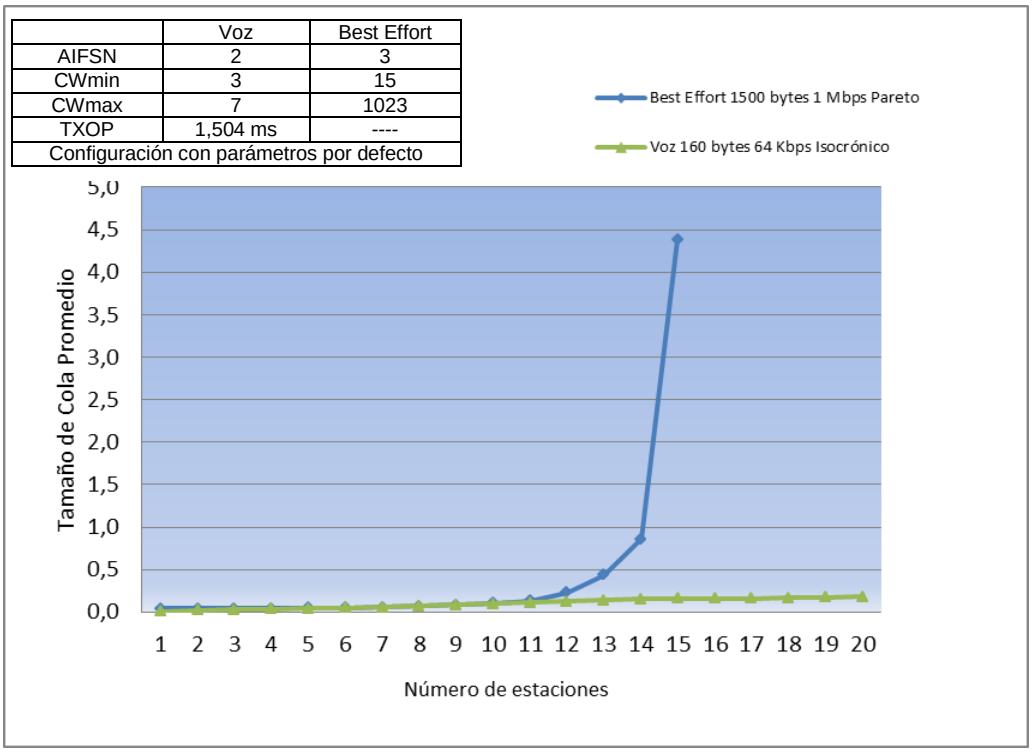


Figura 3.18 Tamaño de Cola de los tráficos de voz y mejor esfuerzo Escenario 1.3

	Voz	Best Effort
AIFSN	2	3
CWmin	3	15
CWmax	7	1023
TXOP	1,504 ms	----
Configuración con parámetros por defecto		

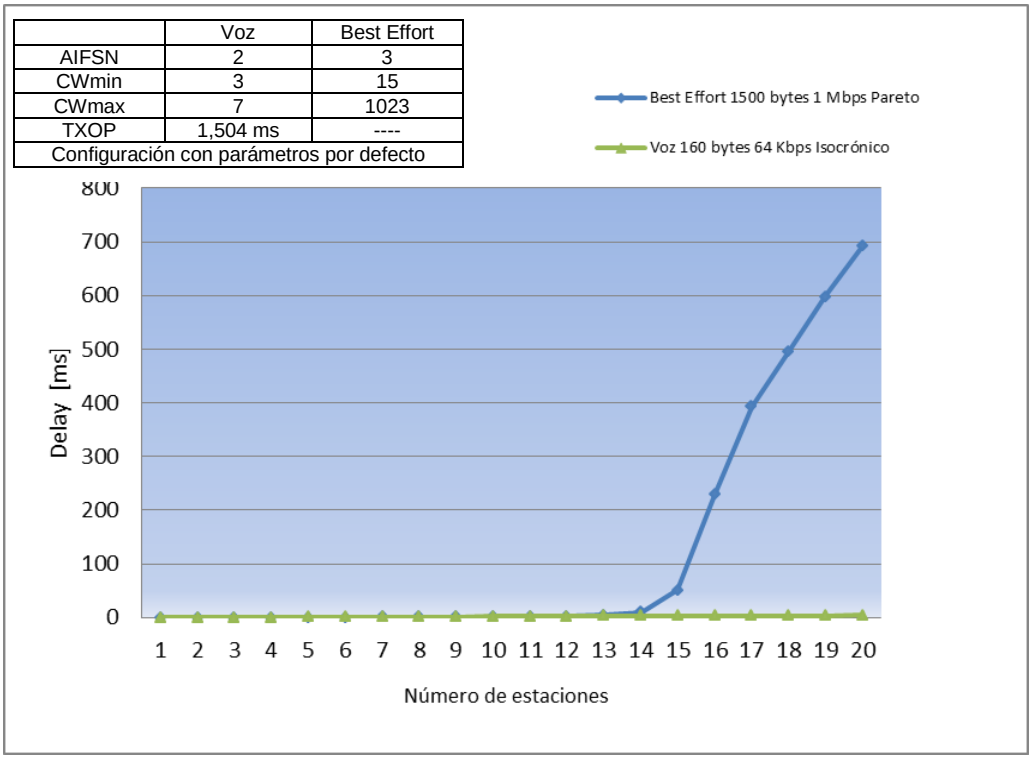


Figura 3.19 Delays de los tráficos de voz y mejor esfuerzo Escenario 1.3

	Voz	Best Effort
AIFSN	2	3
CWmin	3	15
CWmax	7	1023
TXOP	1,504 ms	----
Configuración con parámetros por defecto		

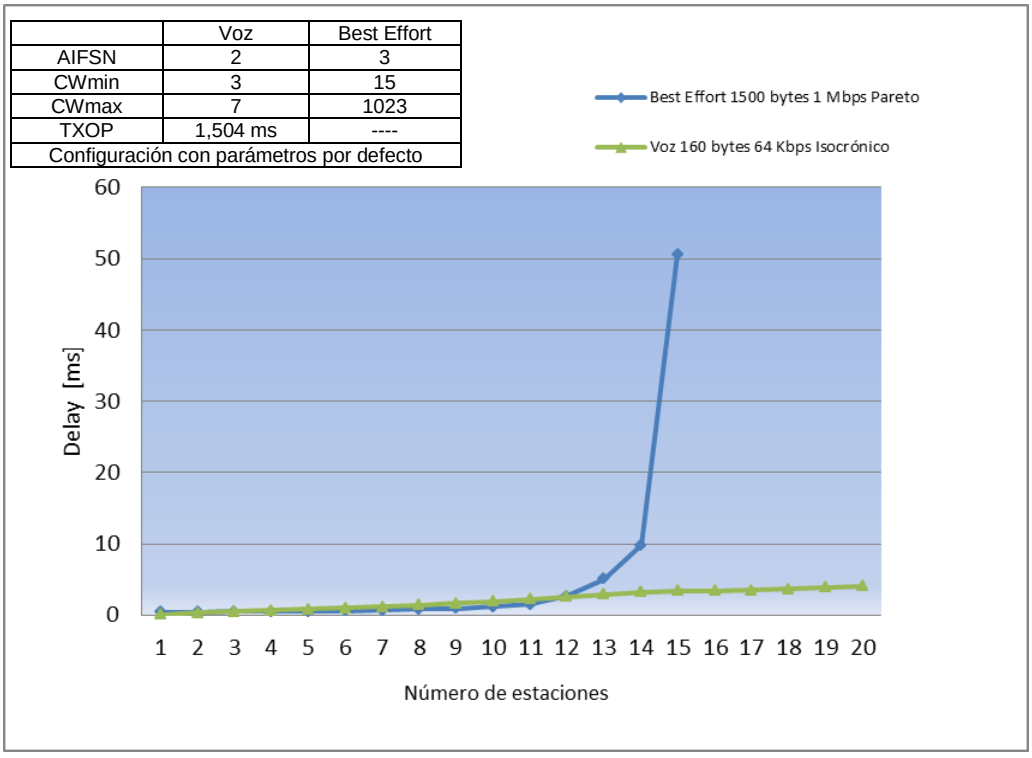


Figura 3.20 Delays de los tráficos de voz y mejor esfuerzo Escenario 1.3

Efectuando un análisis que destaque las principales diferencias para este escenario en particular (comparado a cuando están presentes todos los tráficos) se deduce que: i) El tamaño de cola promedio de voz se incrementa, hasta un orden de magnitud, cuando la carga se incrementa a 20 estaciones, pero siempre por debajo de la unidad, y ii) El tráfico de mejor esfuerzo, de menor prioridad, resulta afectado menos sensiblemente en todas sus métricas a partir de la estación 14, en beneficio del tráfico de voz.

La Tabla 3.6 resume las características más importantes de este escenario cuando están presentes los tráficos de voz y de mejor esfuerzo, en ausencia del tráfico de video, variando la cantidad de estaciones de 1 a 20.

	Voz	Best Effort
Rendimiento Máximo [Mbps]	1,133	15,524
Pérdida 1% Rendimiento	12° estación	12° estación
Pérdida 5 % Rendimiento	15° estación	16° estación
Pérdida 10 % Rendimiento	20° estación	17° estación
Retardo de Cola en Rendimiento Máximo [ms]	4,105	228,995
Retardo de Cola para 10 estaciones [ms]	1,920	1,174
Retardo Máximo de Cola 20 estaciones [ms]	4,105	691,479
Tamaño de Cola para 10 estaciones [paquetes]	0,095	0,102
Tamaño de Cola para 20 estaciones [paquetes]	0,181	40,334

Tabla 3.6 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 1.3

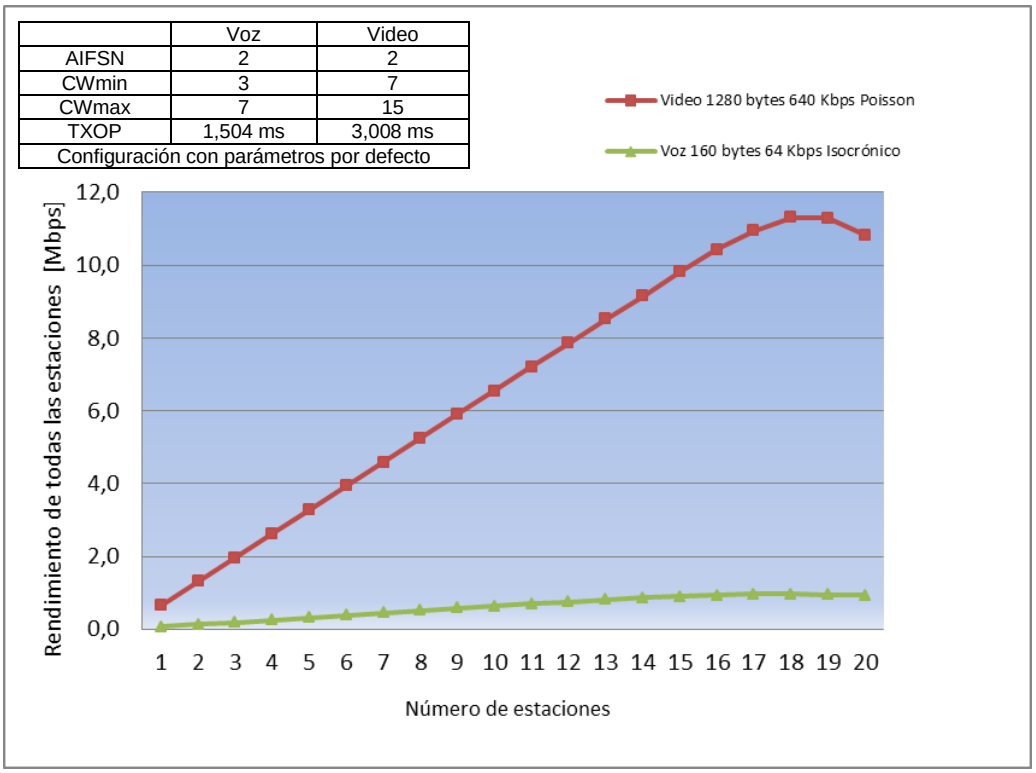
III.3.1.4 Estaciones sin tráfico de best effort

En este último caso, se realizaron las simulaciones para caracterizar la conducta de la red, cuando todas las estaciones están transfiriendo mensajes de voz y video, pero sin tráfico de mejor esfuerzo.

Los valores promedios obtenidos para el rendimiento directo, rendimiento relativo, tamaño de cola y retardo de paquete, variando la carga de 1 a 20 estaciones, se muestran en las Figuras 3.21, 3.22, 3.23, y 3.24.

En Figura 3.21 se destaca que el rendimiento de flujo de voz de más alta prioridad se mantiene estable, al contrario del flujo de video, de más baja prioridad. El flujo de voz alcanza un pico de 0,967 Mbps en la estación 18. En la misma estación, el tráfico de video obtiene un pico de 11,303 Mpbs, y luego decae. Ambos tráficos alcanzan picos superiores de rendimiento, con un mayor número de estaciones presentes, en ausencia de tráfico de mejor esfuerzo. Comparando con el escenario III.3.1.1, los rendimientos del tráfico de voz y de video mantienen un similar comportamiento, con métricas mejores que cuando está presente el tráfico de mejor esfuerzo.

El rendimiento relativo para este escenario sin tráfico de mejor esfuerzo se presenta en la Figura 3.22. Se nota que el rendimiento relativo de los flujos aparece prácticamente sin pérdidas significativas hasta la estación 11, independientemente del flujo. Los flujos de voz y de video alcanzan en la estación 20 una pérdida 27,39 % y del 17,5%, respectivamente.



	Voz	Video
AIFSN	2	2
CWmin	3	7
CWmax	7	15
TXOP	1,504 ms	3,008 ms
Configuración con parámetros por defecto		

Figura 3.21 Rendimiento de los tráficos de voz y video Escenario 1.4

	Voz	Video
AIFSN	2	2
CWmin	3	7
CWmax	7	15
TXOP	1,504 ms	3,008 ms
Configuración con parámetros por defecto		

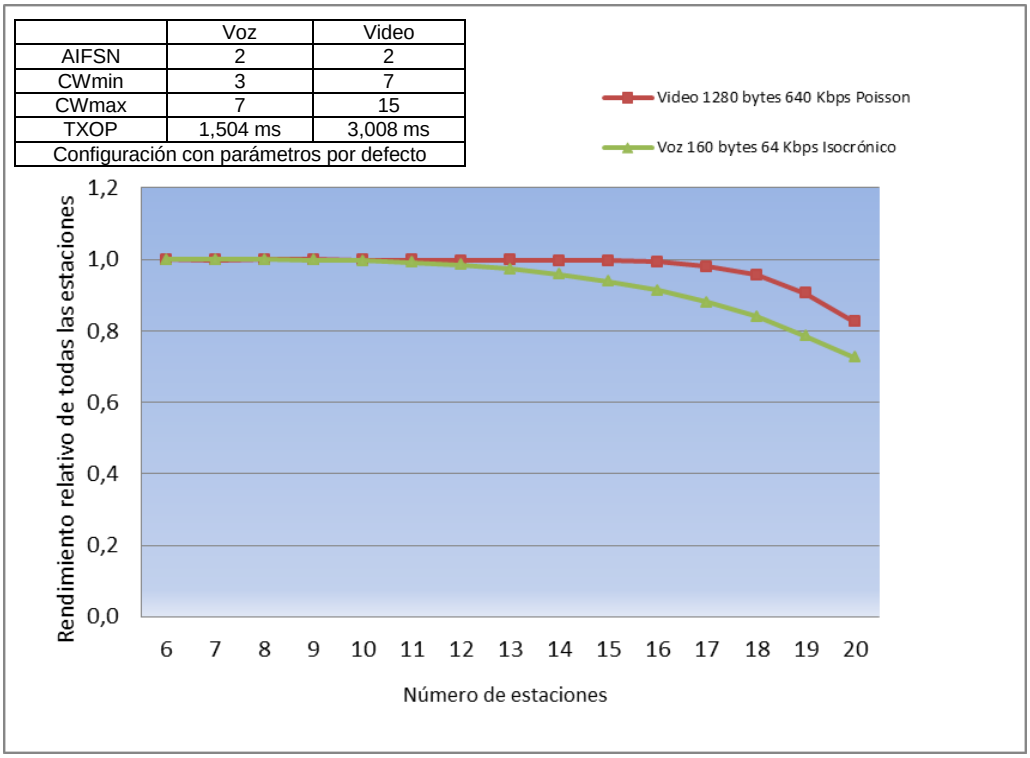


Figura 3.22 Rendimiento relativo de los tráficos de voz y video Escenario 1.4

En la Figura 3.23 se observa el crecimiento relativamente suave de los tamaños de las colas para los tráficos de voz y de video. A partir de la estación 18 el tamaño de la cola de video comienza un crecimiento más brusco, mientras que la cola del tráfico de voz permanece por debajo de la unidad en la estación 20.

Finalmente, en la Figura 3.24 se presentan los delays de los tráficos de las estaciones. Los retardos promedio de voz y de video son de 15 ms y 35 ms, para 20 estaciones, respectivamente.

Efectuando un análisis que destaque las principales diferencias para este escenario en particular (comparado a cuando están presentes todos los tráficos) se deduce que: i) El tamaño de cola promedio de video se incrementa, hasta dos órdenes de magnitud, cuando la carga se incrementa a 20 estaciones, y ii) El tráfico de voz, resulta afectado menos en todas sus métricas.

La Tabla 3.7 resume las características más importantes de este escenario cuando están presentes los tráficos de voz y video en ausencia del tráfico de mejor esfuerzo, variando la cantidad de estaciones de 1 a 20.

	Voz	Video
AIFSN	2	2
CWmin	3	7
CWmax	7	15
TXOP	1,504 ms	3,008 ms
Configuración con parámetros por defecto		

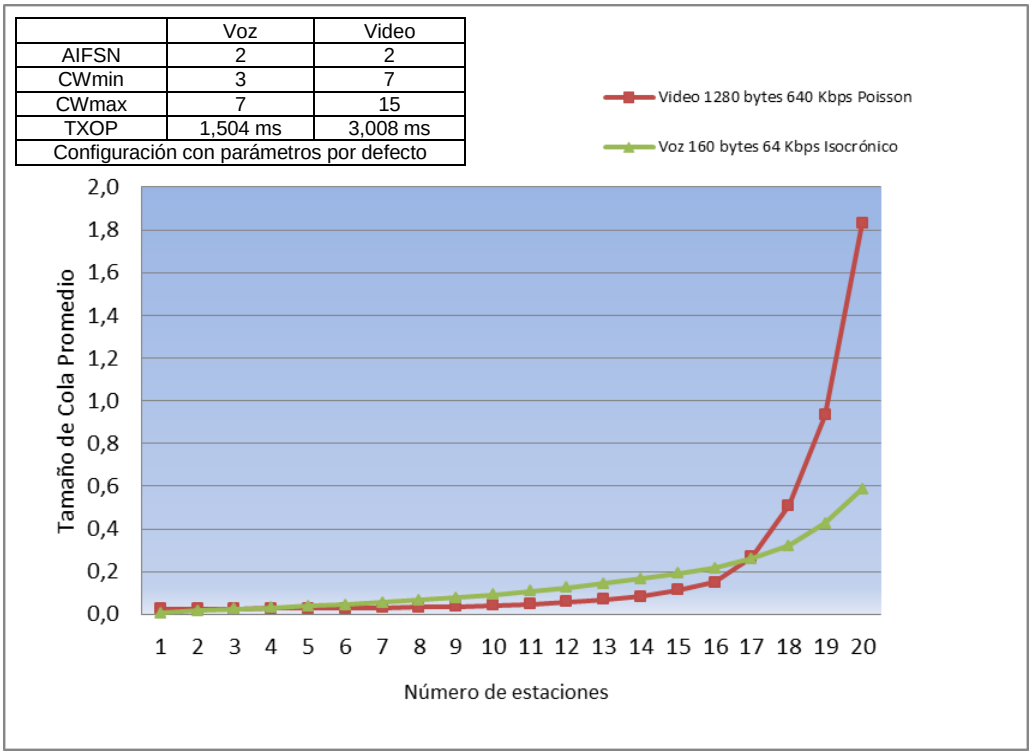


Figura 3.23 Tamaño de Cola de los tráficos de voz y video Escenario 1.4

	Voz	Video
AIFSN	2	2
CWmin	3	7
CWmax	7	15
TXOP	1,504 ms	3,008 ms
Configuración con parámetros por defecto		

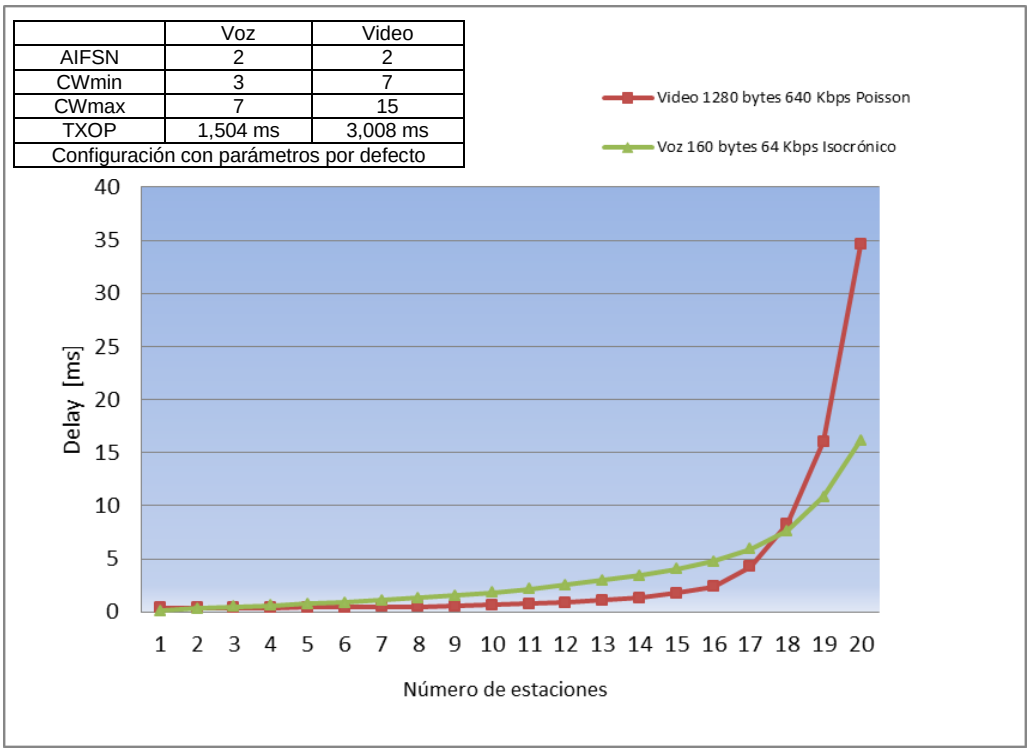


Figura 3.24 Delays de los tráficos de voz y video Escenario 1.4

	Voz	Video
Rendimiento Máximo [Mbps]	0,967	11,303
Pérdida 1% Rendimiento	12° estación	17° estación
Pérdida 5 % Rendimiento	15° estación	19° estación
Pérdida 10 % Rendimiento	17° estación	20° estación
Retardo de Cola en Rendimiento Máximo [ms]	7,659	8,298
Retardo de Cola para 10 estaciones [ms]	1,840	0,658
Retardo Máximo de Cola 20 estaciones [ms]	16,173	34,595
Tamaño de Cola para 10 estaciones [paquetes]	0,091	0,042
Tamaño Máximo de Cola 20 estaciones [paquetes]	0,587	1,831

Tabla 3.7 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 1.4

III.3.1.5 Resumen experimentación Escenario 1

Los valores promedios obtenidos para el rendimiento directo y rendimiento relativo para el tráfico de voz, variando la carga de 1 a 20 estaciones, se muestran en las Figuras 3.25 y 3.26. En las mismas Figuras, a los efectos del análisis comparativo, se han superpuesto los casos del Escenario 1 en que están presentes todos los tráficos, o cuando están ausentes el tráfico de video o el de mejor esfuerzo.

Para el rendimiento directo (Figura 3.25), se observa una mejora del 18,73% en la estación 20 cuando no está presente el tráfico de video, respecto a cuándo están todos los tráficos en el escenario. El rendimiento de voz, sin tráfico de mejor esfuerzo, se ubica entre estas curvas en el momento de la saturación de la red. En la Figura 3.26 se observa que el rendimiento relativo tiene una pérdida del 11,48% sobre la estación 20, cuando no hay tráfico de video, pero cae al 28,06% y 27,39% cuando están todos los tráficos presentes o no hay tráfico de mejor esfuerzo, respectivamente.

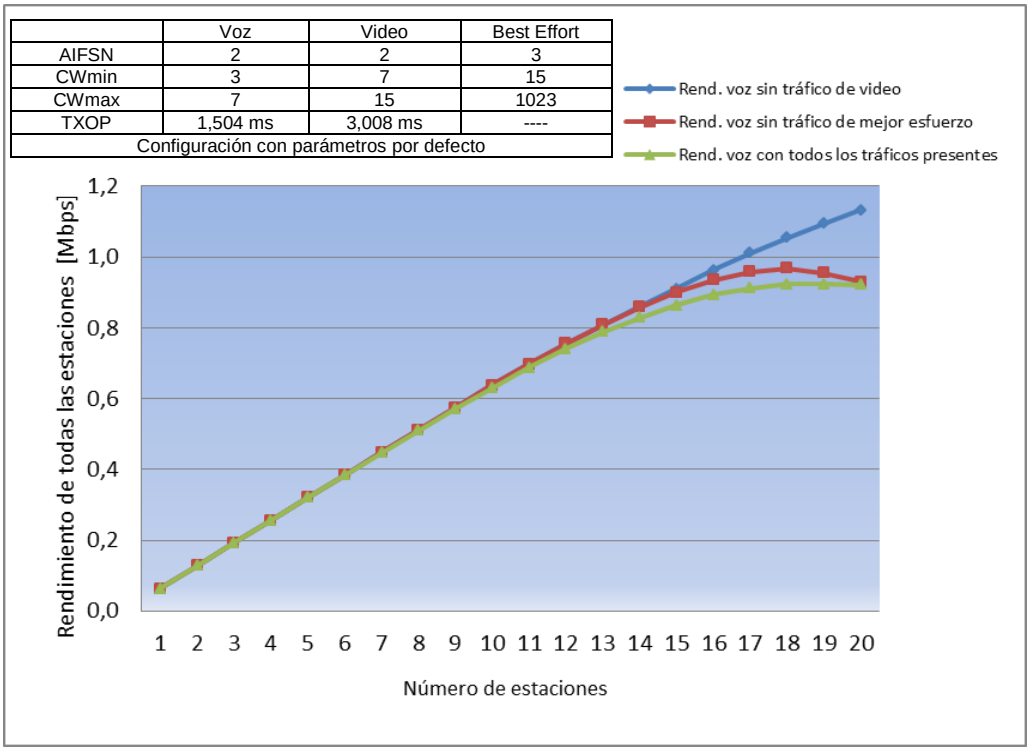


Figura 3.25 Rendimiento del tráfico de voz en cada Escenario 1

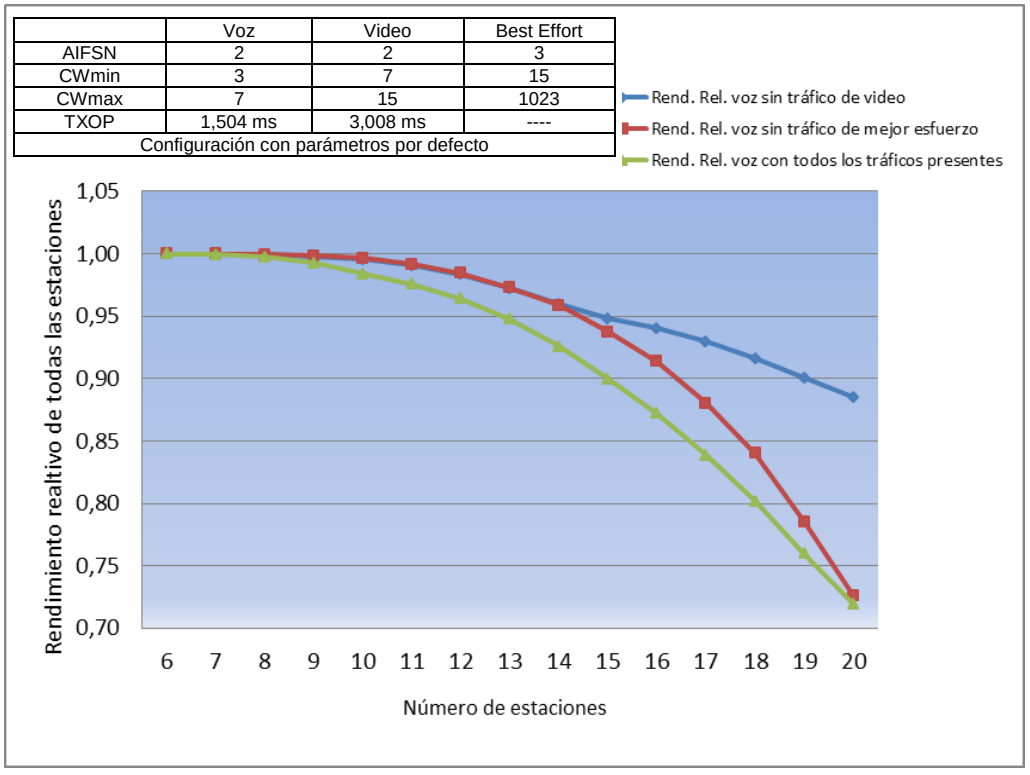


Figura 3.26 Rendimiento relativo del tráfico de voz en cada Escenario 1

En las Figuras 3.27 y 3.28, se han superpuesto los casos de la respuesta del video cuando están presentes todos los tráficos, o cuando están ausentes el tráfico de voz o el de mejor esfuerzo. En la Figura 3.27, se observa una mejora del 18,43%, en la estación 20 cuando no está presente el tráfico de voz, respecto a cuando están todos los tráficos en el escenario. El rendimiento de video, sin tráfico de mejor esfuerzo, se ubica entre estas curvas en el momento de la saturación de la red. En la Figura 3.28 se observa que el rendimiento relativo tiene una pérdida del 0,41% sobre la estación 20, cuando no hay tráfico de voz, pero cae al 19,01% y 17,38% cuando están todos los tráficos presentes o no hay tráfico de mejor esfuerzo, respectivamente.

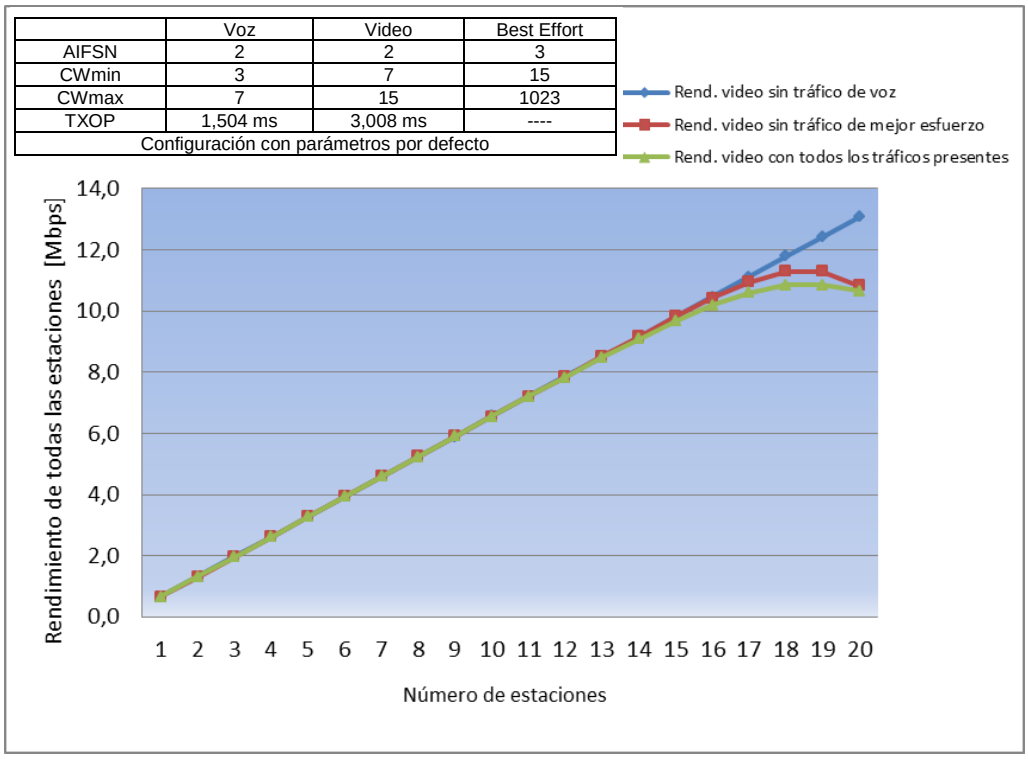


Figura 3.27 Rendimiento del tráfico de video en cada Escenario 1

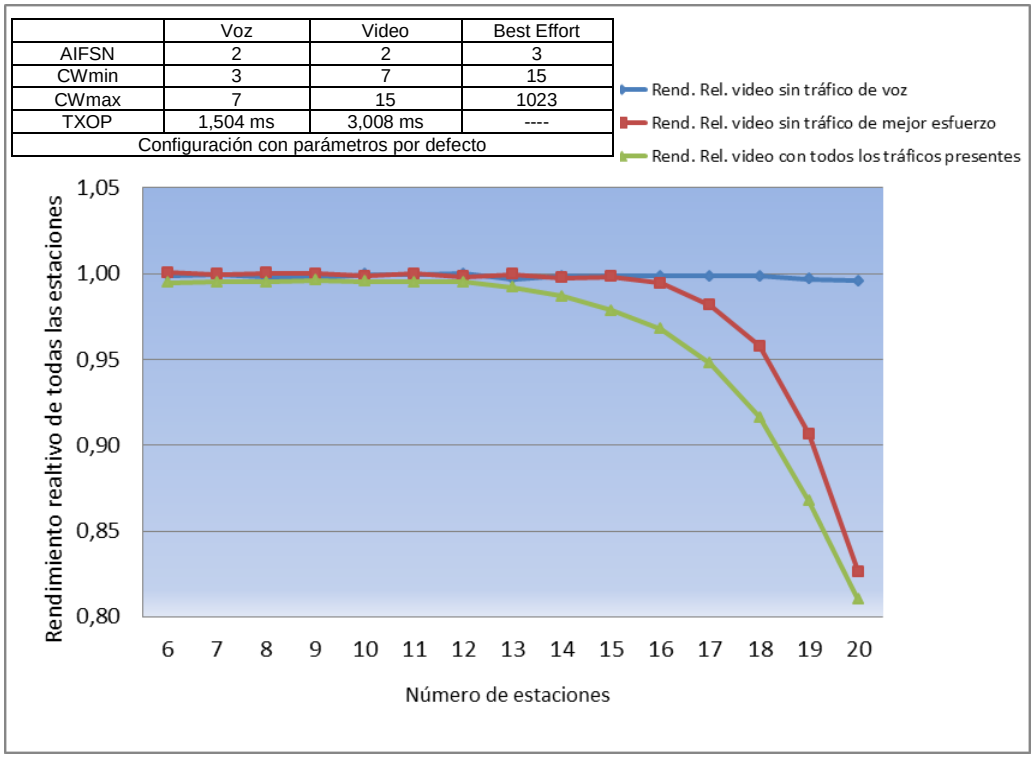


Figura 3.28 Rendimiento relativo tráfico de video en cada Escenario 1

Finalmente, en las Figuras 3.29 y 3.30, se han superpuesto los casos de la respuesta de mejor esfuerzo cuando están presentes todos los tráficos, o cuando están ausentes el tráfico de voz o el de video. En la Figura 3.29, se observa una mejora del 33,75%, en la estación 16, cuando no está presente el tráfico de video, respecto a cuando están todos los tráficos en el escenario, cuyo máximo rendimiento se alcanza en la estación 10. El rendimiento de mejor esfuerzo, sin tráfico de voz, se ubica entre estas curvas con pico de rendimiento en la estación 13. En la Figura 3.30 se observa que el rendimiento relativo de mejor esfuerzo tiene una pérdida del 33,75% sobre la estación 20, cuando no hay tráfico de video, pero cae un 99% y un 68,70% cuando están todos los tráficos presentes o no hay tráfico de voz, respectivamente.

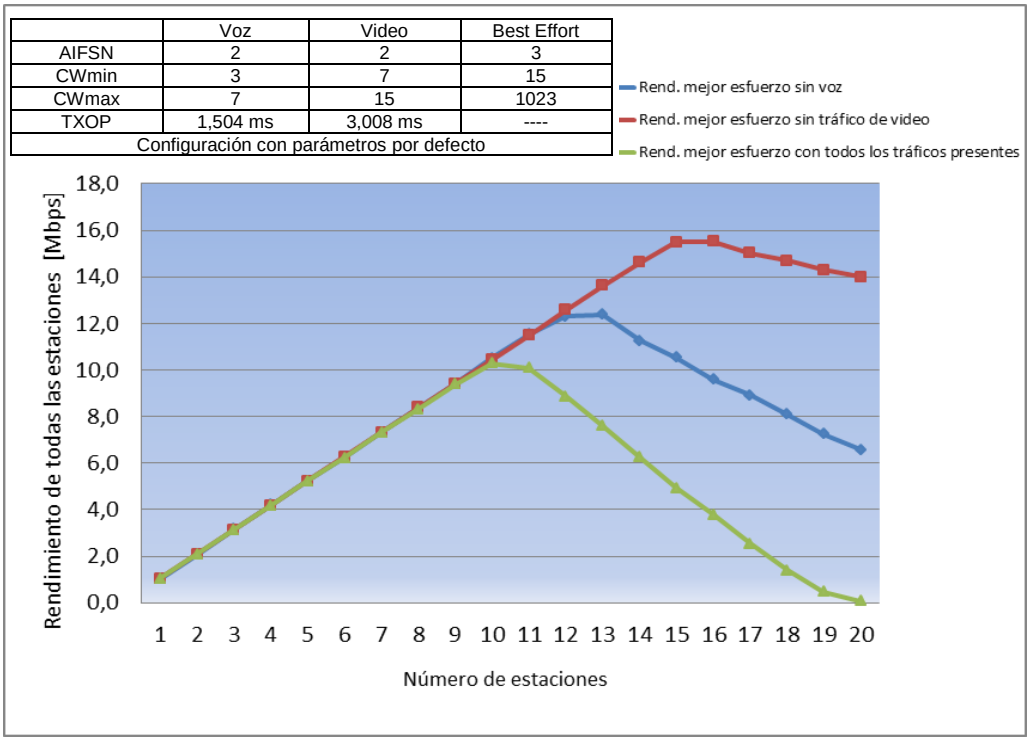


Figura 3.29 Rendimiento del tráfico de mejor esfuerzo en cada Escenario 1

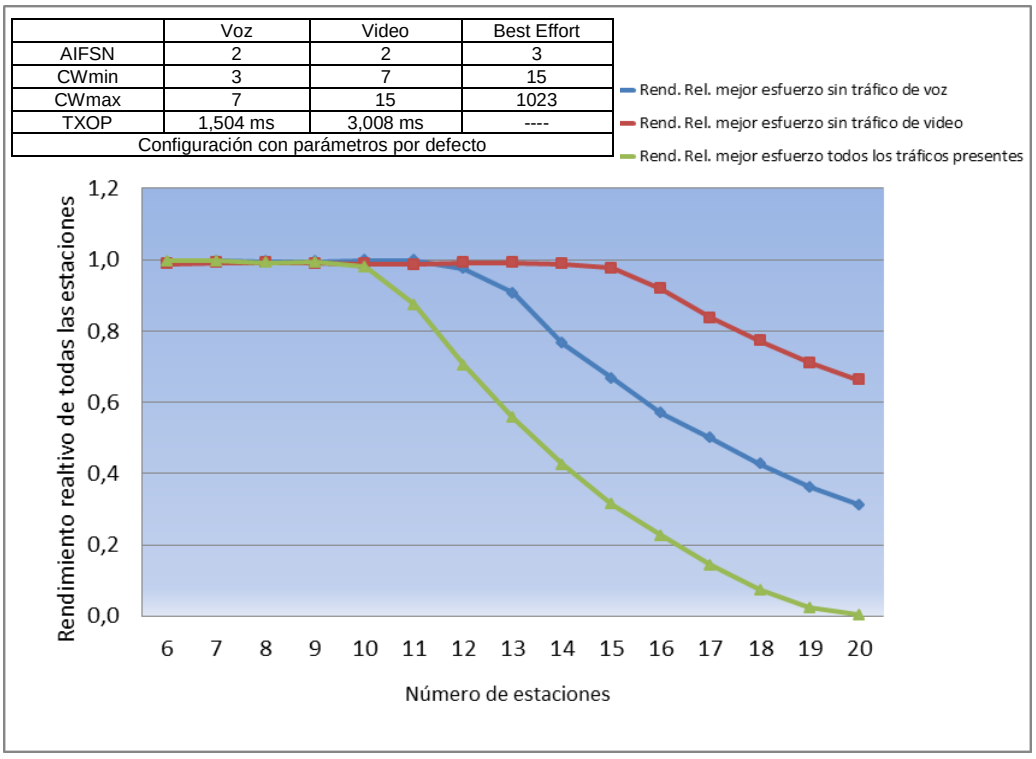


Figura 3.30 Rendimiento relativo del tráfico de mejor esfuerzo en cada Escenario 1

III.3.2 Escenario 2

III.3.2.1 60 % de estaciones de voz, 20 % de video y 20 % de mejor esfuerzo

Para este escenario, se realizaron las simulaciones para caracterizar la conducta de la red, cuando todas las estaciones transmiten un tipo de trafico: voz, video o mejor esfuerzo.

Los valores promedios obtenidos para el rendimiento directo, rendimiento relativo, tamaño de cola y delay, variando la carga de 5 a 45 estaciones, con una proporción de 60% de tráfico de voz, 20% de video y 20% de mejor esfuerzo, se muestran en las Figuras 3.31, 3.32, 3.33, 3.34 y 3.35.

Se destaca que también en este escenario, EDCA provee la diferenciación de servicio esperado entre los diferentes tipos de tráficos, resolviendo a favor de los tráficos de mayor prioridad. Aunque también es evidente que no se pueden evitar las pérdidas ocasionadas por las estaciones de voz entre sí, debido a su mayor proporción relativa. Se observa en la Figura 3.31 que el rendimiento de los flujos de voz y de video de más alta prioridad, se mantienen más estables que el flujo de mejor esfuerzo, de más baja prioridad. El flujo de voz alcanza un pico de 1,273 Mbps cuando está presentes 45 estaciones. Cuando hay 40 estaciones, el tráfico de mejor esfuerzo alcanza un pico 8,185 Mbps, y luego el rendimiento decae rápidamente. Mientras que el rendimiento del tráfico de video, cuando hay 45 estaciones, alcanza un rendimiento máximo de 5,838 Mbps.

En la Figura 3.32 se nota más claramente el comportamiento de la red en este escenario. El rendimiento relativo de los flujos aparece prácticamente sin pérdidas significativas hasta las 20 estaciones. Los flujos de voz y de mejor esfuerzo alcanzan en las 45 estaciones, una pérdida de 26,31% y 28,42%, respectivamente; mientras que el de video pierde un 1,4 % de rendimiento en la misma cantidad de estaciones.

El tamaño de cola promedio se presenta en la Figura 3.33. Se observa el crecimiento brusco del tamaño de la cola para el tráfico de mejor esfuerzo a partir de las 40 estaciones, en concordancia con las métricas anteriores. Los tamaños de cola para el tráfico de voz y video permanecen por debajo de los 0,5 paquetes aún en las 45 estaciones.

	Voz	Video	Best Effort
AIFSN	2	2	3
CWmin	3	7	15
CWmax	7	15	1023
TXOP	1,504 ms	3,008 ms	----
Configuración con parámetros por defecto			

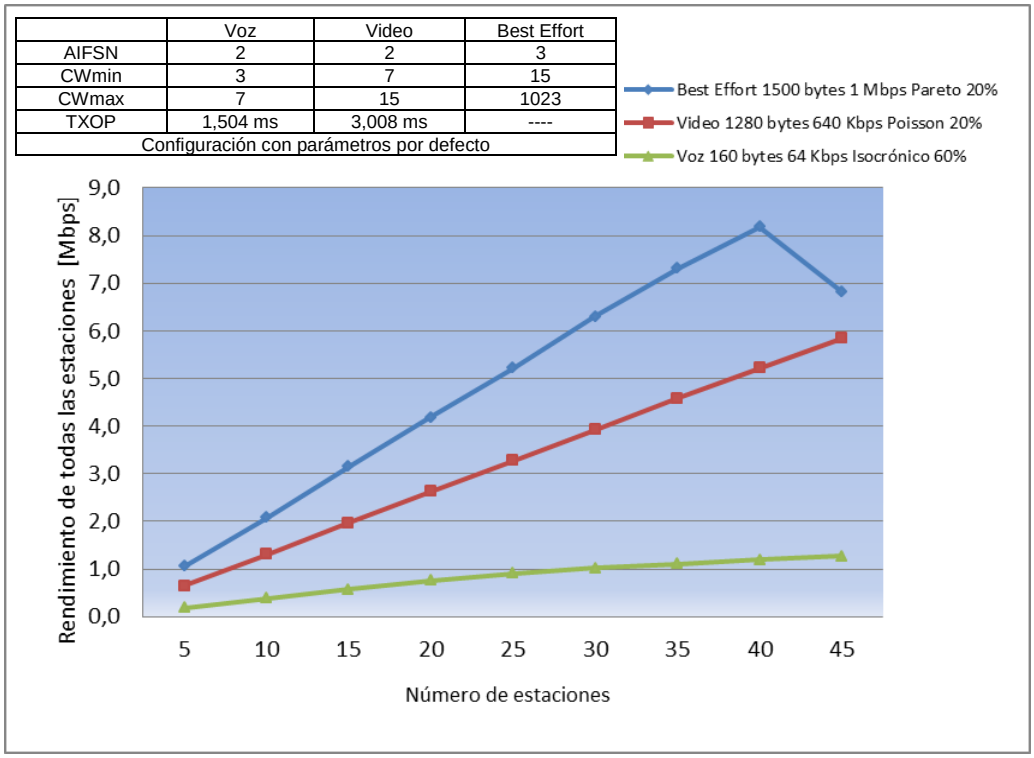


Figura 3.31 Rendimiento de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.1

	Voz	Video	Best Effort
AIFSN	2	2	3
CWmin	3	7	15
CWmax	7	15	1023
TXOP	1,504 ms	3,008 ms	----
Configuración con parámetros por defecto			

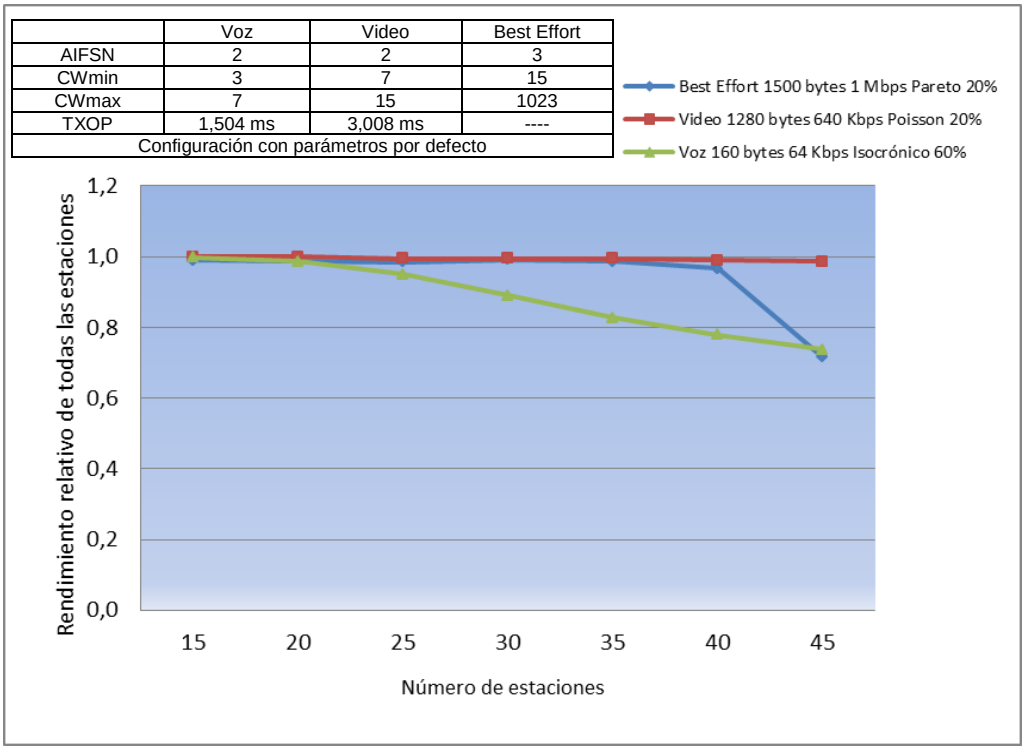


Figura 3.32 Rendimiento relativo de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.1

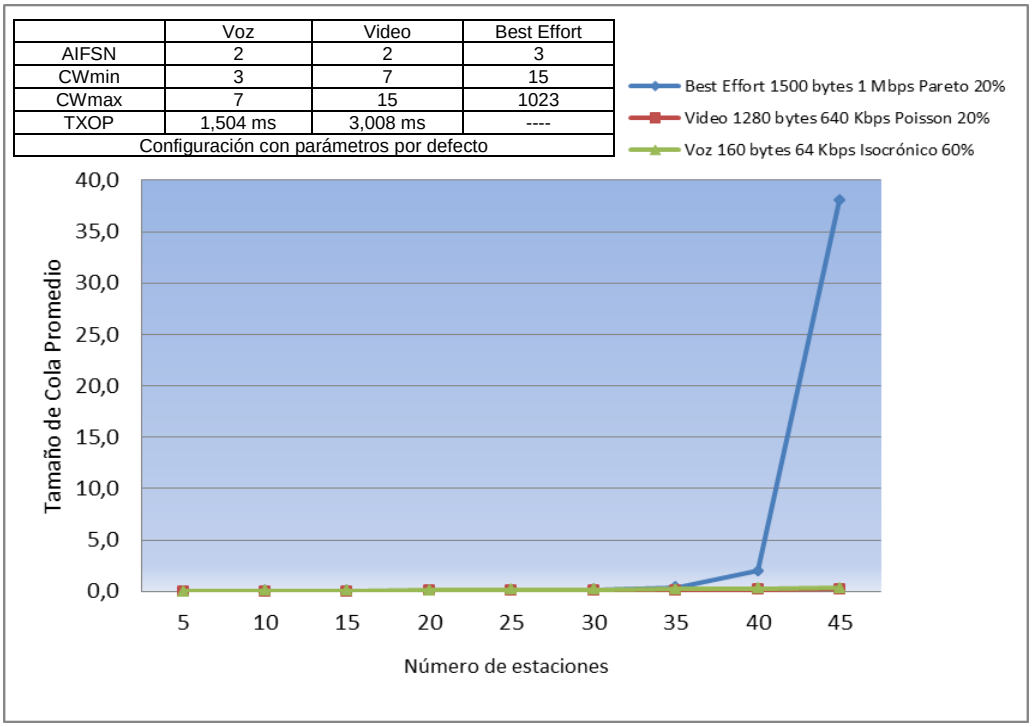


Figura 3.33 Tamaño de Cola de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.1

Finalmente, en las Figuras 3.34 y 3.35 se presentan los delays de los tráficos de las estaciones. Los retardos promedios de voz y video están por debajo de 10 ms para 45 estaciones. Por el contrario, el retardo promedio del flujo de mejor esfuerzo ha crecido rápidamente desde las 40 estaciones.

El análisis de simulación para este escenario, manteniendo una preponderancia de estaciones de voz, muestra que: i) El número creciente de estaciones, conservando la proporción 60%-20%-20%, en el dominio de red influye fuertemente en la conducta del tráfico, produciendo un tamaño de cola promedio siempre creciente, aunque acotado a menos de la unidad para el tráfico de voz y video, y un rendimiento relativo decreciente que se acentúa a partir de las 20 estaciones, independientemente del tráfico; ii) El tamaño de cola promedio de voz se incrementa, hasta un orden de magnitud, cuando la carga se incrementa a 45 estaciones; igual criterio se verificó para el tráfico de video; iv) El tráfico de mejor esfuerzo, de menor prioridad, resulta afectado sensiblemente en todas sus métricas a partir de las 40 estaciones, en beneficio de los otros tráficos.

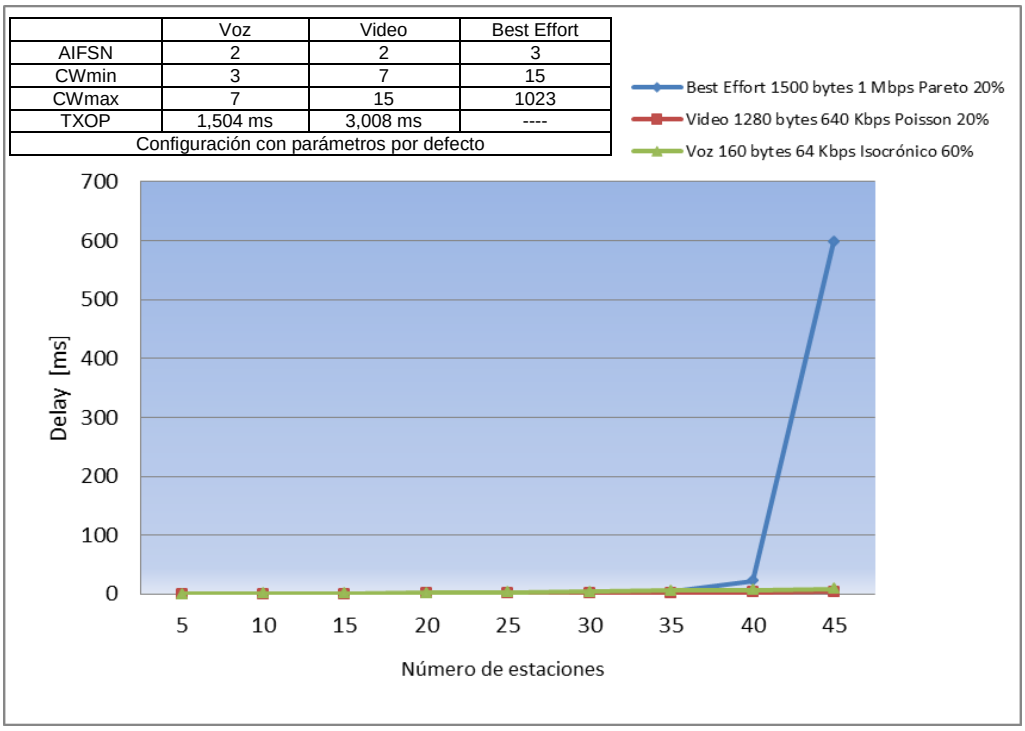


Figura 3.34 Delays de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.1

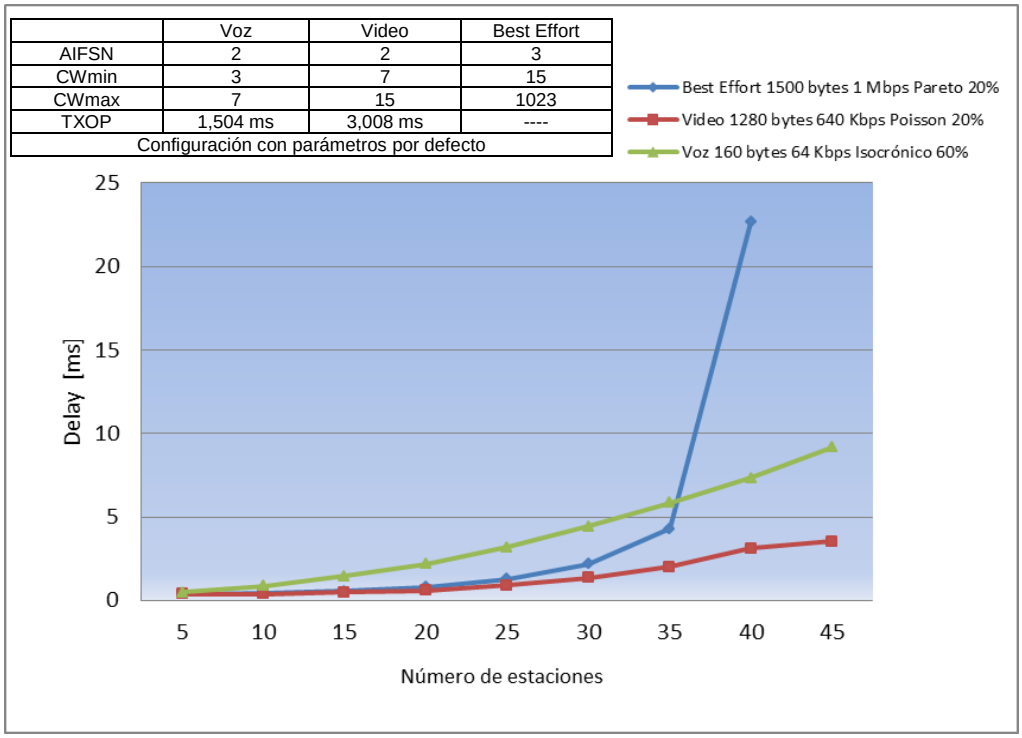


Figura 3.35 Delays de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.1

La Tabla 3.8 resume las características más importantes de este escenario cuando están presentes los tráficos en una proporción de 60% de tráfico de voz, 20% de video y 20% de mejor esfuerzo, variando la cantidad de estaciones de 5 a 45.

	Voz	Video	Best Effort
Rendimiento Máximo [Mbps]	1,273	5,838	8,185
Pérdida 1% Rendimiento	20 estaciones	45 estaciones	35 estaciones
Pérdida 5 % Rendimiento	25 estaciones	-	45 estaciones
Pérdida 10 % Rendimiento	30 estaciones	-	45 estaciones
Retardo de Cola en Rendimiento Máximo [ms]	9,172	3,526	22,669
Retardo de Cola para 25 estaciones [ms]	3,196	0,890	1,270
Retardo Máximo de Cola 45 estaciones [ms]	9,172	3,526	598,841
Tamaño de Cola para 25 estaciones [paquetes]	0,152	0,056	0,110
Tamaño de Cola para 45 estaciones [paquetes]	0,337	0,223	38,086

Tabla 3.8 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 2.1

III.3.2.2 20 % de estaciones de voz, 60 % de video y 20 % de mejor esfuerzo

Los valores promedios obtenidos para el rendimiento directo y relativo, tamaño de cola y delay, variando la carga de 5 a 45 estaciones, con una proporción de 20% de tráfico de voz, 60% de video y 20% de mejor esfuerzo, se muestran en las Figuras 3.36, 3.37, 3.38, 3.39, 3.40 y 3.41.

Se destaca que EDCA provee la diferenciación de servicio esperado entre los diferentes tipos de tráficos, resolviendo a favor de los tráficos de mayor prioridad, aun cuando hay presente una mayor proporción de tráfico de video. También aquí se observa (Figura 3.36) que el rendimiento de los flujos de voz y de video de más alta prioridad, se mantienen más estables que el flujo de mejor esfuerzo, de más baja prioridad. El flujo de voz alcanza un pico de 0,435 Mbps cuando están presentes 45 estaciones. Cuando hay presentes 30 estaciones, el tráfico de mejor esfuerzo alcanza un pico 6,177 Mbps, y luego el rendimiento decae rápidamente. Mientras que el rendimiento del tráfico de video, de mayor proporción, con 45 estaciones, alcanza un rendimiento máximo de 15,044 Mbps.

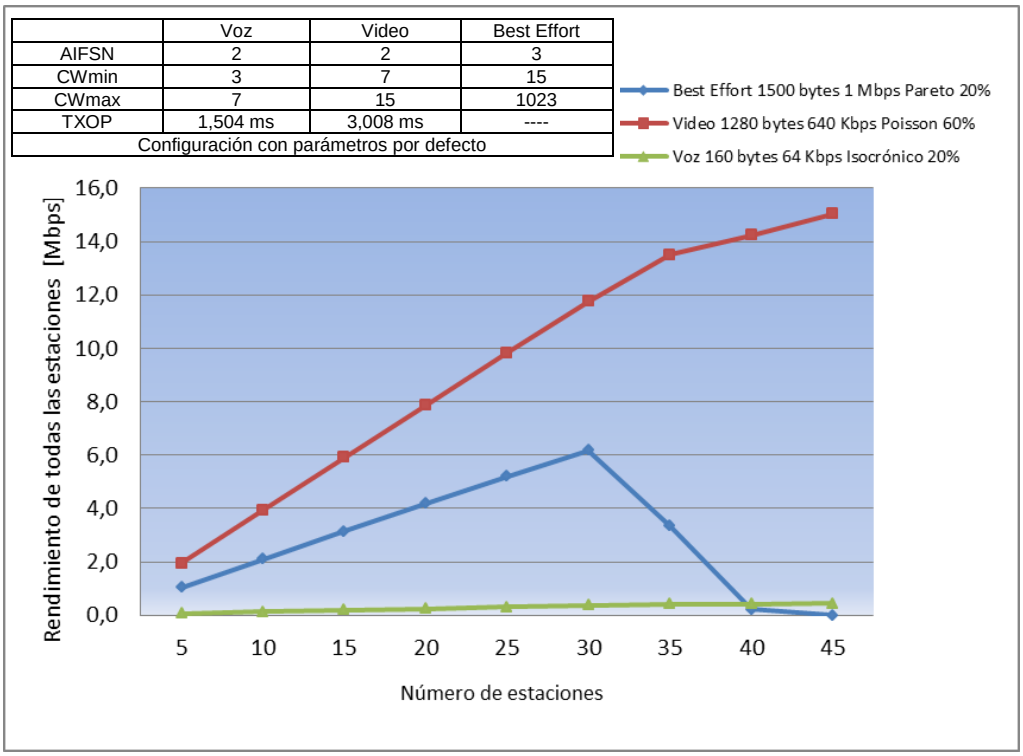
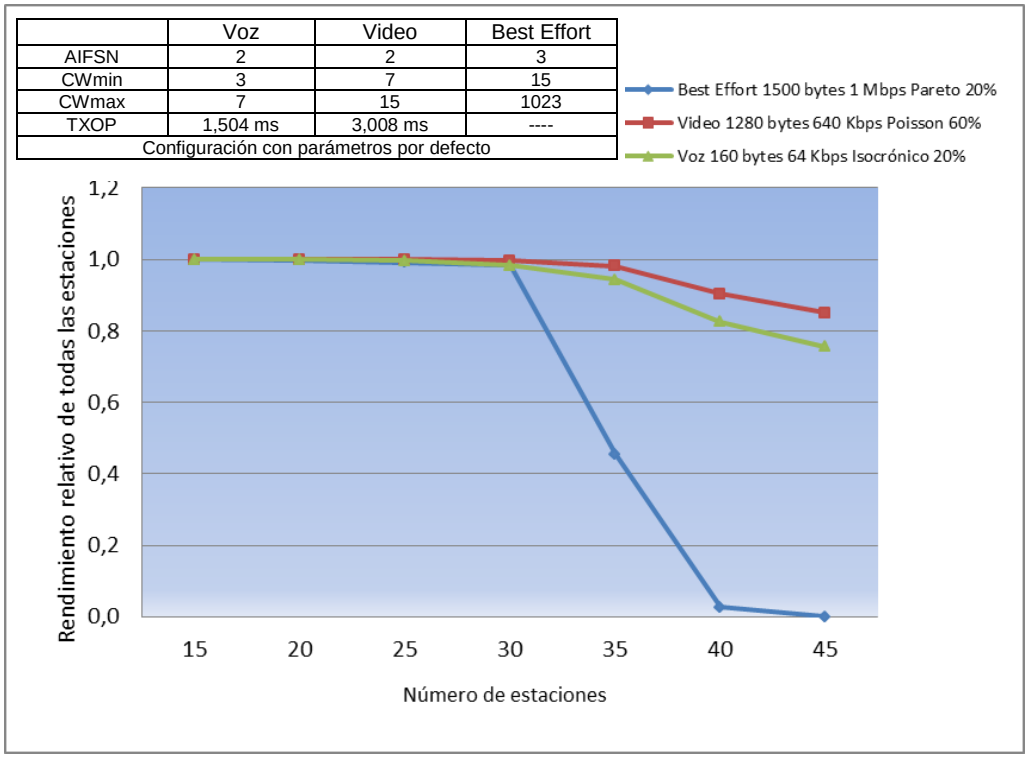


Figura 3.36 Rendimiento de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.2

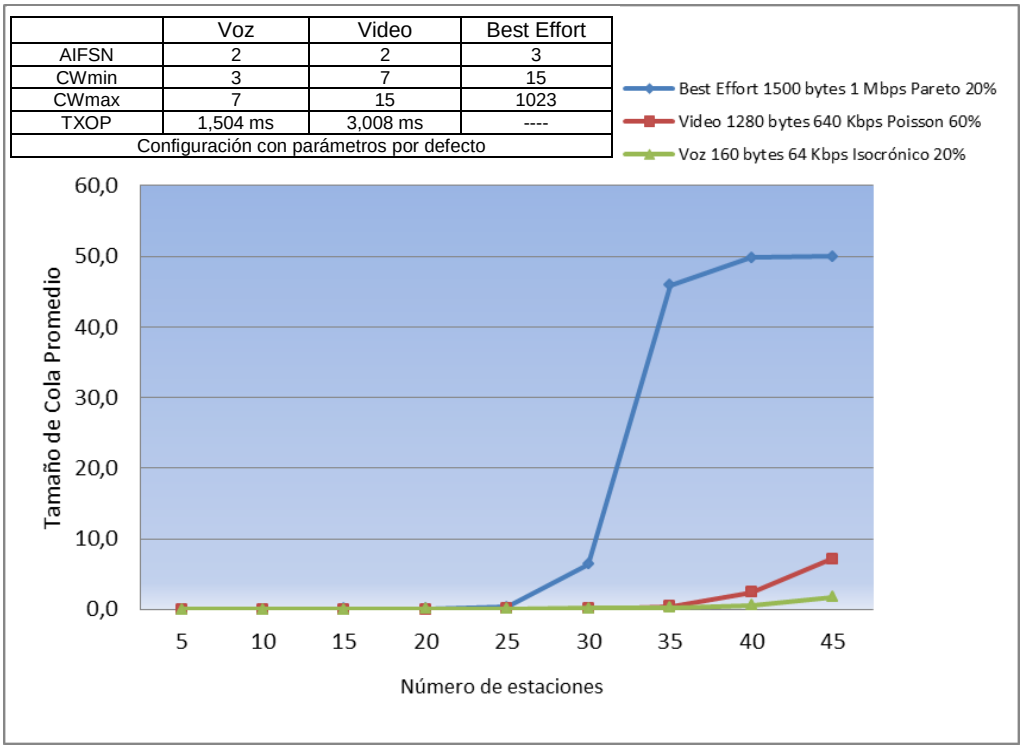
El rendimiento relativo de los flujos aparece prácticamente sin pérdidas significativas hasta las 30 estaciones, como se observa en la Figura 3.37. El flujo de voz y de video alcanzan en las 45 estaciones, una pérdida de 24,45% y 15,05%, respectivamente; mientras que el tráfico de mejor esfuerzo pierde ya un 55 % de rendimiento en las 35 estaciones.

Las Figuras 3.38 y 3.39 presentan el tamaño de cola promedio de las estaciones. Se observa el crecimiento brusco del tamaño de la cola para el tráfico de mejor esfuerzo a partir de las 30 estaciones, en concordancia con las métricas anteriores. Los tamaños de cola para el tráfico de voz y video permanecen por debajo de 0,4 paquetes para 35 estaciones. Luego, ambas colas comienzan un crecimiento sobre la unidad, especialmente la cola promedio de video que alcanza 7,123 paquetes cuando hay 45 estaciones.



	Voz	Video	Best Effort
AIFSN	2	2	3
CWmin	3	7	15
CWmax	7	15	1023
TXOP	1,504 ms	3,008 ms	----
Configuración con parámetros por defecto			

Figura 3.37 Rendimiento relativo de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.2



	Voz	Video	Best Effort
AIFSN	2	2	3
CWmin	3	7	15
CWmax	7	15	1023
TXOP	1,504 ms	3,008 ms	----
Configuración con parámetros por defecto			

Figura 3.38 Tamaño de Cola de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.2

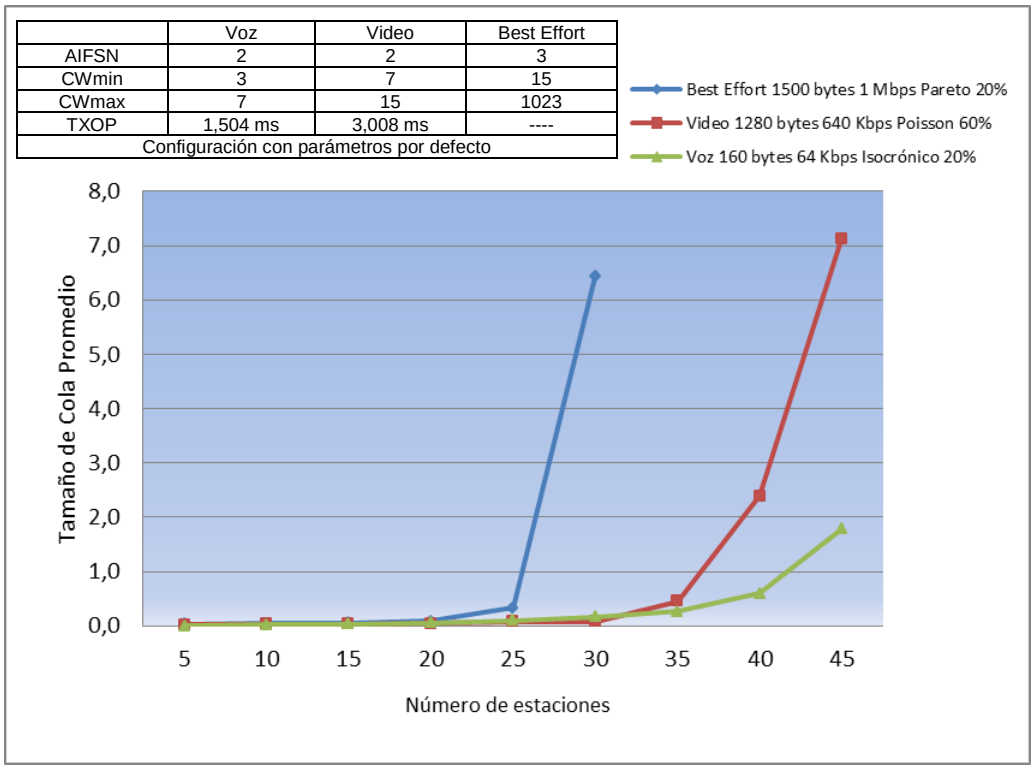


Figura 3.39 Tamaño de Cola de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.2

Finalmente, en las Figuras 3.40 y 3.41 se presentan los delays de los tráficos de las estaciones. El retardo promedio de voz crece a 46 ms, y el de video alcanza los 130 ms para 45 estaciones. Por el contrario, el retardo promedio del flujo de mejor esfuerzo ha crecido rápidamente desde las 30 estaciones.

Efectuando un análisis que destaque las principales diferencias para este escenario en particular (comparado con el escenario III.3.2.1), manteniendo una preponderancia de estaciones de video, se demuestra que: i) El número creciente de estaciones, conservando la proporción 20%-60%-20% en el dominio de red, influye fuertemente en la conducta del tráfico, produciendo un cambio del tamaño de cola promedio más significativo, del orden de 2 paquetes para el tráfico de voz y de 7 paquetes para el tráfico de video para 45 estaciones, y un rendimiento relativo decreciente que se acentúa a partir de las 30 estaciones, independientemente del tráfico; ii) El tamaño de cola promedio de voz se incrementa, hasta dos órdenes de magnitud, cuando la carga se incrementa a 45 estaciones; igual criterio se verificó para el tráfico de video; iii) El tráfico de mejor esfuerzo, de menor prioridad, resulta afectado sensiblemente en todas sus métricas a partir de las 30 estaciones, en beneficio de los otros tráficos.

	Voz	Video	Best Effort
AIFSN	2	2	3
CWmin	3	7	15
CWmax	7	15	1023
TXOP	1,504 ms	3,008 ms	----
Configuración con parámetros por defecto			

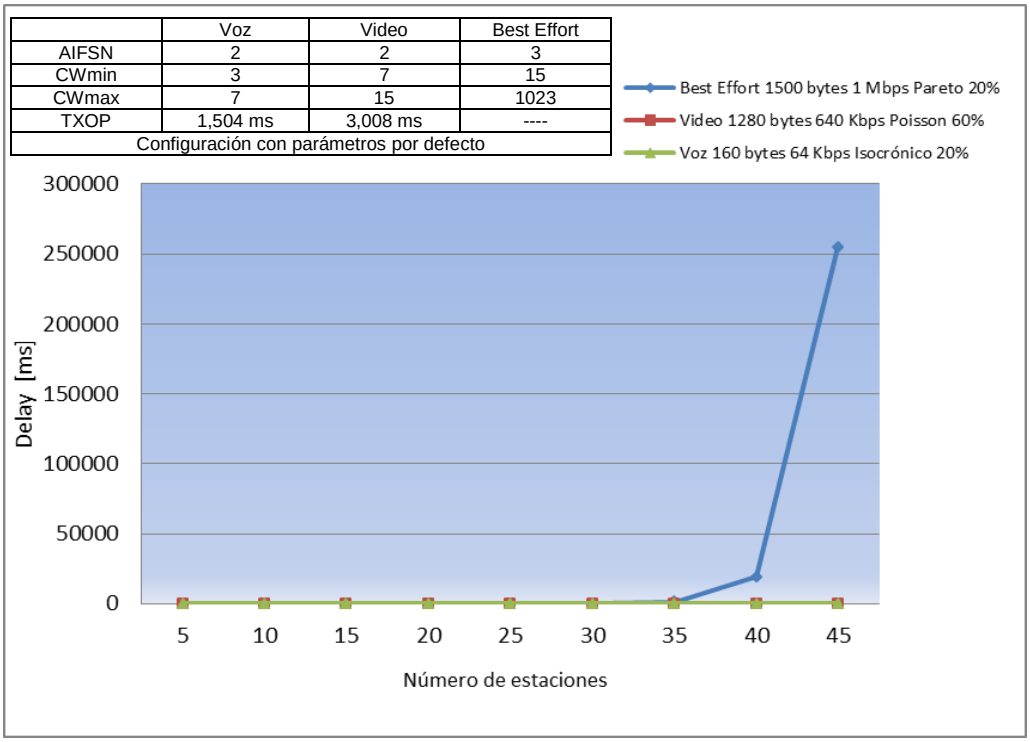


Figura 3.40 Delays de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.2

	Voz	Video	Best Effort
AIFSN	2	2	3
CWmin	3	7	15
CWmax	7	15	1023
TXOP	1,504 ms	3,008 ms	----
Configuración con parámetros por defecto			

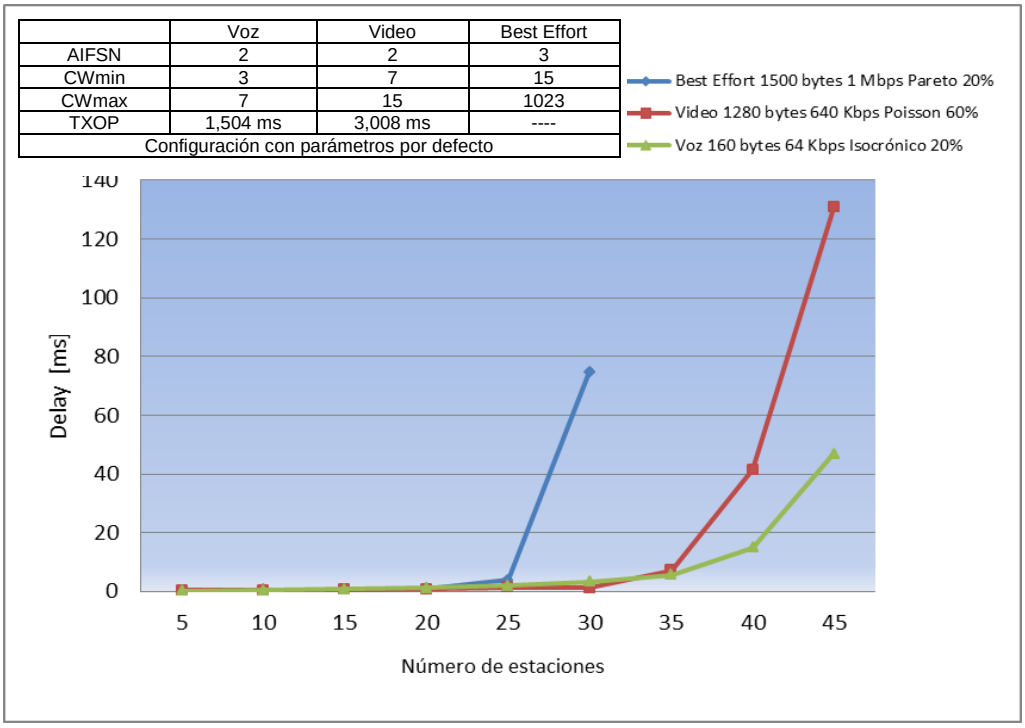


Figura 3.41 Delays de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.2

La Tabla 3.9 resume las características más importantes de este escenario cuando están presentes los tráficos en una proporción de 20% de tráfico de voz, 60% de video y 20% de mejor esfuerzo, variando la cantidad de estaciones de 5 a 45.

	Voz	Video	Best Effort
Rendimiento Máximo [Mbps]	0,435	15,044	6,177
Pérdida 1% Rendimiento	30 estaciones	35 estaciones	30 estaciones
Pérdida 5 % Rendimiento	35 estaciones	40 estaciones	35 estaciones
Pérdida 10 % Rendimiento	40 estaciones	45 estaciones	35 estaciones
Retardo de Cola en Rendimiento Máximo [ms]	46,826	130,793	74,754
Retardo de Cola para 25 estaciones [ms]	1,939	1,300	3,869
Retardo Máximo de Cola 45 estaciones [ms]	46,826	130,793	254745,092
Tamaño de Cola para 25 estaciones [paquetes]	0,096	0,083	0,338
Tamaño de Cola para 45 estaciones[paquetes]	1,783	7,123	49,998

Tabla 3.9 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 2.2

III.3.2.3 20 % de estaciones de voz, 20 % de video y 60 % de mejor esfuerzo.

Los valores promedios obtenidos para el rendimiento directo, rendimiento relativo, tamaño de cola y delay, variando la carga de 5 a 45 estaciones, con una proporción de 20% de tráfico de voz, 20% de video y 60% de mejor esfuerzo, se muestran en las Figuras 3.42, 3.43, 3.44, 3.45 y 3.46.

Aquí también EDCA provee la diferenciación de servicio esperado entre los diferentes tipos de tráficos, resolviendo a favor de los tráficos de mayor prioridad, a pesar de que hay presente una mayor proporción de tráfico de mejor esfuerzo. Se observa en la Figura 3.42 que el rendimiento de los flujos de voz y de video de más alta prioridad, se mantienen más estables que el flujo de mejor esfuerzo, de más baja prioridad. El flujo de voz alcanza un pico de 0,565 Mbps cuando están presentes 45 estaciones. Con 25 estaciones, el tráfico de mejor esfuerzo alcanza un pico 15,633 Mbps, y luego el rendimiento decae rápidamente. Mientras que el rendimiento del tráfico de video, con 45 estaciones alcanza un rendimiento máximo de 5,887 Mbps.

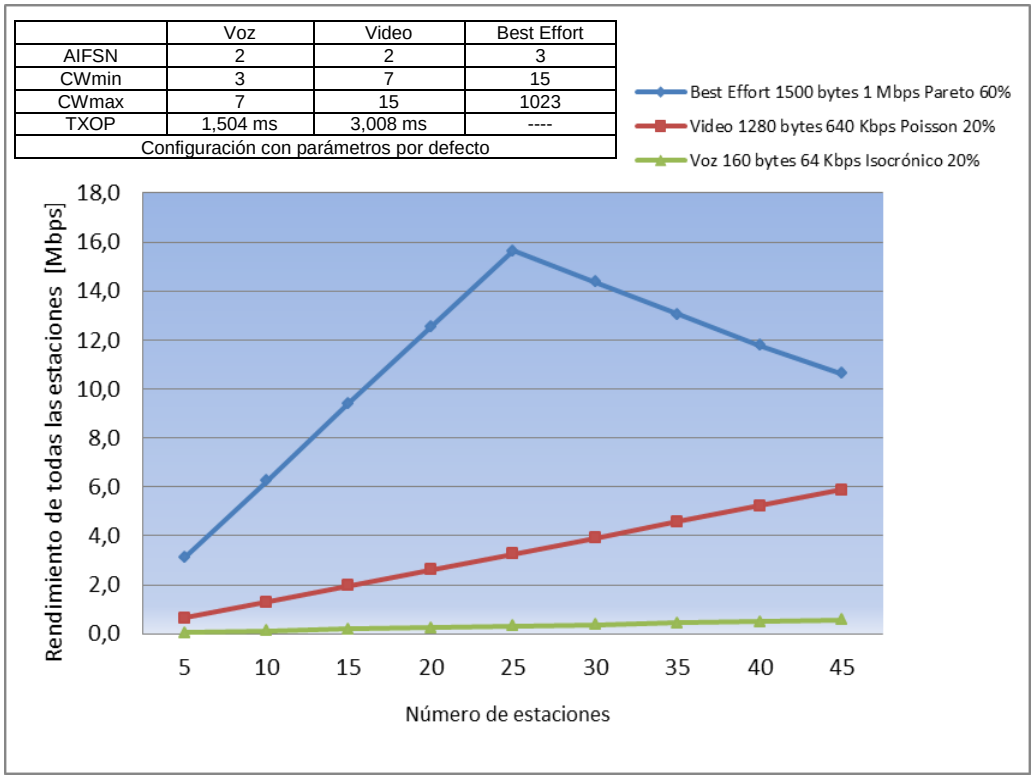


Figura 3.42 Rendimiento de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.3

El rendimiento relativo de los flujos aparece prácticamente sin pérdidas significativas hasta las 25 estaciones (Figura 3.43). El flujo de voz y de video alcanza en las 45 estaciones, una pérdida de 1,76% y 0,575%, respectivamente; mientras que el tráfico de mejor esfuerzo pierde ya un 41 % de rendimiento cuando están presentes 35 estaciones.

La Figura 3.44 presenta el tamaño de cola promedio de las estaciones. Se observa el crecimiento brusco para el tráfico de mejor esfuerzo a partir de las 25 estaciones, en concordancia con las métricas anteriores. Los tamaños de cola para el tráfico de voz y video permanecen por debajo de 0,2 paquetes en las 45 estaciones.

Finalmente, en las Figura 3.45 y 3.46 se presentan los delays de los tráficos de las estaciones. Los retardos promedios de voz y de video se encuentran por debajo de los 5 ms para 45 estaciones. Por el contrario, el retardo promedio del flujo de mejor esfuerzo ha crecido rápidamente desde las 25 estaciones.

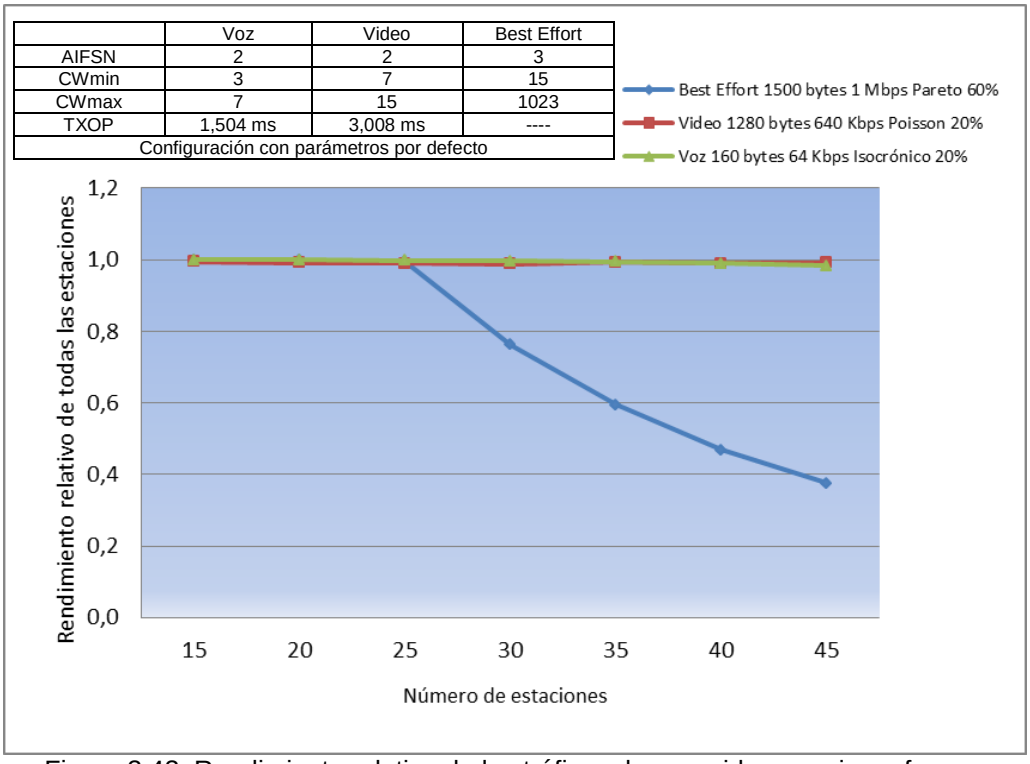


Figura 3.43 Rendimiento relativo de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.3

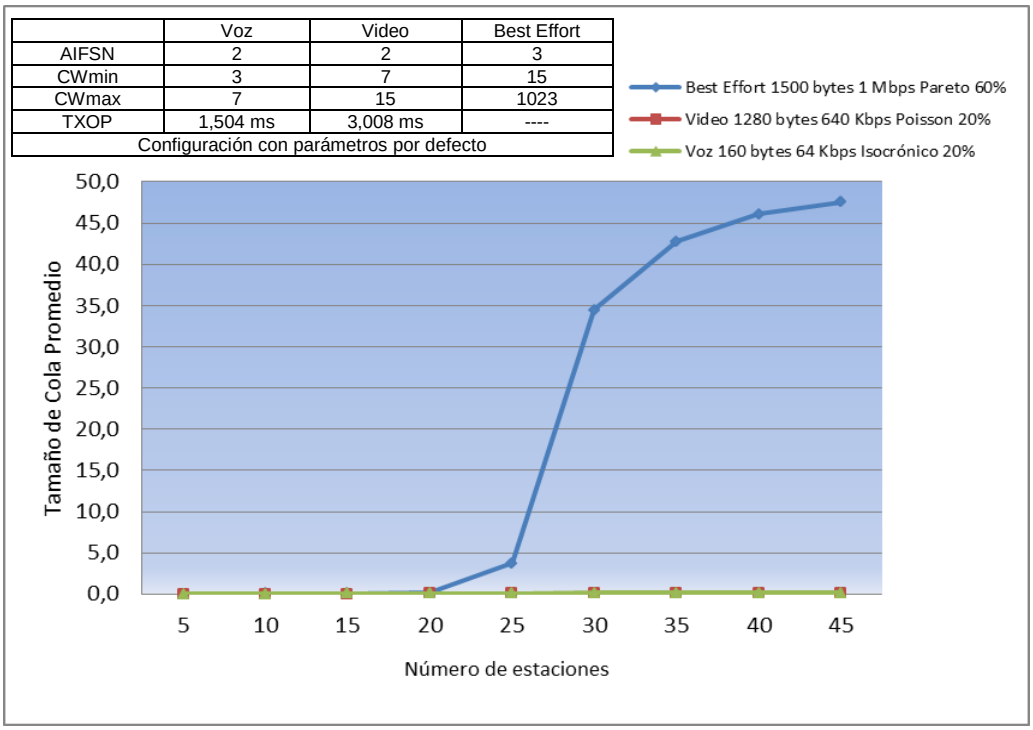


Figura 3.44 Tamaño de Cola de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.3

	Voz	Video	Best Effort
AIFSN	2	2	3
CWmin	3	7	15
CWmax	7	15	1023
TXOP	1,504 ms	3,008 ms	----
Configuración con parámetros por defecto			

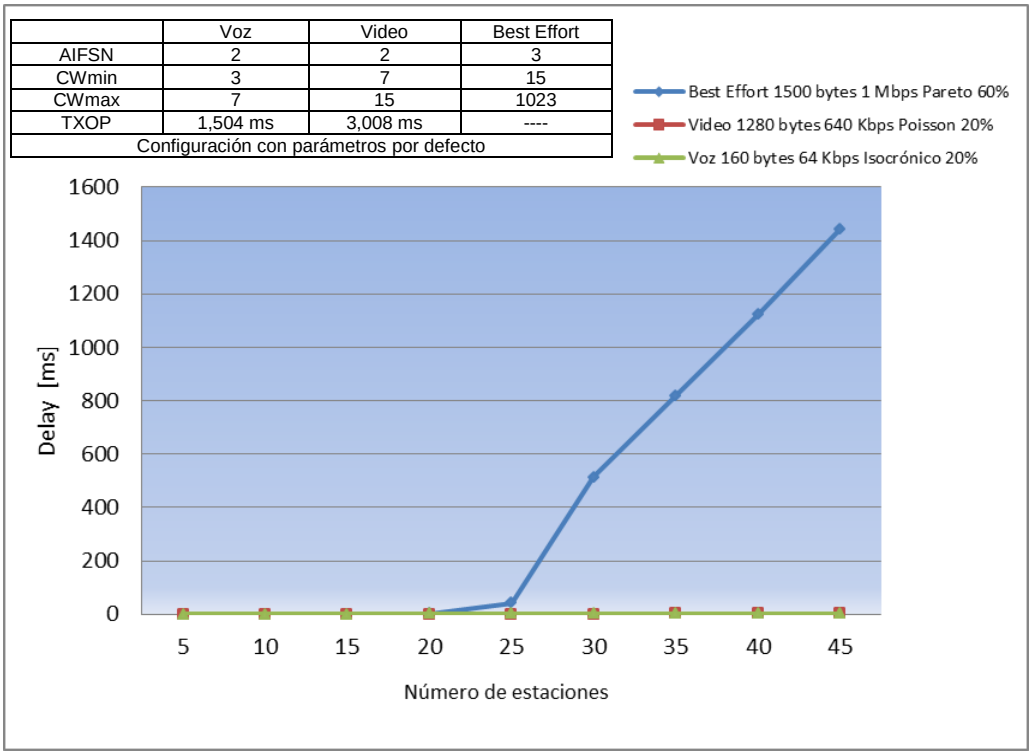


Figura 3.45 Delays de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.3

	Voz	Video	Best Effort
AIFSN	2	2	3
CWmin	3	7	15
CWmax	7	15	1023
TXOP	1,504 ms	3,008 ms	----
Configuración con parámetros por defecto			

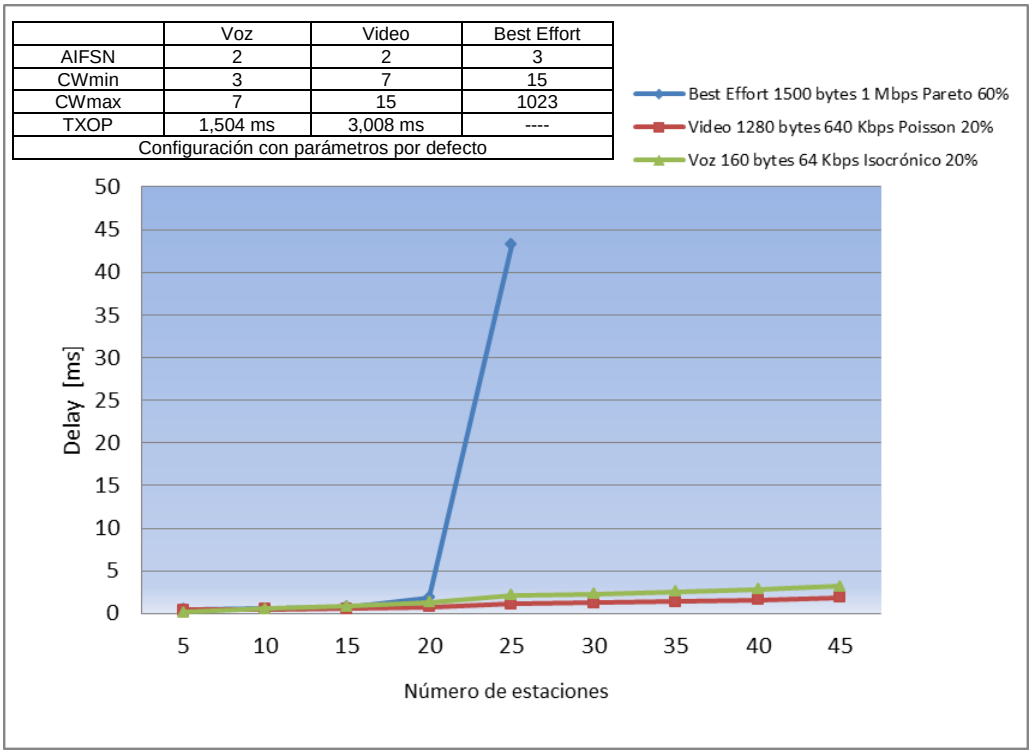


Figura 3.46 Delays de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.3

Efectuando un análisis que destaque las principales diferencias para este escenario en particular (comparado con el escenario IV.3.2.1), manteniendo una preponderancia de estaciones de mejor esfuerzo, se demuestra que: i) El número creciente de estaciones, conservando la proporción 20%-20%-60% en el dominio de red, influye fuertemente en la conducta del tráfico, produciendo un tamaño de cola promedio siempre creciente, aunque acotado a menos de 0,2 paquetes para el tráfico de voz y de video para 45 estaciones, y un rendimiento relativo decreciente que se acentúa a partir de las 25 estaciones, para el tráfico de mejor esfuerzo; ii) El tamaño de cola promedio de voz se incrementa, hasta un orden de magnitud, cuando la carga se incrementa a 45 estaciones; igual criterio se verificó para el tráfico de video; iii) El tráfico de mejor esfuerzo, de menor prioridad, resulta afectado sensiblemente en todas sus métricas a partir de las 25 estaciones, en beneficio de los otros tráficos.

La Tabla 3.10 resume las características más importantes de este escenario, cuando están presentes los tráficos en una proporción de 20% de tráfico de voz, 20% de video y 60% de mejor esfuerzo, variando la cantidad de estaciones de 5 a 45.

	Voz	Video	Best Effort
Rendimiento Máximo [Mbps]	0,565	5,887	15,633
Pérdida 1% Rendimiento	45 estaciones	30 estaciones	30 estaciones
Pérdida 5 % Rendimiento	-	-	30 estaciones
Pérdida 10 % Rendimiento	-	-	30 estaciones
Retardo de Cola en Rendimiento Máximo [ms]	3,188	1,842	43,239
Retardo de Cola para 25 estaciones [ms]	2,160	1,117	43,239
Retardo Máximo de Cola 45 estaciones [ms]	3,188	1,842	1441,013
Tamaño de Cola para 25 estaciones [paquetes]	0,107	0,071	3,753
Tamaño de Cola para 45 estaciones [paquetes]	0,156	0,117	47,501

Tabla 3.10 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 2.3

III.3.2.4 Resumen experimentación Escenario 2

Los valores promedios obtenidos para el rendimiento directo y rendimiento relativo del tráfico de voz, variando la carga de 5 a 45 estaciones, se muestran en las Figuras 3.47 y 3.48. A los efectos del

análisis comparativo, se han superpuesto las diferentes situaciones, según la proporción de tráfico inyectado por las estaciones, a saber: a) 60 % de estaciones de voz, 20 % de video y 20 % de mejor esfuerzo, b) 20 % de estaciones de voz, 60 % de video y 20 % de mejor esfuerzo, y c) 20 % de estaciones de voz, 20 % de video y 60 % de mejor esfuerzo.

La Figura 3.47 presenta el rendimiento directo de voz en cada situación. Como es de esperar, se observa un mayor rendimiento cuando hay una mayor cantidad proporcional de estaciones de voz. Además, hay una mejor respuesta cuando hay una mayor proporción de tráfico de mejor esfuerzo que una mayor proporción de tráfico de video.

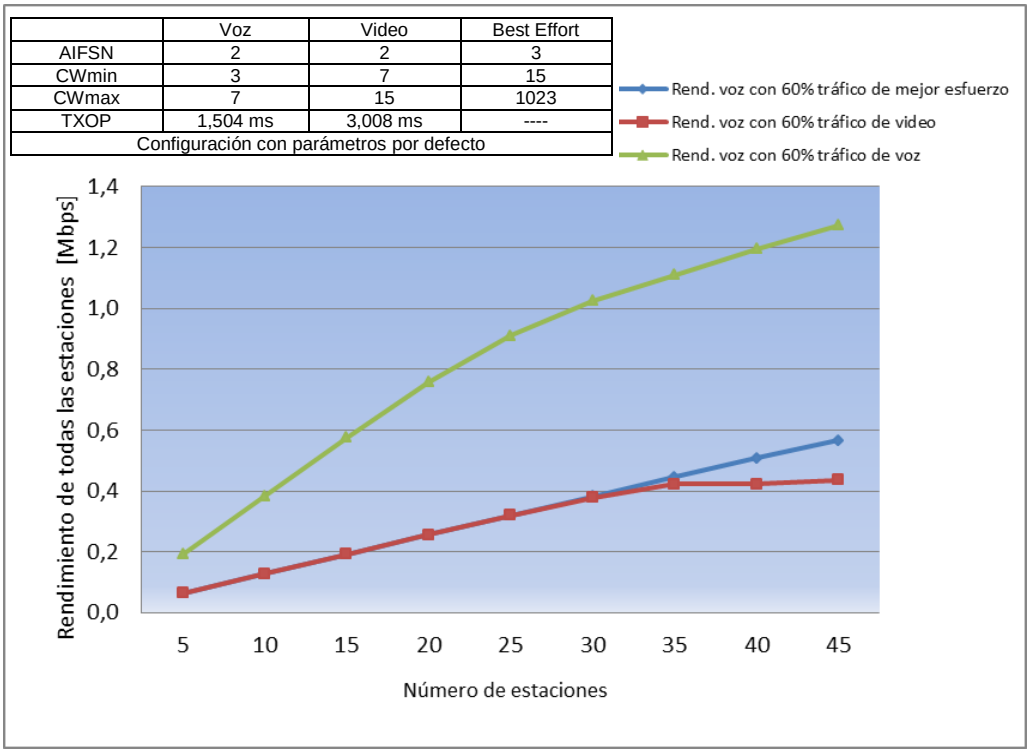


Figura 3.47 Rendimiento del tráfico de voz en cada Escenario 2

En la Figura 3.48 se observa que el rendimiento relativo tiene una pérdida del 26,31% con 45 estaciones, cuando hay una mayor proporción de estaciones de voz. La pérdida es de 24,45% y de sólo 1,76%, cuando hay una mayor proporción de estaciones de video, o de estaciones de mejor esfuerzo, respectivamente.

Los valores promedios obtenidos para el rendimiento directo y rendimiento relativo del tráfico de video, variando la carga de 5 a 45 estaciones, se muestran en las Figuras 3.49 y 3.50. En este caso, para el

análisis comparativo, se han superpuesto las diferentes situaciones, según la proporción de tráfico inyectado por las estaciones.

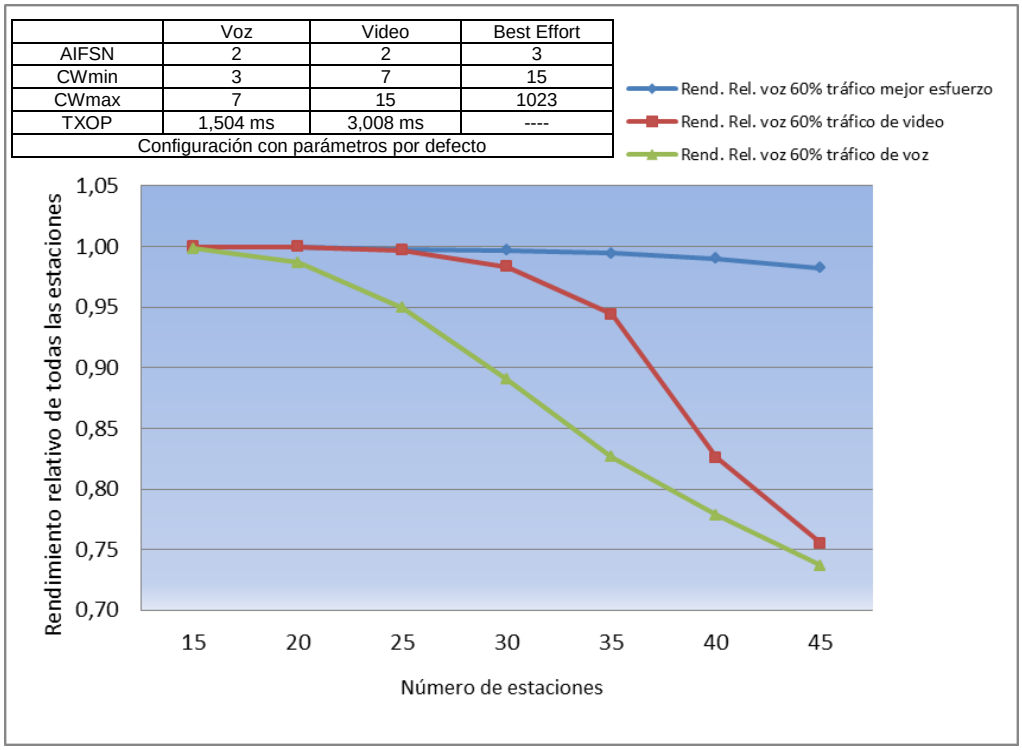


Figura 3.48 Rendimiento relativo del tráfico de voz en cada Escenario 2

En la Figura 3.49 se muestra el rendimiento directo de video. Se observa lógicamente un mayor rendimiento cuando hay una mayor cantidad proporcional de estaciones de video. Además, hay una respuesta prácticamente similar cuando hay una mayor proporción de tráfico voz o una mayor proporción de tráfico de mejor esfuerzo (las curvas aparecen superpuestas). En la Figura 3.50 se observa que el rendimiento relativo del video tiene una pérdida del 15,15% con 45 estaciones, cuando hay una mayor proporción de estaciones de video. Y la pérdida es de 1,21% y de sólo 0,38%, cuando hay una mayor proporción de estaciones de voz o de estaciones de mejor esfuerzo, respectivamente.

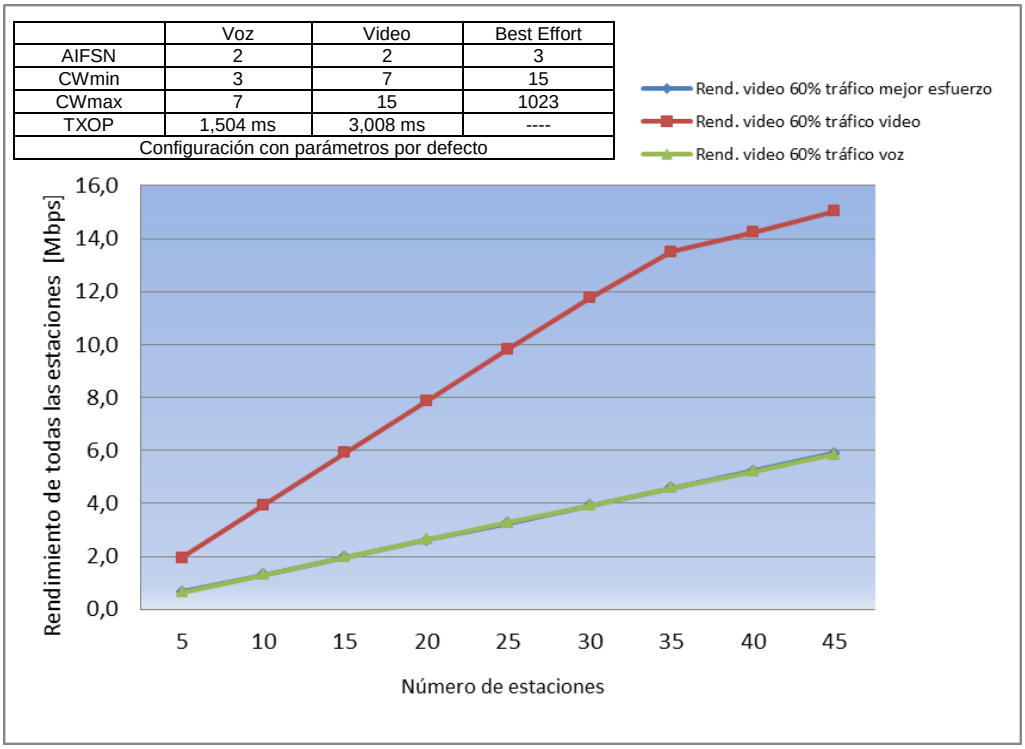


Figura 3.49 Rendimiento del tráfico de video en cada Escenario 2

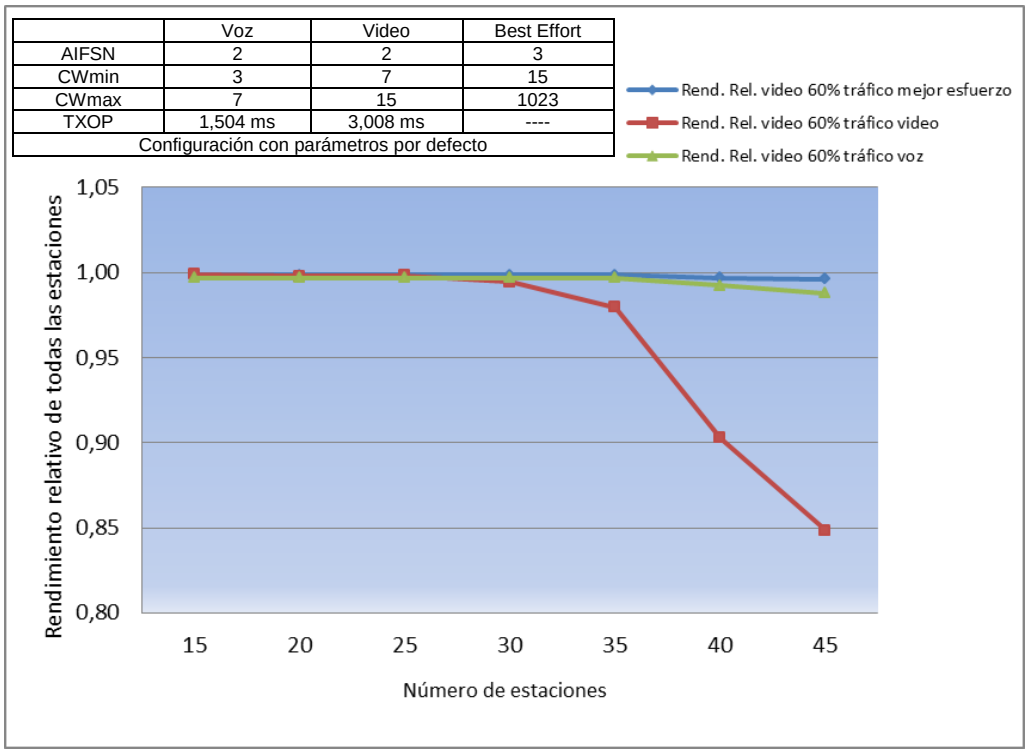


Figura 3.50 Rendimiento relativo del tráfico de video en cada Escenario 2

Finalmente, se presentan los valores promedios obtenidos para el rendimiento directo y rendimiento relativo del tráfico de mejor esfuerzo, variando la carga de 5 a 45 estaciones. En las Figuras 3.51 y 3.52, para el análisis comparativo, se han superpuesto las diferentes situaciones, según la proporción de tráfico inyectado por las estaciones.

Para el rendimiento directo de mejor esfuerzo, se observa un mayor rendimiento cuando hay una mayor cantidad proporcional de estaciones de mejor esfuerzo, como se muestra en la Figura 3.51. Además, hay una mejor respuesta del tráfico de mejor esfuerzo cuando hay una mayor proporción de tráfico de voz, con un pico de 8,185 Mbps con 40 estaciones, que cuando hay una mayor proporción de tráfico de video, que alcanza 6,177 Mbps para 30 estaciones. En la Figura 3.52 se observa que el rendimiento relativo de mejor esfuerzo tiene una pérdida de casi el 100% sobre 45 estaciones, cuando hay una mayor proporción de estaciones de video. Y la pérdida se reduce al 62,45% y es de 27,72%, cuando hay una mayor proporción de estaciones de mejor esfuerzo o de estaciones de voz, respectivamente.

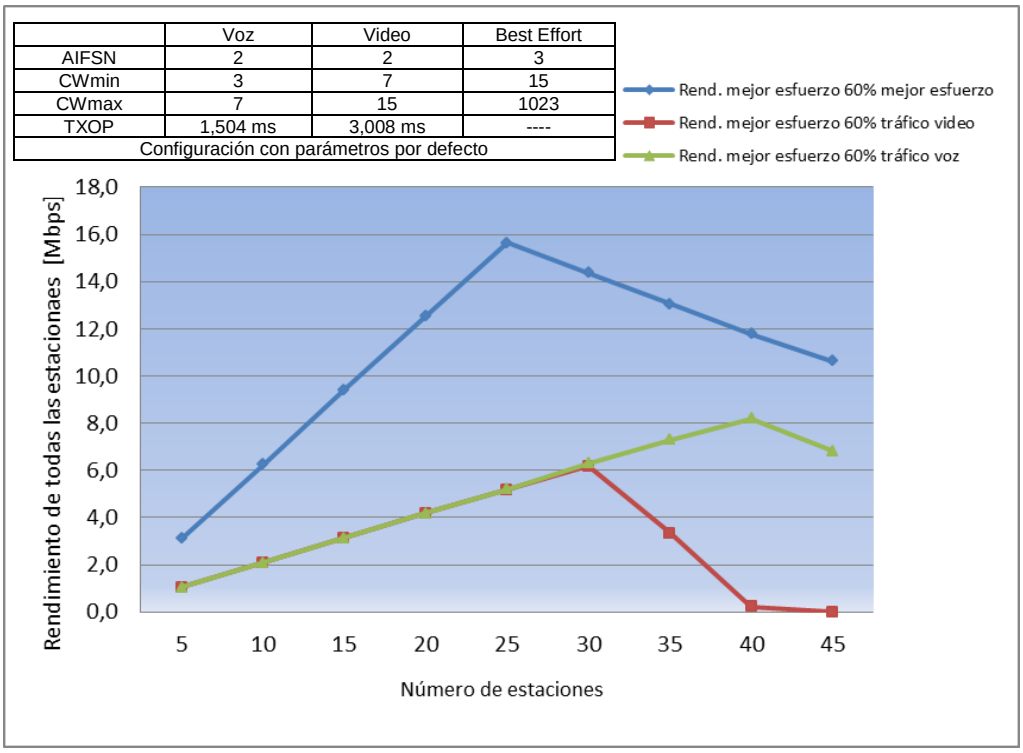


Figura 3.51 Rendimiento del tráfico de mejor esfuerzo en cada Escenario 2

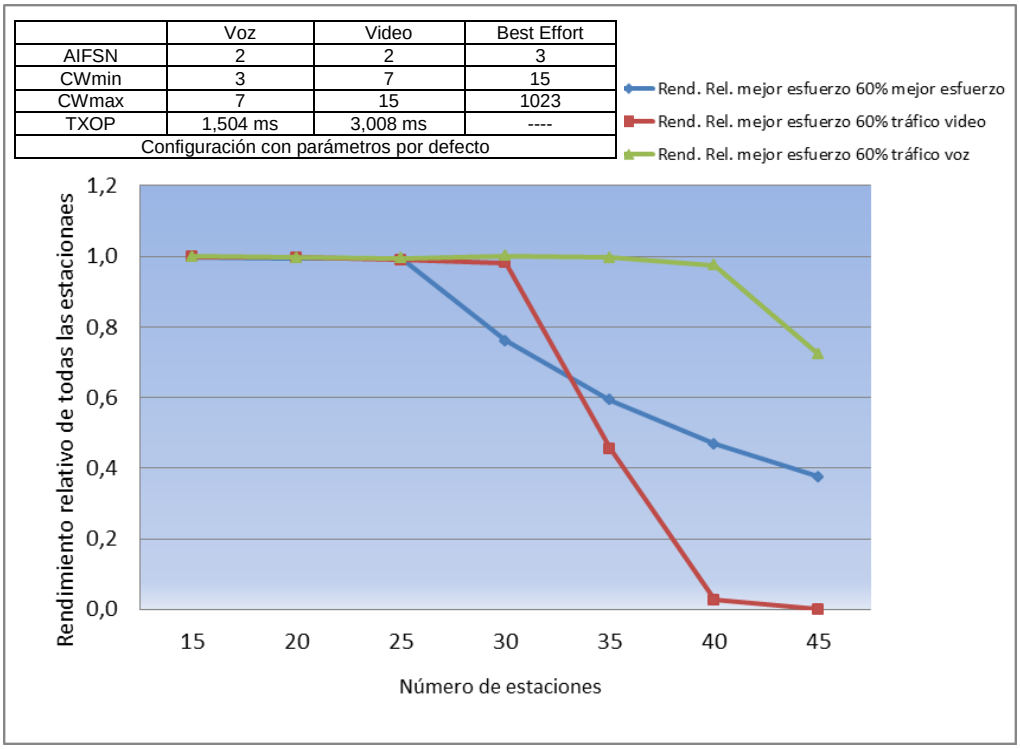


Figura 3.52 Rendimiento relativo del tráfico de mejor esfuerzo en cada Escenario 2

III.4) CONCLUSIÓN

Se ha demostrado, usando cada uno de los casos de los Escenarios 1 y 2, que la variación en la proporción relativa de diferentes tipos de tráficos de nodos wíreless con QoS, tendrá un efecto diferenciado sobre el comportamiento y estado general de la red WLAN que integran.

En cada situación se han verificado distintos valores para las métricas utilizadas en la experimentación. Por ejemplo, el rendimiento máximo de video varía entre 10,856 Mbps a 13,071 Mpbs (un 20% más), o el delay de la cola de voz para 20 estaciones se ubica entre los 4,105 ms a 16,173 ms (400% más), dependiendo del Escenario 1 que se trate. Mientras que la pérdida del 1% de rendimiento del tráfico de voz puede producirse entre 20 y 45 estaciones (con más del doble de estaciones), o el tamaño de cola de video para 45 estaciones puede variar entre 0,117 y 7,123 paquetes (60 veces más), según la variante del Escenario 2.

Los valores de la pérdida de rendimiento relativo estarán comprendidos en un rango de 20% para los tráficos de voz y video, y del 65% para el tráfico de mejor esfuerzo, cuando hay una carga de 20 estaciones en cualquiera de los Escenarios 1. Mientras que para una carga de 45 estaciones en alguno de los Escenarios 2, los valores de

pérdida de rendimiento relativo estarán dentro de un rango de 25% para el tráfico de voz y del 70% para el tráfico de mejor esfuerzo. Para el tráfico de video el rango se reduce a 15%.

Se concluye que:

- El número creciente de estaciones wireless en un dominio de red diverso influye fuertemente en la conducta del tráfico, por medio de rendimientos menores, y retardos de paquete promedio, porcentajes de pérdida de paquetes y tamaños de cola promedio más altos. Por lo tanto, el mecanismo EDCA 802.11e es capaz de efectuar la diferenciación de tráfico, pero no puede garantizar los requerimientos de QoS de las comunicaciones del tráfico de mayor prioridad, cuando la voz y el video comparten dinámicamente el canal entre ellos, en presencia o ausencia de trafico de datos generales de mejor esfuerzo, a menos que el número de estaciones se mantenga por debajo de 10 estaciones aproximadamente.
- Se tendrá un efecto indeseado que impide mantener niveles de rendimiento y retardos, cuando se trata de aplicaciones multimedia o de tiempo real muy estrictas en sus requerimientos, destacándose que se ha verificado primero el umbral de pérdida de rendimiento estándar, tanto para voz como para video, antes que se alcance el umbral de retardo habitual.
- El mayor impacto sobre la QoS de las comunicaciones wireless es debido a las interacciones entre los tráficos presentes de las estaciones, que generan colisiones virtuales, descartes de cola y colisiones en el medio, y al propio protocolo EDCA 802.11e, que las características de error introducidas en el medio en la experimentación (10^{-4} BER).

Y mientras la diferenciación de servicio provisto por la configuración de parámetros EDCA, usando los valores por defecto y manteniéndolos fijos, es efectiva para menos de 10 estaciones aproximadamente, las prestaciones de los flujos puede degradarse de diversa forma dependiendo del contexto, aún a costa de los de menor prioridad, cuando el canal esta altamente cargado.

Por lo tanto, deben proponerse nuevas aproximaciones para habilitar el uso de las redes EDCA 802.11e para soportar estas comunicaciones multimediales y de tiempo real, y simultáneamente satisfacer las restricciones de este tipo de tráfico de alta prioridad. Los restantes Capítulos introducen la búsqueda de parámetros que mejoren las métricas dadas por la configuración por defecto, y aseguren

dinámicamente las condiciones de QoS esperada para los tráficos presentes.

En el Apéndice B “Tablas comparativas del comportamiento de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo”, se sintetizan los puntos críticos de las métricas más importantes, analizando el comportamiento del tráfico de voz, de video y de mejor esfuerzo, para cada una de las situaciones, y resaltando los casos de mejores y peores prestaciones.

III.5) SUMARIO

En este capitulo, se han evaluado las condiciones del protocolo EDCA 802.11e para soportar diversos escenarios, en una configuración por defecto. Los escenarios de simulación propuestos analizan la conducta del mecanismo EDCA, cuando las categorías tráfico de distinta prioridad interactúan entre sí, en presencia o ausencia de algunas de las fuentes, o al cambiar la proporción relativa de entre ellas.

Los escenarios analizados son:
Escenario 1:

- Estaciones similares con todos los tipos de tráfico presentes (voz, video y mejor esfuerzo)
- Idem a anterior sin tráfico de voz,
- Idem a anterior sin tráfico de video, y
- Idem a anterior sin tráfico de mejor esfuerzo,

Escenario 2:

- 60 % de estaciones de voz, 20 % de video y 20 % de mejor esfuerzo,
- 20 % de estaciones de voz, 60 % de video y 20 % de mejor esfuerzo, y
- 20 % de estaciones de voz, 20 % de video y 60 % de mejor esfuerzo.

Salvando la primera situación del Escenario 1, a conocimiento del tesista, esta es la primera experiencia de análisis exhaustivo, con las variantes del Escenario 1. Además, se incluye una nueva propuesta, variando la proporción relativa de los tipos de tráfico presentes, planteada con todos los casos del Escenario 2 [78-80].

Se ha demostrado, que la variación en la proporción relativa de diferentes tipos de tráficos de nodos wireless con QoS, tiene un efecto diferenciado sobre el comportamiento y estado general de la red WLAN que integran.

CAPITULO IV

ENTENDIENDO LAS LIMITACIONES DE EDCA 802.11E: IMPACTO DE LAS PRESTACIONES ANTE LA DINÁMICA DE LOS PARÁMETROS EDCA

En este Capítulo, se plantean las limitaciones del mecanismo EDCA cuando se usan los parámetros estáticos por defecto. Para ello, se evalúa el impacto sobre las métricas de prestaciones cuando se adoptan otros valores de los parámetros EDCA, en búsqueda de aquellos que aseguren un comportamiento de mejora de cada tipo de tráfico y de la red como un todo. A los fines comparativos de las métricas de prestaciones, los nuevos valores de los parámetros se usaron sobre los mismos escenarios utilizados en el Capítulo 3. Se demuestra que hay mejoras del rendimiento en todos los casos, con un máximo de 36% para uno de los tráficos, y de un 25% para la red.

IV.1) INTRODUCCIÓN

Las WLAN (Wireless LAN) basadas en IEEE 802.11 se han vuelto las más populares en accesos a las Redes LAN Cableadas y a la banda ancha móvil/wireless de Internet. Corrientemente, la mayor parte del tráfico transportado por estas redes está compuesto por servicios de internet tradicionales como web browsing, e-mail o transferencia de archivos. Sin embargo, las llamadas de VoIP (Voice over IP) y otros servicios de streaming o interactivos como video o juegos, o aplicaciones industriales en tiempo real, tendrán un importante rol en las redes wireless multiservicio heterogéneas del futuro.

En orden a satisfacer los requerimientos de mayor tráfico y el servicio de aplicaciones nuevas, la tecnología WLAN evolucionó, y continúa, en dos claras direcciones: i) experimentando maximizar la utilización del canal wireless con nuevas especificaciones de Capa física (*PHY*), por ejemplo usando OFDM (Orthogonal Frequency - Division Multi-plexing), técnicas MIMO (Multiple Input Multiple Output), entre otras y ii) mejorando los mecanismos de diferenciación de tráfico a nivel MAC (Media Access Control), en orden de gestionar apropiadamente los diferentes perfiles de tráfico.

Están disponibles los AP (Access Points) y tarjetas wireless implementando la EDCA **(**Enhanced Distributed Channel Access) 802.11e bajo la denominación de WMM (Wireless Multimedia). EDCA/WMM provee diferenciación de tráfico clasificando los flujos de tráfico en

diferentes ACs (Access Categories), donde cada AC tiene sus propios parámetros MAC.

De acuerdo a lo evaluado en el Capítulo anterior, surgen naturalmente las dudas si los parámetros estándar sugeridos (o por defecto) son los óptimos, y si con otras configuraciones pueden obtenerse mejores resultados de prestaciones.

IV.2) EDCA 802.11E: UNA VISIÓN MÁS DETALLADA

La provisión de QoS para las aplicaciones de capa superior es uno de los más grandes desafíos que una capa MAC wirelesss debería soportar. En particular, los enlaces wireless tienen características tales como altos niveles de pérdidas, ráfagas de pérdidas de tramas, alta latencia y jitter.

Hay algunas formas de caracterizar la QoS con requerimientos estrictos expresados en términos de valores cuantitativos tales como velocidad de datos en Mbps, limites de máxima pérdida de rendimiento y/o de paquetes, o umbrales máximos de retardos y de jitter.

IV.2.1 Limitaciones de QoS de DCF y PCF

En DCF, solo se provee el servicio de mejor esfuerzo. Las aplicaciones multimedia limitadas en tiempo (por ejemplo, voz sobre IP, videoconferencias) requieren ciertas garantías de QoS. En DCF, todas las estaciones compiten por el canal con la misma prioridad. No hay mecanismo de diferenciación para proveer mejor servicio para el tráfico multimedia de tiempo real que para las aplicaciones de datos.

Mientras que PCF se diseñó para soportar aplicaciones multimedia limitadas en tiempo, este modo tiene problemas que conducen a una pobre prestación de QoS, discutidos en distintas publicaciones, entre ellas en [62,147,155]. PCF utiliza un algoritmo de planificación round robin de simple clase, que no puede manipular los requerimientos de QoS de tráfico múltiple. Por ejemplo, el AP debe planificar cada transmisión de tramas beacon, pero el AP tiene que competir por el acceso al medio. Dependiendo sobre si el medio wireless está libre u ocupado, la trama beacon podría retardarse.

Por otro lado, en PCF no se puede controlar el tiempo de transmisión de una STA. Una STA puede enviar una trama de cualquier longitud de 0 hasta 2304 bytes, e introducir tiempos de transmisión variable. Además, la velocidad de datos PHY de una STA puede cambiar

de acuerdo a las condiciones de canal variable. Así, el AP no es capaz de predecir el tiempo de transmisión de una manera precisa.

Esto impide que el AP pueda garantizar retardos a otras STAs presentes en la lista de polling.

Finalmente, un problema común de QoS, tanto en DCF como en PCF, es que la MAC 802.11 no especifica ningún mecanismo de control de admisión. Cuando la carga de tráfico es muy alta, la performance de ambas funciones puede degradarse.

IV.2.2 802.11e Soporte de QoS Realzada para WLANs

Las limitaciones de QoS de DCF y PCF, mencionadas previamente, han motivado numerosos esfuerzos de investigación como mencionados en el Capítulo 1. Algunos de los aportes fueron la fuente para la estandarización de EDCA 802.11e. Desde entonces, se ha constituido en uno de los protocolos ampliamente analizado en la bibliografía especializada, con el objeto de contribuir a su configuración óptima, al estudio de prestaciones, sus características de colisión y pérdida de paquetes, su aplicación en tiempo real, entre otros aspectos, introducidos en los Capítulos anteriores. El apartado 5.2 trata específicamente sobre los algoritmos de sintonización de los parámetros EDCA.

Con EDCA 802.11e, se propuso una nueva función de capa MAC llamada la función de coordinación hibrida (HCF) (Figura 4.1). HCF usa un método de acceso al canal basado en la contención, también llamado acceso al canal distribuido realzado (EDCA), que opera concurrentemente con un método de acceso al canal controlado HCF basado en polling (HCCA). El AP y aquellas STAs que implementan las facilidades de QoS son llamados APs con QoS realzadas (QAPs) y STAs con QoS realzadas (QSTAs), respectivamente.

EDCA se diseñó para proveer QoS priorizada mejorando la DCF basada en contención [82]. Antes de entrar en la capa MAC, cada paquete de datos recibido desde la capa superior tiene asignado un valor de prioridad de usuario específico. En la capa MAC, EDCA introduce cuatro diferentes colas first-in first-out (FIFO), llamadas categorías de acceso (ACs). Diferentes clases de aplicaciones (por ejemplo, tráfico background, tráfico de mejor esfuerzo, tráfico de video y tráfico de voz) deben estar dirigidos a diferentes ACs. Cada AC se comporta como una simple entidad DCF compitiendo con sus propios parámetros de contención (*CWmin*[*AC*], *CWmax*[*AC*], *AIFS*[*AC*] y *TXOPLimit*[*AC*]), los cuales son anunciados por el QAP periódicamente en tramas beacon.

Básicamente, a más pequeño los valores de *CWmin*[*AC*], *CWmax*[*AC*], y *AIFS*[*AC*], más cortos los retardos de acceso de canal para el correspondiente AC, y más alta la prioridad para acceder al medio (Figura 4.2).

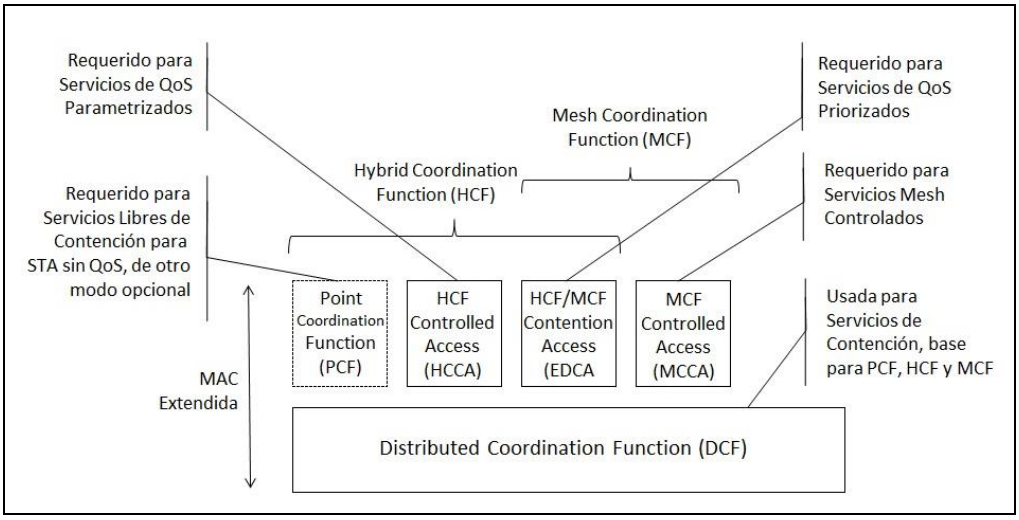


Figura 4.1 Arquitectura MAC 802.11

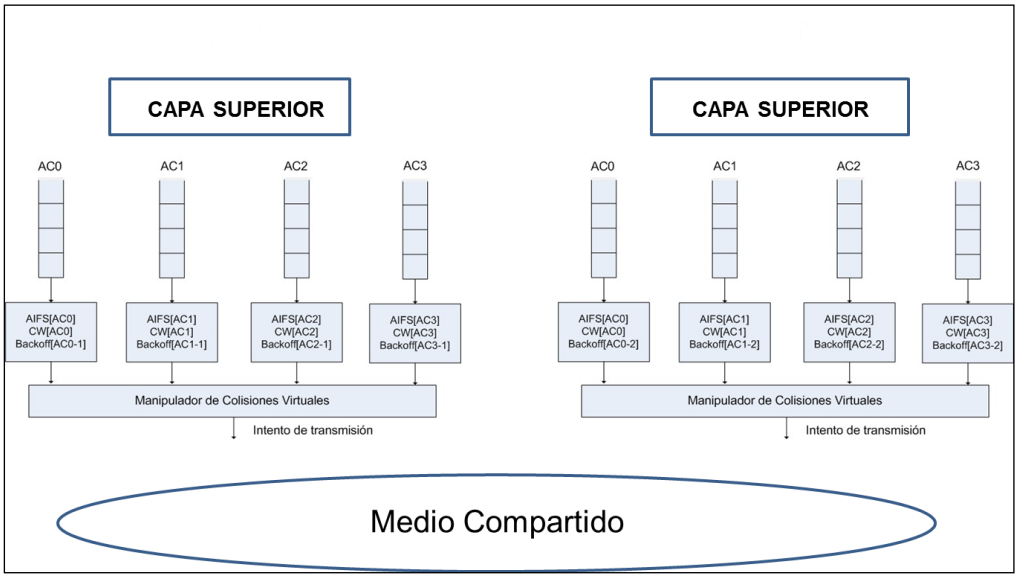


Figura 4.2 Esquema de funcionamiento de EDCA de 802.11e

En EDCA se introduce un nuevo tipo de IFS, el IFS de arbitrio (arbitrary IFS-AIFS), en lugar del DIFS en DCF (Figura 4.3). Cada AIFS tiene un intervalo IFS con longitudes de arbitrio definidas como:

$$AIFS[AC] = SIFS + AIFSN[AC] \times slot\ time,$$

dónde *AIFSN*[*AC*] es el número IFS de arbitrio.

Una nueva característica principal de HCF es el concepto de oportunidad de transmisión (TXOP), que se refiere a una duración de tiempo durante la cual una QSTA puede transmitir una ráfaga de tramas de datos. En orden para controlar el retardo, el valor máximo de una TXOP está limitado por un valor llamado TXOPLimit, que está determinado por el QAP.

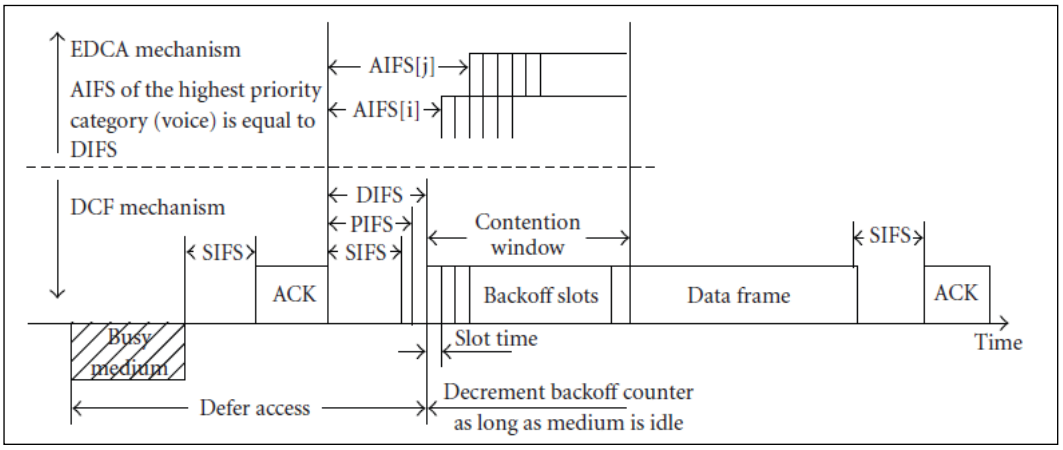


Figura 4.3. Relaciones IFS

El propósito de usar diferentes parámetros de contención para diferentes colas es dar a una clase de prioridad baja un tiempo de espera superior que a una clase de prioridad alta, de modo que la clase de prioridad alta probablemente pueda acceder el medio más rápidamente que la clase de prioridad baja. En esta situación, los tiempos de backoff de diferentes ACs en una QSTA son generados aleatoriamente y pueden alcanzar cero simultáneamente. Esto puede causar una colisión interna. En tal caso, un planificador virtual en cada QSTA le permite sólo transmitir tramas a la AC de más alta prioridad.

Además, en 802.11e se sugiere un mecanismo de control de admisión basado en contención que necesitan tanto el QAP y las QSTAs. Cada AC en una QSTA transmite una solicitud QoS al QAP conteniendo una especificación de tráfico (TSPEC) de su aplicación (por ejemplo, velocidad de datos medio/pico, tamaño de trama media/máxima, etc.). Los algoritmos usados por el QAP para tomar una decisión de admisión no están totalmente especificados.

IV.3) RENDIMIENTO VARIANDO LOS PARÁMETROS EDCA [81]

En este apartado se estudia el rendimiento relativo wireless 802.11 variando los parámetros EDCA, con el objeto de despejar las dudas sobre si los parámetros AIFSN, CWmin, CWmax y TXOP estáticos por defecto generan las prestaciones óptimas de la red.

En [156-157] se plantearon estudios del comportamiento de la red variando los parámetros EDCA. El trabajo [156] confirmó la capacidad de diferenciación de la norma EDCA IEEE 802.11e, cuando en el escenario de experimentación se encuentran estaciones EDCA conjuntamente con estaciones DCF. Lamentablemente, para el desarrollo se asumió que cada estación EDCA soportaba una simple AC, y por lo tanto, un solo tipo de tráfico lo que impidió analizar la interferencia entre distintos tipos de flujos, y como una consecuencia, no pudo tenerse en cuenta las colisiones virtuales en que puede incurrir una misma estación. Además, las mediciones de performance se realizaron en condiciones de saturación, es decir, en una determinada condición operativa, limitando la exactitud de los resultados y la calidad de las conclusiones. Mientras que en [157] se realizó un estudio del comportamiento de los parámetros en un escenario que utilizó una mezcla de tráfico de voz, de video, de mejor esfuerzo y de background. Para las simulaciones se utilizó el simulador Opnet Modeler. Este último trabajo ha sido tomado de referencia en cuanto a los aspectos metodológicos básicos, variando los parámetros EDCA sobre un subconjunto de valores, mientras se determinan los rendimientos obtenidos. Ambos trabajos no incluyeron en sus experimentos fuentes de interferencias y/o error.

Los ensayos experimentales se realizaron conservando las características del tráfico generado por las estaciones y la configuración 802.11a en 36 Mbps, sobre el escenario 1 con todos los tráficos presentes. Estos ensayos se realizaron considerando que el número de estaciones varía de a saltos en 4, iniciando con 4, y siguiendo con 8, 12, 16, y 20 estaciones. Esta simplificación en las simulaciones experimentales, en las que no se analizaron todos los casos comprendidos entre 1 y 20 estaciones, no alteró la calidad de las conclusiones. Por otro lado, para el análisis preliminar se utilizó un conjunto más amplio de combinaciones posibles de los diversos valores de los parámetros EDCA. A los fines de la exposición y representación en las Figuras, se han seleccionado las curvas más relevantes y concluyentes.

IV.3.1 Variando el parámetro AIFSN

Inicialmente, en los ensayos se usaron como configuraciones iniciales los parámetros por defecto de CWmin, CWmax y TXOP, pero variando AIFSN.

La Figura 4.4 nos muestra el rendimiento relativo del tráfico de voz en función de diferentes combinaciones de valores de AIFSN.

Los valores de AIFSN corresponden al tráfico de voz, video y mejor esfuerzo, en ese orden. Se observa que los valores 2-2-3, correspondientes a la configuración por defecto, producen el comportamiento más negativo, dejando una pérdida del rendimiento relativo de voz del orden del 28% para 20 estaciones. Además, se destaca que la prestación del tráfico de voz tiene menos pérdida cuando se asignan valores distintos para el tráfico de voz y video. Es de esperar este comportamiento cuando se usan AIFSN distintos, para priorizar el tráfico de voz sobre el de video. Para los valores 2-3-5 la pérdida se reduce al 15%, y con los valores 2-4-6 al 11%.

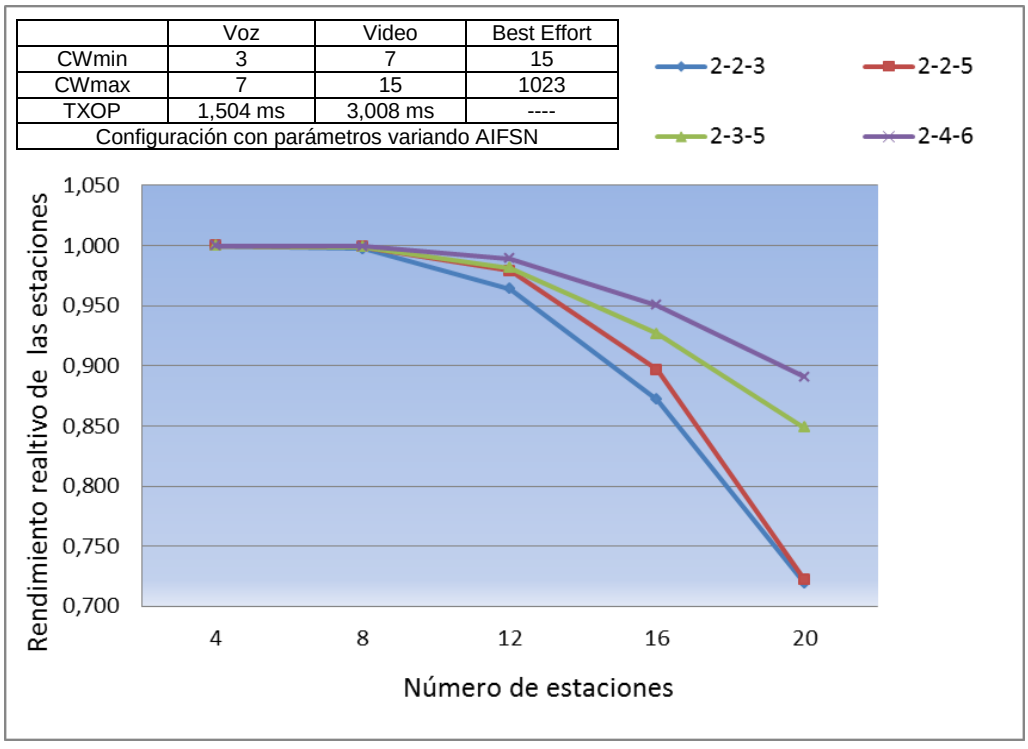


Figura 4.4 Rendimiento relativo del tráfico de voz en función de distintas configuraciones del parámetro AIFSN.

La Figura 4.5 nos muestra el rendimiento relativo del tráfico de video en función de las mismas combinaciones usadas para el tráfico de voz. El tráfico de video se ve menos influido que el tráfico de voz cuando se cambian los juegos de valores de AIFSN. Se observa nuevamente que los valores 2-2-3, correspondientes a la configuración por defecto, producen el comportamiento más negativo, con una pérdida del rendimiento de video del orden del 18%. Para los valores 2-3-5 la pérdida se reduce al 5%, y con los valores 2-4-6 al 2%. Podemos concluir que se produce un mejor comportamiento del tráfico de voz y de video, cuando el valor de AIFSN del tráfico de mejor esfuerzo se aleja del AIFSN de video, y este del AIFSN del tráfico de voz.

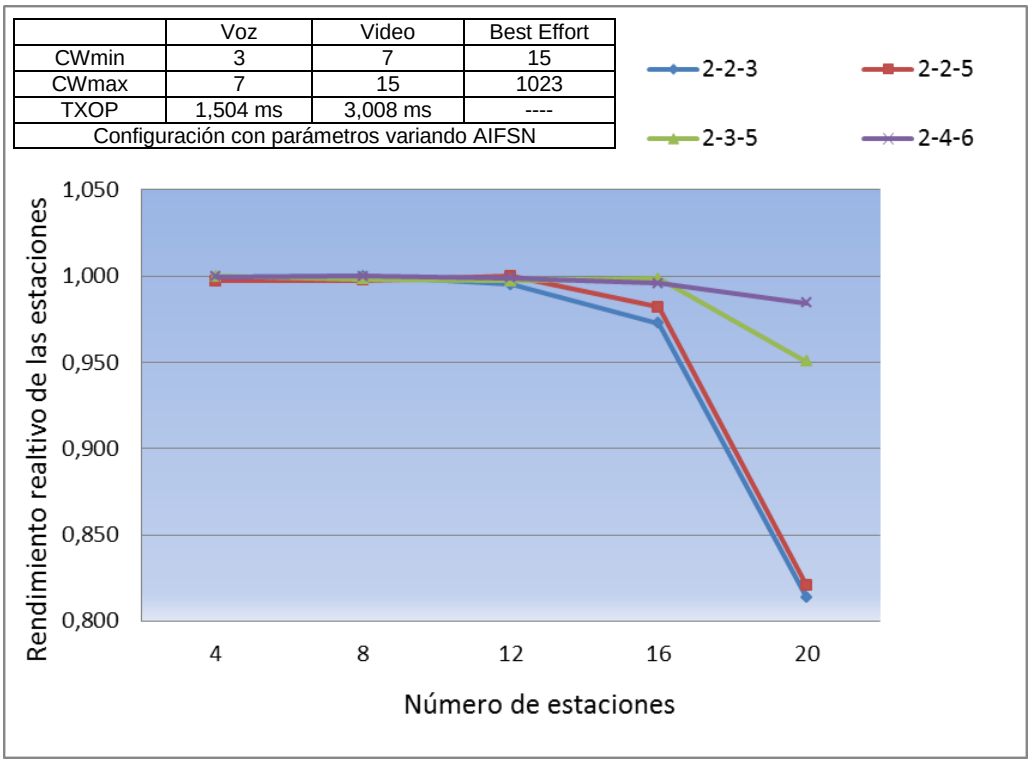


Figura 4.5 Rendimiento relativo del tráfico de video en función de distintas configuraciones del parámetro AIFSN

Finalmente, en la Figura 4.6 se presenta el rendimiento relativo del tráfico de mejor esfuerzo. Se observa que este tráfico no se ve prácticamente influido cuando se varían los valores de configuración de AIFSN. En cualquiera de los casos, el rendimiento relativo cae un 30% para la estación 12, 75% para la estación 16 y por arriba del 90% para la estación 20.

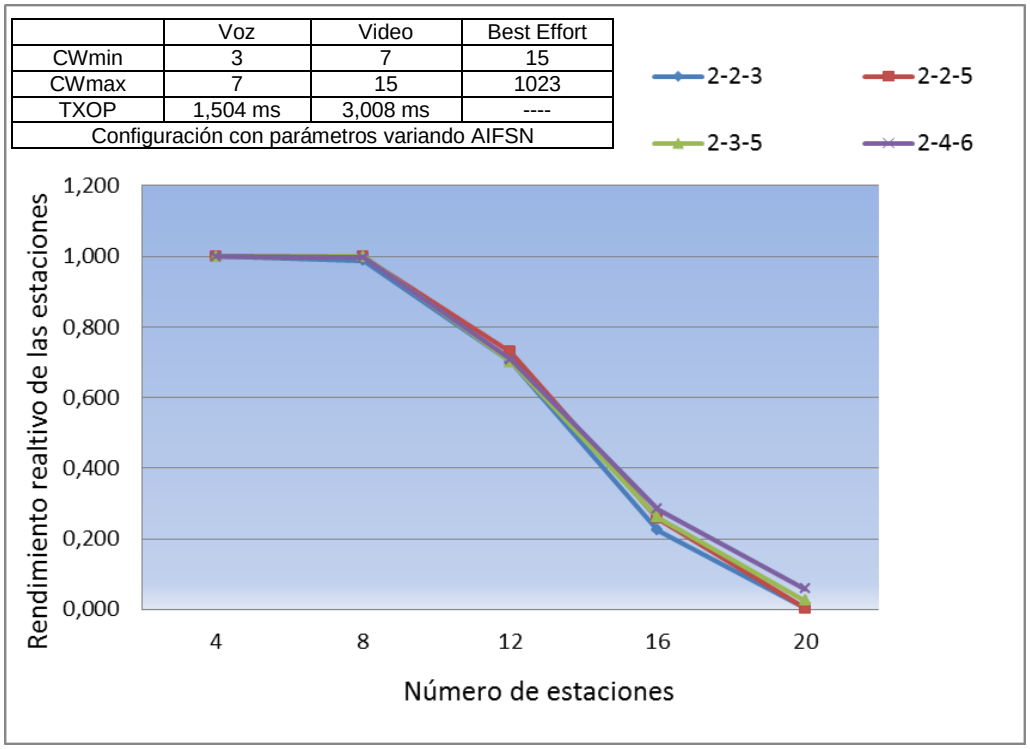


Figura 4.6 Rendimiento relativo del tráfico de mejor esfuerzo en función de distintas configuraciones del parámetro AIFSN

IV.3.2 Variando el parámetro CWmin

Pasando a los ensayos experimentales de CWmin, se usaron los parámetros por defecto de CWmax y TXOP, variando CWmin y adoptando los valores 2-3-5 de AIFSN. Se observó que los tráficos de voz y de mejor esfuerzo tuvieron similar comportamiento, independientemente de los valores de CWmin.

La Figura 4.7 nos muestra el rendimiento relativo del tráfico de video. Este tráfico se ve menos influido por CWmin que por AIFSN. Se observa nuevamente que los valores 3-7-15, correspondientes a la configuración por defecto, producen el comportamiento más negativo, con una pérdida del rendimiento de video del orden del 5%. Para los valores 7-31-63 la pérdida se reduce a un poco más del 3%.

Podemos concluir que se produce un mejor comportamiento del tráfico de video, cuando el valor de CWmin del tráfico de mejor esfuerzo se aleja del CWmin de video, y este del CWmin del tráfico de voz. Entonces, se puede favorecer al tráfico de voz al aumentar el CWmin del resto de los tráficos.

	Voz	Video	Best Effort
AIFSN	2	3	5
CWmax	7	15	1023
TXOP	1,504 ms	3,008 ms	----
Configuración con parámetros variando CWmin			

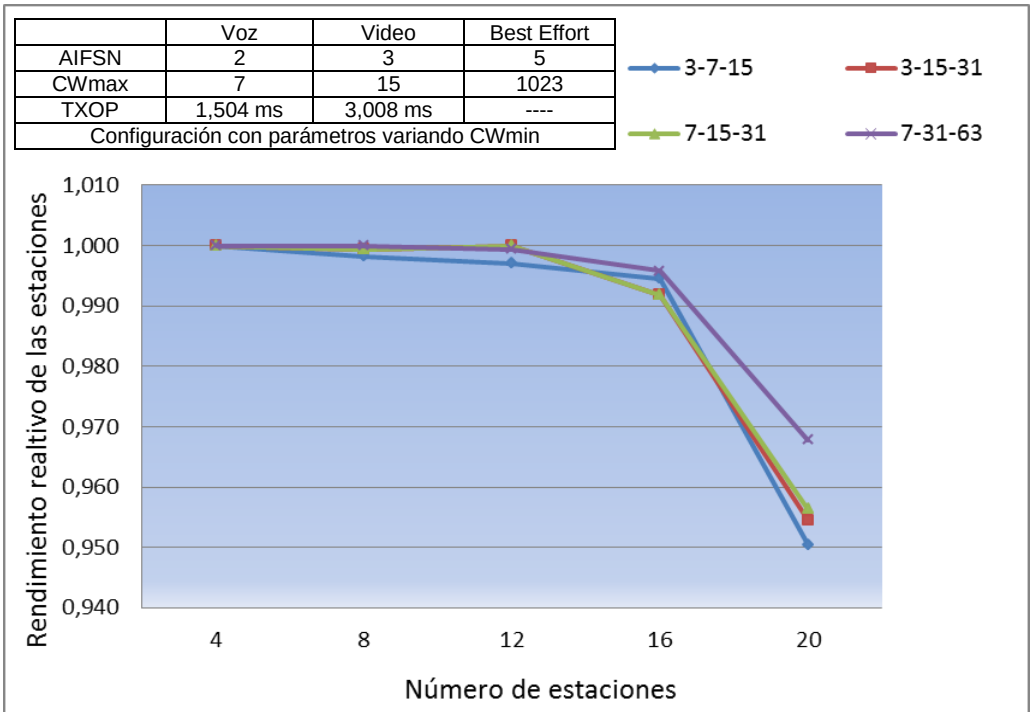


Figura 4.7 Rendimiento relativo del tráfico de video en función de distintas configuraciones del parámetro CWmin.

IV.3.3 Variando el parámetro CWmax

Para el caso de los ensayos experimentales de CWmax, se conservaron las configuraciones iniciales, con los parámetros por defecto de TXOP, pero variando CWmax y adoptando los valores 2-3-5 para AIFSN, y 7-31-63 para CWmin. Se observó que los tráficos de video y de mejor esfuerzo tuvieron similar comportamiento, independientemente de los valores de CWmax.

En la Figura 4.8 se presenta el rendimiento relativo del tráfico de voz. Este tráfico se ve menos influido por CWmax que por AIFSN. Se observa que los valores 15-63-1023, producen el comportamiento más negativo, con una pérdida del rendimiento de voz del orden del 2,5%. Para los valores 31-63-1023 la pérdida se reduce a un poco más del 1%. Y para 31-127-1023 a un poco más de 0,8%. Podemos concluir que se produce un mejor comportamiento del tráfico de voz, cuando el valor de CWmax del tráfico de mejor esfuerzo se aleja del CWmax de video, y este del CWmax del tráfico de voz. Es decir, al aumentar el CWmax del resto de los tráficos se puede favorecer ligeramente el tráfico de voz.

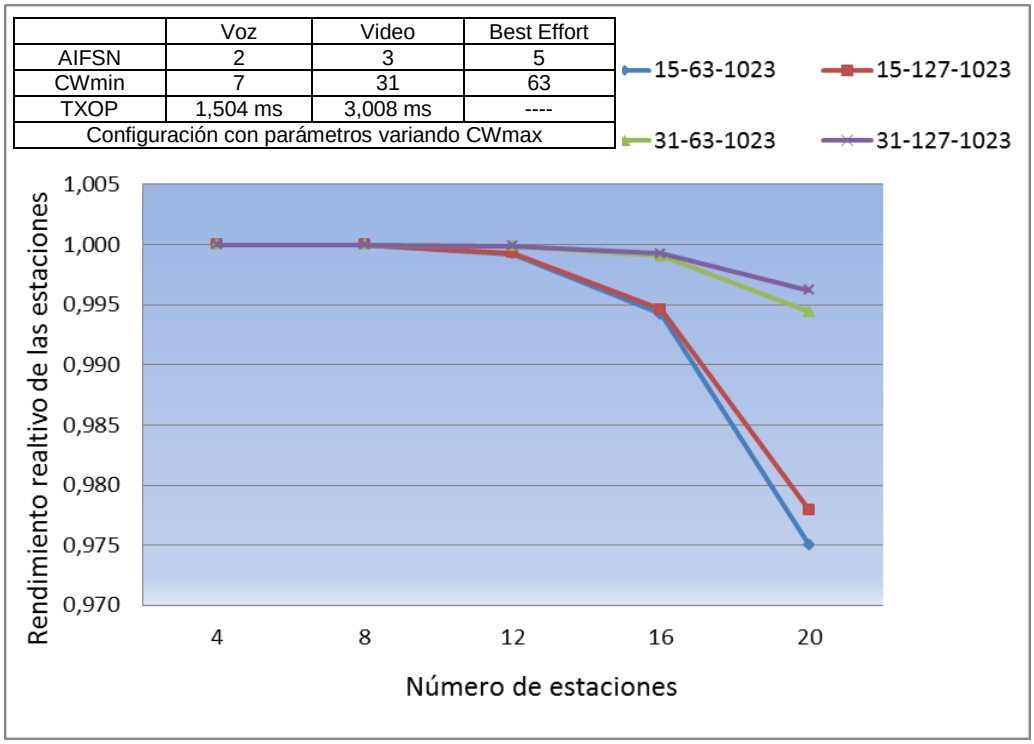


Figura 4.8. Rendimiento relativo del tráfico de voz en función de distintas configuraciones del parámetro CWmax

IV.3.4 Variando el parámetro TXOP

Finalmente, se analizó en los ensayos experimentales el caso de TXOP. Para este parámetro se utilizó la siguiente codificación: el valor TXOP=1 debe considerarse igual a TXOP=1.504 ms, y proporcionalmente para los otros valores. Se varió TXOP, pero adoptando los valores 2-3-5 de AIFSN, 7-31-63 para CWmin y 31-63-1023 para CWmax.

Se observó que el rendimiento relativo de tráfico de video tuvo similar comportamiento, independientemente de los valores de TXOP. Cuando se evalúa el comportamiento del tráfico de voz y mejor esfuerzo, se nota que TXOP los afecta menos que AIFSN.

La Figura 4.9 nos muestra el rendimiento relativo del tráfico de voz. Se observa que los valores 1-2-0, correspondientes a la configuración por defecto, producen el mejor comportamiento, dejando una pérdida del rendimiento de voz del orden del 0,5% para 20 estaciones. Para los valores 1-4-6 la pérdida se amplía al 1,3%, y con los valores 1-10-10 al 1,4%.

Mientras que la Figura 4.10 nos muestra el rendimiento relativo del tráfico de mejor esfuerzo. En este caso los valores de la configuración por defecto 1-2-0, producen el peor comportamiento, dejando una pérdida del

rendimiento de mejor esfuerzo del orden del 90 % para 20 estaciones, y siempre por debajo, desde la estación 8, del rendimiento para las otras configuraciones de TXOP. Estas configuraciones tienen un comportamiento similar con una pérdida del 80% para 20 estaciones.

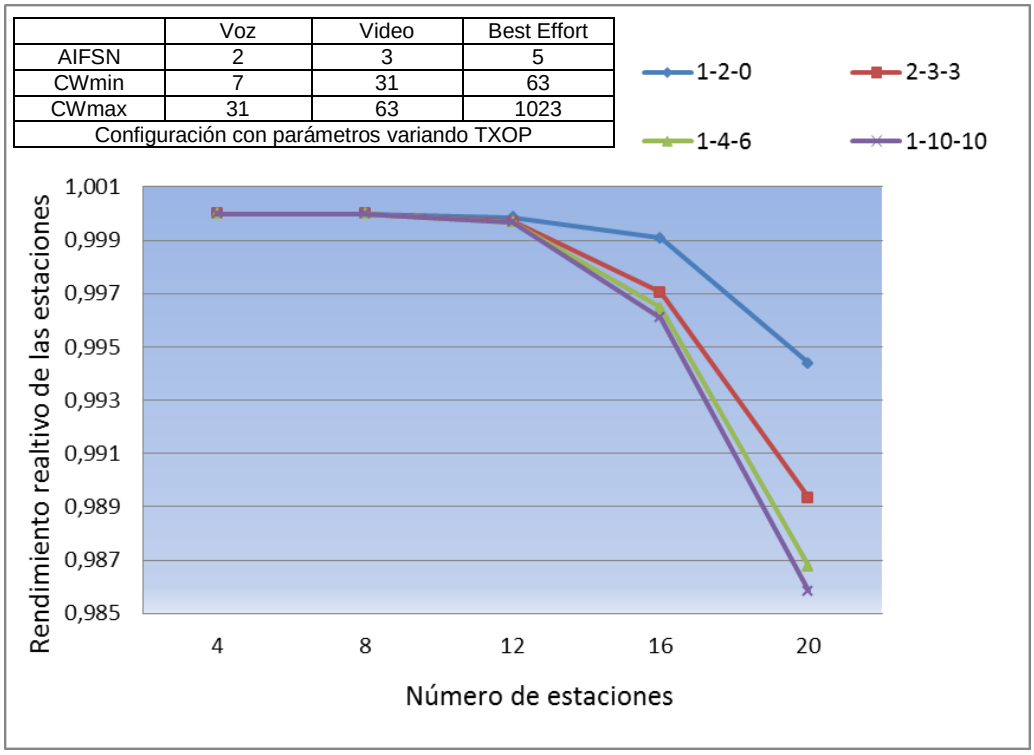


Figura 4.9 Rendimiento relativo del tráfico de voz en función de distintas configuraciones del parámetro TXOP

IV.3.5 Conclusiones

Aunque en este estudio experimental se ha discretizado el análisis, observando los efectos de los parámetros, de a uno por vez, se puede establecer conclusiones determinantes sobre el comportamiento de los parámetros por defecto.

Los resultados obtenidos muestran que los valores por defecto no son los que brindan el rendimiento óptimo. Y que el parámetro AIFSN influye más significativamente que los otros parámetros, al efecto de asegurar QoS.

Con el objeto de mejorar las prestaciones, los resultados sugieren asignar un valor distinto de AIFSN para los flujos de voz, de video y de mejor esfuerzo, especialmente cuando el valor de AIFSN del tráfico de mejor esfuerzo se aleja del valor de AIFSN de video, y este del AIFSN del tráfico de voz. Este último criterio puede aplicarse también a los

parámetros CWmin y CWmax, dado que al aumentar estos valores en el tráfico de video y de mejor esfuerzo se favorece al tráfico de voz.

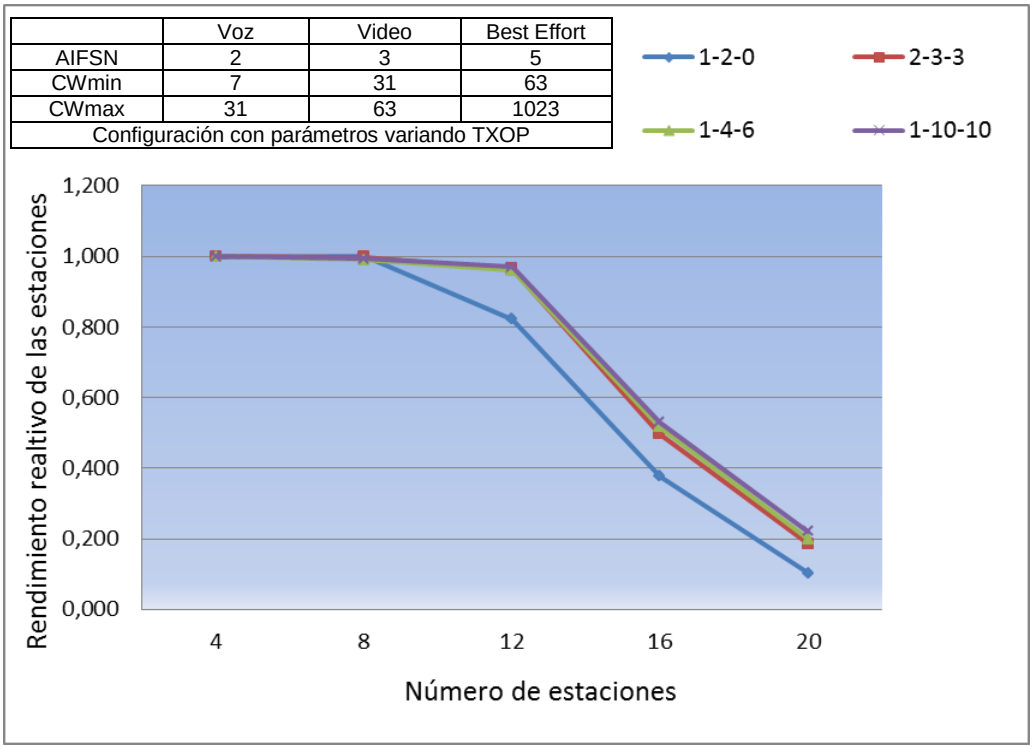


Figura 4.10 Rendimiento relativo del tráfico de mejor esfuerzo en función de distintas configuraciones del parámetro TXOP

Y por último, se observó el efecto contrario que tiene el valor de los TXOPs. A valores más grandes, especialmente en el tráfico de video y mejor esfuerzo, se producen mejoras en sus prestaciones. Por el contrario, en el tráfico de voz se produce una desmejora cuando se usan valores mayores de TXOP en el resto del tráfico

IV.4) ENSAYO EXPERIMENTAL CON PARÁMETROS EDCA DE MEJORA [81]

Atento a las conclusiones dadas en el apartado anterior, es posible seleccionar otros valores de parámetros a los por defecto, que a los fines del resto de la tesis llamaremos valores de mejora.

Estos valores de mejora pueden ser aquellos que satisfagan ciertas premisas y objetivos, por ejemplo, buscando obtener mejores resultados en el rendimiento de voz y video, y a su vez el rendimiento de mejor esfuerzo máximo posible, mientras lo permitan los primeros. Por ello, esos valores se seleccionaron de acuerdo a los tipos de tráficos presentes en cada uno de los escenarios 1 y 2 descritos en el Capítulo III.

Con el objeto de comparar los comportamientos de la red usando los parámetros por defecto y los parámetros de mejora, se conservaron las configuraciones generales de 802.11a en 36 Mbps.

IV.4.1 Escenario 1

IV.4.1.1 Estaciones con todos los tráficos

Por lo expuesto, e ilustrar el comportamiento EDCA sobre este escenario con todos los tráficos presentes, se realizaron simulaciones usando el modelo de estación EDCA HSAN sobre el simulador Möbius, configurado de acuerdo a nuevos valores de los parámetros resumidos en la Tabla 4.1.

Los valores promedios obtenidos para el rendimiento directo y el rendimiento relativo, variando la carga de 1 a 20 estaciones, se muestran en las Figuras 4.11 y 4.12

	Voz	Video	Best Effort
AIFSN	2	3	5
CWmin	7	31	63
CWmax	31	63	1023
TXOP	1,504 ms	15,040 ms	15,040 ms
Paquete	160 bytes	1280 bytes	1500 bytes
Rate	64 Kbps	640 Kbps	1024 Kbps

Tabla 4.1 Parámetros EDCA de mejora utilizados Escenario 1.1

Se observa en la Figura 4.11 que el flujo de voz alcanza un pico de 1,261 Mbps en la estación 20. Mientras que en la estación 12, el tráfico mejor esfuerzo alcanza un pico de 12,226 Mpbs, y luego decae rápidamente. El tráfico de video alcanza en la estación 20 un rendimiento máximo de 13,030 Mbps.

La Figura 4.12 presenta el rendimiento relativo de los tres tráficos configurados con los parámetros de mejora. El mismo aparece prácticamente sin pérdidas significativas hasta la estación 10, independientemente del flujo que se trate. Los flujos de voz y de video alcanzan en la estación 20 una pérdida de 1,42% y 0,64%, respectivamente; mientras que el de mejor esfuerzo ya pierde un 25 % de rendimiento en la estación 14. Además, ahora el tráfico de voz cruza el umbral del 1 % de caída del rendimiento recién en la estación 19. Esto implica una importante mejora para algunas aplicaciones muy estrictas en velocidad. También el tráfico de video ha mejorado sustancialmente, no superando el umbral del 1% para las 20 estaciones.

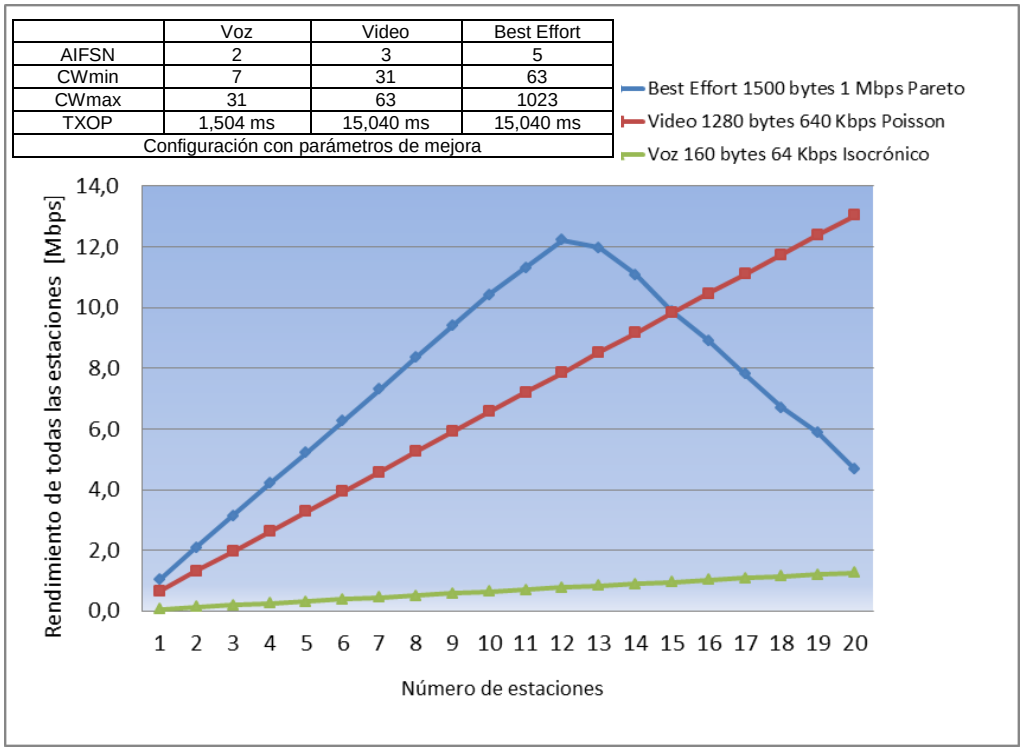


Figura 4.11 Rendimiento de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 1.1

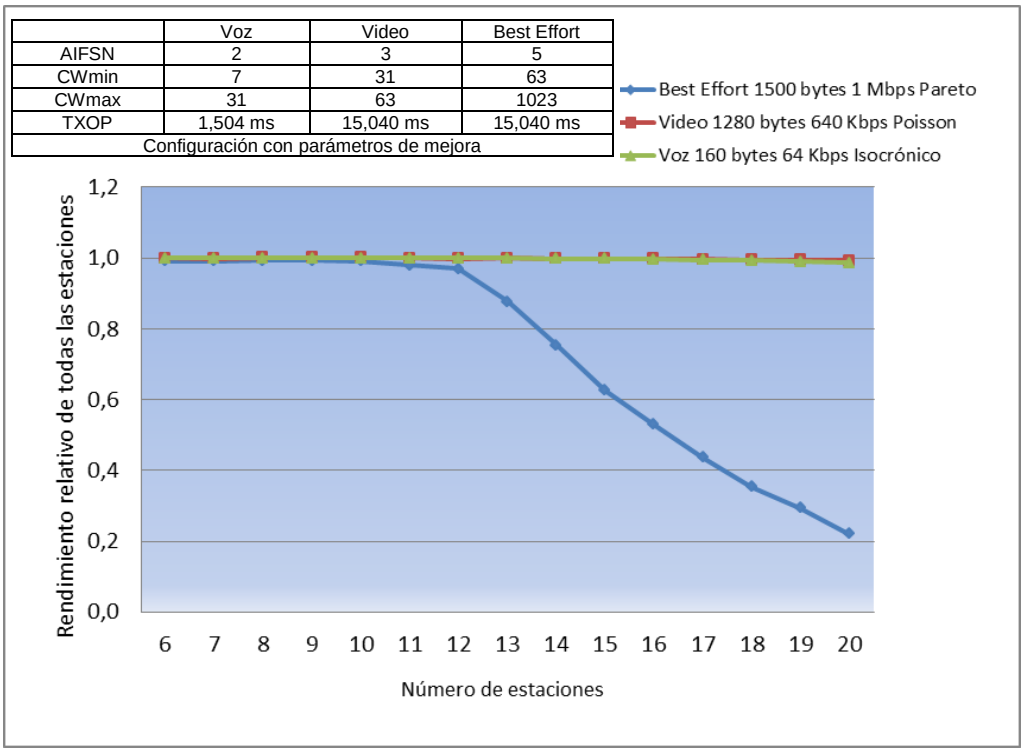


Figura 4.12 Rendimiento relativo de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 1.1

La Tabla 4.2 resume las características más importantes en los puntos críticos cuando todos los tráficos están presentes.

	Voz	Video	Best Effort
Rendimiento Máximo [Mbps]	1,261	13,030	12,226
Pérdida 1% Rendimiento	19° estación	-	11° estación
Pérdida 5 % Rendimiento	-	-	13° estación
Pérdida 10 % Rendimiento	-	-	13° estación
Retardo de Cola en Rendimiento Máximo [ms]	10,442	48,184	704,626
Retardo de Cola para 10 estaciones [ms]	2,377	2,044	19,157
Retardo Máximo de Cola 20 estaciones [ms]	10,442	48,184	2233,011
Tamaño de Cola para 10 estaciones [paquetes]	0,118	0,130	1,666
Tamaño de Cola Máximo 20 estaciones [paquetes]	0,514	3,063	44,027

Tabla 4.2 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 1.1

En las Figuras 4.13, 4.14 y 4.15 se observan las comparaciones del rendimiento directo de los flujos de voz, video y de mejor esfuerzo, y en las Figuras 4.16, 4.17 y 4.18 las comparaciones del rendimiento relativo, configurados con los parámetros de mejora y con los parámetros por defecto.

En la Figura 4.13 se destaca que el tráfico de voz con los parámetros de mejora alcanza un máximo de 1,261 Mbps para 20 estaciones, con una mejora del 36,62% respecto a los 0,924 Mpbs en la estación 19 usando los parámetros por defecto.

Mientras que en la Figura 4.14 el tráfico de video alcanza un máximo de 13,030 Mbps para 20 estaciones, mejorando en 20,03% respecto a si se usa la configuración por defecto; en este último caso el rendimiento máximo es de 10,855 Mbps en la estación 18.

Por último, en la Figura 4.15, el tráfico de mejor esfuerzo alcanza un pico de 12,226 Mbps en la estación 12, desde donde el rendimiento decae. Se alcanza una mejora del 18,87% en el rendimiento máximo respecto a los 10,285 Mpbs de la configuración por defecto, obtenido en la estación 10.

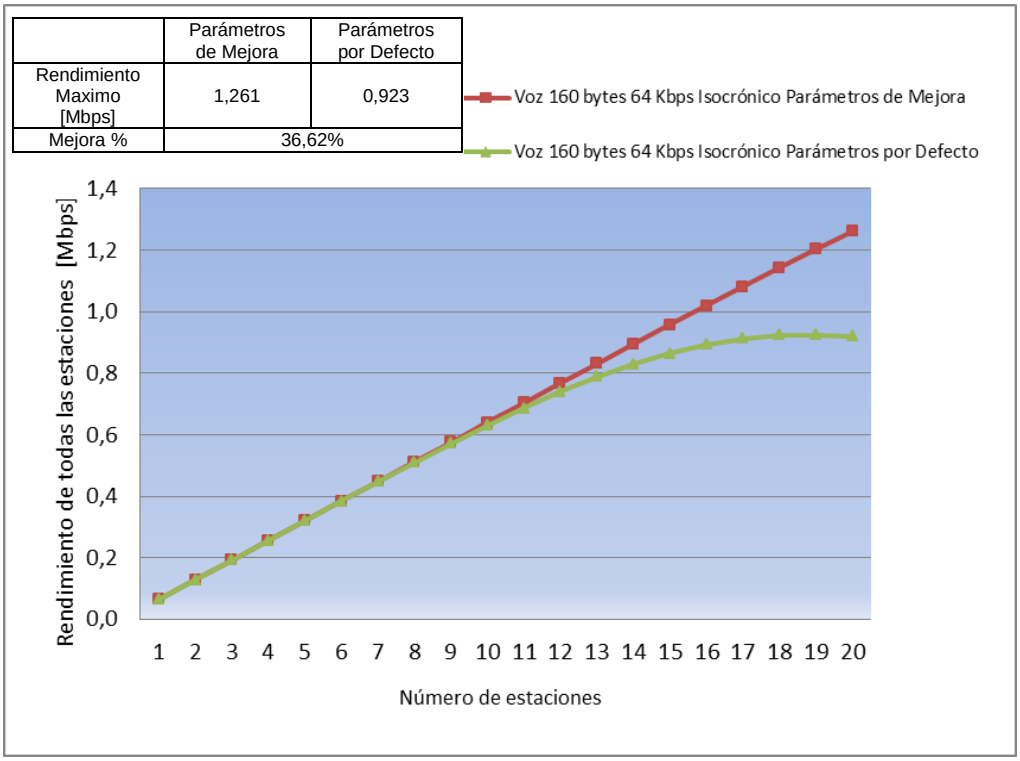


Figura 4.13 Comparación del rendimiento del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.1

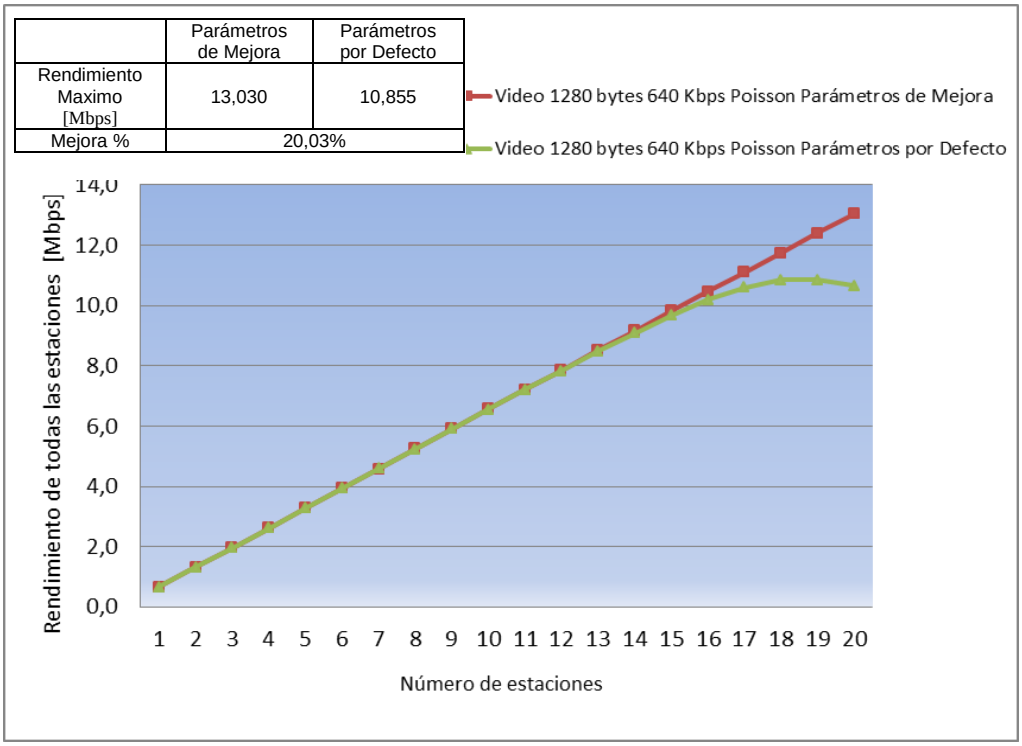


Figura 4.14 Comparación del rendimiento del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.1

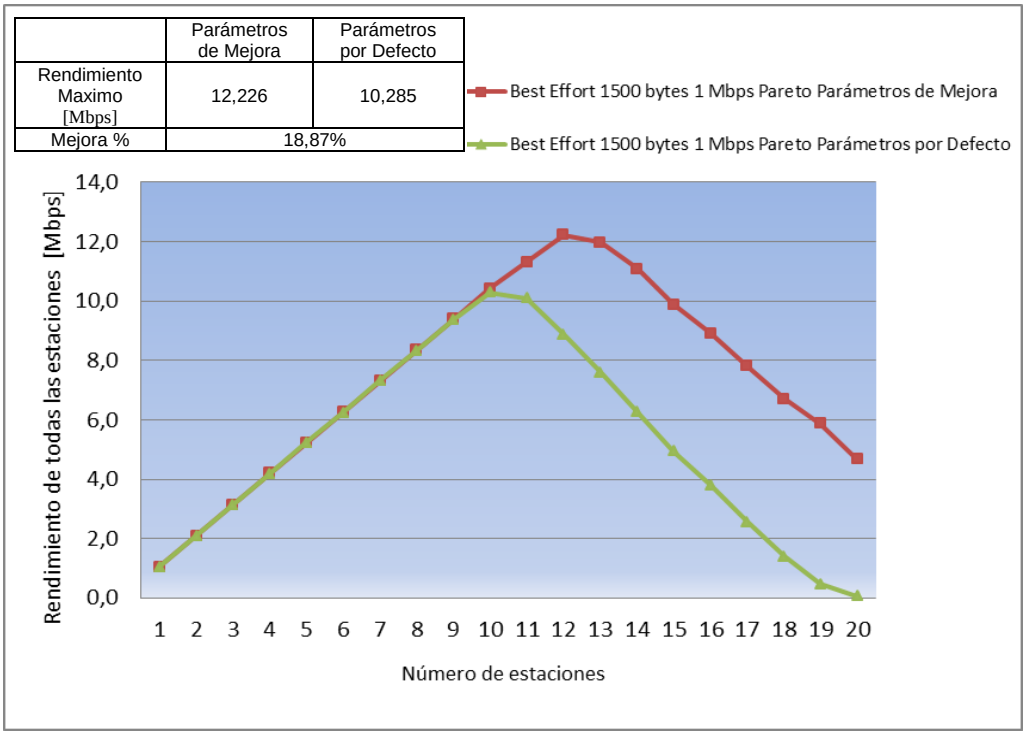


Figura 4.15 Comparación del rendimiento del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.1

Los resultados obtenidos muestran que los parámetros por defecto no son óptimos, y que con una selección apropiada, pueden alcanzarse mejoras individuales para cada tráfico con un máximo del 36% para voz, y un mínimo del 19% para el tráfico de mejor esfuerzo. Además, el rendimiento global de la red mejora en este caso un 25% promedio.

En la Figura 4.16 se observa que el flujo de voz permanece casi sin pérdidas para 20 estaciones. La pérdida es recién del 1,42% para la estación 20, lo que es una mejora del 37,03% respecto de la pérdida de 28,06% con los parámetros por defecto, para el mismo número de estación.

La comparación para el tráfico de video se muestra en la Figura 4.17. Aquí también el tráfico de video, como el de voz, configurado con los parámetros de mejora, presenta una respuesta con una pérdida menor al 1% dentro de las 20 estaciones. Esto significa una mejora del 22,21% respecto a la pérdida de 18,70% en las 20 estaciones cuando la configuración es por defecto.

Finalmente, en la Figura 5.18 se presenta la comparación del tráfico de mejor esfuerzo. Se observa que hay un desplazamiento importante hacia la derecha, retrasando los umbrales de pérdida de

rendimiento. El umbral del 10% de pérdida se produce en la estación 13 para los parámetros de mejora, y en la estación 11 para los parámetros por defecto; el umbral del 45% se produce ahora en la estación 16, cuando antes era en la 13. Para la estación 16 la mejora en la pérdida es del 135%.

Los resultados obtenidos muestran que los parámetros por defecto superan los umbrales de pérdida para una menor cantidad de estaciones que si se usan los parámetros de mejora, para todos los tráficos presentes. Esta mejora sustantiva con los parámetros de mejora difiere en más de dos estaciones la zona de saturación, cuando se aumenta la cantidad de las mismas, y asegura mejores prestaciones para los tráficos más exigentes en cuanto a las pérdidas.

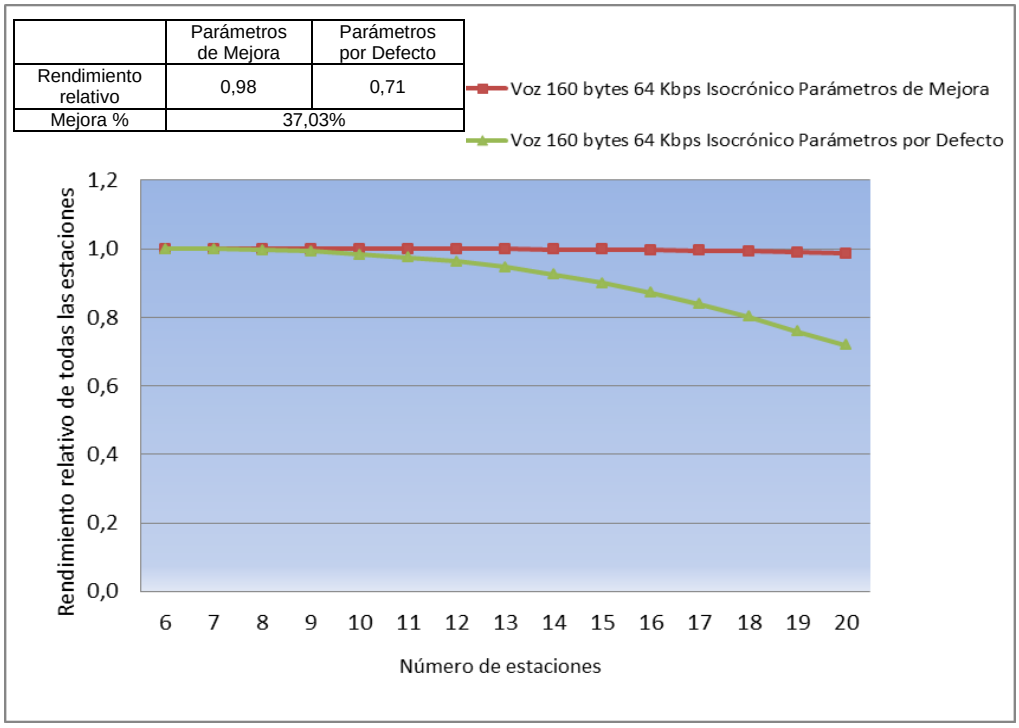


Figura 4.16 Comparación del rendimiento relativo del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.1

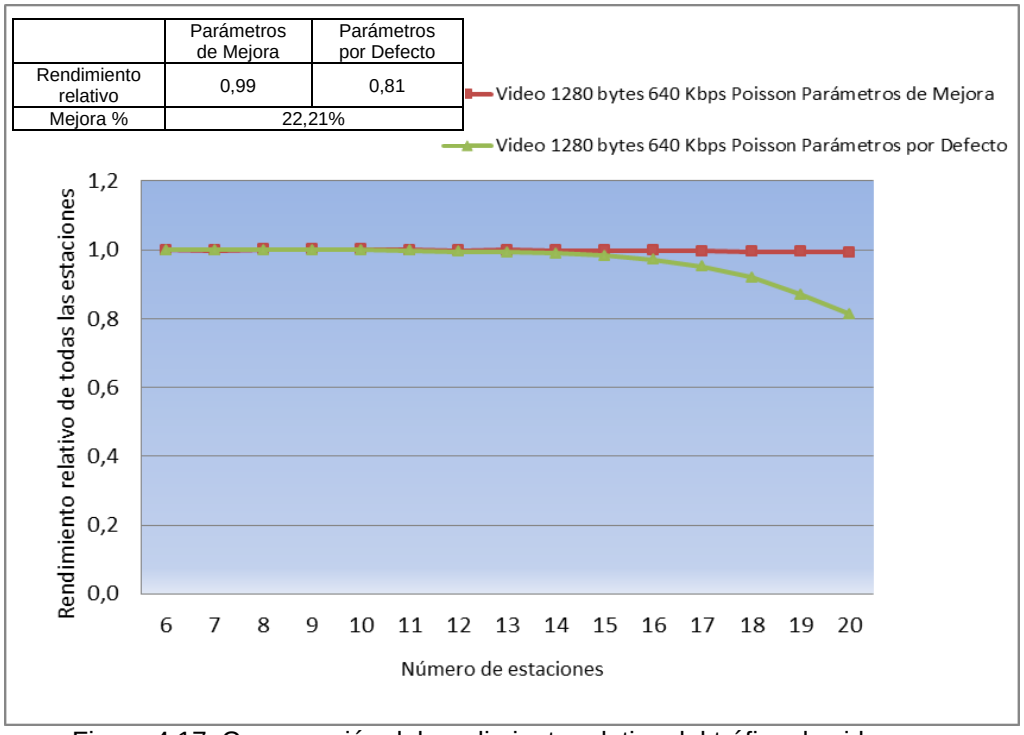


Figura 4.17 Comparación del rendimiento relativo del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.1

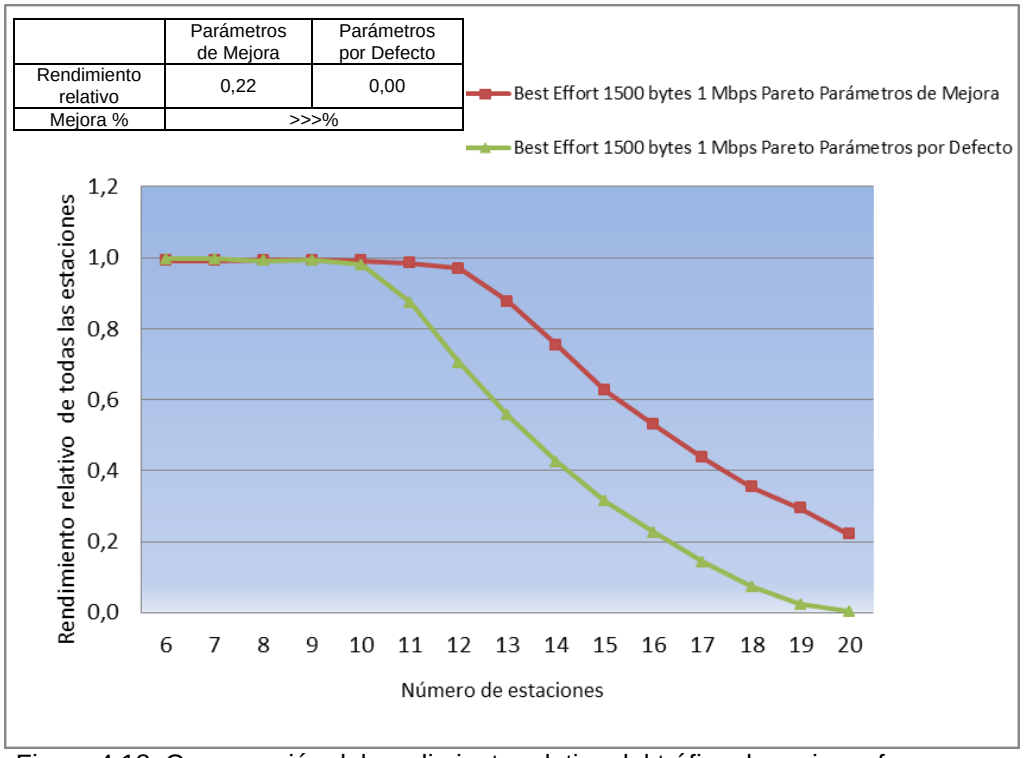


Figura 4.18 Comparación del rendimiento relativo del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.1

IV.4.1.2 Estaciones sin tráfico de voz

En este caso, sin la presencia del tráfico de voz, se realizaron simulaciones configurando el modelo de estación EDCA HSAN de acuerdo a nuevos valores de los parámetros resumidos en la Tabla 4.3.

	Video	Best Effort
AIFSN	2	3
CWmin	7	31
CWmax	31	1023
TXOP	1,504 ms	15,040 ms
Paquete	1280 bytes	1500 bytes
Rate	640 Kbps	1024 Kbps

Tabla 4.3 Parámetros EDCA de mejora utilizados Escenario 1.2

Los valores promedios obtenidos para el rendimiento directo y el rendimiento relativo, variando la carga de 1 a 20 estaciones, se muestra en las Figuras 4.19 y 4.20, respectivamente.

En la Figura 4.19 se destaca que el flujo de video alcanza un pico de 13,098 Mbps en la estación 20. Mientras que en la estación 15, el tráfico mejor esfuerzo alcanza un pico de 14,594 Mpbs, y luego decae lentamente.

La Figura 4.20 presenta el rendimiento relativo de los tráficos de video y mejor esfuerzo usando los parámetros de mejora. Al no haber tráfico de voz, los tráficos aparecen prácticamente sin pérdidas significativas hasta la estación 13. El flujo de video tiene en la estación 20 una pérdida menor al 0,50%. El de mejor esfuerzo pierde un 23% de rendimiento en la estación 17. Ahora, como es de esperar con un tráfico menos, se ha mejorado el comportamiento del tráfico de video y de mejor esfuerzo, y de la red como un todo.

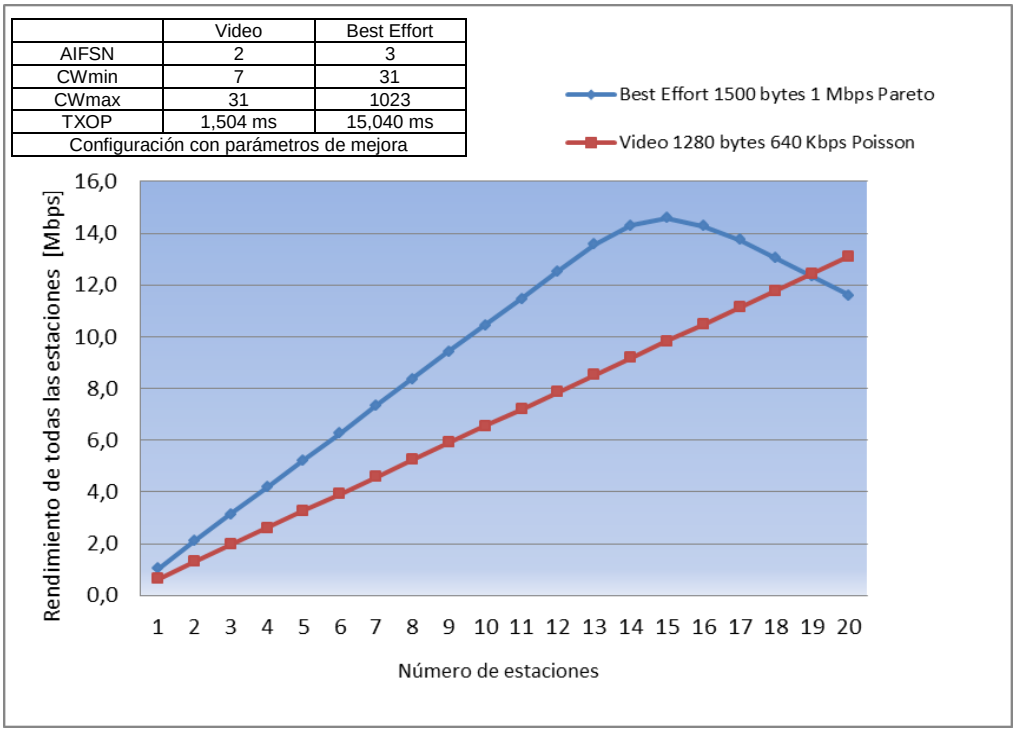


Figura 4.19 Rendimiento de los tráficos de video y mejor esfuerzo Escenario 1.2

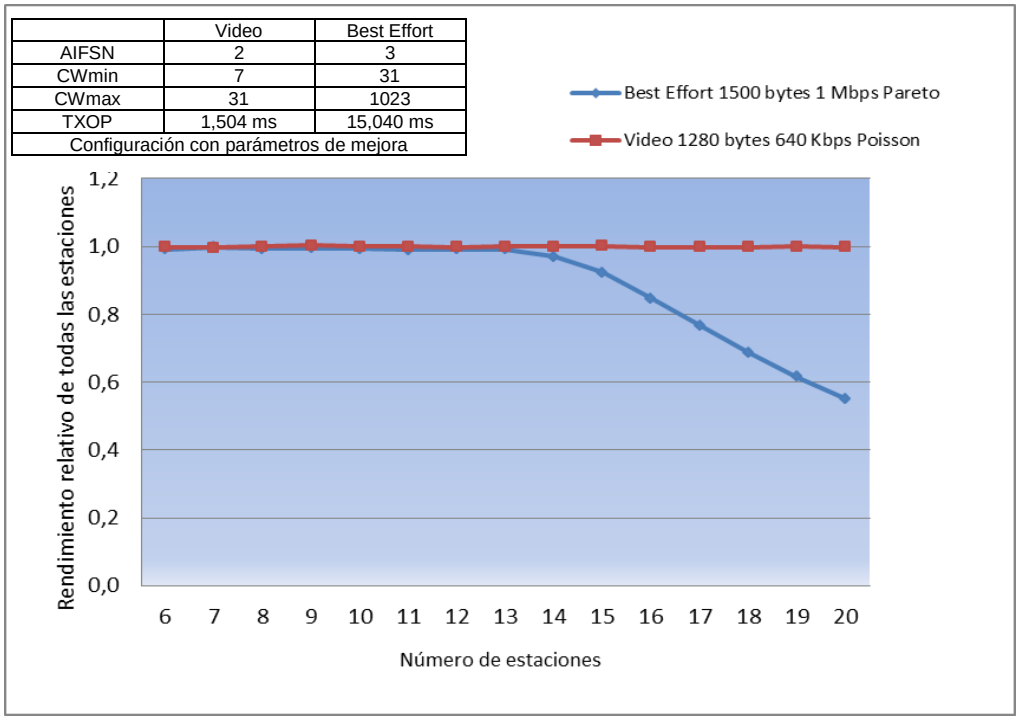


Figura 4.20 Rendimiento relativo de los tráficos de video y mejor esfuerzo Escenario 1.2

La Tabla 4.4 resume las características más importantes en los puntos críticos cuando no está presente el tráfico de voz.

	Video	Best Effort
Rendimiento Máximo [Mbps]	13,098	14,594
Pérdida 1% Rendimiento	-	14° estación
Pérdida 5 % Rendimiento	-	15° estación
Pérdida 10 % Rendimiento	-	16° estación
Retardo de Cola en Rendimiento Máximo [ms]	51,459	144,889
Retardo de Cola para 10 estaciones [ms]	1,199	6,459
Retardo de Cola Máximo 20 estaciones [ms]	51,459	670,957
Tamaño de Cola para 10 estaciones [paquetes]	0,076	0,563
Tamaño de Cola para 20 estaciones [paquetes]	3,290	32,394

Tabla 4.4 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 1.2

En las Figuras 4.21 y 4.22 se observan las comparaciones del rendimiento directo de los flujos de video y de mejor esfuerzo, y en las Figuras 4.23 y 4.24 las comparaciones del rendimiento relativo, configurados con los parámetros de mejora y con los parámetros por defecto.

En la Figura 4.21 se observa que el tráfico de video con los parámetros de mejora alcanza un máximo de 13,098 Mbps para 20 estaciones, con una mejora del 0,21% respecto a los 13,071 Mpbs usando los parámetros por defecto.

Y en la Figura 4.22, el tráfico de mejor esfuerzo alcanza un pico 14,594 Mbps en la estación 15, desde donde el rendimiento decae. Se alcanza una mejora del 17,77% en el rendimiento máximo respecto a los 12,391 Mpbs en la estación 13 de la configuración por defecto.

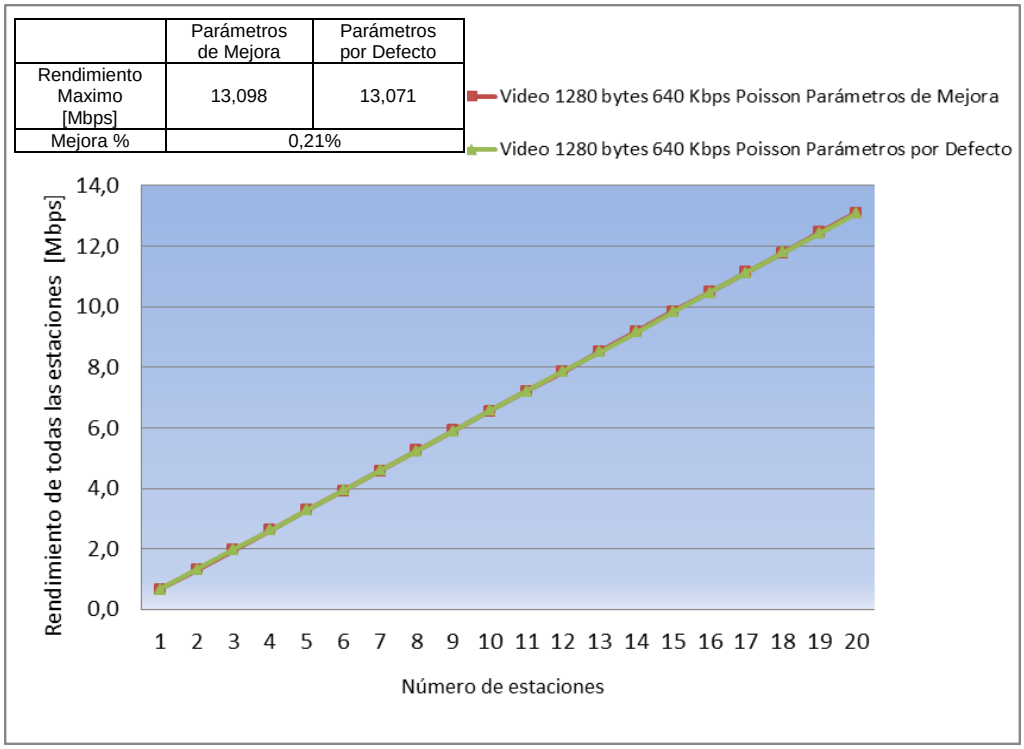


Figura 4.21 Comparación del rendimiento relativo del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.2

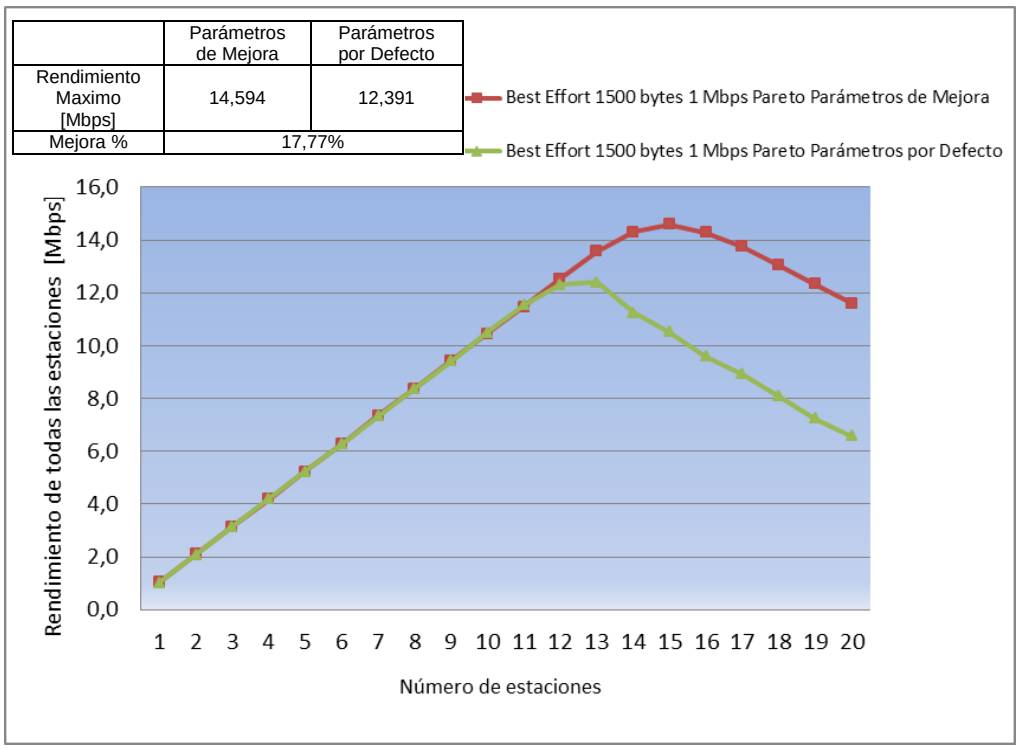


Figura 4.22 Comparación del rendimiento relativo del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.2

Nuevamente se observan las mejoras individuales para cada tráfico con un máximo del 0,21% para video, y de 17,77% para el tráfico de mejor esfuerzo. Y una mejora de rendimiento global de la red de 9% promedio.

En la Figura 4.23 se destaca que el flujo de video permanece sin pérdidas para 20 estaciones. Aunque la pérdida mínima del 1% está dentro del valor de error utilizado para la simulación, se mantuvo la tendencia general de un mejor comportamiento para el tráfico con parámetros de mejora.

Y en la Figura 4.24 se presenta la comparación del tráfico de mejor esfuerzo. Se observa nuevamente aquí que hay un desplazamiento importante hacia la derecha, retrasando los umbrales de pérdida de rendimiento. El umbral del 20% de pérdida se supera en la estación 17 para los parámetros de mejora, y en la estación 14 para los parámetros por defecto. Para la estación 20 la mejora en la pérdida es del 76%.

En este escenario, para los parámetros de mejora y por defecto utilizados, se produce un comportamiento similar en el tráfico de video, pero una mejora significativa de tres estaciones en la zona de saturación para el tráfico de mejor esfuerzo.

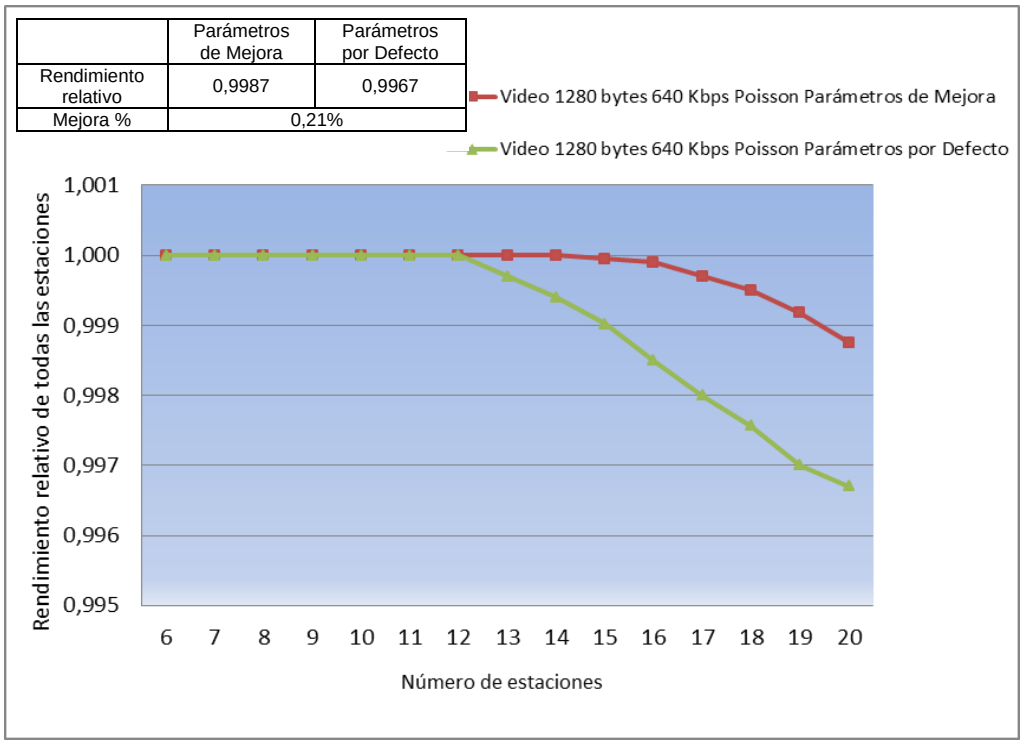


Figura 4.23 Comparación del rendimiento relativo del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.2

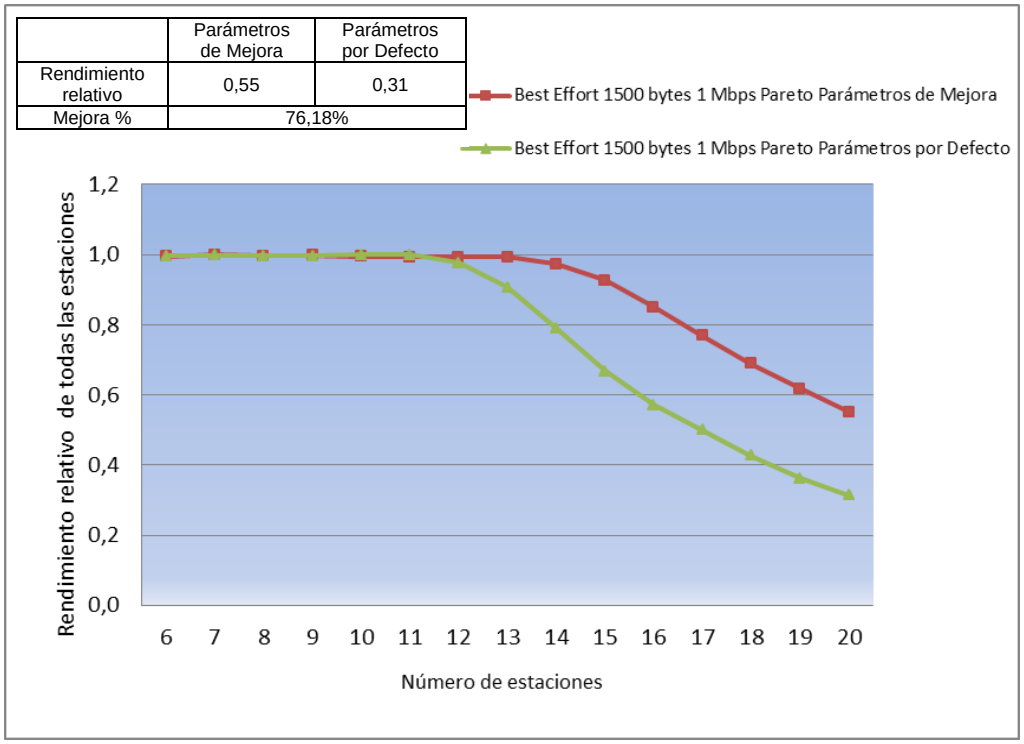


Figura 4.24 Comparación del rendimiento relativo del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.2

IV.4.1.3 Estaciones sin tráfico de video

Sin la presencia del tráfico de video, se realizaron simulaciones configurando el modelo de estación EDCA HSAN de acuerdo a nuevos valores de los parámetros resumidos en la Tabla 4.5.

	Voz	Best Effort
AIFSN	2	3
CWmin	7	63
CWmax	31	1023
TXOP	1,504 ms	15,040 ms
Paquete	160 bytes	1500 bytes
Rate	64 Kbps	1024 Kbps

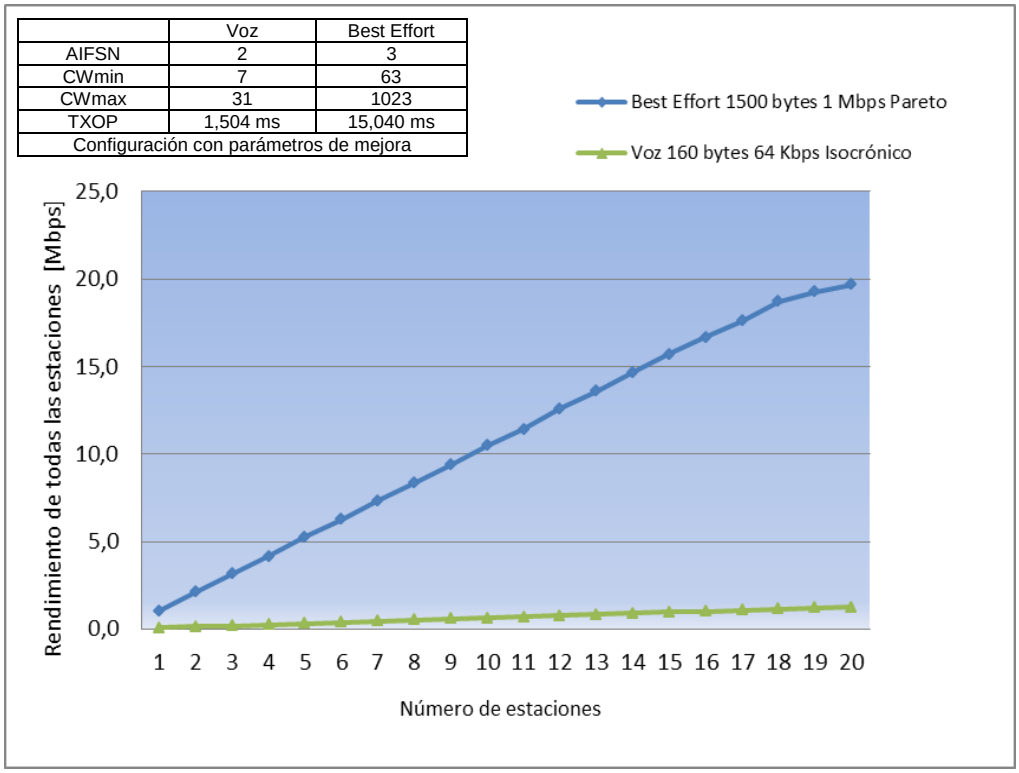
Tabla 4.5 Parámetros EDCA de mejora utilizados Escenario 1.3

Los valores promedios obtenidos para el rendimiento directo y el rendimiento relativo, variando la carga de 1 a 20 estaciones, se muestra en las Figuras 4.25 y 4.26, respectivamente.

En la Figura 4.25 se observa que el flujo de voz alcanza un pico de 1,261 Mbps en la estación 20. Mientras que en la estación 20, el tráfico mejor esfuerzo alcanza un pico de 19,680 Mpbs.

Y en la Figura 4.26 se presenta el rendimiento relativo de los tráficos de voz y mejor esfuerzo con los parámetros de mejora. Los tráficos aparecen muy estables en cuanto a las pérdidas hasta la estación 15 (por debajo del 1%). El flujo de voz tiene en la estación 20 una pérdida de 1,42%. El de mejor esfuerzo pierde un 6,64 % de rendimiento en la estación 20. La ausencia del tráfico de video impacta más que la ausencia de voz, mejorando más notoriamente el comportamiento del tráfico de voz y de mejor esfuerzo, y de la red como un todo.

La Tabla 4.6 resume las características más importantes en los puntos críticos cuando no está presente el tráfico de video.



	Voz	Best Effort
AIFSN	2	3
CWmin	7	63
CWmax	31	1023
TXOP	1,504 ms	15,040 ms
Configuración con parámetros de mejora		

Figura 4.25 Rendimiento de los tráficos de voz y mejor esfuerzo Escenario 1.3

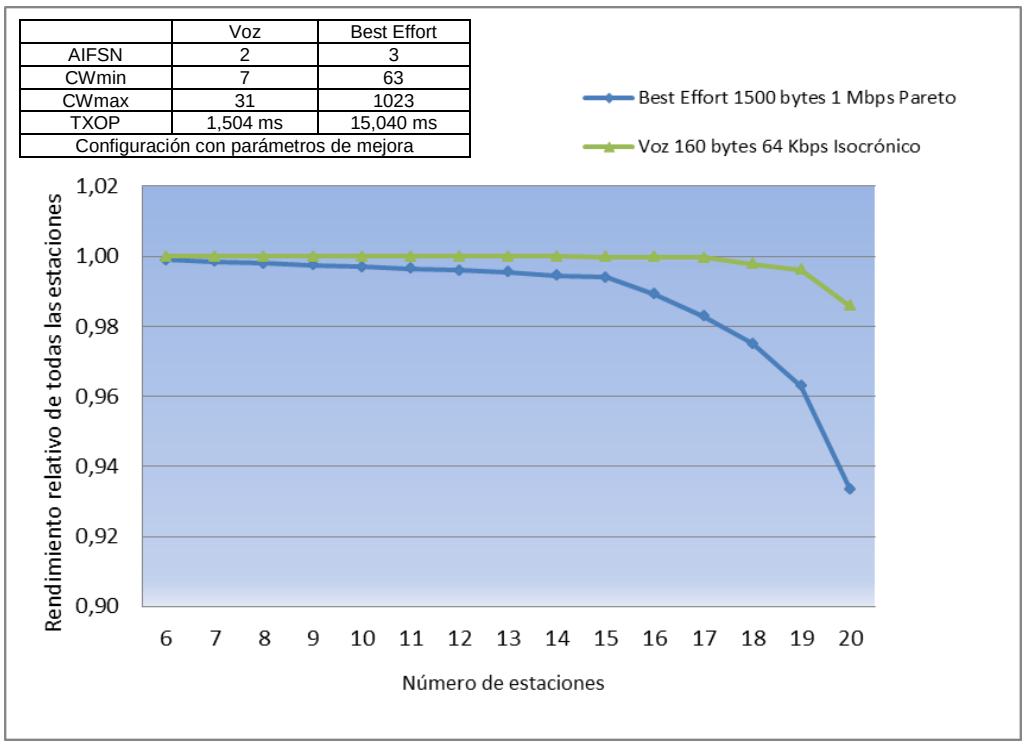


Figura 4.26 Rendimiento relativo de los tráficos de voz y mejor esfuerzo Escenario1.3

	Voz	Best Effort
Rendimiento Máximo [Mbps]	1,261	19,680
Pérdida 1% Rendimiento	20° estación	16° estación
Pérdida 5 % Rendimiento	-	20° estación
Pérdida 10 % Rendimiento	-	-
Retardo de Cola en Rendimiento Máximo [ms]	8,520	148,498
Retardo de Cola para 10 estaciones [ms]	1,812	1,328
Retardo de Cola Máximo 20 estaciones [ms]	8,520	148,498
Tamaño de Cola para 10 estaciones [paquetes]	0,090	0,116
Tamaño de Cola para 20 estaciones [paquetes]	0,420	12,180

Tabla 4.6 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 1.3

En las Figuras 4.27 y 4.28 se observan las comparaciones del rendimiento directo de los flujos de voz y de mejor esfuerzo, y en las Figuras 4.29 y 4.30 las comparaciones del rendimiento relativo,

configurados con los parámetros de mejora y con los parámetros por defecto.

En la Figura 4.27 se observa que el tráfico de voz con los parámetros de mejora alcanza un máximo de 1,261 Mbps para 20 estaciones, con una mejora del 11,37% respecto a los 1,133 Mpbs usando los parámetros por defecto.

Y en la Figura 4.28, el tráfico de mejor esfuerzo alcanza un pico de 19,680 Mbps en la estación 20; se alcanza una mejora del 26,77% en el rendimiento máximo respecto a los 15,524 Mpbs en la estación 16 de la configuración por defecto.

La ausencia del tráfico de video permite mayores mejoras individuales para cada tráfico que cuando no está presente el tráfico de voz. Cuando se usan los parámetros de mejora, se alcanza una mejora del 11,37% para el tráfico de voz, de 26,77% para el tráfico de mejor esfuerzo, y del 19% promedio para la red global.

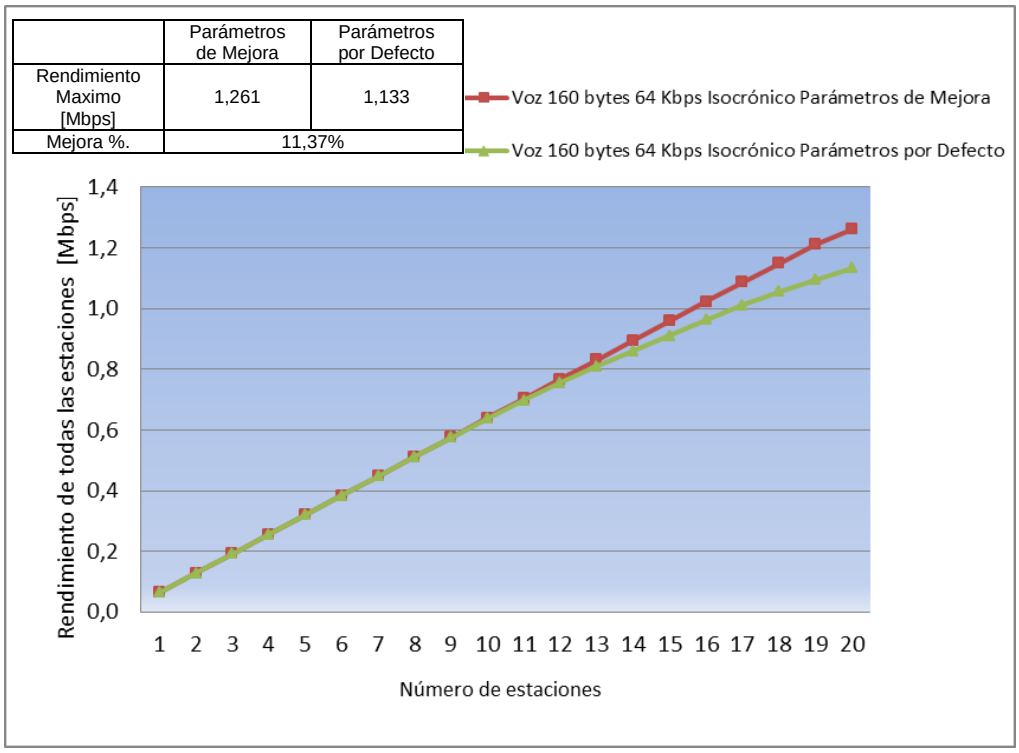


Figura 4.27 Comparación del rendimiento del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.3

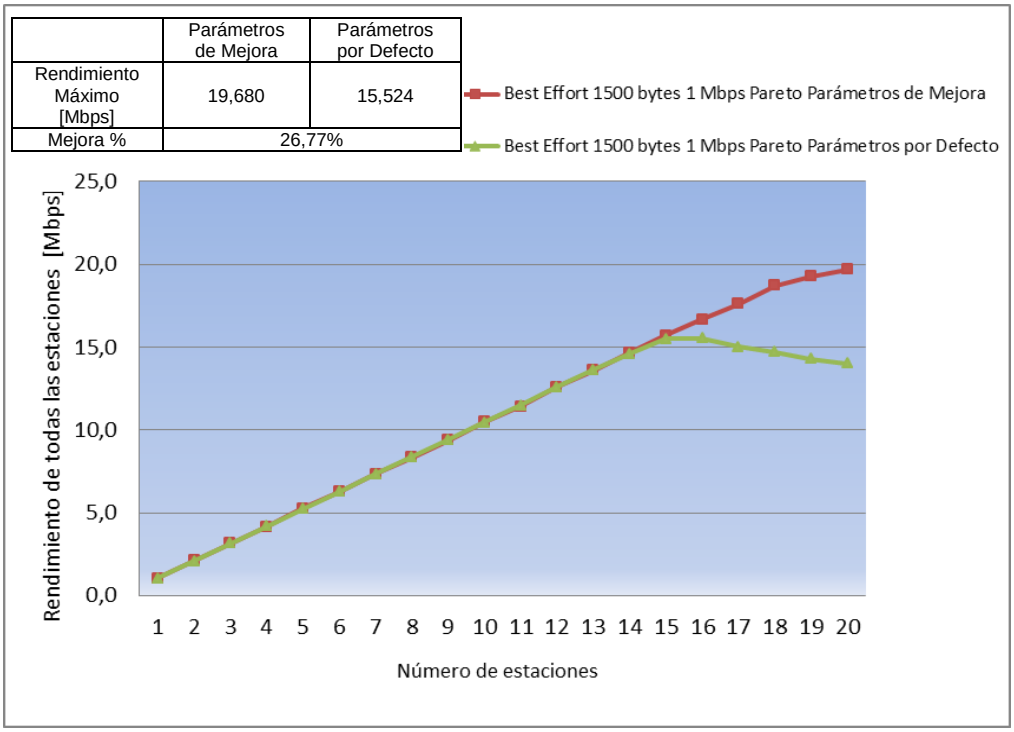


Figura 4.28 Comparación del rendimiento del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.3

En la Figura 4.29 se observa que la configuración óptima del flujo de voz obtiene un mejor comportamiento sobre la configuración por defecto. La pérdida se reduce a 1,42% con la configuración de mejora desde los 11,48% con la configuración por defecto, en ambos casos sobre la estación 20, con una mejora del 11,37%.

Y en la Figura 4.30 se presenta la comparación del tráfico de mejor esfuerzo. Se observa otra vez que hay un retraso de los umbrales de pérdida de rendimiento, que este caso es mayor que cuando no está presenta el tráfico de voz. En la estación 20 no se supera el umbral del 10% de pérdida para los parámetros de mejora, mientras que con los parámetros por defecto se supera el 30% en dicha estación. La reducción en la pérdida es del 40%.

Como se observa, se produce una mejora sustantiva en el comportamiento de ambos tráficos. La reducción en la pérdida de la red está por arriba del 25%.

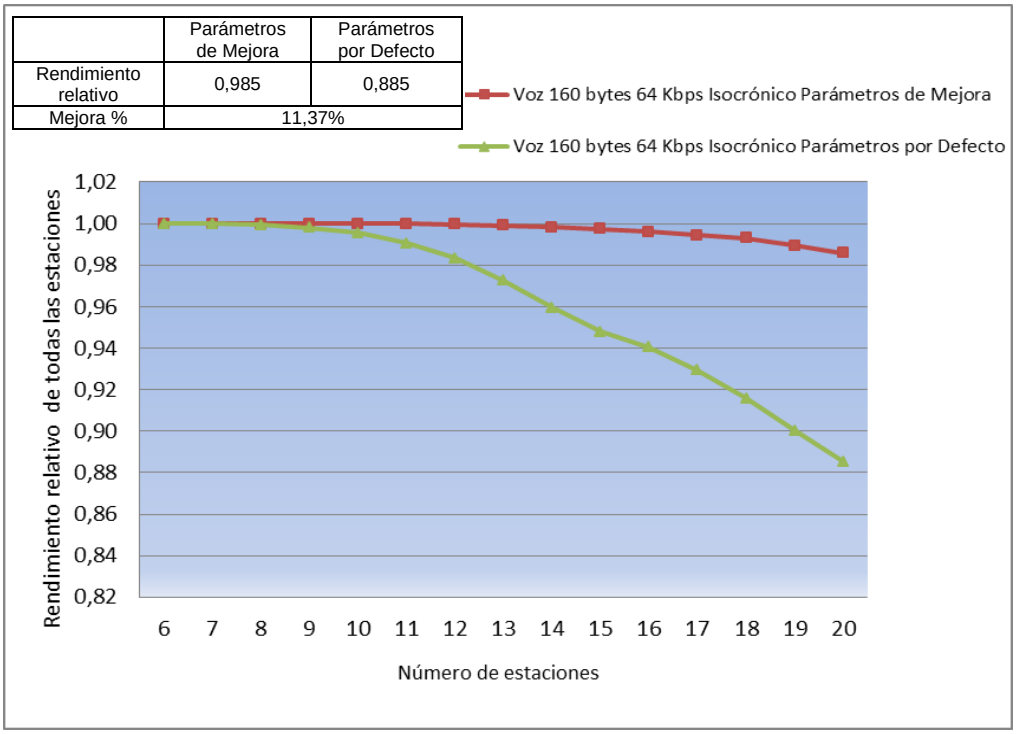


Figura 4.29 Comparación del rendimiento relativo del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.3

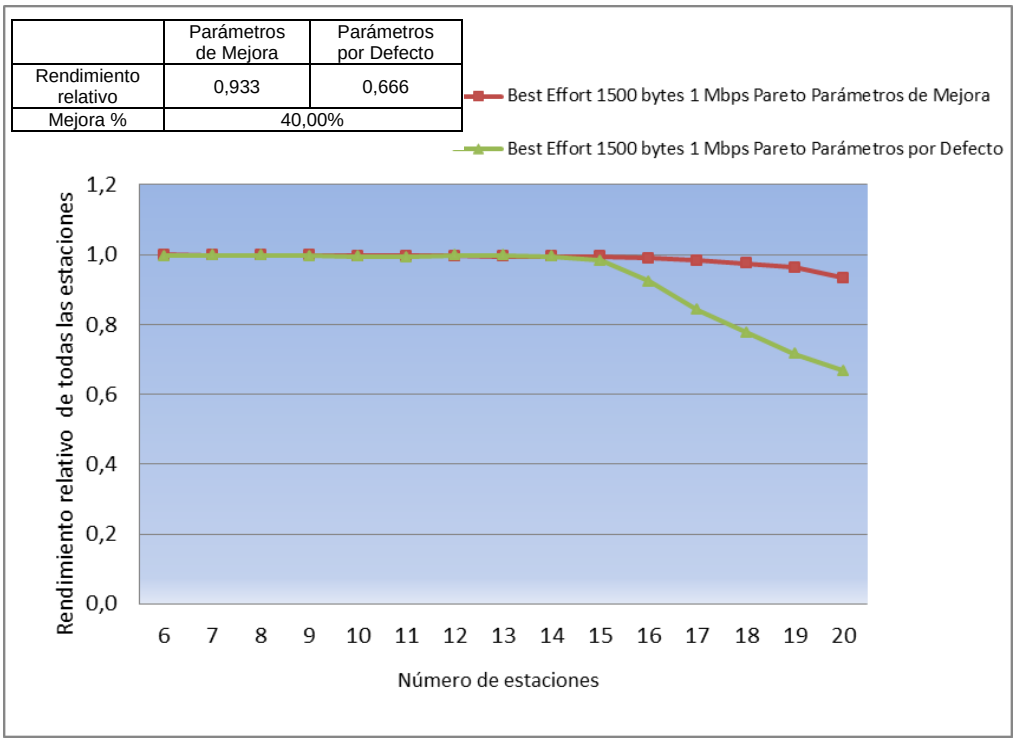


Figura 4.30 Comparación del rendimiento relativo del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.3

IV.4.1.4 Estaciones sin tráfico de Best Effort

En el último caso del escenario 1, sin la presencia del tráfico de mejor esfuerzo, se realizaron simulaciones configurando el modelo de estación EDCA HSAN de acuerdo a nuevos valores de los parámetros resumidos en la Tabla 4.7.

	Voz	Video
AIFSN	2	3
CWmin	7	31
CWmax	31	63
TXOP	1,504 ms	15,040 ms
Paquete	160 bytes	1280 bytes
Rate	64 Kbps	640 Kbps

Tabla 4.7 Parámetros EDCA de mejora utilizados Escenario 1.4

Los valores promedios obtenidos para el rendimiento directo y el rendimiento relativo, variando la carga de 1 a 20 estaciones, se muestra en las Figuras 4.31 y 4.32, respectivamente.

En la Figura 4.31 se observa que el flujo de voz alcanza un pico de 1,277 Mbps en la estación 20. Mientras que en la misma estación, el tráfico video alcanza un pico de 13,098 Mpbs. Ambos tráficos alcanzan el máximo valor posible respecto a cualquiera de los otros escenarios.

Y en la Figura 4.32 se presenta el rendimiento relativo de los tráficos de voz y video con los parámetros de mejora. Los tráficos aparecen muy estables en cuanto a las pérdidas hasta la estación 20 (por debajo del 1%). Los valores de pérdidas para ambos flujos se encuentran dentro de los valores de error; sin embargo, las representaciones sirven para observar las tendencias generales del comportamiento de los tráficos. La ausencia del tráfico de mejor esfuerzo disminuye al mínimo las pérdidas de ambos tráficos.

	Voz	Video
AIFSN	2	3
CWmin	7	31
CWmax	31	63
TXOP	1,504 ms	15,040 ms
Configuración con parámetros de mejora		

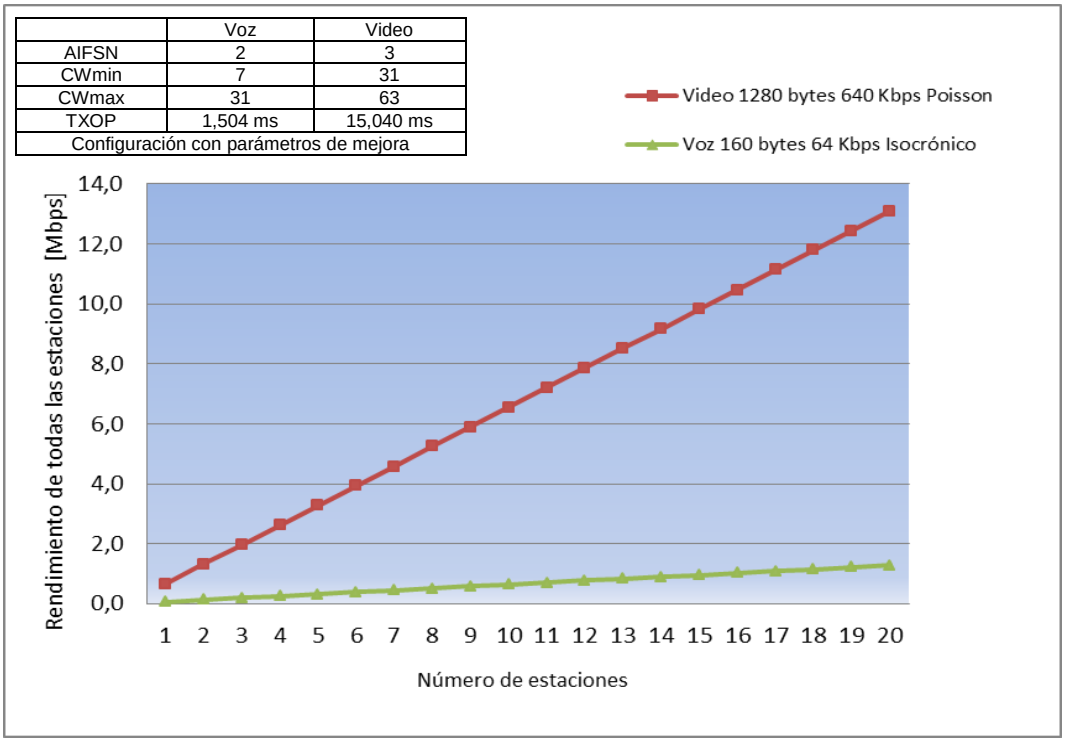


Figura 4.31 Rendimiento de los tráficos de voz y video Escenario 1.4

	Voz	Video
AIFSN	2	3
CWmin	7	31
CWmax	31	63
TXOP	1,504 ms	15,040 ms
Configuración con parámetros de mejora		

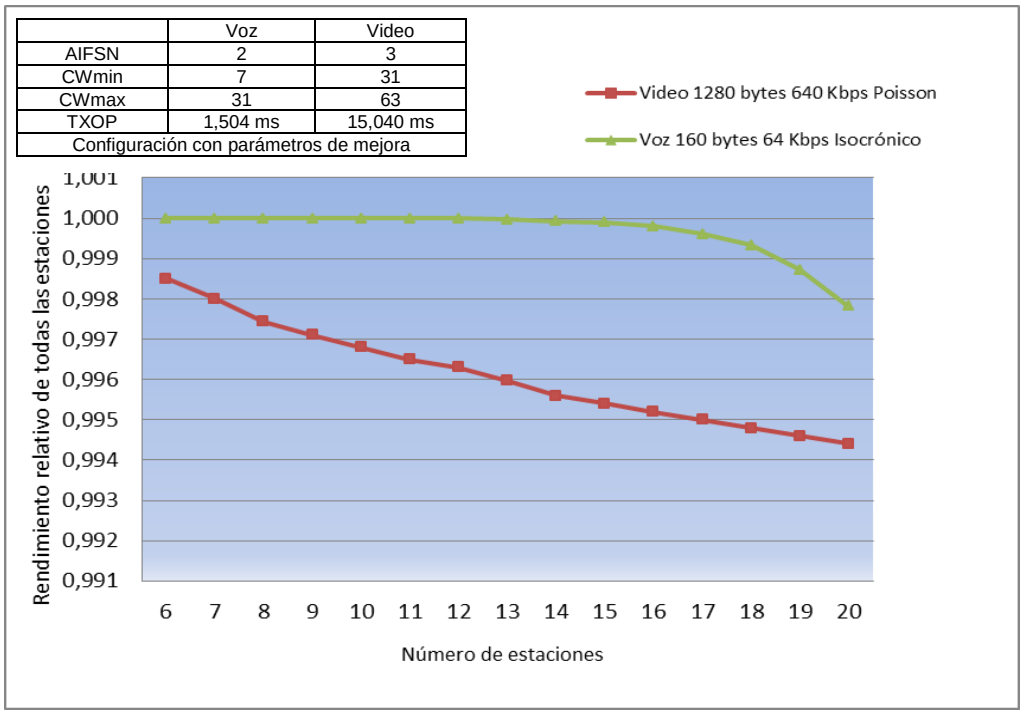


Figura 4.32 Rendimiento relativo de los tráficos de voz y video Escenario 1.4

La Tabla 4.8 resume las características más importantes en los puntos críticos cuando no está presente el tráfico de mejor esfuerzo.

	Voz	Video
Rendimiento Máximo [Mbps]	1,277	13,098
Pérdida 1% Rendimiento	-	-
Pérdida 5 % Rendimiento	-	-
Pérdida 10 % Rendimiento	-	-
Retardo de Cola en Rendimiento Máximo [ms]	4,509	5,579
Retardo de Cola para 10 estaciones [ms]	1,536	0,690
Retardo de Cola Máximo 20 estaciones [ms]	4,509	5,579
Tamaño de Cola para 10 estaciones [paquetes]	0,076	0,044
Tamaño de Cola Máximo 20 estaciones [paquetes]	0,225	0,356

Tabla 4.8 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 1.4

En las Figuras 4.33 y 4.34 se observan las comparaciones del rendimiento directo de los flujos de voz y de video, y en las Figuras 4.35 y 4.36 las comparaciones del rendimiento relativo, configurados con los parámetros de mejora y con los parámetros por defecto.

La Figura 4.33 presenta el tráfico de voz con los parámetros de mejora; se observa que alcanza un máximo de 1,277 Mbps para 20 estaciones, con una mejora del 31,96% respecto a los 0,967 Mpbs usando los parámetros por defecto.

Y en la Figura 4.34, el tráfico de video obtiene un pico de 13,098 Mbps en la estación 20; se alcanza una mejora del 15,88% en el rendimiento máximo respecto a loa 11,303 Mpbs en la estación 18 de la configuración por defecto.

La ausencia del tráfico de mejor esfuerzo da también aquí una de las mayores mejoras individuales para cada tráfico que cuando no está presente el tráfico de voz, y la mayor mejora de la red como un todo. Se alcanza un máximo del 31,96% para voz, y de 15,88% para el tráfico de video, con una mejora de rendimiento global de la red de 23% promedio.

En la Figura 4.35 se observa que el flujo de voz obtiene un mejor comportamiento sobre la configuración por defecto. La pérdida se reduce a 1,42% con la configuración óptima desde los 27,39% usando la configuración por defecto, en ambos casos sobre la estación 20, con una mejora del 35,78%.

Y en la Figura 4.36 se presenta la comparación del tráfico de video. En la estación 20, la pérdida de video no supera el 1,5% para los parámetros de mejora, respecto a 17,40% de pérdida con los parámetros por defecto. La reducción de la pérdida es del 20,28%.

Se observa una importante mejora del comportamiento de ambos tráficos. La reducción en la pérdida de la red está por arriba del 27%.

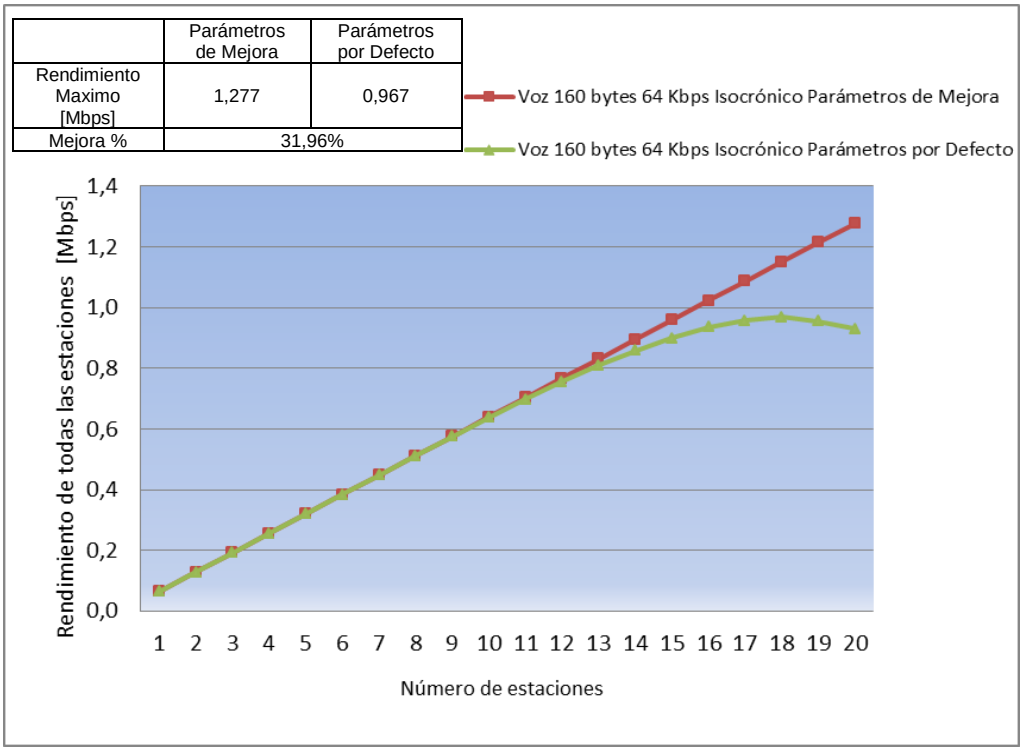


Figura 4.33 Comparación del rendimiento del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.4

	Parámetros de Mejora	Parámetros por Defecto
Rendimiento Maximo [Mbps]	13,098	11,303
Mejora %	15,88%	

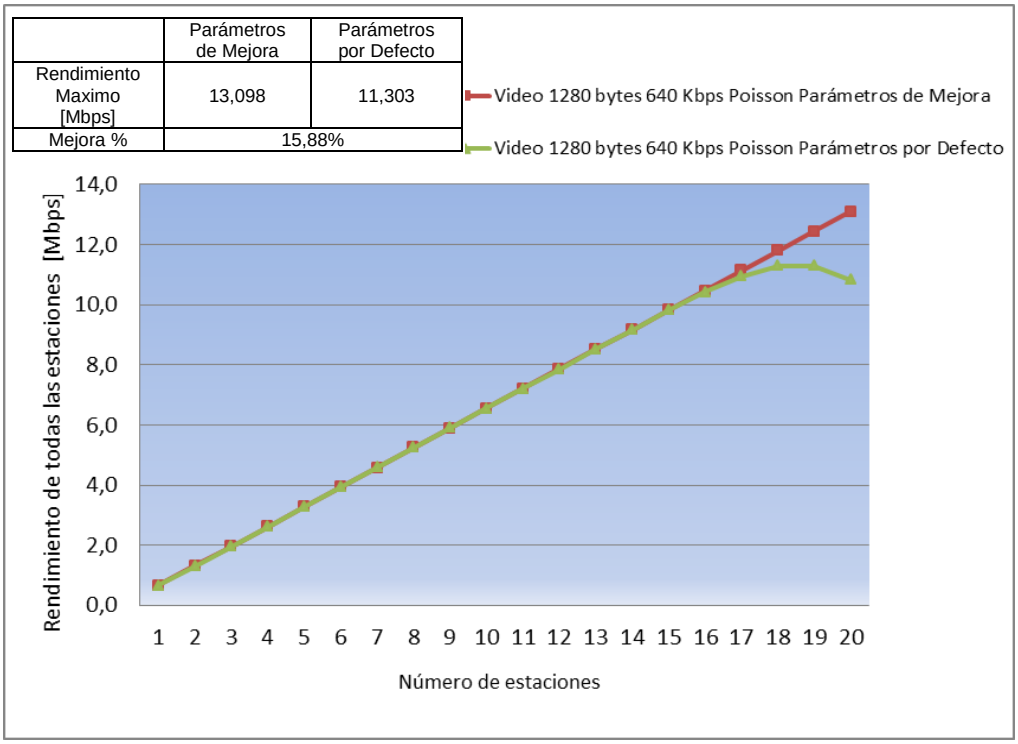


Figura 4.34 Comparación del rendimiento del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.4

	Parámetros de Mejora	Parámetros por Defecto
Rendimiento relativo	0,985	0,726
Mejora %	35,78%	

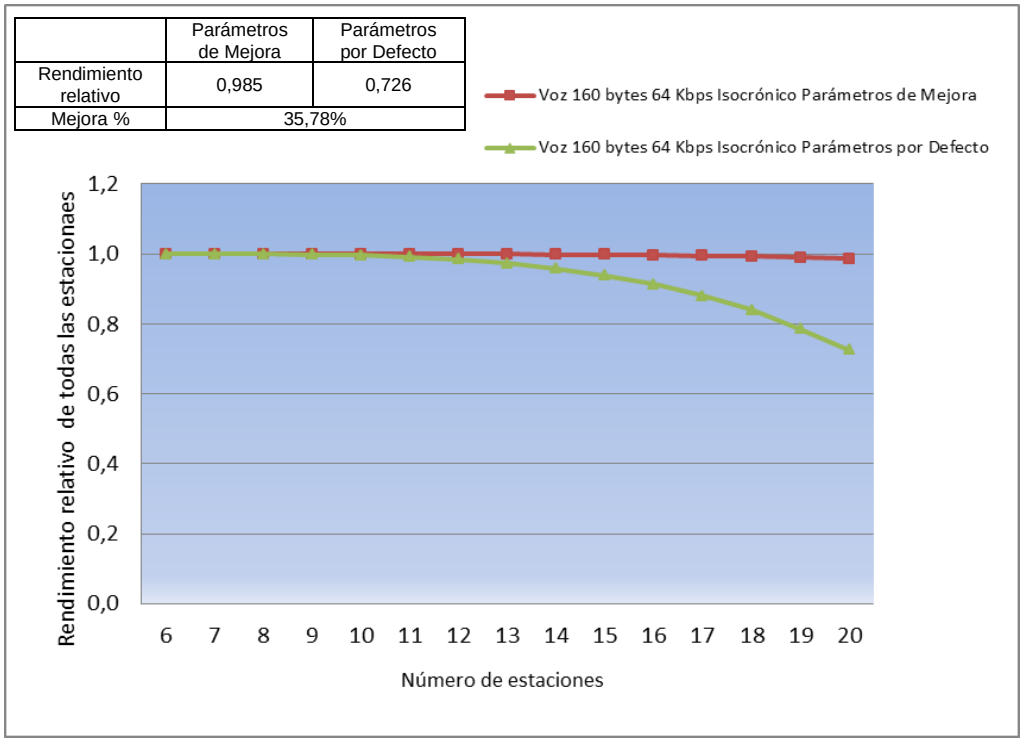


Figura 4.35 Comparación del rendimiento relativo del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.4

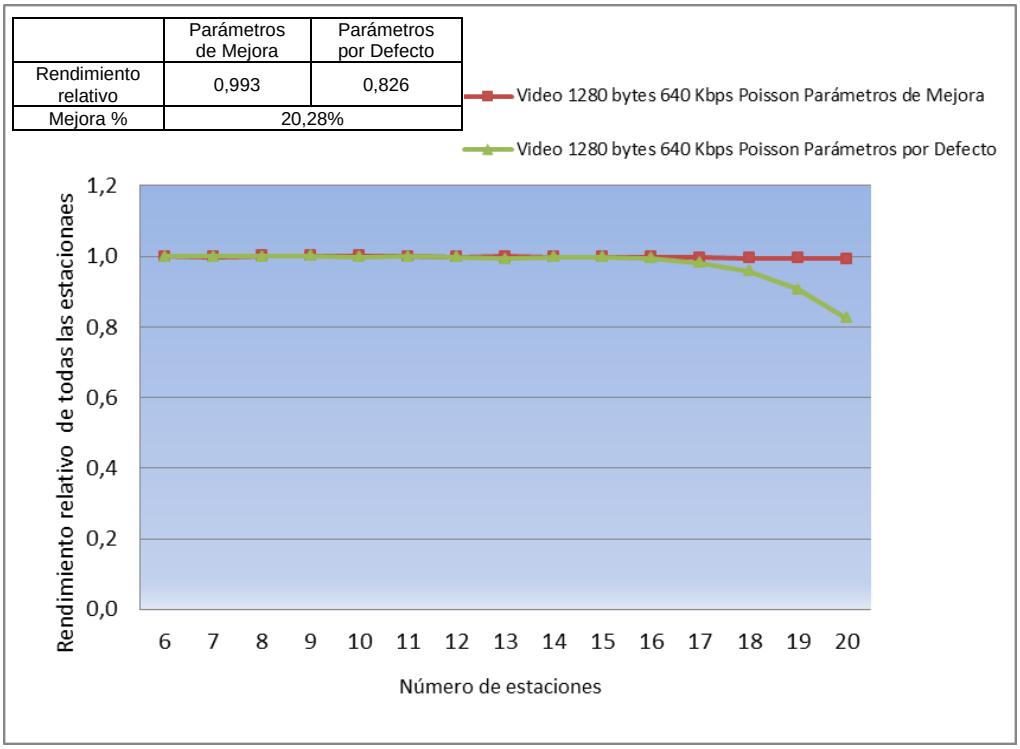


Figura 4.36 Comparación del rendimiento relativo del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.4

IV.4.2 Escenario 2

Para ilustrar el comportamiento EDCA sobre este escenario con todos los tráficos presentes, pero variando la proporción relativa entre ellos en cada subescenario, se configuró el modelo de estación EDCA HSAN con los mismos parámetros resumidos en las Tablas 4.1.

IV.4.2.1 60 % de estaciones de voz, 20 % de video y 20 % de mejor esfuerzo

Los valores promedios obtenidos para el rendimiento directo y el rendimiento relativo, variando la carga de 5 a 45 estaciones, se muestran en las Figuras 4.37 y 4.38, respectivamente.

En la Figura 4.37 se observa que el flujo de voz alcanza un pico de 1,713 Mbps cuando están presentes 45 estaciones. Para la misma cantidad de estaciones, el tráfico de mejor esfuerzo alcanza los 9,151 Mpbs, y el tráfico de video los 5,896 Mbps. No se distinguen caídas del rendimiento a simple vista.

Y en la Figura 4.38 se presenta el rendimiento relativo de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo con los parámetros de mejora. Los

tráficos aparecen muy estables en cuanto a las pérdidas, aun cuando estén presentes 45 estaciones. La presencia de un 60% de tráfico de voz no ocasiona grandes pérdidas en los otros tráficos. El tráfico de voz no alcanza a caer por debajo del 1%, mientras que el tráfico de video permanece estable, no superando el 0,5 % de pérdida. El tráfico de mejor esfuerzo, en el mismo escenario, no supera los 3,5 % de pérdida.

La Tabla 4.9 resume las características más importantes en los puntos críticos para este escenario.

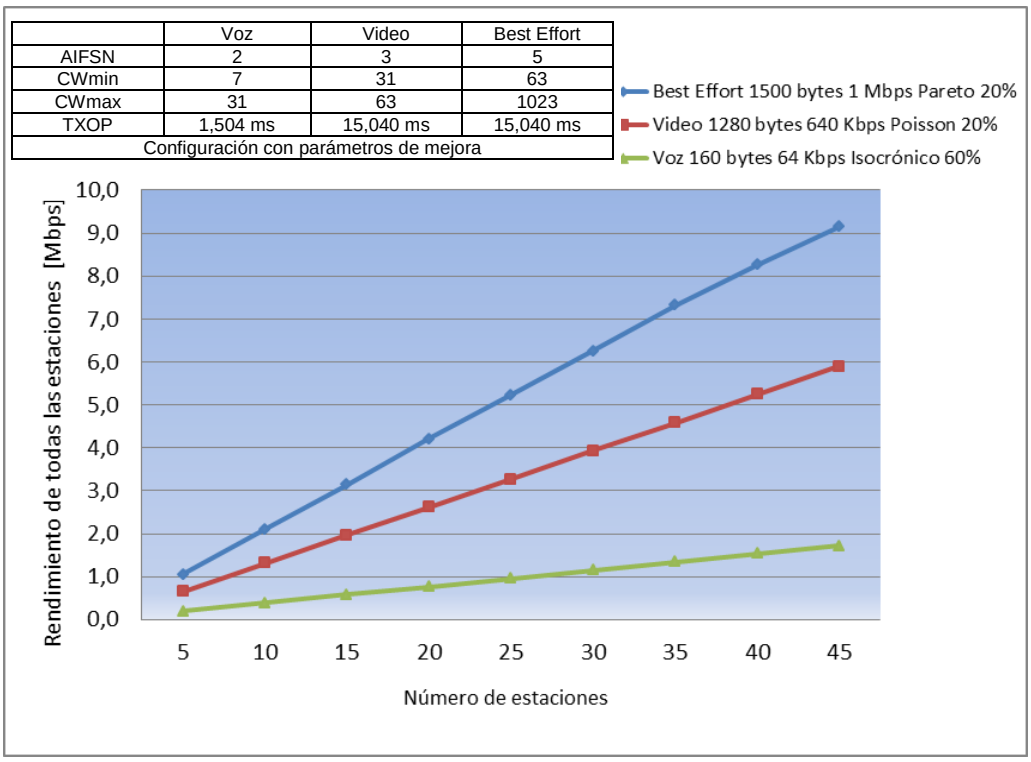


Figura 4.37 Rendimiento de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.1

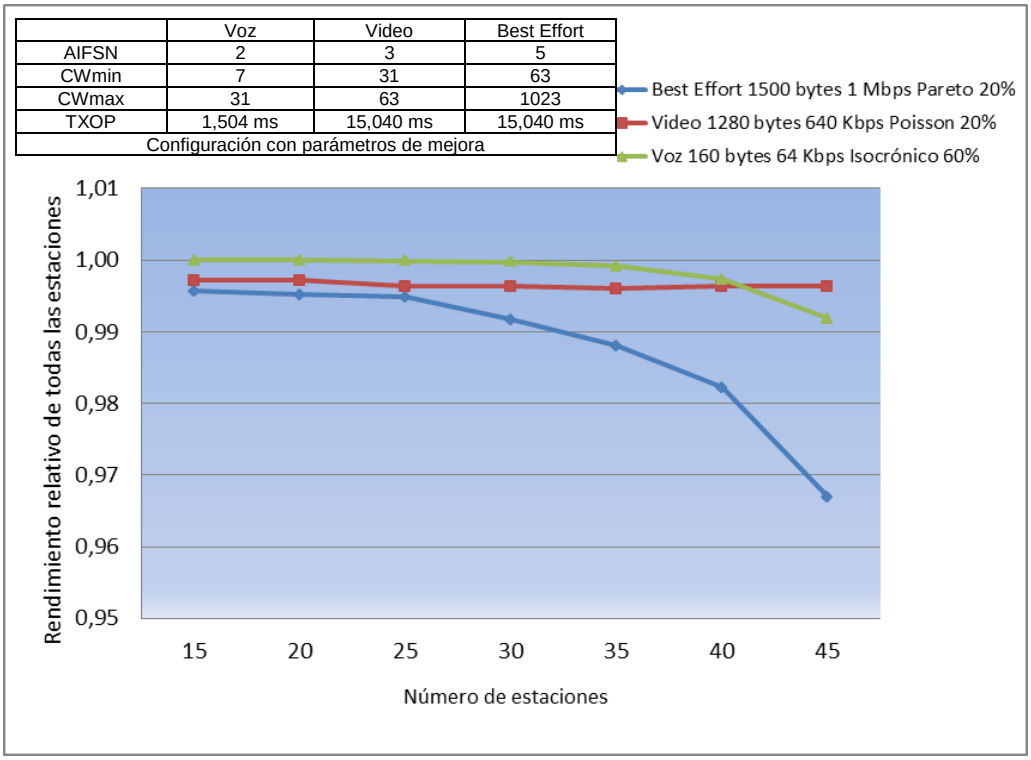


Figura 4.38 Rendimiento relativo de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.1

	Voz	Video	Best Effort
Rendimiento Máximo [Mbps]	1,713	5,896	9,151
Pérdida 1% Rendimiento	-	-	35 estaciones
Pérdida 5 % Rendimiento	-	-	-
Pérdida 10 % Rendimiento	-	-	-
Retardo de Cola en Rendimiento Máximo [ms]	6,568	8,408	82,785
Retardo de Cola para 25 estaciones [ms]	2,538	1,004	1,310
Retardo de Cola Máximo 45 estaciones [ms]	6,568	8,408	82,785
Tamaño de Cola para 25 estaciones [paquetes]	0,126	0,064	0,114
Tamaño de Cola para 45 estaciones [paquetes]	0,325	0,537	7,025

Tabla 4.9 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 2.1

En las Figuras 4.39, 4.40 y 4.41 se observan las comparaciones del rendimiento directo de los flujos de voz, video y de mejor esfuerzo, y en las Figuras 4.42, 4.43 y 4.44 las comparaciones del rendimiento relativo, configurados con los parámetros de mejora y con los parámetros por defecto.

En la Figura 4.39 se destaca que el tráfico de voz con los parámetros de mejora alcanza un máximo de 1,713 Mbps para 45 estaciones, con una mejora del 34,60% respecto a los 1,273 Mpbs para la misma cantidad de estaciones usando los parámetros por defecto. En la Figura 4.40 el tráfico de video alcanza un máximo de 5,896 Mbps para 45 estaciones, mejorando en 0,99% respecto a si se usa la configuración por defecto, que obtiene 5,838 Mbps. Finalmente, en la Figura 4.41 se observa que el tráfico de mejor esfuerzo alcanza un pico 9,151 Mbps con 45 estaciones. Esto significa una mejora del 11,80% en el rendimiento respecto a loa 8,185 Mpbs de la configuración por defecto que se obtienen con 40 estaciones.

Nuevamente como en otros escenarios, se concluye también para este caso que los parámetros por defecto no son óptimos. Con la configuración de mejora adoptada se han alcanzado mejoras individuales para cada tráfico, y un rendimiento global de la red 16% mayor. Particularmente el tráfico de voz alcanza un pico de mejora del 34,6%.

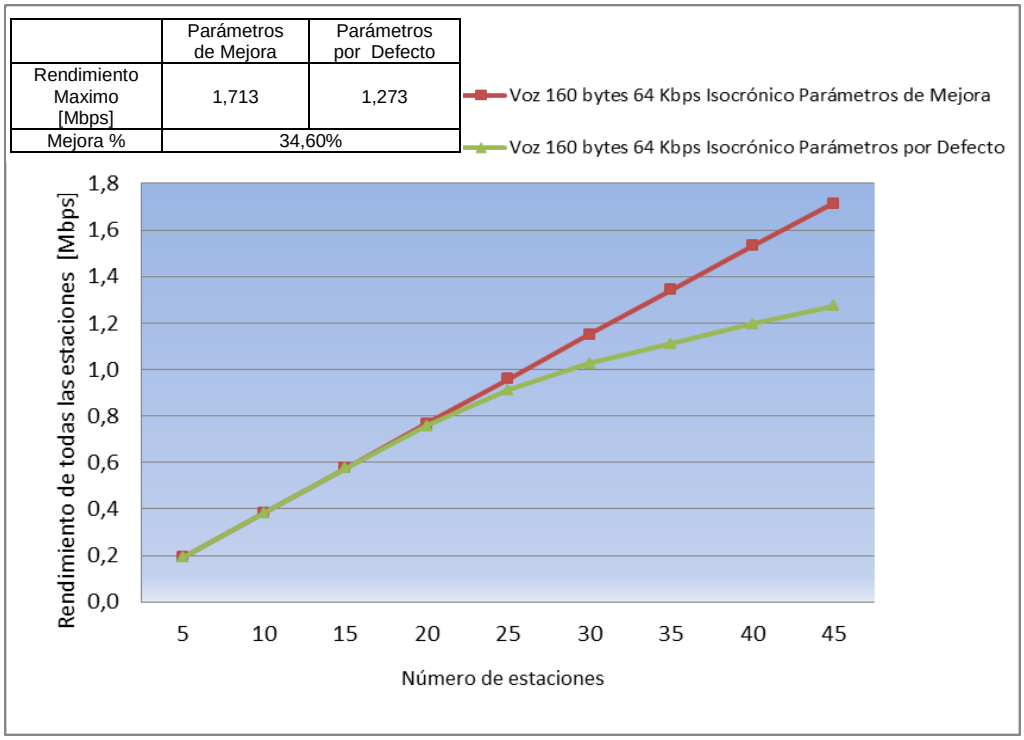


Figura 4.39 Comparación del rendimiento del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.1

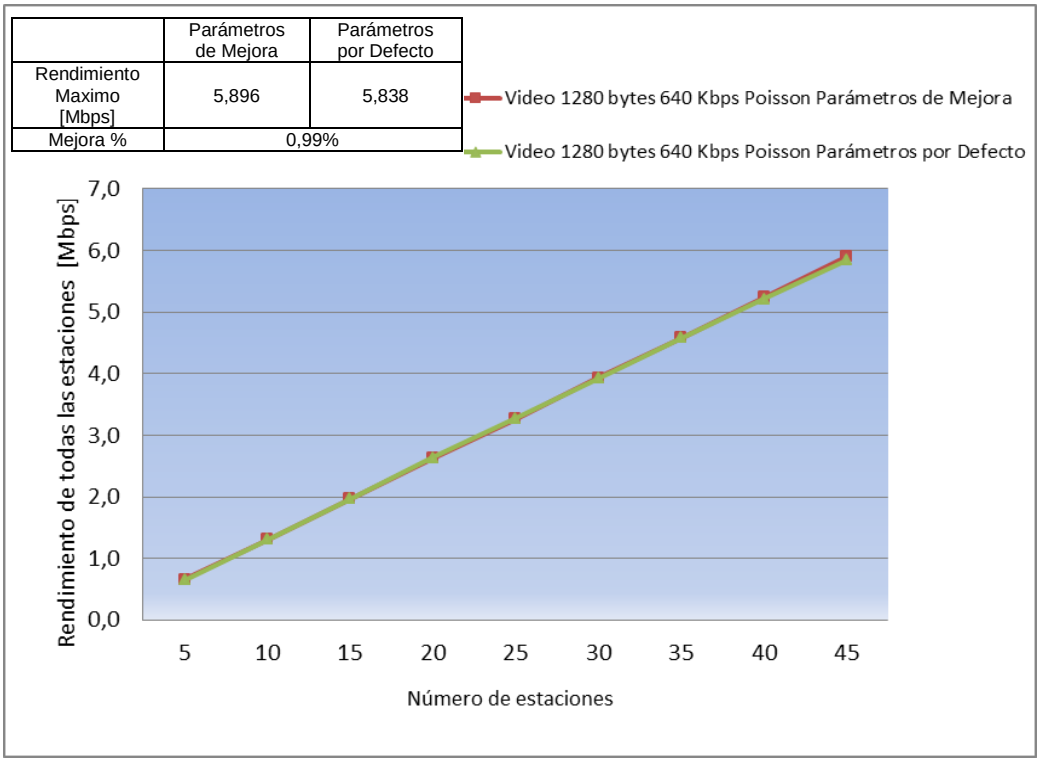


Figura 4.40 Comparación del rendimiento del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.1

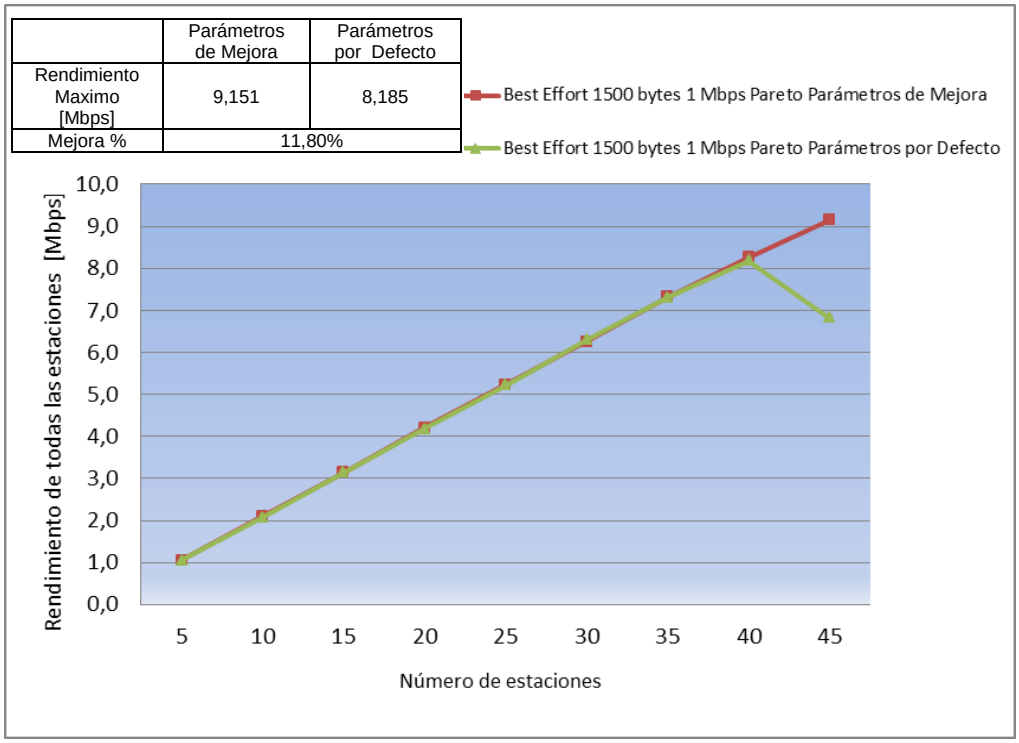


Figura 4.41 Comparación del rendimiento del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.1

Se observa en la Figura 4.42 que el flujo de voz permanece casi sin pérdidas. La pérdida es del 0,81% con 45 estaciones, lo que es una mejora del 34,60% respecto de la pérdida de 26,31% con los parámetros por defecto. Con la configuración de mejora, puede mantenerse el rendimiento relativo aun cuando sea este el tipo de tráfico predominante.

La comparación para el tráfico de video se muestra en la Figura 4.43. El tráfico de video, como el de voz, configurado con los parámetros de mejora, presenta una respuesta con una pérdida menor al 0,5% dentro de las 45 estaciones. Esto significa una mejora del 1,00% respecto a la pérdida de 1,40% cuando la configuración es por defecto.

Finalmente, en la Figura 4.44 se presenta la comparación del tráfico de mejor esfuerzo. El umbral del 1% de pérdida se produce para 40 estaciones para los parámetros de mejora, y con 35 estaciones para los parámetros por defecto. Para 45 estaciones la mejora en la pérdida es del 35,09%.

Se observa que cuando hay una preponderancia del tráfico de voz, configurados con los parámetros de mejora, todos los tráficos presentan bajas pérdidas, aun cuando se aumenta la cantidad proporcional de aquellas estaciones. Este escenario asegura muy buenas prestaciones para las aplicaciones más exigentes en cuanto a las pérdidas.

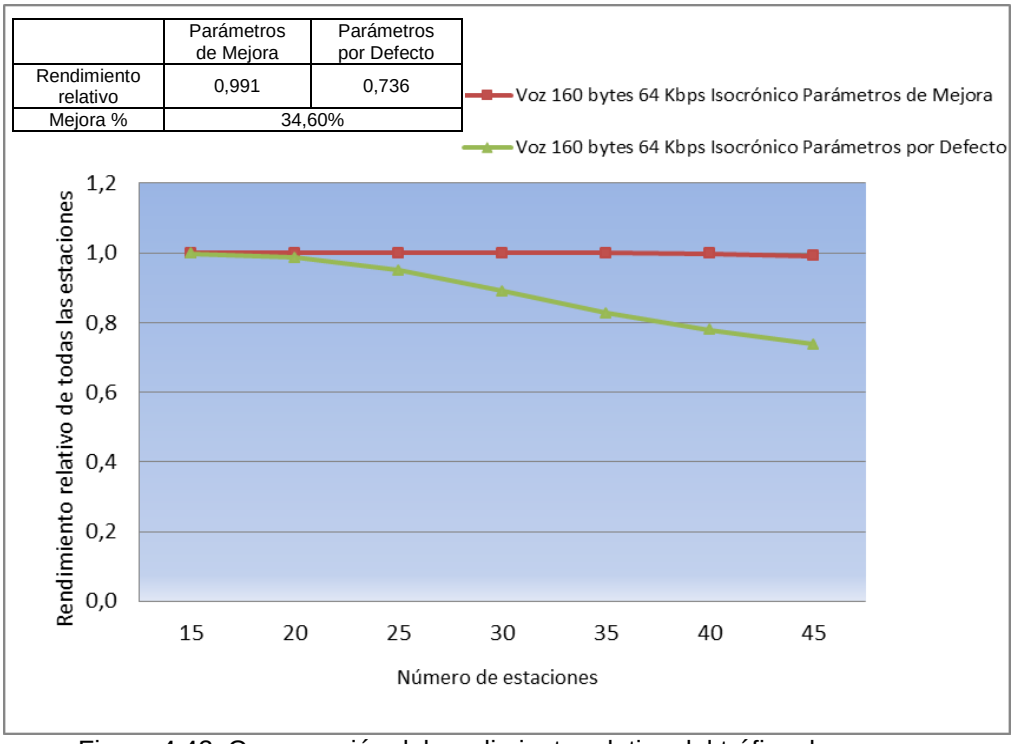


Figura 4.42 Comparación del rendimiento relativo del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.1

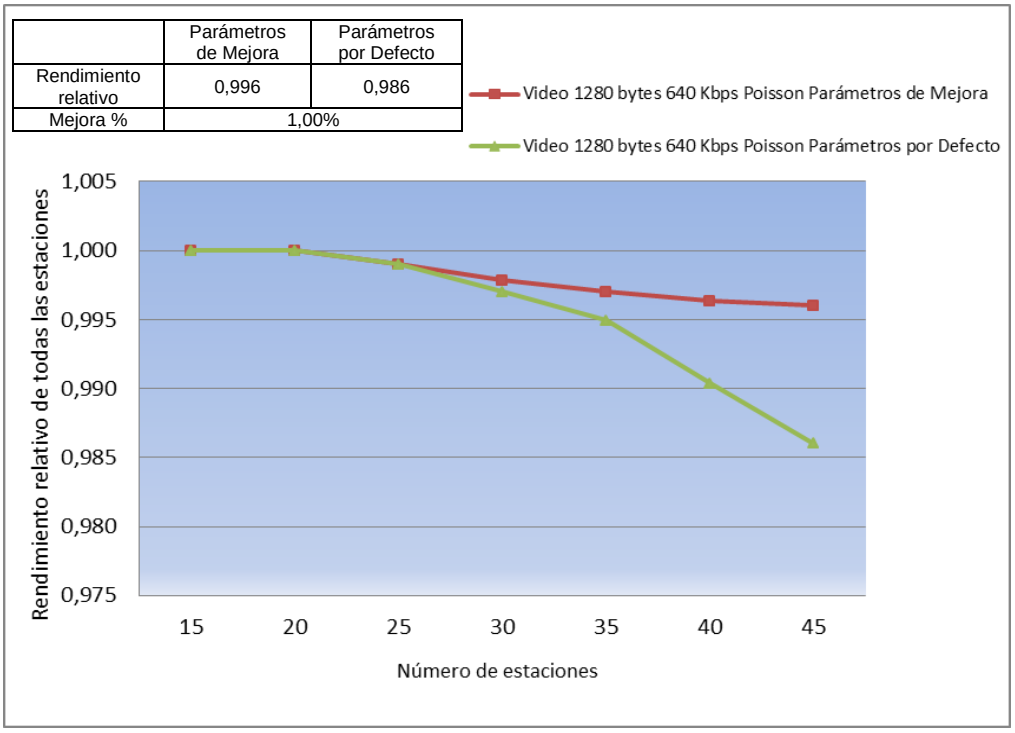


Figura 4.43 Comparación del rendimiento relativo del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.1

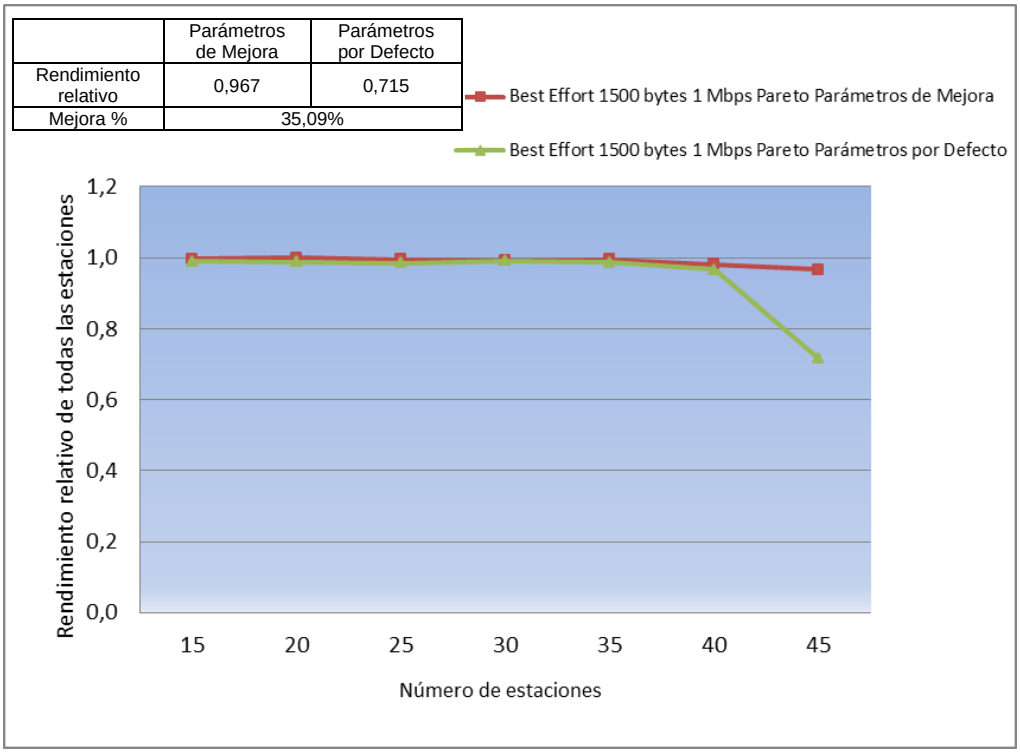


Figura 4.44 Comparación del rendimiento relativo del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.1

IV.4.2.2 20 % de estaciones de voz, 60 % de video y 20 % de mejor esfuerzo

Los valores promedios obtenidos para el rendimiento directo y el rendimiento relativo, variando la carga de 5 a 45 estaciones, se muestran en las Figuras 4.45 y 4.46, respectivamente.

En la Figura 4.45 se observa que el flujo de voz alcanza un pico de 0,573 Mbps cuando están presentes 45 estaciones. El menor rendimiento de voz se debe a la menor proporción de tráfico de voz presente respecto al escenario anterior. Para la misma cantidad de estaciones, el tráfico de mejor esfuerzo alcanza los 6,949 Mpbs para 35 estaciones, y luego cae. Finalmente, el tráfico de video alcanza 17,608 Mbps con 45 estaciones. Este valor alto se corresponde con el hecho que un 60% del tráfico es de video.

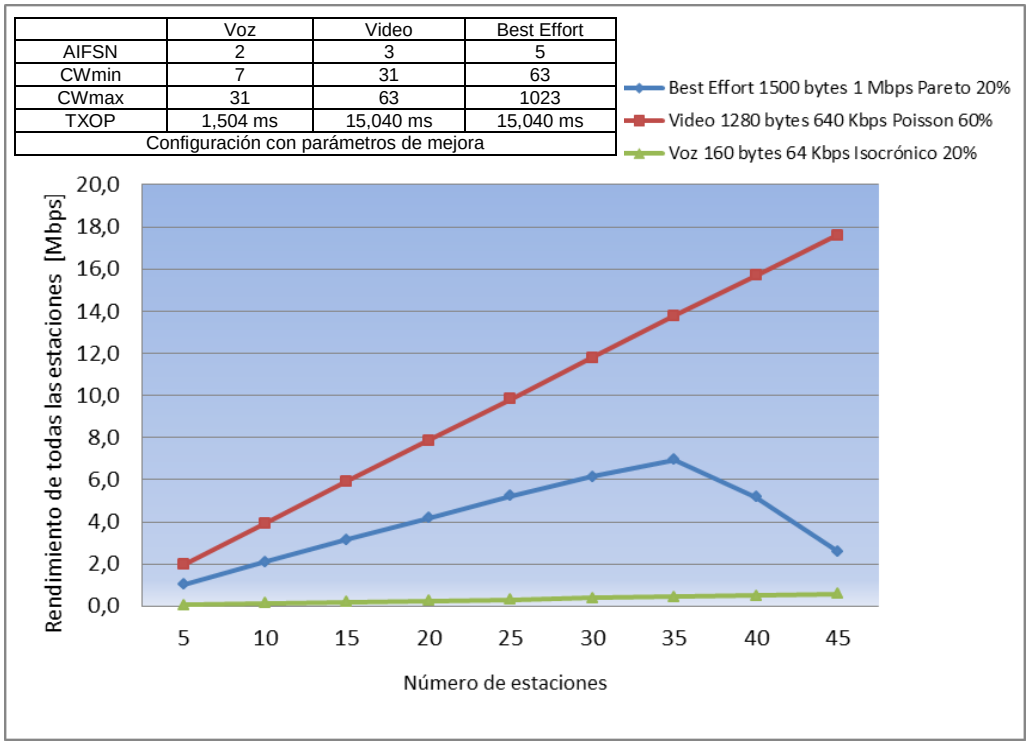


Figura 4.45 Rendimiento de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.2

La Figura 4.46 presenta el rendimiento relativo de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo con los parámetros de mejora. Los tráficos de voz y video aparecen muy estables en cuanto a las pérdidas aun para 45 estaciones, pero el de mejor esfuerzo cae rápidamente a partir de las 35 estaciones. La presencia del 60% de tráfico de video, presenta una mayor carga a la red, que el 60% de tráfico de voz del escenario anterior, afectando sensiblemente al tráfico de mejor esfuerzo. El tráfico de voz cae

un 0,45%, mientras que el tráfico de video permanece estable, no superando el 0,72 % de pérdida para 45 estaciones. Por otro lado, el tráfico de mejor esfuerzo, en el mismo escenario, cae un 5,49% para 35 estaciones, y alcanza los 72,32% para 45 estaciones. En este escenario se destaca nuevamente la capacidad de diferenciación de tráfico de EDCA, y la protección de los tráficos de mayor prioridad, sobre los de menor prioridad.

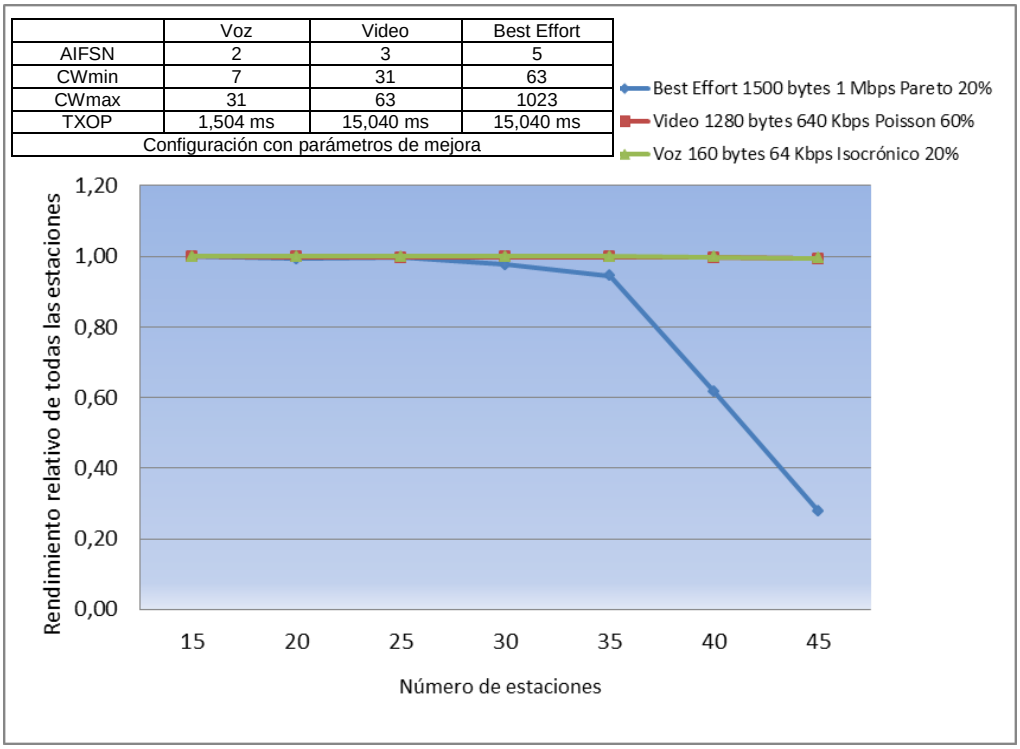


Figura 4.46 Rendimiento relativo de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.2

La Tabla 4.10 resume las características más importantes en los puntos críticos para este escenario.

En las Figuras 4.47, 4.48 y 4.49 se observan las comparaciones del rendimiento directo de los flujos de voz, video y de mejor esfuerzo, y en las Figuras 4.50, 4.51 y 4.52 las comparaciones del rendimiento relativo, configurados con los parámetros de mejora y con los parámetros por defecto.

	Voz	Video	Best Effort
Rendimiento Máximo [Mbps]	0,573	17,608	6,949
Pérdida 1% Rendimiento	-	-	30 estaciones
Pérdida 5 % Rendimiento	-	-	35 estaciones
Pérdida 10 % Rendimiento	-	-	40 estaciones
Retardo de Cola en Rendimiento Máximo [ms]	9,134	56,429	120,779
Retardo de Cola para 25 estaciones [ms]	1,550	1,342	6,023
Retardo de Cola Máximo 45 estaciones [ms]	9,134	56,429	1747,910
Tamaño de Cola para 25 estaciones [paquetes]	0,077	0,085	0,526
Tamaño de Cola para 45 estaciones [paquetes]	0,454	3,588	42,398

Tabla 4.10 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 2.2

En la Figura 4.47 se destaca que el tráfico de voz con los parámetros de mejora alcanza un máximo de 0,573 Mbps para 45 estaciones, con una mejora del 31,76% respecto a los 0,435 Mpbs para la misma cantidad de estaciones usando los parámetros por defecto.

En la Figura 4.48 el tráfico de video alcanza un pico de 17,608 Mbps para 45 estaciones, mejorando en 17,44% respecto a los 15,044 Mbps usando la configuración por defecto.

Finalmente, en la Figura 4.49 se observa que el tráfico de mejor esfuerzo alcanza un pico 6,949 Mbps sobre las 35 estaciones. Con la configuración por defecto, el máximo rendimiento es de 6,177 Mpbs en 30 estaciones. Esto significa una mejora del 12,49%.

Con un 60% de tráfico de video, repartiendo el resto por iguales entre el tráfico de voz y de mejor esfuerzo, se nota una mejora importante con los parámetros de mejora, respecto a cuando se usan los parámetros por defecto. Se obtiene el máximo de 31,76% en el tráfico de voz, y el mínimo de mejora de 12,49% en el tráfico de mejor esfuerzo. Con la configuración adoptada se ha alcanzado un mejor rendimiento global promedio de la red de 21%.

	Parámetros de Mejora	Parámetros por Defecto
Rendimiento Máximo [Mbps]	0,573	0,435
Mejora %	31,76%	

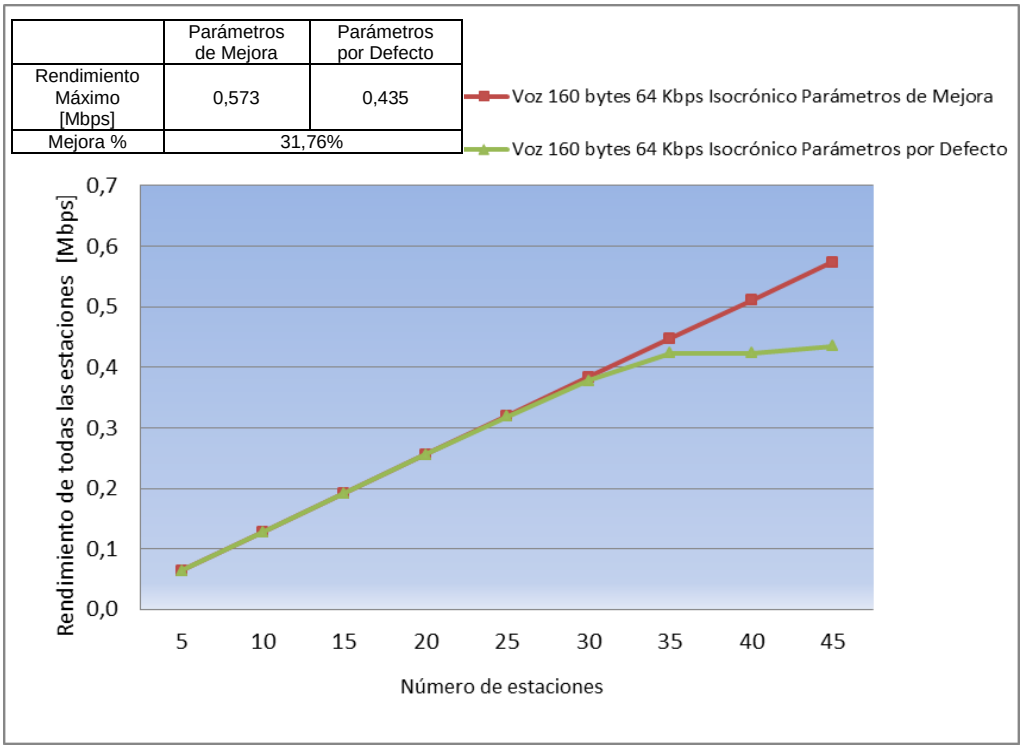


Figura 4.47 Comparación del rendimiento del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.2

	Parámetros de Mejora	Parámetros por Defecto
Rendimiento Maximo [Mbps]	17,608	15,044
Mejora %	17,44%	

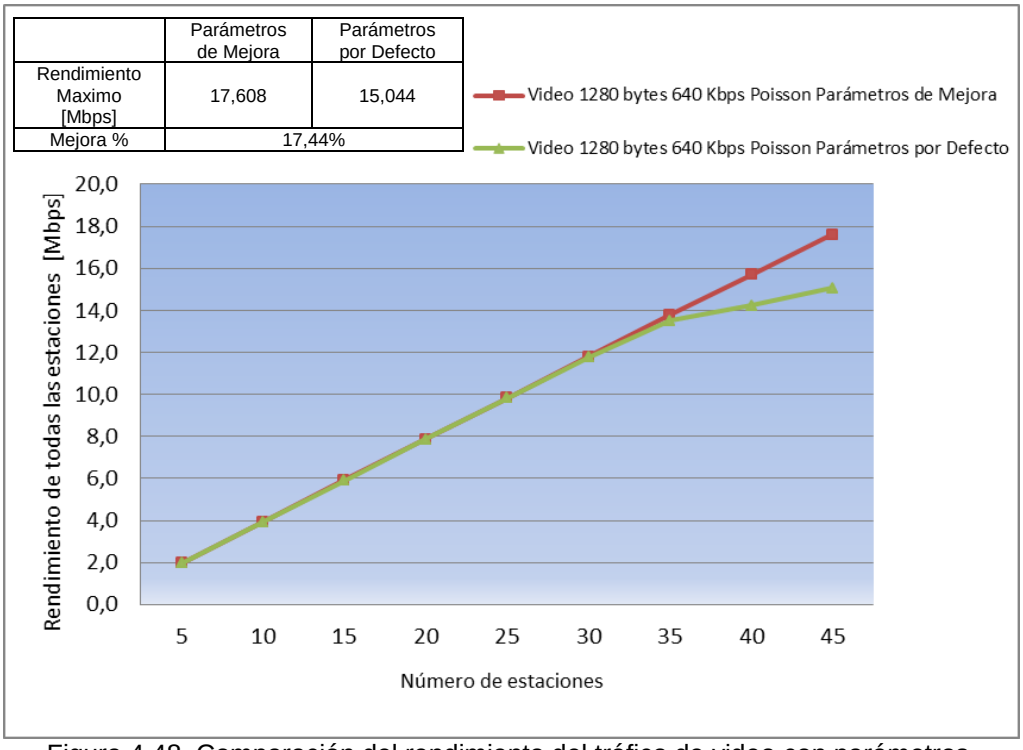


Figura 4.48 Comparación del rendimiento del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.2

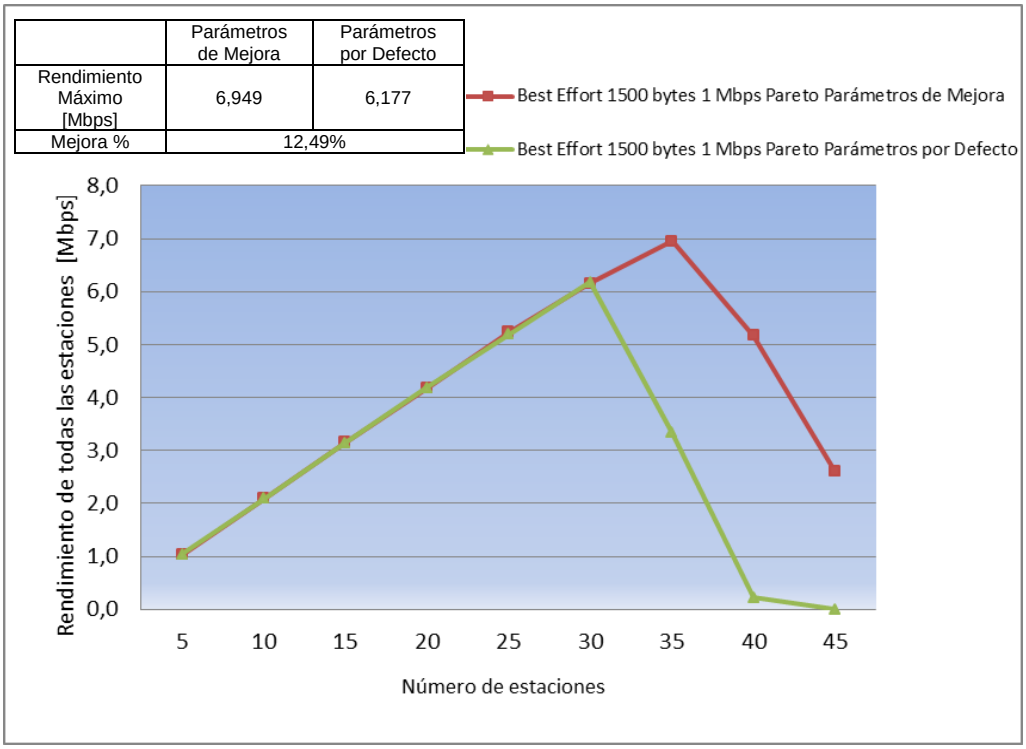


Figura 4.49 Comparación del rendimiento del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.2

Efectuando la comparación sobre el rendimiento relativo de voz para ambas configuraciones, se observa en la Figura 4.50 que el flujo de voz permanece casi sin pérdidas. La pérdida es del 0,45% con 45 estaciones, que comparado con los 24,45% de pérdida en la configuración por defecto, hay una mejora del 31,76%. Con la configuración óptima, puede mantenerse el rendimiento relativo aun cuando haya un 60% de tráfico de video, como tráfico predominante.

La comparación para el tráfico de video se muestra en la Figura 4.51. El tráfico de video configurado con los parámetros de mejora, presenta una respuesta con una pérdida de 0,72% dentro de las 45 estaciones. Esto significa una mejora del 16,87% respecto a la pérdida de 15,05% cuando la configuración es por defecto.

Por último, en la Figura 4.52 se presenta la comparación del tráfico de mejor esfuerzo. El umbral del 1% de pérdida se supera en 30 estaciones para los parámetros de mejora, y para los parámetros por defecto. Sin embargo, para 45 estaciones la pérdida con parámetros de mejora es de 72%; esto es mejor que la caída de prácticamente el 100% cuando se usan los parámetros por defecto.

Se observa que cuando hay una preponderancia del tráfico de video, los tráficos de voz y video presentan un muy buen comportamiento, con pérdidas por debajo del 1%, aun cuando se aumente la cantidad de estaciones a 45. Este escenario asegura muy buenas prestaciones para las aplicaciones más exigentes en cuanto a las pérdidas, a costa del tráfico de mejor esfuerzo.

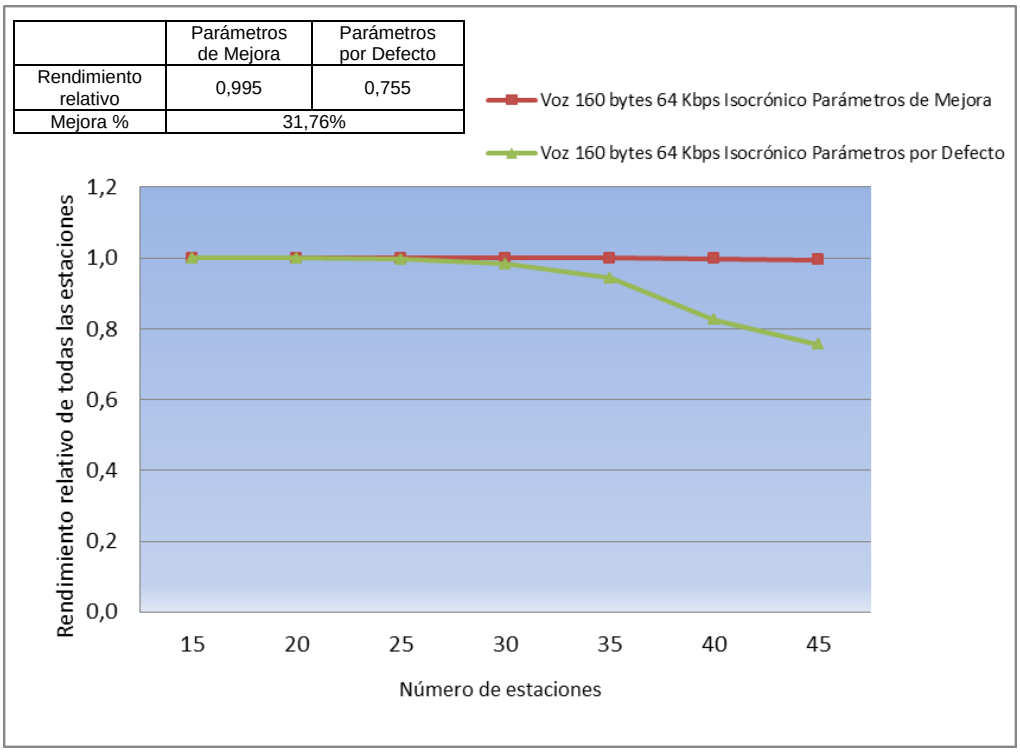


Figura 4.50 Comparación del rendimiento relativo del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.2

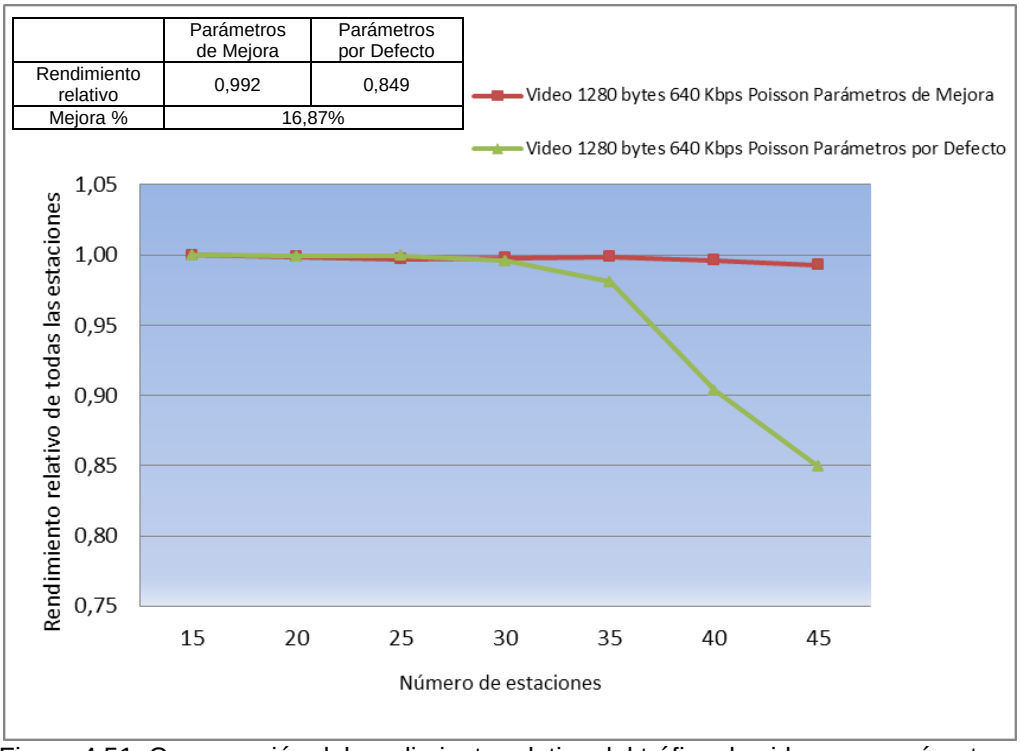


Figura 4.51 Comparación del rendimiento relativo del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.2

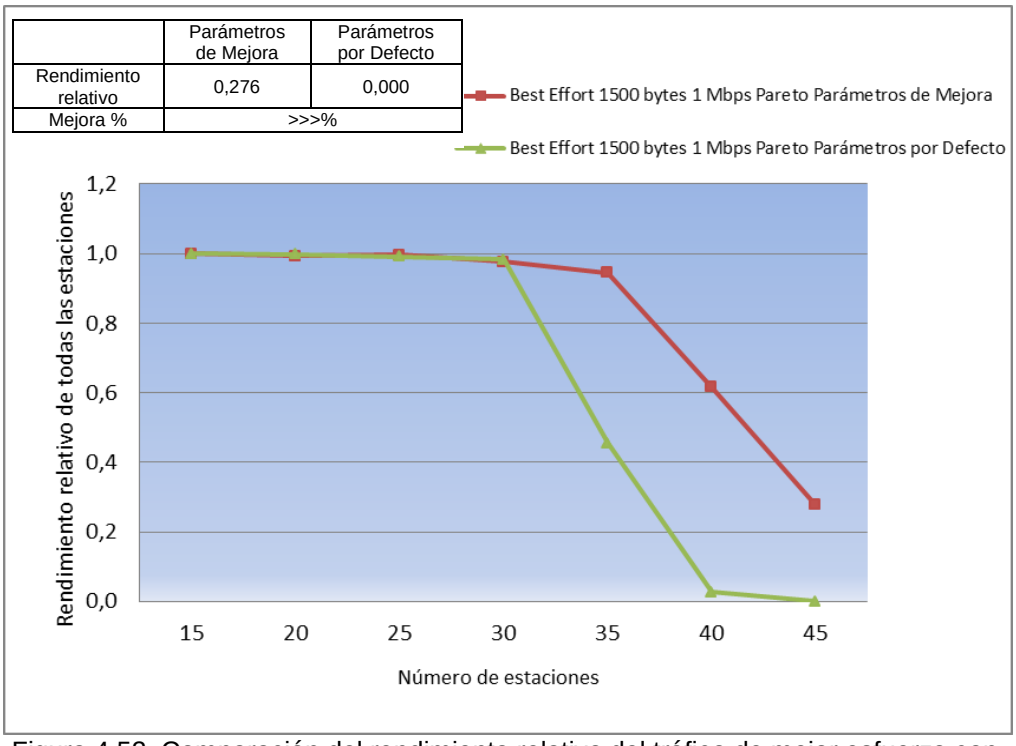


Figura 4.52 Comparación del rendimiento relativo del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.2

IV.4.2.3 20 % de estaciones de voz, 20 % de video y 60 % de mejor esfuerzo.

Los valores promedios obtenidos para el rendimiento directo y el rendimiento relativo, variando la carga de 5 a 45 estaciones, se muestran en las Figuras 4.53 y 4.54, respectivamente.

En la Figura 4.53 se observa que el flujo de voz alcanza un pico de 0,575 Mbps cuando están presentes 45 estaciones. Este valor para la voz es bastante similar al escenario anterior (IV.4.2.2), lo que indica la capacidad de EDCA para mantener el rendimiento de este tráfico de alta prioridad independientemente de la proporción. Para la misma cantidad de estaciones, el tráfico de video alcanza los 5,894 Mpbs, que resulta también similar al pico obtenido en el primer caso del escenario 2 (IV.4.2.1). Finalmente, el tráfico de mejor esfuerzo alcanza un máximo de 18,859 Mbps para 35 estaciones, y luego inicia una caída suave.

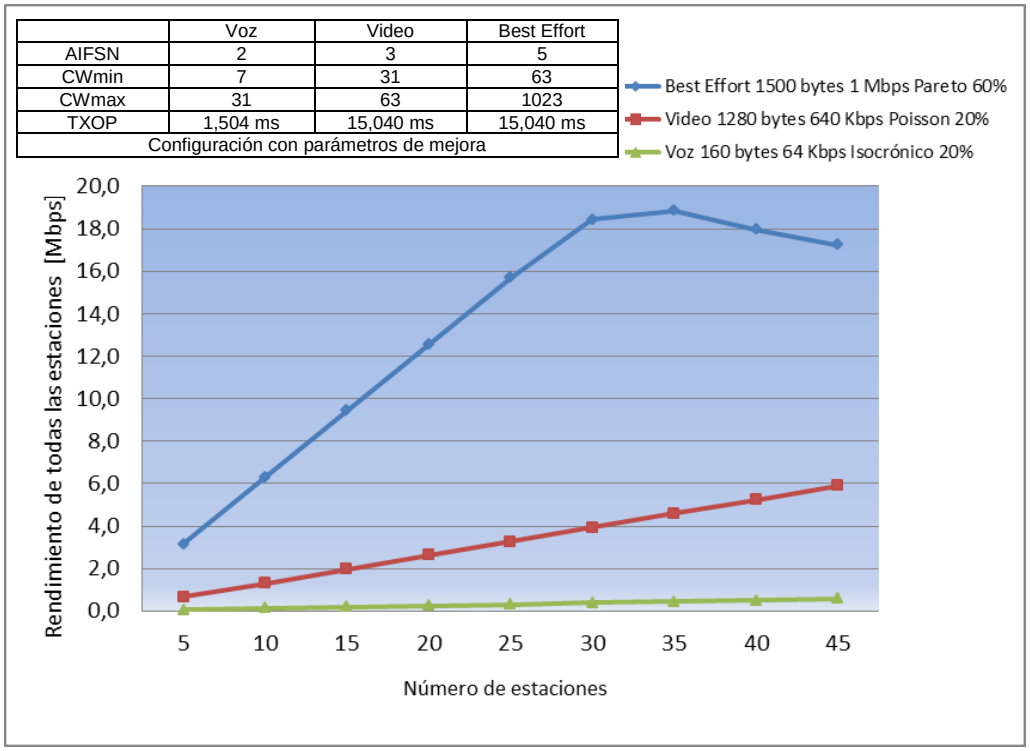


Figura 4.53 Rendimiento de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.3

La Figura 4.54 presenta el rendimiento relativo de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo con los parámetros de mejora. Los tráficos de voz y video aparecen con la mejor respuesta en cuanto a las pérdidas aún para 45 estaciones, pero el de mejor esfuerzo cae rápidamente a partir de las 30 estaciones. La presencia de un 60% de tráfico de mejor esfuerzo, presenta una mayor carga a la red, y afecta negativamente a dicho tráfico.

El tráfico de voz cae menos del 0,15%, mientras que el tráfico de video permanece estable, no superando el 0,4% de pérdida. Por el contrario, el tráfico de mejor esfuerzo, en el mismo escenario, cae un 2,79% para 30 estaciones, y alcanza los 39,34% para 45 estaciones.

En este escenario se repite la protección de los tráficos de mayor prioridad, aun cuando haya una mayor proporción de tráfico de menor prioridad.

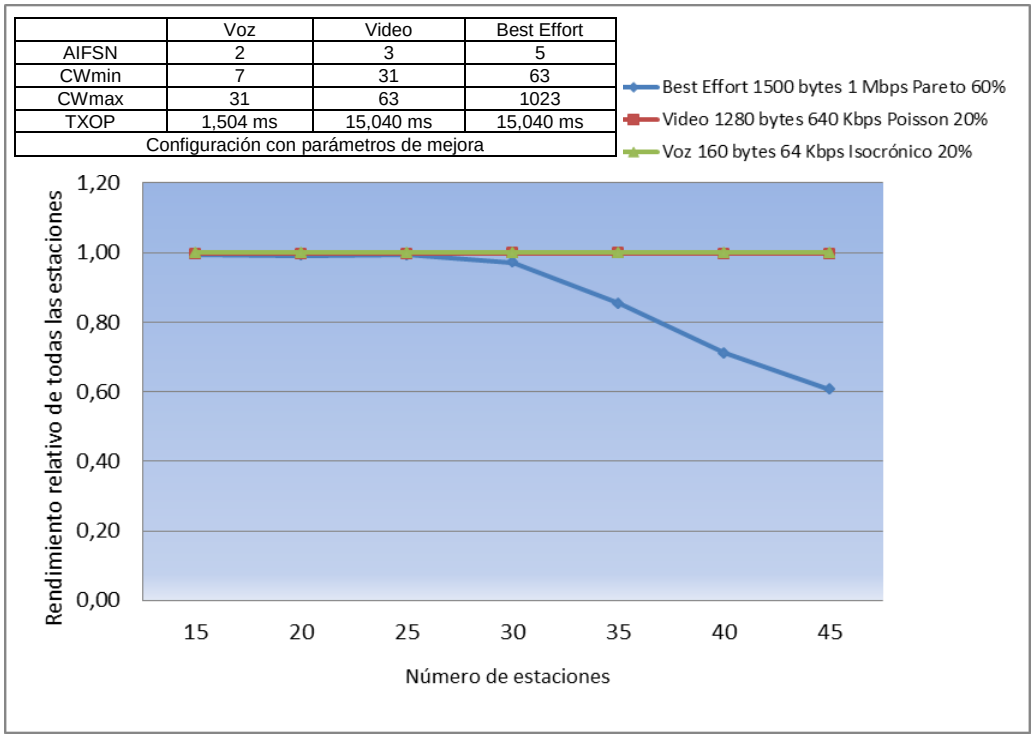


Figura 4.54 Rendimiento relativo de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.3

La Tabla 4.11 resume las características más importantes en los puntos críticos para este escenario.

En las Figuras 4.55, 4.56 y 4.57 se observan las comparaciones del rendimiento directo de los flujos de voz, video y de mejor esfuerzo, y en las Figuras 4.58, 4.59 y 4.60 las comparaciones del rendimiento relativo, configurados con los parámetros de mejora y con los parámetros por defecto.

	Voz	Video	Best Effort
Rendimiento Máximo [Mbps]	0,575	5,894	18,859
Pérdida 1% Rendimiento	-	-	30 estaciones
Pérdida 5 % Rendimiento	-	-	35 estaciones
Pérdida 10 % Rendimiento	-	-	35 estaciones
Retardo de Cola en Rendimiento Máximo [ms]	8,698	23,015	72,050
Retardo de Cola para 25 estaciones [ms]	1,842	1,582	14,381
Retardo de Cola Máximo 45 estaciones [ms]	8,698	23,015	571,975
Tamaño de Cola para 25 estaciones [paquetes]	0,092	0,101	1,254
Tamaño de Cola para 45 estaciones [paquetes]	0,434	1,472	30,031

Tabla 4.11 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 2.3

En la Figura 4.55 se destaca que el tráfico de voz con los parámetros de mejora alcanza un máximo de 0,575 Mbps para 45 estaciones, con una leve mejora del 1,73% respecto a los 0,565 Mpbs para la misma cantidad de estaciones usando los parámetros por defecto.

También se produce una escasa mejora para el tráfico de video, como se muestra en la Figura 4.56. El tráfico de video alcanza un pico de 5,894 Mbps para 45 estaciones, mejorando en 0,12% respecto a los 5,997 Mbps usando la configuración por defecto.

Finalmente, en la Figura 4.57, el tráfico de mejor esfuerzo alcanza un pico de 18,859 Mbps sobre 35 estaciones. Con la configuración por defecto, el máximo rendimiento es de 15,633 Mpbs en 25 estaciones. La mejora es del 20,63% para los parámetros de mejora.

Cuando hay un 60% de tráfico de mejor esfuerzo, no se obtiene una gran diferencia en el rendimiento de los tráficos de voz y video. Si es importante la mejora del 20,63% en el tráfico de mejor esfuerzo. Con esta configuración se ha alcanzado una mejora del rendimiento global promedio de 7%. Este es el escenario con la menor mejora usando los parámetros de mejora.

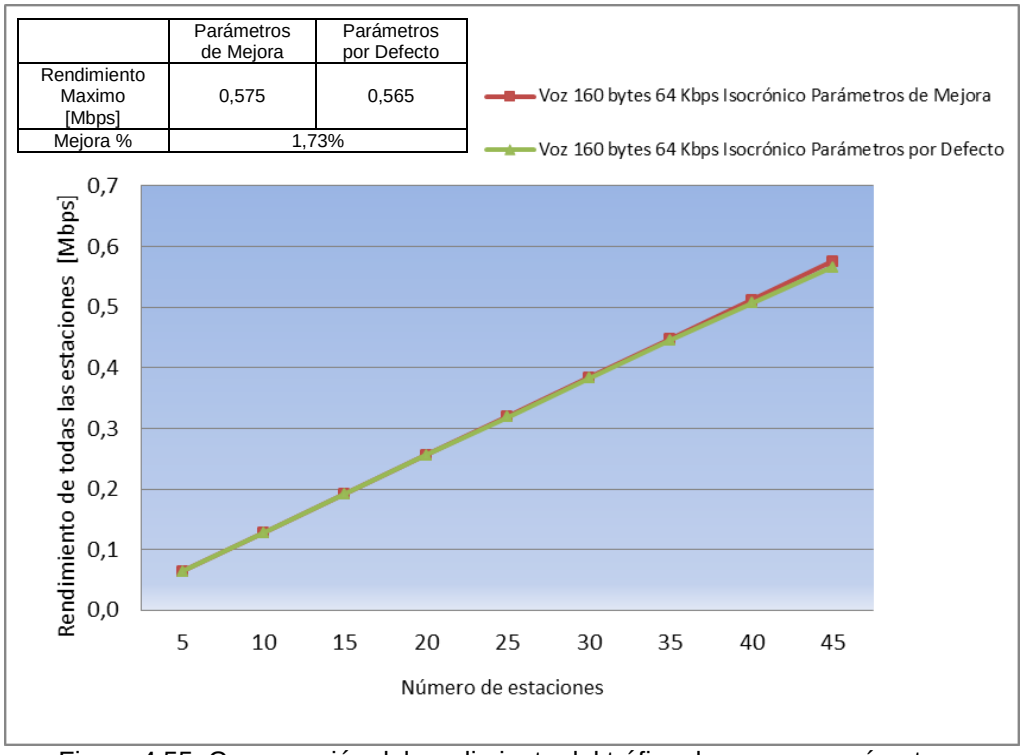


Figura 4.55 Comparación del rendimiento del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.3

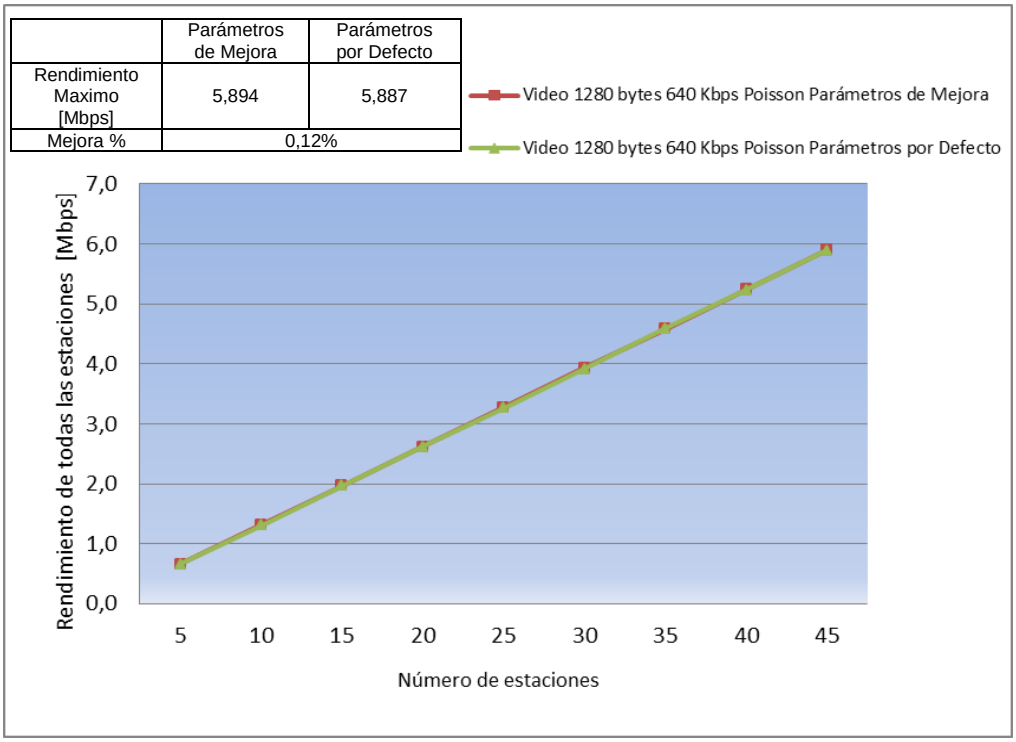


Figura 4.56 Comparación del rendimiento del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.3

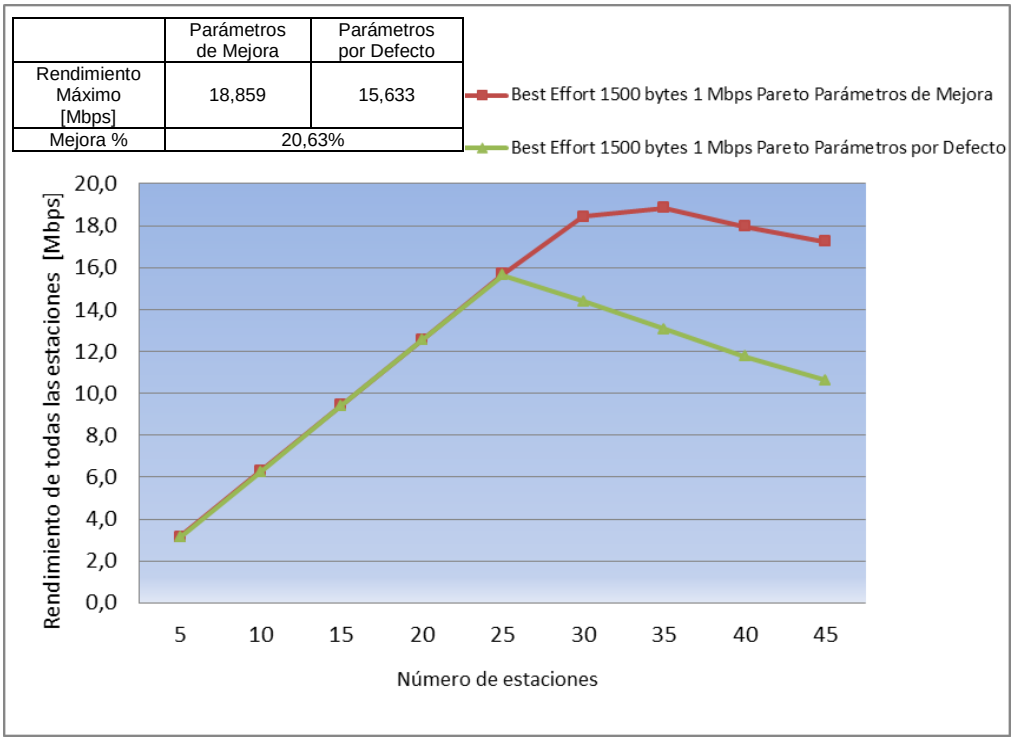


Figura 4.57 Comparación del rendimiento del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.3

Respecto a la comparación sobre el rendimiento relativo de voz para ambas configuraciones, se observa en la Figura 4.58 que el flujo de voz permanece casi sin pérdidas. La pérdida es del 0,06% con 45 estaciones para la configuración óptima, que comparado con el 1,76% de pérdida en la configuración por defecto, implica una mejora de 1,73%. La comparación para el tráfico de video se muestra en la Figura 4.59. El tráfico de video configurado con los parámetros de mejora, presenta una respuesta con una pérdida de 0,40% dentro de las 45 estaciones. Esto significa una mejora del 0,12% respecto a la pérdida de 0,88% cuando la configuración es por defecto. Finalmente, se muestra en la Figura 4.60 la comparación del rendimiento relativo del tráfico de mejor esfuerzo. Para los parámetros de mejora, el umbral de pérdida del 1% se produce en 30 estaciones, y alcanza los 39,34% para 45 estaciones. Usando los parámetros por defecto, la pérdida en 45 estaciones es de 62,38%. Esto significa una mejora del 61,23% cuando se usan los parámetros de mejora para este número máximo de estaciones.

Como en el escenario anterior, se observa que cuando hay una preponderancia del tráfico de mejor esfuerzo, los tráficos de voz y video presentan un muy buen comportamiento con la configuración de mejora.

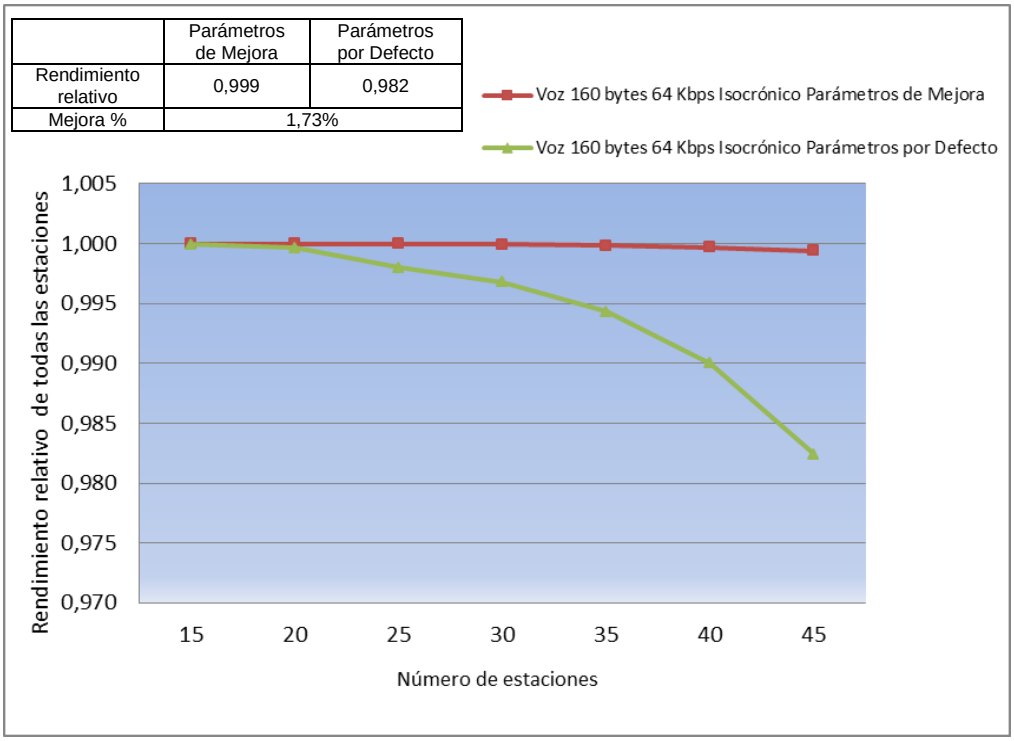


Figura 4.58 Comparación del rendimiento relativo del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.3

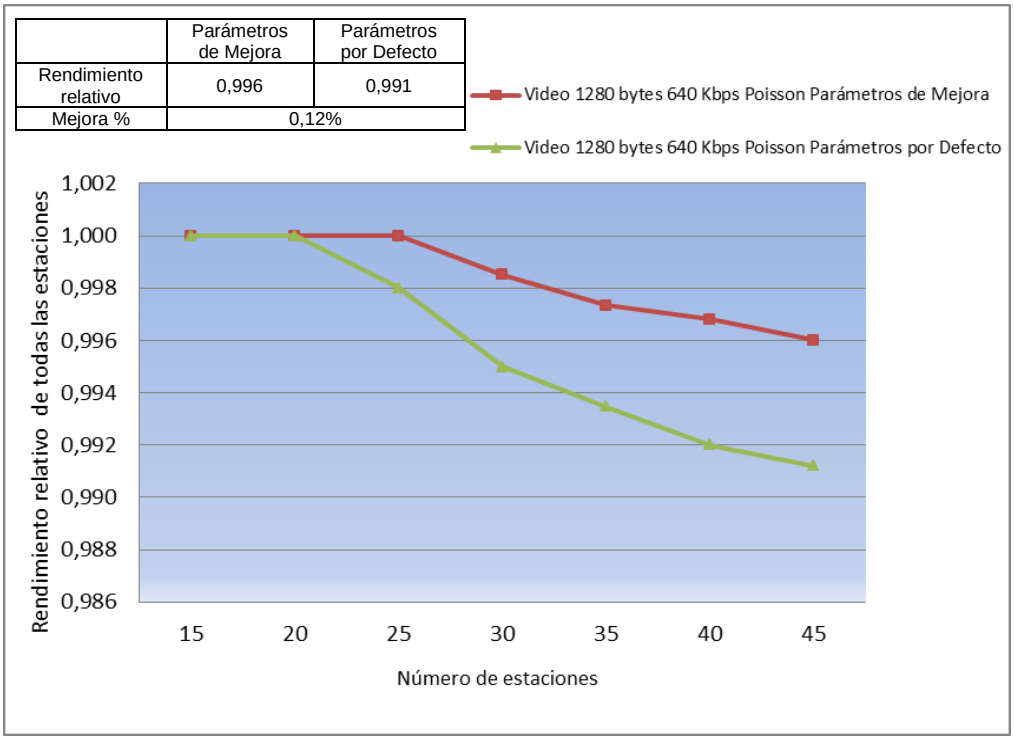


Figura 4.59 Comparación del rendimiento relativo del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.3

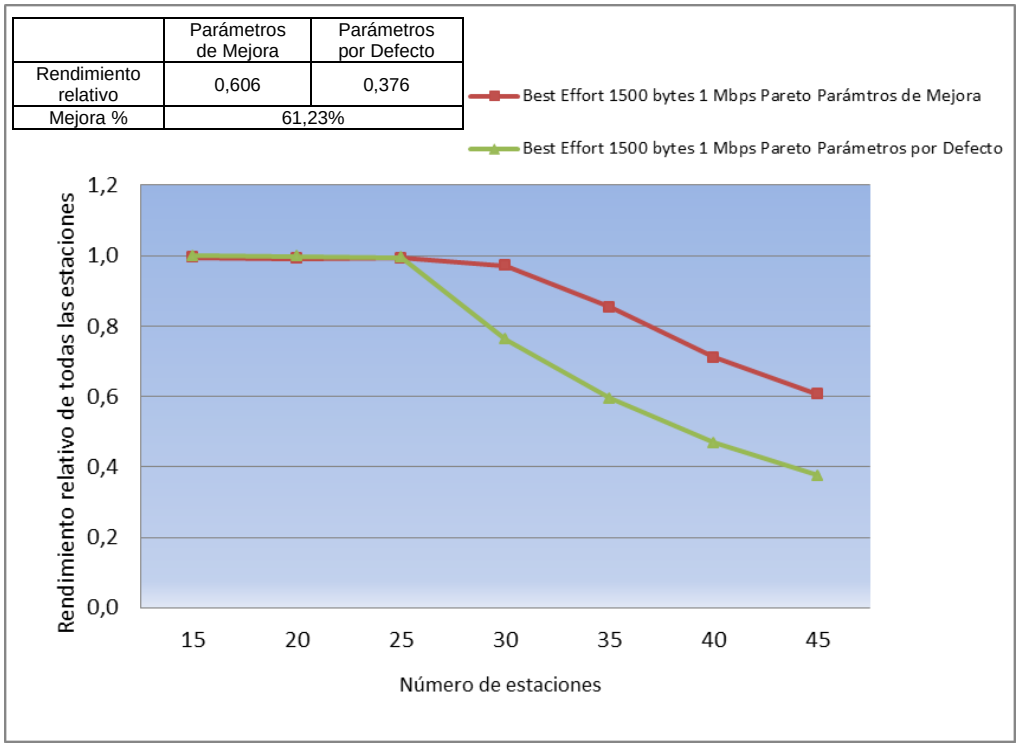


Figura 4.60 Comparación del rendimiento relativo del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.3

IV.5) SUMARIO

En el capitulo se han planteado las limitaciones del protocolo EDCA 802.11e sobre diversos escenarios, cuando se usa la configuración estática por defecto.

Los resultados obtenidos muestran que los valores de los parámetros por defecto no son los que brindan el rendimiento óptimo [81]. Y que el parámetro AIFSN influye más significativamente que los otros parámetros, al efecto de asegurar QoS. Además, se observa la conveniencia de asignar un valor distinto de AIFSN para los flujos de voz, de video y de mejor esfuerzo; y en general, alejar los valores de AIFSN, CWmin y CWmax del tráfico de mejor esfuerzo de los valores usando para el tráfico de video, y estos de los valores usados para el tráfico de voz.

Se ha demostrado, en los diferentes escenarios, que con una selección apropiada de los parámetros EDCA, pueden alcanzarse mejoras individuales significativas para cada tráfico y del rendimiento global de la red. Por ejemplo, para el Escenario 1.1, con todos los tráficos presentes, el tráfico de voz aumenta en un 36%, y la red en su conjunto un 25% adicional, respecto a cuando se usan los parámetros por defecto.

La Tabla 4.12 resume las diferencias porcentuales para las métricas en la configuración óptima respecto a la configuración por defecto, en cada uno de los casos de los Escenarios 1 y 2. El color verde indica una mejora para la métrica, y el color rojo una desmejora. No debe llevar a confusión, especialmente los valores porcentuales altos de desmejora asociados al tráfico de video, dado que los mismos están referidos a tamaños de colas o delays pequeños. El estudio de la Tabla debería complementarse con las Figuras del presente Capítulo y las del Apéndice C.

Configuración óptima vs por defecto	Escenario 1				Escenario 2		
% de Variación	Todo Tráfico	Sin voz	Sin Video	Sin Best Effort	60 % Voz	60% Video	60% BestEffort
Rendimiento Máximo de voz [Mbps]	36,62 %	-	11,37 %	31,96 %	34,60 %	31,76 %	1,73 %
Rendimiento Máximo de video [Mbps]	20,03 %	0,21 %	-	15,88 %	0,99 %	17,04 %	0,12 %
Rendimiento Máximo de best effort [Mbps]	18,87 %	17,77 %	26,77 %	-	11,80 %	12,49 %	20,63 %
Retardo Máximo de Cola de voz [ms]	-30,36 %	-	107,54 %	-72,12 %	-28,39 %	-80,49 %	172,82 %
Retardo Máximo de Cola de video [ms]	304,49 %	1473,92 %	-	-83,87 %	138,40 %	-56,86 %	1148,90 %
Retardo Máximo de Cola de best effort [ms]	-98,87 %	-61,51 %	-78,52 %	-	-86,18 %	-99,31 %	-60,31 %
Tamaño Máximo de Cola de voz [paquetes]	-4,57 %	-	131,13 %	-61,68 %	-3,61 %	-74,51 %	177,54 %
Tamaño Máximo Cola de video [paquetes]	394,32 %	1367,50 %	-	-80,52 %	140,70 %	-49,62 %	1150,56 %
Tamaño Máximo Cola de best effort [paquetes]	-11,92 %	-8,82 %	-69,80 %	-	-81,55 %	-15,20 %	-36,78 %

Tabla 4.12 Resumen de las diferencias porcentuales de las métricas en los puntos críticos

CAPITULO V

MECANISMO DE SINTONIZACIÓN DE PARÁMETROS EDCA: ALGORITMO MTDA

En este Capítulo, se presenta la propuesta de algoritmo de tuning o sintonización MTDA. Para mantener el análisis comparativo con los Capítulos anteriores, el algoritmo adopta como valores de inicialización de los parámetros aquellos denominados de mejora en el Capítulo 4, y se ejecuta sobre los mismos escenarios propuestos en el Capítulo 3. Se demuestra que el algoritmo de sintonización responde a la dinámica de la red para cualquier contexto, adaptando los parámetros EDCA a esa dinámica, y complementando el protocolo, para asegurar las restricciones de QoS para los tráficos de mayor prioridad o de tiempo real, aún en las condiciones de alta carga. Además, se verifica la capacidad de convergencia y la mejora significativa en el rendimiento.

V.1) INTRODUCCIÓN

V.1.1 Definición y Clasificación de Algoritmos de Sintonización

Un algoritmo de sintonización de parámetros EDCA es la función o mecanismo que selecciona los parámetros EDCA futuros a partir de los valores actuales y el estado corriente de la WLAN, que aseguren el cumplimiento de premisas de QoS de uno o más tráficos, con un cierto orden de prioridad, y de la red como un todo.

En [158] se presentan varias clasificaciones de algoritmos de sintonización de los parámetros EDCA. Las mismas se basan en las siguientes consideraciones:

- Estático vs Adaptativo. Los algoritmos de parámetros EDCA estáticos definen parámetros para todas las ACs, y mantienen la configuración sin cambios. Por el contrario, los algoritmos adaptativos son capaces de seleccionar los parámetros más apropiados para cada AC, o para cada estación, con la intención de mejorar y/o mantener la QoS prevista a los flujos activos en cualquier momento específico.
- Basado en Medidas vs Basado en modelo. Otra clasificación está basada sobre el momento en que los parámetros se actualizan. La computación de los nuevos parámetros puede hacerse cuando cambian las métricas medidas, como la carga de las colas AC, el número de estaciones compitiendo o la velocidad de colisión. En el otro extremo, los algoritmos basados en modelos actualizan los parámetros cada vez que un nuevo flujo arriba o deja el sistema.

- Centralizado vs Distribuido. Hay también otro tipo de clasificación que depende sobre la ubicación de la computación de los parámetros EDCA. Es posible decidir los parámetros más apropiados de una forma centralizada en el AP, o de una manera distribuida, en cada una de las estaciones.

También es posible diferenciar los algoritmos a partir de otros criterios. Por ejemplo:

- Según el número de Parámetros EDCA involucrados. El número de parámetros que se cambian es también otro factor de diferenciación entre los varios algoritmos de sintonización de parámetros EDCA. La mayoría de las propuestas sólo consideran el cambio de los parámetros CWmin y CWmax. Otros trabajos sólo varían el AIFS, o el valor TXOP. Muy pocos algoritmos tienen en cuenta dos o tres, o todos los parámetros EDCA.
- Iterativos o no iterativos. En los algoritmos iterativos es más fácil encontrar soluciones casi óptimas cuando puede seleccionarse la configuración más apropiada, aunque la mayoría de ellas no puedan trabajar en tiempo real debido al tiempo requerido para computar la solución. Los algoritmos no iterativos computan los parámetros EDCA para una configuración de red dada basados sobre diferentes métricas (número de flujos, carga, rendimiento, etc.).

V.1.2 Algoritmos de Sintonización

V.1.2.1 Visión de antecedentes de los Algoritmos de Sintonización

Hay numerosos trabajos previos focalizados para el soporte de QoS en EDCA IEEE 802.11e. Los autores [158-179] han propuesto diferentes algoritmos de sintonización para mejorar la utilización del canal y responder a las consignas de QoS para las aplicaciones multimedia.

En [158] se analizan los aspectos relevantes de varios algoritmos de sintonización dados en [159-162] (estos algoritmos se analizan en más detalle en el apartado V.1.2.2). En los mismos sólo se consideran dos tipos de tráficos: de voz y de mejor esfuerzo. Todos estos algoritmos pueden ser categorizados como algoritmos de sintonización basados en modelo y centralizados, y pueden ser analizados comparativamente desde la cuenta de parámetros objeto de sintonización. Dos algoritmos son representativos de aquellos que trabajan sobre un sólo parámetro. Tal es el caso de la solución dada en [159] y es el algoritmo más simple considerado. Usa una configuración fija para todos los parámetros, excepto para la ventana de contención de flujos no sensibles (mejor esfuerzo). El objetivo de la propuesta es la protección del tráfico de VoIP respecto a cualquier otro tipo de tráfico Wi-Fi. La modelación se realizó

usando cadenas de Markov. Para ilustrar el comportamiento se consideró un escenario con estaciones de VoIP con tráfico isocrónico y otro número similar con tráfico Poisson. Los resultados de los estudios se obtuvieron a través de un simulador orientado a eventos desarrollado en C++, que refleja el comportamiento del mecanismo EDCA en cada estación. Otra propuesta es el algoritmo presentado en [160], donde se provee una búsqueda iterativa del parámetro EDCA CWmin. El resto de los parámetros toman los valores por defecto del estándar IEEE 802.11e. El algoritmo fue evaluado usando el simulador NS2 sobre un escenario de inicialmente 13 estaciones, agregando posteriormente 20 estaciones más, y luego reduciendo la cantidad a 10. Cada estación es una fuente de tráfico con distribución exponencial o Pareto. El trabajo se focalizó sobre las métricas de rendimiento y delay.

En [161] se presenta el caso de un algoritmo que efectúa la sintonización usando dos parámetros EDCA. Se trata de un algoritmo no iterativo para ajustar el TXOP y la CWmin en función del rendimiento demandado y el número de estaciones de cada tipo de tráfico. Los autores también evaluaron los ajustes usando el parámetro AIFS, aunque a su entender los resultados no produjeron niveles de utilización razonable. El algoritmo fue evaluado usando la herramienta de simulación NS2. La topología de la red consideró tráfico de voz a tasa constante, tráfico de video MPEG usando trazas de video disponibles, y fuentes de tráfico de mejor esfuerzo.

Otros algoritmos más sofisticados consideran la sintonización de tres parámetros EDCA (aunque no todos). El algoritmo analizado en [162] aparte de considerar los parámetros CWmin y TXOP, adicionalmente tiene en cuenta el parámetro AIFS. Este algoritmo tiene en cuenta procesos de optimización max-min para la selección de los parámetros. La modelación se realizó analíticamente y se comparó con los obtenidos a través de un modelo EDCA IEEE 802.11e usando el paquete de simulación COST (Component Oriented Simulation Toolkit). Los ensayos se realizaron considerando escenarios con una combinación de tráfico de VoIP y de mejor esfuerzo.

A diferencia de los algoritmos anteriores, en [163] se considera la utilización de escenarios con tráficos de voz, video y datos. El algoritmo adapta dinámicamente los parámetros CWmin, CWmax y TXOP (no incluye AIFSN). El trabajo introduce como novedad el cálculo de los intentos de transmisiones no exitosas como variable en el algoritmo. El algoritmo fue evaluado por simulaciones usando el simulador OPNET combinado con implementaciones C++. Se evaluaron tres escenarios. Las simulaciones se obtuvieron sobre tráfico heterogéneo incluyendo voz,

video y mejor esfuerzo, haciendo énfasis sobre los parámetros CWmax y Cwmin.

Algunas otras propuestas de mecanismos para ajustar los parámetros EDCA tienen sus particularidades funcionales o ciertas aplicaciones en mente. En [164] se trata de una aproximación para el suministro de QoS usando las TXOP. El objetivo fue la mejora del rendimiento WLAN en presencia de ráfagas de paquetes. En el estudio, basándose en modelos analíticos de EDCA, se propuso GTXOP (Game TXOP) para determinar dinámicamente el valor de TXOP, de acuerdo al comportamiento de las redes WLANs y el número de nodos en la red. Efectivamente, usando GTXOP cada nodo puede elegir su TXOP autónomamente, para una mejora en su QoS, y en el rendimiento global de la red. La modelación fue analítica, considerando un escenario con 25 estaciones, con un solo tipo de tráfico y paquetes de la misma longitud. Los parámetros AIFSN, CWmin y CWmax se configuraron con los valores por defecto.

En la misma línea, otros trabajos están direccionados a la mejora a través del parámetro TXOP. Por ejemplo, en [165] se desarrolló un modelo analítico para la red EDCA y se la validó con un modelo de simulación. Los autores verificaron en sus experimentos que el ajuste de TXOP de acuerdo con la distribución del tamaño de la ráfaga puede mejorar considerablemente el rendimiento de la red y el retardo de la ráfaga. Aunque se aclara que la asignación de grandes TXOP puede comprometer la QoS por denegación de servicio. La modelación se hizo con cadenas de Markov y se verificó con el simulador OPNET.

En [166] también se utiliza como variable de sintonización el parámetro TXOP, pero asignado en función de la carga variable de la red. El modelo analítico utilizado plantea la complejidad de la interacción entre TXOP, por un lado, y AIFSN y la ventana de contención por otro. El análisis se derivó sobre puntos de saturación y estabilidad para las 4 clases de tráfico y se discute su dependencia sobre las asignaciones de TXOP. Para la modelación se utilizó cadenas de Markov, con un escenario de 80 estaciones con un simple tráfico con distribución Poisson. Mientras que en [167] la propuesta está dirigida a la transmisión de video eficiente sobre EDCA IEEE 802.11e, con el objetivo de minimizar su retardo. En el trabajo se propone un algoritmo que ajusta los parámetros EDCA para transportar tráfico de video a partir de un modelo analítico usado para derivar el punto de operación óptimo de EDCA. La modelación utilizó cadenas de Markov y se verificó con el simulador OPNET++, con sólo tráfico de video.

Otros trabajos realizan sintonización usando sólo la ventana de contención. Por ejemplo, en [168] se propuso un modelo analítico para redes EDCA IEEE 802.11e para obtener el rendimiento máximo de la red con diversos tamaños de ventana backoff. El modelo se construyó con cadenas de Markov y se constató con el simulador NS-2. Todos los nodos se configuraron con el mismos AIFSN y el escenario no preveía errores. De igual forma, en [169] se muestra el impacto de la manipulación de los parámetros de la ventana de contención de EDCA. Se presentan dos diferentes algoritmos de contención adaptativos que mejoran el rendimiento en saturación sobre los valores estáticos de 802.11e. La verificación se realizó a través de un algoritmo analítico. En [170] se presenta una aproximación que divide la ventana de contención de las categorías de acceso en diferentes subventanas, asegurando que esta partición disminuye las colisiones del canal, mientras mantiene un bajo retardo y rendimiento alto. La división de las ventanas considera los requerimientos de las aplicaciones y las condiciones de la red. La modelación y simulación se realizó utilizando OPNET. El escenario consideraba 6 estaciones origen, 6 estaciones de recepción y 1 AP. Las STA origen transmiten 4 tipos de tráfico isocrónico. Por último, en [171] se utiliza una aproximación para controlar la optimización del rendimiento EDCA. El trabajo propone una aproximación teórica de control para adaptar la ventana de contención a las condiciones de la red, en base a un modelo analítico. Se usa un controlador integrador proporcional para derivar el punto de operación óptima y determinar su configuración. La modelación analítica se realiza usando un simulador custom escrito en C/C++.

Otros estudios y desarrollos son más generales, aunque conservan sus particularidades en cuanto a la configuración de los escenarios o tipos de tráficos de los mismos. En [172] se estudia el impacto de la asignación de los parámetros TXOP y AFISN sobre una red bajo carga variable. La carga se modifica cambiando los parámetros de los procesos de arribo, y lógicamente, la población de nodos de la red. En el primer caso, se varía el proceso de arribo alterando la distribución del tamaño de ráfaga, el tamaño de ráfaga media, el tamaño de trama y las velocidades de arribo. Se utilizó el simulador OPNET, con un escenario de 5 estaciones de cada tipo de tráfico con distribución Poisson, manteniendo CWmin y CWmax constantes. Mientras que en [173] se plantea el análisis del comportamiento de EDCA con AIFSN, CWmin y CWmax con valores fijos, y TXOP con valores variables. Con la variación del valor de TXOP se obtuvo estabilidad de rendimiento y retardo mínimo. La modelación se realizó usando el simulador QualNet 5.0.2 en un escenario de 24 estaciones con flujos CBR con distintas prioridades.

Un trabajo similar se presenta en [174] buscando la configuración óptima de los parámetros EDCA para tráfico de tiempo real y de datos. Se propone un algoritmo novel para satisfacer los requerimientos de rendimiento y retardo de las estaciones que están presentes en la WLAN, y computar la configuración óptima de los parámetros EDCA. Se presenta un análisis matemático de los fundamentos enunciados y se validan por simulaciones usando OPNET. Mientras que en [175] se plantea un mecanismo similar que ajusta los parámetros de QoS entre la llamada del control de admisión y el control de velocidad para realzar el mecanismo de acceso EDCA. Las prestaciones de la propuesta se analizó usando OPNET. El escenario tenía 20 nodos con tráfico de voz, video y background. La sintonización ajusta la categoría de acceso AC y la ventana de contención CW. Las métricas se muestran en función del tiempo. Y en [176] se evalúa, a través de simulaciones, los beneficios de EDCA IEEE 802.11e. Las simulaciones se han hecho teniendo en cuenta los efectos de las estaciones ocultas, y adoptando los parámetros apropiados para simular los canales 802.11e tan exactamente posible. La simulación se realizó con NS-2. El escenario contiene 8 estaciones inyectando tráfico de voz y video CBR, y tráfico TCP.

Finalmente, hay diversos trabajos que plantean y/o implementan ciertas soluciones con características particulares. En [177] se plantea una solución de QoS práctica para VoIP en redes 802.11. El trabajo propone la configuración de los parámetros EDCA para diferentes tipos de tráfico. El análisis experimental verificó que los parámetros EDCA de los APs no son siempre más agresivos que los de las estaciones. Se propone un mecanismo para configurar el conjunto de parámetros EDCA de productos telefónicos Wi-Fi vía una interface software, sin necesidad de modificar las operaciones de los APs y los protocolos de capa MAC. La simulación se realizó usando NS-2. Mientras que en [178] se presenta una evaluación experimental real sobre la capacidad del mecanismo EDCA para soportar tráfico de voz en una transmisión que mezcla voz y datos, sintonizando los parámetros. Verificaron que el parámetro AIFSN protege más efectivamente el tráfico de voz, mientras que TXOP no mejora su calidad. El escenario experimental utilizó 15 PCs como estaciones de voz bidireccional y una PC generadora de tráfico background. Modificaron los parámetros usando el driver MADWiFi. Y en [179] se propone un control de admisión que trabaja en conjunto con un algoritmo de sintonización que decide la configuración más apropiada de todos los parámetros EDCA, cada vez que un flujo arriba o deja el sistema. Los escenarios son heterogéneos, incluyendo flujos elásticos y de tiempo real. La modelación es analítica y el escenario incluye 4 estaciones de voz bidireccional, 2 estaciones punto a punto de tráfico descendente, 2 estaciones web y de 0 a 25 estaciones punto a punto de tráfico ascendente.

V.1.2.2 Detalles de antecedentes de los Algoritmos de Sintonización

En esta sección se presentan los algoritmos de los trabajos en [159-162]. Los algoritmos consideran dos ACs: tráfico de voz (*v*) y tráfico de mejor esfuerzo (*e*). Cuando no se especifica un subíndice se considera que se está utilizando el mismo valor de parámetro EDCA para ambos tráficos. Para diferenciar entre tráfico ascendente y descendente, se utilizan los subíndices *u* y *d*, respectivamente. Si no se usa ninguno de los subíndices, los valores se aplican a ambos tipos de flujos. Finalmente, la nomenclatura utilizada considera en los algoritmos que:

- ξ: son los requerimientos de ancho de banda de todas las clases de tráficos definidas,
- ζ: es un parámetro booleano que determina si se cumplen los requerimientos de ancho de banda de todos los diferentes flujos.
- EstimateHotspotPerformance: es una función que retorna el rendimiento del sistema (ancho de banda, retardo promedio, pérdida de paquetes promedio, etc.) para cada flujo. El rendimiento puede computarse a través de un modelo analítico o estimándolo desde las mediciones.
- θ y ϕ: Se considera que los parámetros MAC solo cambian cuando un nuevo flujo arriba o un flujo activo se anula. En la siguiente expresión, el parámetro φ representa el cambio sobre el estado del sistema en t+1, con respecto al estado corriente en el tiempo t(ϕ((t)).

$$(\theta(t+1), \phi(t+1)) = f(\theta(t), \phi(t) + \varphi(t+1))$$

Donde f da un nuevo conjunto de parámetros θ(t+1), que se refiere a los siguientes parámetros MAC: CWmin, CWmax, AIFSN y TXOP, y en un nuevo estado ϕ(t+1), que representa el número de flujo activos y sus características.

A continuación se detalla el algoritmo introducido en [159]:

1: Inicializar los parámetros MAC
2: **Lazo**
3: **Esperar** por una nueva solicitud de flujo
4: Almacenar ($CW_{min,e}$, $CW_{max,e}$)
5: Set $CW_{min,e}$ = min(1024, n_ex16)
6: Set $CW_{max,e}$ = min(1024, 32x$CW_{min,e}$)
7: ζ = EstimateHotspotPerformance(ϕ, θ, ξ)
8: **si** (ζ = 1) **entonces**
9: Aceptar solicitud entrante

10: **de lo contrario**
11: Rechazar solicitud entrante
12: Restaurar ($CW_{min,e}$, $CW_{max,e}$)
13: **fin si**
14: **fin lazo**

En el algoritmo se observa que $CW_{min,e}$ y $CW_{max,e}$ son variables y dependen del número de estaciones elásticas compitiendo (n_e), de acuerdo a las líneas 5-6. No hay diferencias entre los flujos ascendentes y descendentes. La propuesta es conservadora, porque da una alta prioridad de acceso al canal para los paquetes de VoIP, configurando $TXOP_v$ = 10, $AIFSN_v$ = 2 (valor por defecto) y $CW_{min,v}$ = $CW_{max,v}$ = 32. Mientras que el algoritmo es muy restrictivo con el flujo elástico, configurando $TXOP_e$ = 1, y especialmente, $AIFSN_e$ = 15.

La lógica del algoritmo discutido en [160] es:

1: Inicializar lo parámetros MAC
2: Inicializar los parámetros del algoritmo:
$W = 320$, $\Delta_{SF} = 0.1$, $SF = \Delta_{SF}$
3: Inicializar las variables del algoritmo
$\zeta_{iter-1} = 0$, $S_{e,iter-1} = 0$
4: **lazo**
5: **Esperar** por una nueva solicitud de flujo
6: Almacenar ($CW_{min,e}$)
7: **Mientras** ($\Delta_{SF} < W/100$) **haga**
8: $CW_{min,e} = WxSF$
9: (ζ_{iter-1},$S_{e,iter-1}$) = EstimateHotspotPerformance(ϕ, θ, ξ)
10: **Si** ($\zeta_{iter-1} = 1$ && $\zeta_{iter} = 1$ && $S_e <= S_{e,iter-1}$) **entonces**
11: Restaurar los últimos parámetros de configuración: $\xi(iter\text{-}1)$
12: break
13: **de lo contrario si** ($\zeta_{iter-1} = 0$ && $\zeta_{iter} = 1$ && $S_e <= S_{e,iter-1}$)
entonces
14: break
15: **fin si**
16: $SF = SF + \Delta_{SF}$
17: $\zeta_{iter-1} = \zeta_{iter}$
18: $S_{e,iter-1} = S_{e,iter}$
19: **fin mientras**
20: **si** $\zeta_{iter} = 1$ **entonces**
21: Aceptar solicitud entrante

22: **de lo contrario**
23: Rechazar solicitud entrante
24: Restaurar ($CW_{min,e}$)
25: **fin si**
26: **fin lazo**

El algoritmo busca iterativamente la configuración óptima del parámetro $CW_{min,e}$, mientras los otros parámetros conservan los valores EDCA por defecto. El objetivo es maximizar el rendimiento. En la línea 8 se observa el núcleo del algoritmo. Se trata de un simple incremento iterativo del parámetro $CW_{min,e}$ de la ventana de contención, controlado por los parámetros Δ_{SF} y SF (valor inicial). Mientras se esté en el rango de valores posibles de $CW_{min,e}$ (a lo sumo 1024) el algoritmo se ejecuta hasta que se obtienen los requerimientos de ancho de banda ξ de los flujos sensibles o hasta que se alcanza el máximo rendimiento agregado de los todos los flujos. Cuando hay flujos de VoIP y elásticos simultáneamente, los incrementos de $CW_{min,e}$ a valores mayores incrementan la protección de los flujos rígidos al reducir la contención del canal.

A continuación se detalla el algoritmo presentado en [161]:

1: Inicializar los parámetros MAC
2: $TXOP_{e,u} = 1$
3: $TXOP_{v,u} = 1$
4: **lazo**
5: **Espera**r por una nueva solicitud de flujo
6: Almacenar ($TXOP_{e,u}$,$TXOP_{v,u}$,$CW_{min,e}$,$CW_{min,v}$)
7: **si** ($n_v > 0$ && $n_e > 0$) **entonces**
8: $TXOP_{v,u} = (B_v/B_{e,min})$
9: **fin si**
10: $TXOP_{v,d} = TXOP_{v,u} \times n_v$
11: $TXOP_{e,d} = TXOP_{e,u} \times n_{e,d}$
12: **si** ($n_v > CW_{min,v}$) **entonces**
13: $CW_{min,v} = 2 \times CW_{min,v}$
14: **de lo contrario si** ($n_v < CW_{min,v}/2$) **entonces**
15: $CW_{min,v} = CW_{min,v}/2$
16: **fin si**
17: $CW_{min,e} = CW_{min,v}$
18: **si** ($n_e > CW_{min,e}$) **entonces**
19: $CW_{min,e} = 2 \times CW_{min,e}$
20: **de lo contrario si** ($n_e < CW_{min,e}/2$) **entonces**
21: $CW_{min,e} = CW_{min,e}/2$
22: **fin si**
23: [ζ] = EstimateHotspotPerformance(ϕ, θ, ξ)

24: **si** (ζ = 1) **entonces**
25: Aceptar Flujo
26: **de lo contrario**
27: Rechazar Flujo
28: Restaurar ($TXOP_{e,u}$,$TXOP_{v,u}$,$CW_{min,e}$,$CW_{min,v}$)
29: **fin si**
30: **sin lazo**

En este algoritmo, los parámetros CWmin y TXOP de todas las clases de tráfico se ajustan dependiendo del rendimiento requerido y el número de estaciones de cada clase (n). El resto de los parámetros toman los valores EDCA por defecto. Inicialmente, el TXOP de la clase con requerimientos de ancho de banda más baja (B_{lw}) se configura a 1 y el TXOP de la clase con requerimientos de ancho de banda más alto (B_{hg}) se configura dependiendo de la relación entre las pautas de las dos clases (B_{hg}/B_{lw}). Este paso se enuncia en la línea 8 del algoritmo. Luego, el TXOP en el enlace descendiente ($TXOP_d$) también se incrementa por el número de flujos activos en el enlace descendentes a los efectos de mitigar los problemas de desequilibrios entre los flujos ascendentes y descendentes (observar líneas 10 y 11). El parámetro CW_{min} se configura dependiendo del número de estaciones compitiendo de cada clase. Cada clase ajusta el valor de CW_{min} independientemente de las otras clases, de acuerdo a las líneas 12 a 22. Básicamente, el $CW_{min,a}$ de la clase a se duplica si el número de estaciones en esa clase excede el valor corriente CW_{min},a o se divide por dos si el número de estaciones es más pequeño que la mitad del CW_{min} corriente. Sin embargo, el $CW_{min,b}$ inicial de la clase b, con prioridad más baja que la clase a se configura siempre al valor $CW_{min,a}$ actual.

El valor de TXOP se ajusta proporcionalmente a los requerimientos de ancho de banda de cada clase, y el valor de CWmin en base al número de estaciones compitiendo en cada clase.

Finalmente se presenta el algoritmo discutido en [162]:

1: Inicializar los parámetros MAC
2: **lazo**
3: **Esperar** por una nueva solicitud de flujo
4: Almacenar ($CW_{min,e}$,$TXOP_v$,$AIFSN_e$,$TXOP_e$)
5: $CW_{min,e,u} = n_{e,u}$ x 32
6: **mientras** (ζ = 0 && $TXOP_{e,u}$ < 1) **haga**
7: $TXOP_{v,u} = TXOP_{v,u} + 1$
8: $TXOP_{v,d} = TXOP_{v,u}$ x n_v
9: [ζ] = EstimateHotspotPerformance(ϕ, θ, ξ)
10: **si** (ζ = 1) **entonces**

11: break
12: **fin si**
13: $AIFSN_{e,u} = AIFSN_{e,u} - 1$
14: $AIFSN_{e,d} = AIFSN_{e,u} - 1$
15: [ζ] = EstimateHotspotPerformance(ϕ, θ, ξ)
16: **si** ($\zeta = 1$) **entonces**
17: break
18: **fin si**
19: $TXOP_{e,u} = 1$
20: $TXOP_{e,d} = TXOP_{e,u} \times n_{e,d}$
21: [ζ] = EstimateHotspotPerformance(ϕ, θ, ξ)
22: **si** ($\zeta = 1$) **entonces**
23: break
24: **fin si**
25: **fin mientras**
26: **mientras** ($CW_{min,e,d} < 1024$) **haga**
27: $CW_{min,e,d} = 2 \times CW_{min,e,d}$
28: [ζ] = EstimateHotspotPerformance(ϕ, θ, ξ)
29: **si** ($\zeta = 1$) **entonces**
30: break
31: **fin si**
32: **fin mientras**
33: **si** ($\zeta = 1$) **entonces**
34: Aceptar Flujo
35: **de lo contrario**
36: Rechazar Flujo
37: Restaurar ($CW_{min,e}$,$TXOP_v$,$AIFSN_e$,$TXOP_e$)
38: **fin si**
39: **fin lazo**

Este algoritmo fue diseñado con el objeto de incrementar el rendimiento de los flujos elásticos, especialmente cuando el número de flujos de VoIP es bajo. Cuando el número de flujos de VoIP se incrementa, el algoritmo sintoniza los parámetros MAC para favorecer la protección del tráfico de voz.

El único parámetro que se ajusta en los flujos de VoIP es $TXOP_v$, mientras que en los flujos elásticos se sintonizan los parámetros $CW_{min,e}$,$TXOP_e$, y $AIFSN_e$. Todos los parámetros EDCA se inicializan con el objetivo de incrementar el rendimiento elástico con los siguientes valores: $CW_{min,e} = 32$, $TXOP_v = 1$, $AIFSN_e = 3$ y $TXOP_e = 10$. Estos parámetros se ajustan secuencialmente con un cambio por iteración, para incrementar la protección de VoIP. Para controlar los problemas de desequilibrios se consideran las siguientes configuraciones: el valor de

AIFSN se disminuye en 1 para el enlace descendente, el TXOP en el enlace descendente se configura a $n_{e,d}$ veces el TXOP en el enlace ascendente (línea 20), donde $n_{e,d}$ es el número de flujos activos elásticos descendentes, y el $CW_{min,e,u}$ se ajusta dependiendo del número de flujos activos elásticos en el enlace ascendente $n_{e,u}$ (línea 5).

V.1.2.3 Aspectos relevantes hacia un análisis comparativo de los Algoritmos de Sintonización

Desde el punto de vista de la evolución de la investigación de la temática de los algoritmos de sintonización de los parámetros EDCA en redes Wi-Fi, cada uno de los trabajos discutidos sintéticamente (y otros no referenciados por brevedad), han sido parte del desarrollo general del tema. Sin embargo, lamentablemente, no se encuentra una uniformidad en los escenarios de experimentación, en la cantidad y tipos de tráfico, en la cantidad de parámetros EDCA, ni una descripción detallada de las metodologías utilizadas para la obtención de las métricas de las prestaciones. Además, en la mayoría de los casos se utilizan modelos analíticos EDCA, no se soportan distribuciones de tráfico avanzadas (sólo Poisson y/o CBR), y no se realizan especificaciones claras sobre los modelos de error que afectan los escenarios (estas observaciones fueron tratadas previamente, especialmente en el Capítulo 2).

Además, se observa que preliminarmente no se han realizado estudios detallados para el análisis del comportamiento naturalmente dinámico de las redes Wi-Fi con QoS, ni para evaluar el impacto ante los cambios de los valores de los parámetros EDCA IEEE 802.11e en las diversas métricas de prestaciones de la red. Por otro lado, se trabaja con uno o muy pocos escenarios de experimentación que impiden la obtención de conclusiones más generales. Estos aspectos complican en su conjunto las comparaciones entre estos trabajos contemporáneos entre sí, y los previos.

Atento a ello, y para mantener el análisis comparativo con los Capítulos anteriores, y la evolución histórica de trabajos de reconocido prestigio internacional sobre QoS (Cap. II.4), se tienen especialmente en cuenta los valores de los parámetros de mejora del Capítulo 4, y los mismos escenarios propuestos en el Capítulo 3.

V.1.2.4 Funcionamiento conjunto de un Algoritmo de Sintonización y un Algoritmo de Control de Admisión

Finalmente, se destaca que en todos los casos se asume que los algoritmos de sintonización trabajan conjuntamente con un algoritmo de Control de Llamada de Admisión (Call Admission Control - CAC) también

especificado por la IEEE 802.11e [82]. Estos aspectos serán tratados con más detalle en el Capítulo 6.

Cuando un nuevo flujo arriba al sistema, envía una solicitud de stream ADD de tráfico (ADD traffic stream - ADDTS) al CAC incluyendo sus propias especificaciones de flujo de tráfico (Traffic flow SPECifications - TSPEC). Sobre la recepción de un mensaje ADDTS, el CAC basado en la información TSPEC y el estado de la red, decide si el nuevo flujo puede ser aceptado para sintonizar los parámetros EDCA (siguiendo el algoritmo especificado). Sólo si se satisfacen los requerimientos de QoS establecidos para los flujos activos, se acepta el nuevo flujo. De otro modo, se rechaza el flujo y se conservan los parámetros EDCA previos. Alternativamente, cuando un flujo deja el sistema, se asume que también notifica el CAC enviando un stream DELete de tráfico (DELete traffic stream - DELTS); en este caso el CAC también computa los nuevos parámetros EDCA de trabajo siguiendo el algoritmo especificado. Este tópico será retomado en el Capítulo 6.

Los modelos analíticos (Cap. II.2.1) han sido considerados habitualmente como el recurso por defecto para el cálculo y evaluación de factibilidad ante una llamada de admisión. En [180] se presenta un modelo EDCA IEEE 802.11e, que se observa como una alternativa apropiada para su evaluación con dicho objeto, dado que ofrece buena escalabilidad, rápida computación, y diferenciación de los 4 parámetros EDCA.

V.2) ALGORITMO DE SINTONIZACIÓN MTDA [75-76]

V.2.1 Aspectos Generales

El objetivo del trabajo fue proponer y experimentar por simulación un algoritmo de sintonización, que llamamos MTDA (Algoritmo de Diferenciación de Tráfico Múltiple). Se trata de un algoritmo adaptativo, basado en modelos, centralizado e iterativo.

A mayor conocimiento del tesista, este es el único algoritmo de sintonización evaluado sobre una modelación que implementa EDCA 802.11e de manera precisa, usando HSANs como herramienta matemática de modelación, estableciendo una nueva referencia comparativa a los algoritmos propuestos y evaluados con otras técnicas de simulación (OPNET, NS-2 o NS-3, QualNet, cadenas de Markov, desarrollos custom, etc.).

Además, introduce las siguientes novedades:

- Plantea la protección de los flujos prioritarios (voz y video) con el uso de los parámetros AIFSN, CWmax y CWmin (con cambios de menor a mayor), y de los flujos no prioritarios (mejor esfuerzo) con el parámetro TXOP (con cambios de mayor a menor).
- Incluye todos los parámetros EDCA (AIFSN, CWmin, CWmax, y TXOP), pero priorizando el impacto del parámetro AIFSN.
- Ha sido evaluado detalladamente en escenarios (Escenario 1.1 y Escenario 2.1) más realistas que tienen en cuenta la diversidad del tráfico presente y ruido en el canal,
- Posee una inicialización algorítmica efectiva y de rápida convergencia, usando los parámetros EDCA de mejora (Cap. IV), apropiados a la situación de la red y al tipo de tráficos presentes,
- Generaliza y extiende el concepto de dinámica de los parámetros EDCA, a todos los escenarios de red posibles, que son propios de un ambiente de red naturalmente dinámico. Los valores de inicialización de los parámetros EDCA depende de los tráficos presentes,
- El análisis de su comportamiento se ha efectuado sobre restricciones de QoS perfectamente establecidas, entre otros aspectos.

Se planteó como objetivo que el algoritmo de sintonización de los parámetros EDCA permitiera:

a) una diferenciación de tráfico dinámica que incremente la prioridad (y así la protección) de los flujos de tiempo real, manteniendo niveles de rendimiento o de pérdidas establecidos,
b) Maximizar el rendimiento agregado obtenido en la red para los diferentes flujos, incluyendo los otros no prioritarios elásticos, y
c) Asegurar la adaptación a los cambios sobre el estado de la WLAN (definido como la mezcla instantánea de los flujos activos) encontrando la asignación más apropiada de los recursos del canal en cada situación.

El diseño del algoritmo de sintonización EDCA tuvo especialmente en cuenta los valores de inicialización y el rango de valores posibles de los parámetros, y el estado dinámico del sistema buscando los puntos de mejora, indiferente de los cambios aleatorios en el tráfico WLAN. Esto pudo obtenerse sintonizando los parámetros EDCA de todos los tipos de tráfico, en los instantes de llegada o partida de un requerimiento, y focalizando especialmente sobre aquellos asociados con la regulación del tráfico de mejor esfuerzo (elástico). Los valores de inicialización y el rango

de los parámetros EDCA del algoritmo se adoptaron de la experimentación y conclusiones obtenidas en el Capítulo 4.

La Tabla 5.1 muestra el rango de valores de los parámetros EDCA sobre los que corre el algoritmo. Y la Tabla 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5 presentan los valores que se utilizaron en la inicialización de los parámetros EDCA según los escenarios, dados en el Capítulo anterior. Estos valores fueron seleccionados por ser de mejora para satisfacer ciertas premisas y objetivos, y apropiados para este y similares escenarios. Para el parámetro TXOP se utilizó la misma codificación del Capítulo4. El valor TXOP=1 debe considerarse igual a TXOP=1.504 ms, y proporcionalmente para los otros valores.

	Voz	Video	Mejor Esfuerzo
AIFSN	2	[2-8]	[3-12],
CWmin	7	[7-63]	[31-1023]
CWmax	31	63	1023
TXOP	[1-7]	[1-10]	[0-10]
Paquete	160 bytes	1280 bytes	1500 bytes
Rate	64 Kbps	640 Kbps	1024 Kbps

Tabla 5.1 Rango de parámetros EDCA utilizados en MTDA

	Voz	Video	Mejor Esfuerzo
AIFSN	2	3	5
CWmin	7	31	63
CWmax	31	63	1023
TXOP	1	10	10
Paquete	160 bytes	1280 bytes	1500 bytes
Rate	64 Kbps	640 Kbps	1024 Kbps

Tabla 5.2 Valores de los parámetros EDCA utilizados Escenario 1.1 y Escenario 2

	Video	Mejor Esfuerzo
AIFSN	2	3
CWmin	7	31
CWmax	31	1023
TXOP	1	10
Paquete	1280 bytes	1500 bytes
Rate	640 Kbps	1024 Kbps

Tabla 5.3 Valores de los parámetros EDCA utilizados Escenario 1.2

	Voz	Mejor Esfuerzo
AIFSN	2	3
CWmin	7	63
CWmax	31	1023
TXOP	1	10
Paquete	160 bytes	1500 bytes
Rate	64 Kbps	1024 Kbps

Tabla 5.4 Valores de los parámetros EDCA utilizados Escenario 1.3

	Voz	Video
AIFSN	2	3
CWmin	7	31
CWmax	31	63
TXOP	1	10
Paquete	160 bytes	1280 bytes
Rate	64 Kbps	640 Kbps

Tabla 5.5 Valores de los parámetros EDCA utilizados Escenario 1.4

El estado de la red Wi-Fi con QoS, de acuerdo a lo analizado en los Capítulos 3 y 4 es esencialmente dinámico, donde las prestaciones de las diversas métricas de cada tráfico y de la red dependen de las características de los tráficos existentes y de la proporción relativa entre ellos. Por lo tanto, un algoritmo de tuning o sintonización debe responder a esa dinámica variando y adaptando los parámetros EDCA, en contraposición a mantener los valores estáticos por defecto, obteniendo mejores métricas de rendimiento, y simultáneamente, el cumplimiento de consignas de QoS para los flujos presentes. EDCA 802.11e, por si sola, asegura la diferenciación de tráfico y premisas de QoS para una determinada cantidad de estaciones, y un algoritmo de sintonización complementa el protocolo, asegurando mayores rendimientos y esas restricciones de QoS, para los tráficos de mayor prioridad o de tiempo real, aún en condiciones de alta carga.

V.2.2 Detalles del Algoritmo

El algoritmo tiene como punto de referencia inicial la propuesta de [162]. Aunque, las varias modificaciones incluidas lo ubican como una propuesta novedosa que tiene en cuenta las particularidades y extensiones dadas en el apartado V.2.1. Se ha pretendido mantener una lógica sencilla y, simultáneamente, favorecer la adaptación dinámica a las tendencias observadas en los tráficos y la propia red. Los aspectos del mismo se describen a través de la siguiente lógica:

1. *Esperar por la primera solicitud de flujo*

2. *Iniciar el vector de parámetros y su rango de valores ξ, según el flujo requerido*

    a) *Todos los tráficos voz, video y mejor esfuerzo*
    - Voz: AIFSN=2, CWmin=7, CWmax=31, TXOP=1
    - Video: AIFSN=3, CWmin=31, CWmax=63, TXOP=10
    - Mejor Esfuerzo: AIFSN=5, CWmin=63, CWmax=1023, TXOP=10

    b) *Tráficos de voz y video*
    - Voz: AIFSN=2, CWmin=7, CWmax=31, TXOP=1
    - Video: AIFSN=3, CWmin=31, CWmax=63, TXOP=10

    c) *Tráficos de voz y mejor esfuerzo*
    - Voz: AIFSN=2, CWmin=7, CWmax=31, TXOP=1
    - Mejor Esfuerzo: AIFSN=3, CWmin=63, CWmax=1023, TXOP=10

    d) *Tráficos de video y mejor esfuerzo*
    - Video: AIFSN=2, CWmin=7, CWmax=31, TXOP=1
    - Mejor Esfuerzo: AIFSN=3, CWmin=31, CWmax=1023, TXOP=10

3. *Esperar por una nueva solicitud de flujo para sumarse al sistema. Resguardar parámetros ξ vigentes hasta el momento. Ajustar el vector de parámetros y su rango de valores ξ temporales según el nuevo flujo requerido.*

4. *Usando los parámetros con la nueva o la misma solicitud de tráfico, verificar el cumplimiento de los objetivos de rendimiento, delay y descarte (μ), etc. o si el número máximo de iteraciones ha sido alcanzado. Si es así, Ir al paso 6. De lo contrario, Ir al paso 5.*

5. *Incrementar/Decrementar secuencialmente (solo un cambio en cada iteración):*
    (a) *- $AIFSN_{be}$ → $AIFSN_{be}$ + 1 [5-12] Actualizar ξ. Ir al Paso 4.*
    - AIFSNvi → AIFSNvi + 1 [3-8] Actualizar ξ. Ir al Paso 4.
    - CWmin,be → CWmin,be x 2 +1 [63-1023] Actualizar ξ. Ir al Paso 4.
    - TXOPvoz → TXOPvoz + 1 [1-7] Actualizar ξ. Ir al Paso 4.
    - $TXOP_{be}$ →$TXOP_{be}$ – 1 [1-10] Actualizar ξ. Ir al Paso 4.
    - TXOPvideo →TXOPvideo – 1 [1-10] Actualizar ξ. Ir al Paso 4.
    (b) *- AIFSNvi → AIFSNvi + 1 [3-8] Actualizar ξ. Ir al Paso 4.*
    - CWmin,vi → CWmin,vi x 2 +1 [31-63] Actualizar ξ. Ir al Paso 4.
    - TXOPvoz → TXOPvoz + 1 [1-7] Actualizar ξ. Ir al Paso 4.
    - TXOPvideo →TXOPvideo – 1 [1-10] Actualizar ξ. Ir al Paso 4.
    (c) *- $AIFSN_{be}$ → $AIFSN_{be}$ + 1 [5-12] Actualizar ξ. Ir al Paso 4.*
    - CWmin,be → CWmin,be x 2 +1 [31-1023] Actualizar ξ. Ir al Paso 4.
    - TXOPvoz → TXOPvoz + 1 [1-7] Actualizar ξ. Ir al Paso 4.
    - $TXOP_{be}$ →$TXOP_{be}$ – 1 [1-10] Actualizar ξ. Ir al Paso 4.
    (d) *- $AIFSN_{be}$ → $AIFSN_{be}$ + 1 [5-12] Actualizar ξ. Ir al Paso 4.*
    - CWmin,be → CWmin,be x 2 +1 [63-1023] Actualizar ξ. Ir al Paso 4.
    - TXOPvideo → TXOPvideo + 1 [1-10] Actualizar ξ. Ir al Paso 4.
    - $TXOP_{be}$ →$TXOP_{be}$ – 1 [1-10] Actualizar ξ. Ir al Paso 4.

    Si el nuevo valor de un parámetro produce un alejamiento del cumplimiento de μ, restaurar el valor anterior del parámetro, y mantenerlo fijo por el resto de las iteraciones del presente requerimiento.

6. *Si no se ha verificado el cumplimiento de μ rechazar solicitud, o proponer requerimientos posibles de satisfacer, y restaurar parámetros ξ resguardados previos a la solicitud. De lo contrario configurar los parámetros de trabajo con ξ temporal. Ir al paso 3.*

Se deduce que la lógica del algoritmo es similar y complementaria cuando la solicitud de flujo se refiere a una baja de tráfico del sistema. Por simplicidad en la presentación del algoritmo, se supone que todas las solicitudes son de alta de tráfico.

V.3) ENSAYO EXPERIMENTAL DEL ALGORITMO MTDA

Con el objeto de comparar MTDA con los comportamientos de la red usando los parámetros por defecto (Capítulo 3) y los parámetros de mejora (Capítulo 4), se conservaron las configuraciones generales de 802.11a en 36 Mbps, y los tipos de tráficos utilizados en los experimentos descriptos previamente.

V.3.1 Escenario 1.1 – Estaciones con todos los tráficos presentes

A los fines de evaluar el comportamiento del algoritmo, sobre el Escenario 1.1 con todos los tráficos presentes, se adoptaron los siguientes umbrales para los tráficos de voz y video:

- Caída promedio máxima del 0,50 % del rendimiento relativo de voz,
- Retardo de cola promedio máximo de 150 ms en el tráfico de voz,
- Caída promedio máxima del 1,20 % del rendimiento relativo de video,
- Retardo de cola promedio máximo de 200 ms en el tráfico de video.

Para un análisis más detallado del funcionamiento del algoritmo, se procedió a extender la variación de la carga hasta las 25 estaciones.

V.3.1.1 Evolución del algoritmo MTDA

La Tabla 5.6 presenta la evolución del algoritmo MTDA, con los detalles del estado del algoritmo en la medida que crece el número de estaciones. Además, se observan el rendimiento promedio directo (en Mbps), el rendimiento relativo y el descarte para el tráfico de voz, y el rendimiento relativo y descarte del tráfico de video, en todos los casos por estación. También, se muestran los valores que van tomando sucesivamente los parámetros EDCA ante cada requerimiento de acceso de una nueva estación. En la Tabla, se destaca en rojo (verde) los puntos en que se viola (cumple) el umbral de rendimiento relativo de voz o video según corresponda.

Se sobreentiende que hasta la solicitud de alta de la estación 16, el algoritmo ejecutó un vez la secuencia algorítmica de los pasos 1-2-3-4-

6 y varias veces la secuencia 3-4-6, dado que no era necesario ajustar los parámetros EDCA. Estando en el paso 3 del algoritmo, se observa que cuando llega la solicitud de alta de la estación 17, demandando servicio para sus tráficos de voz, video y mejor esfuerzo, es necesario ejecutar el paso 4 de cálculo de las métricas para verificar el cumplimiento de las consignas de QoS. Con la incorporación eventual de esta nueva estación, el sistema quedaría con un rendimiento promedio de voz por estación de 0,0636376 Mbps (por debajo de los 0,064 Mbps óptimos), que el rendimiento relativo de 99,43% caería por debajo del umbral de 99,50% y que el descarte superaría el 0,57%. Mientras que en el tráfico de video, el rendimiento relativo promedio sería de 99,61% y el descarte del 0,39%, cuyos valores no superan los umbrales de QoS. Dado que no se cumplen las condiciones establecidas para el tráfico de voz, es necesario aplicar el paso 5 del algoritmo.

En la segunda fila de la Tabla 5.6, se indica simbólicamente con AIFSNbe+6 que el algoritmo se encuentra en el paso 5 y ha efectuado temporalmente el ajuste del parámetro AIFSN de mejor esfuerzo, incrementado su valor en 1, es decir, cambiando su valor de 5 a 6. El algoritmo debe verificar vía cálculo, a través de un modelo analítico apropiado, el cumplimiento de los objetivos de prestaciones. Como se observa, al cambiar el valor de AIFSN de mejor esfuerzo a 6, se mejora el rendimiento promedio de voz por estación a 0,0637048 Mbps, mientras que el rendimiento relativo sube a 99,54% y el descarte se reduce a 0,46%. El tráfico de video también mejora sus prestaciones, con un rendimiento relativo promedio de 99,93% y un descarte de 0,07%. Es decir, que con este ajuste en el parámetro AIFSN del tráfico de mejor esfuerzo, se alcanzaría nuevamente el cumplimiento de los objetivos. Entonces, el algoritmo pasa al paso 6 para aceptar la solicitud de alta de la estación 17, pero configurando el parámetro de trabajo AIFSN de los tráficos de mejor esfuerzo de todas las estaciones, con el valor algorítmico temporal 6. Luego, se vuelve al paso 3 a la espera de una nueva solicitud.

Cuando en el paso 3 del algoritmo (3ra fila de la Tabla) se produce el requerimiento de la estación 18, los valores de parámetros vigentes vuelven a dejar el sistema por debajo de los objetivos. La incorporación eventual de la estación 18, haciendo los cálculos previstos en el paso 4, dejaría el sistema con un rendimiento promedio de voz por estación de 0,0635840 Mbps, el rendimiento relativo en 99,35%, y por lo tanto, el descarte en 0,65%. Dado que nuevamente no se cumplen las premisas para el tráfico de voz, es necesario pasar al paso 5 del algoritmo.

En la cuarta fila de la Tabla, se simboliza con AIFSNvi+4 que el algoritmo se encuentra en el paso 5, y se ha modificado temporalmente el parámetro AIFSN de video, incrementado su valor en 1, es decir,

cambiando su valor de 3 a 4. En este paso, el algoritmo verifica el cumplimiento de los objetivos de prestaciones, al cambiar el valor de AIFSN de video a 4. Como se observa, el rendimiento promedio de voz por estación sube a 0,0638400 Mbps, mientras que el rendimiento relativo alcanza 99,75% y, entonces, el descarte se reduce a 0,25%. Con esta modificación del parámetro AIFSN del tráfico de video de todas las estaciones se alcanzaría otra vez el cumplimiento de los objetivos. En esta situación, el algoritmo pasa al paso 6 para aceptar el alta de la estación 18, pero reconfigurando el parámetro de trabajo AIFSN de los tráficos de video, con el valor temporal 4. Posteriormente, el algoritmo continúa en el paso 3 a la espera de una nueva solicitud.

Ante los requerimientos de alta de las estaciones 19 y 20, (5ta y 6ta fila de la Tabla), los valores de parámetros de trabajo usados en la estación 18, no sacan al sistema de los objetivos propuestos. Recién en la estación 21, usando los parámetros de trabajo, el sistema vuelve a quedar por fuera de las consignas.

El proceso se repite iterativamente para las sucesivas solicitudes de alta, modificando nuevos y/o los mismos parámetros, de acuerdo al algoritmo. En alguna estación, deberá rechazarse la solicitud, o proponerse otros requerimientos posibles de satisfacer. En cualquiera de estos dos casos, se restaurarán los parámetros resguardados previos a la solicitud.

La Tabla 5.7 presenta la evolución de los valores de los parámetros EDCA del algoritmo MTDA para el Escenario 1.1. En la misma se observan los valores iniciales y finales de los parámetros para cada uno de los tráficos presentes. Además, se destacan en verde los parámetros que se ajustan por ejecución del algoritmo.

N° Estaciones	Paso Algorítmico	Rendimiento Voz [Mbps]	Rendimiento relativo voz	Descarte	Rendimiento relativo video	Descarte
17 Estaciones	Ajuste MTDA	0,0636376	99,43%	0,57%	99,61%	0,39%
	AIFSNbe+6	0,0637048	99,54%	0,46%	99,93%	0,07%
18 Estaciones	No Ajuste MTDA	0,0635840	99,35%	0,65%		
	AIFSNvi+4	0,0638400	99,75%	0,25%	99,58%	0,42%
19 Estaciones	No Ajuste MTDA	0,0637936	99,68%	0,32%	99,87%	0,13%
20 Estaciones	No Ajuste MTDA	0,0637216	99,56%	0,44%	99,94%	0,06%
21 Estaciones	Ajuste MTDA	0,0636408	99,44%	0,56%		
	CWminbe+127	0,0636552	99,46%	0,54%		
	TXOPvo+3008	0,0636552	99,46%	0,54%		
	TXOPbe-13536	0,0636544	99,46%	0,54%		
	TXOPvi-13536	0,0636600	99,47%	0,53%		
	AIFSNbe+7	0,0637176	99,56%	0,44%	99,56%	0,44%
22 Estaciones	No Ajuste MTDA	0,0636328	99,43%	0,57%		
	AIFSNVI+5	0,0637992	99,69%	0,31%	99,81%	0,19%
23 Estaciones	No Ajuste MTDA	0,0637384	99,59%	0,41%	99,54%	0,46%
24 Estaciones	Ajuste MTDA	0,0636440	99,44%	0,56%		
	CWminbe+255	0,0636648	99,48%	0,52%		
	TXOPbe-12032	0,0636840	99,51%	0,49%	99,40%	0,60%
25 Estaciones	No Ajuste MTDA	0,0635416	99,28%	0,72%		
	TXOPvi-12032	0,0635432	99,29%	0,71%		
	AIFSNbe+8	0,0636208	99,41%	0,59%		
	AIFSNvi+6	0,0637432	99,60%	0,40%	98,97%	1,03%

Tabla 5.6 Evolución del algoritmo MTDA Escenario 1.1

Tipo de tráfico	Parámetros	Valor Inicial	Valor Final
Voz	AIFSN	2	2
	CWmin	7	7
	CWmax	31	31
	TXOP	1504	3008
Video	AIFSN	3	6
	CWmin	31	31
	CWmax	63	63
	TXOP	15040	12032
Best Effort	AIFSN	5	8
	CWmin	63	255
	CWmax	1023	1023
	TXOP	15040	10232

Tabla 5.7 Valores iniciales y finales de los parámetros del algoritmo MTDA Escenario 1.1

V.3.1.2 Comparación de Métricas usando Inicialización MTDA con Algoritmo MTDA: Capacidad de Convergencia

En este apartado se plantea el análisis de la capacidad de convergencia del algoritmo, destacando la importancia de la selección de los valores iniciales del mismo. En las Figuras 5.1, 5.2 y 5.3 se observan las comparaciones del rendimiento directo de los flujos de voz, video y de mejor esfuerzo, cuando se usan en la configuración de los parámetros los valores de la inicialización del algoritmo MTDA, respecto a cuándo no sólo se aplica la configuración inicial, sino que además se varían los parámetros a causa del algoritmo MTDA. La inicialización MTDA se refiere al uso de los valores iniciales de los parámetros EDCA de dicho algoritmo, manteniéndolos fijos. Esta configuración aplica los denominados parámetros de mejora del Capítulo 4. La carga crece desde 1 a 25 estaciones.

En la Figura 5.1 se destaca que el tráfico de voz con los parámetros de inicialización MTDA alcanza un máximo de 1,530 Mbps en la estación 25, y con el Algoritmo MTDA un pico de 1,593 Mbps, con una mejora del 4,15%. Mientras que en la Figura 5.2 el tráfico de video, con el Algoritmo MTDA alcanza un máximo de 16,222 Mbps para 25 estaciones, mejorando en 1,83% respecto a si se usa la configuración por inicialización MTDA; en este último caso el rendimiento máximo es de 15,931 Mbps. Por último, en la Figura 5.3, el tráfico de mejor esfuerzo alcanza un pico 12,226 Mbps para ambas configuraciones en la estación 12, desde donde el rendimiento cae. No hay mejora en el rendimiento máximo, pero el uso del algoritmo introduce una leve mejora en el rendimiento obtenido para más de 17 estaciones.

Los resultados obtenidos muestran que el uso del algoritmo MTDA sostiene el rendimiento de los tráficos con el objeto del cumplimiento de las premisas de QoS establecidas para los tráficos de voz y video. Como se observa, esto no implica para los valores de configuración utilizados, que la mejora sea a costa del rendimiento del tráfico de mejor esfuerzo. Por el contrario, el ajuste a los nuevos parámetros seleccionados dinámicamente por el algoritmo, a partir de los valores iniciales, producen mejoras en los rendimientos de todos los tráficos.

Además, se observa que los valores de inicialización del algoritmo son muy importantes para una rápida convergencia y mantenimiento de las métricas de QoS establecidas, y que el cuerpo del algoritmo que cambia los parámetros, sólo se ejecuta para la sintonización fina en el 70% (17 estaciones) de la carga máxima de 25 estaciones. A partir de dicho punto, el rendimiento global de la red se sostiene con una mejora promedio para este caso del 2%.

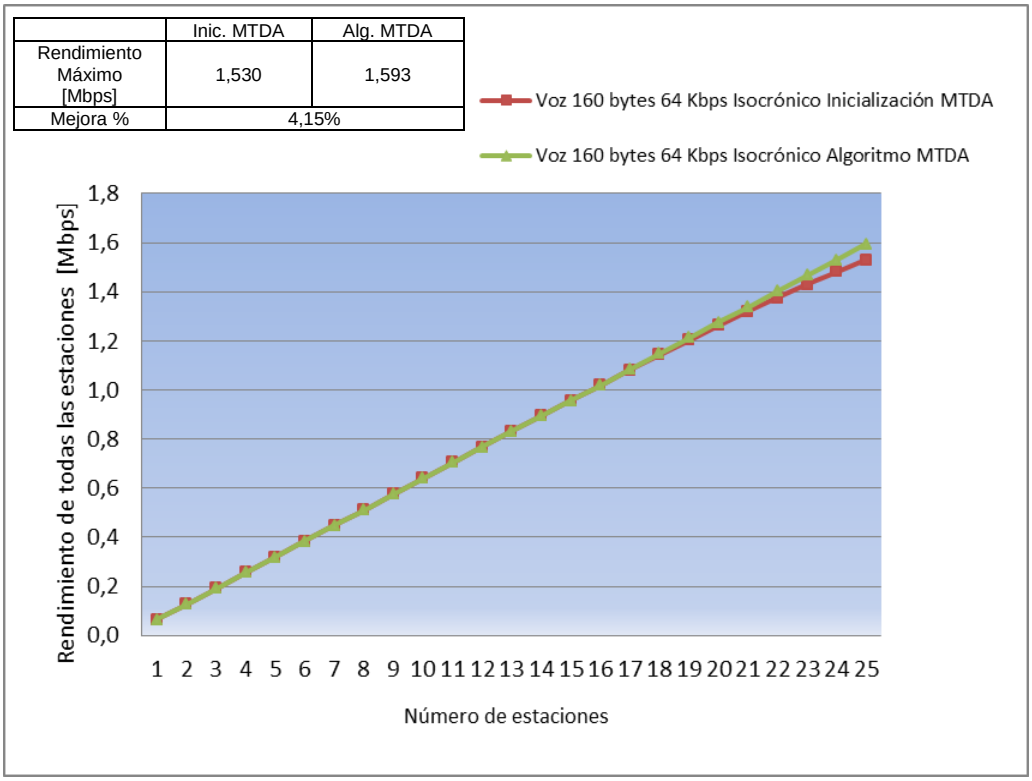


Figura 5.1 Comparación del rendimiento del tráfico de voz usando Inicialización MTDA y el Algoritmo MTDA Escenario 1.1

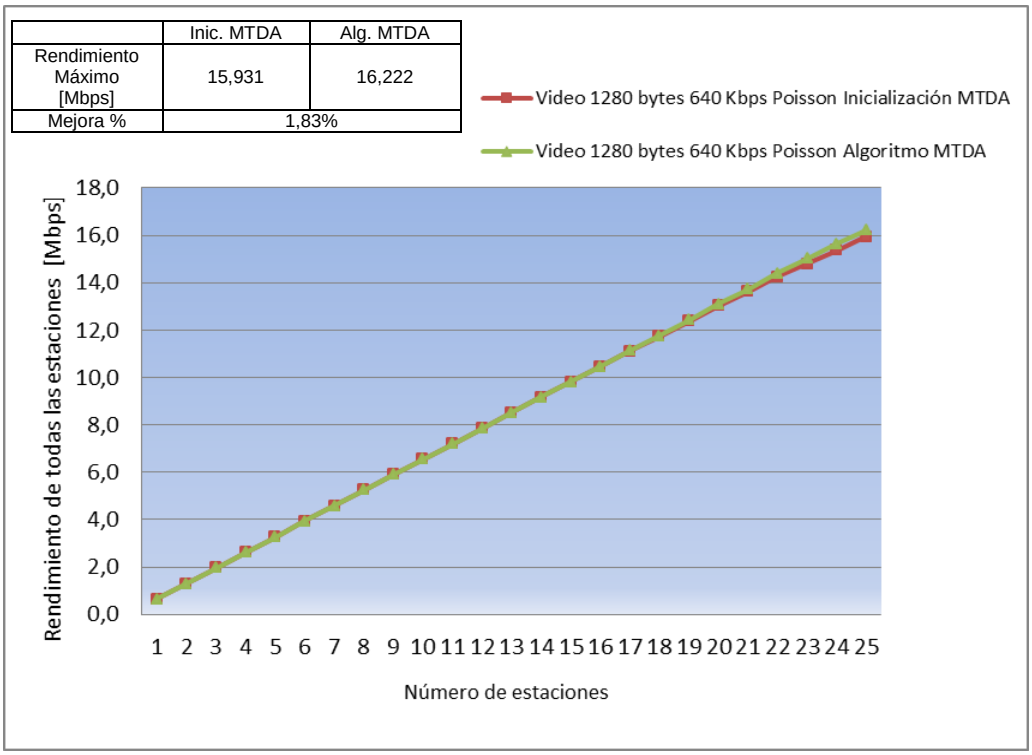


Figura 5.2 Comparación del rendimiento del tráfico de video usando Inicialización MTDA y el Algoritmo MTDA Escenario 1.1

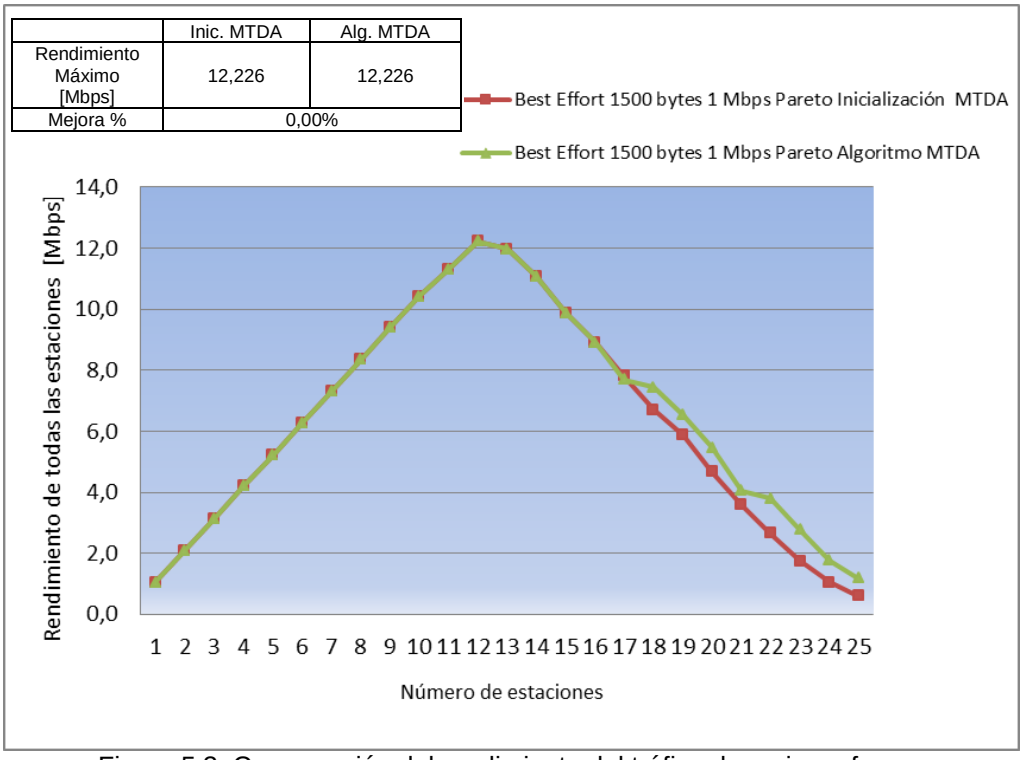


Figura 5.3 Comparación del rendimiento del tráfico de mejor esfuerzo usando Inicialización MTDA y el Algoritmo MTDA Escenario 1.1

Desde la Figura 5.4 a la Figura 5.9 se observan las comparaciones del tamaño de cola y retardos de los flujos de voz, video y de mejor esfuerzo, cuando se usa inicialización MTDA, respecto a cuándo se aplica el algoritmo MTDA, variando la carga de 1 a 25 estaciones.

En la Figura 5.4 se presenta el tamaño de la cola promedio de voz con inicialización MTDA. La cola alcanza un máximo de 0,772 paquetes en la estación 25. Esto supera los 0,416 paquetes que se obtienen como valor máximo en la estación 16 usando el algoritmo MTDA que implica una mejora del 46,09%. Dado que a partir de la estación 16, los ajustes del algoritmo reducen el tamaño de cola a 0,320 paquetes, la mejora se amplía a 58,47% para 25 estaciones.

El tamaño de la cola promedio de video con inicialización MTDA alcanza un máximo de 9,044 paquetes en la estación 25, como se destaca en la Figura 5.5. Cuando se usa el algoritmo MTDA, el tamaño de cola máximo se reduce a 7,710 paquetes, con una mejora del 14,75%.

En el caso de mejor esfuerzo, se presenta en la Figura 5.6. Con inicialización MTDA, se obtiene un máximo de 49,517 paquetes en la estación 25. Mientras que cuando se usa el algoritmo MTDA se obtiene un valor de 49,197. Este valor difiere en menos de 1%.

La variación en el tamaño de las colas muestra que el uso del algoritmo MTDA sostiene los valores de rendimiento, con una disminución importante de los tamaños de cola de voz y video. Es decir, el algoritmo contiene el crecimiento de las colas, dado que el tamaño de las mismas inciden directamente en el delay de los paquetes, y por lo tanto, en el rendimiento de los flujos correspondientes.

Ese comportamiento no se ve reflejado en el tamaño de la cola de mejor esfuerzo, que se mantiene prácticamente estable, a pesar de la leve mejoría en el rendimiento cuando se cambian los parámetros EDCA por parte del algoritmo.

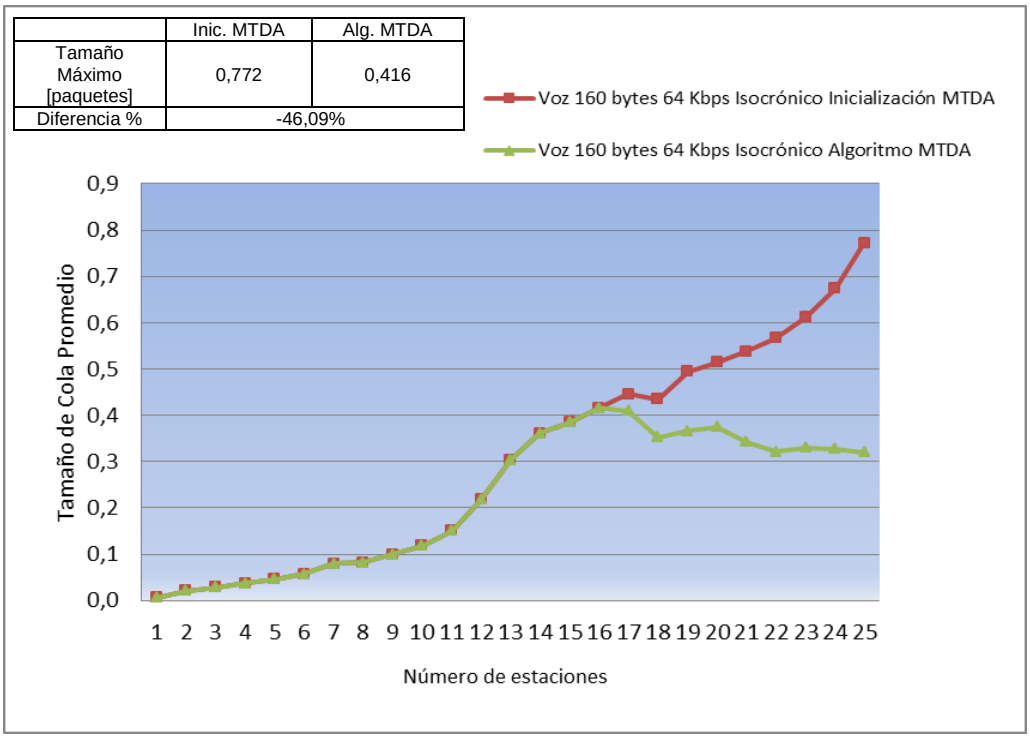


Figura 5.4 Comparación del tamaño de cola del tráfico de voz usando Inicialización MTDA y el Algoritmo MTDA Escenario 1.1

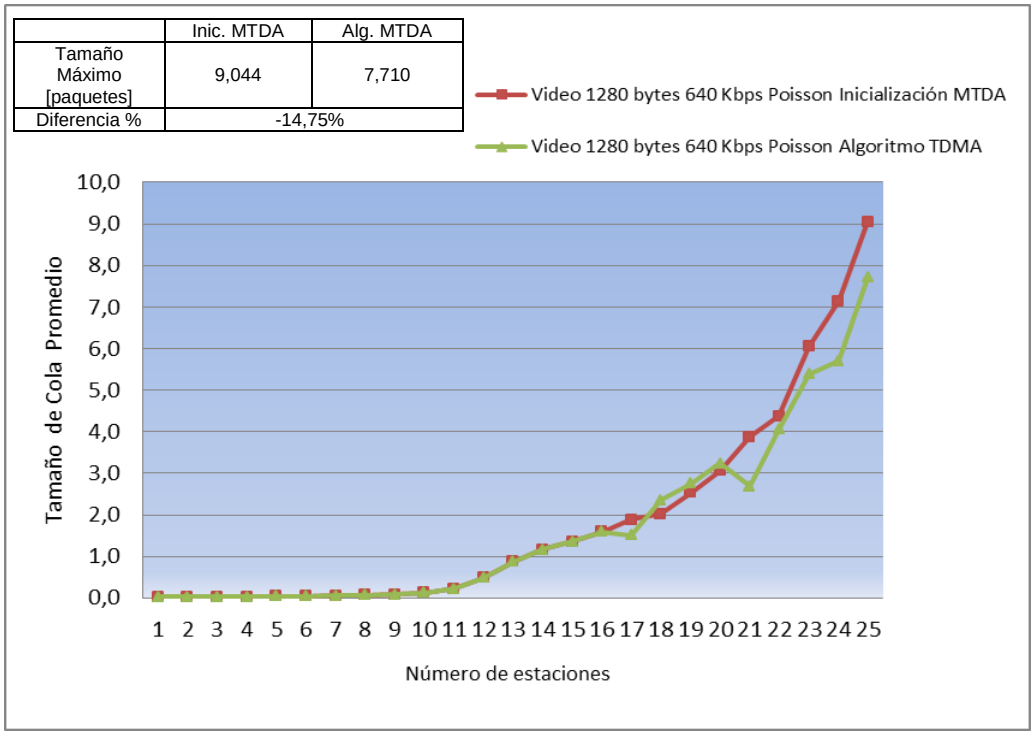


Figura 5.5 Comparación del tamaño de cola del tráfico de video usando Inicialización MTDA y el Algoritmo MTDA Escenario 1.1

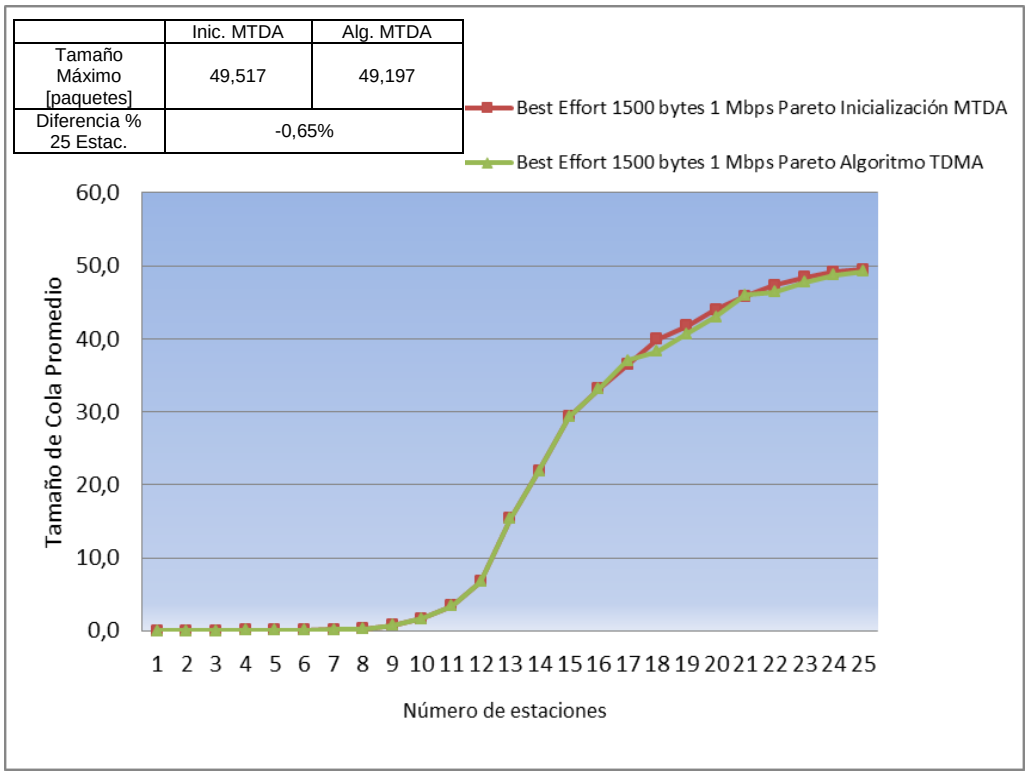


Figura 5.6 Comparación del tamaño de cola del tráfico de mejor esfuerzo usando Inicialización MTDA y el Algoritmo MTDA Escenario 1.1

En la Figura 5.7 se observa el delay del tráfico de voz con inicialización MTDA, con un máximo de 16,148 ms en la estación 25. Usando el algoritmo MTDA, el valor máximo es 9,552 ms en la estación 16. Esto significa una mejora del 40,85%. Este porcentaje de mejora se eleva a 60,13%, dado que a partir de la estación 16 los ajustes del algoritmo reducen el delay a 6,438 ms.

El delay promedio de video con inicialización MTDA alcanza un máximo de 145,166 ms en la estación 25, como se presenta en la Figura 5.8. Cuando se usa el algoritmo MTDA, este valor se reduce a 121,510 ms, dando una mejora de 16,30%.

Finalmente, en la Figura 5.9 se presenta el caso de mejor esfuerzo. Con inicialización MTDA, se observa un máximo de 21317 ms en la estación 25. Cuando se usa el algoritmo MTDA se obtiene un valor de 11385, con una mejora del 46,59%.

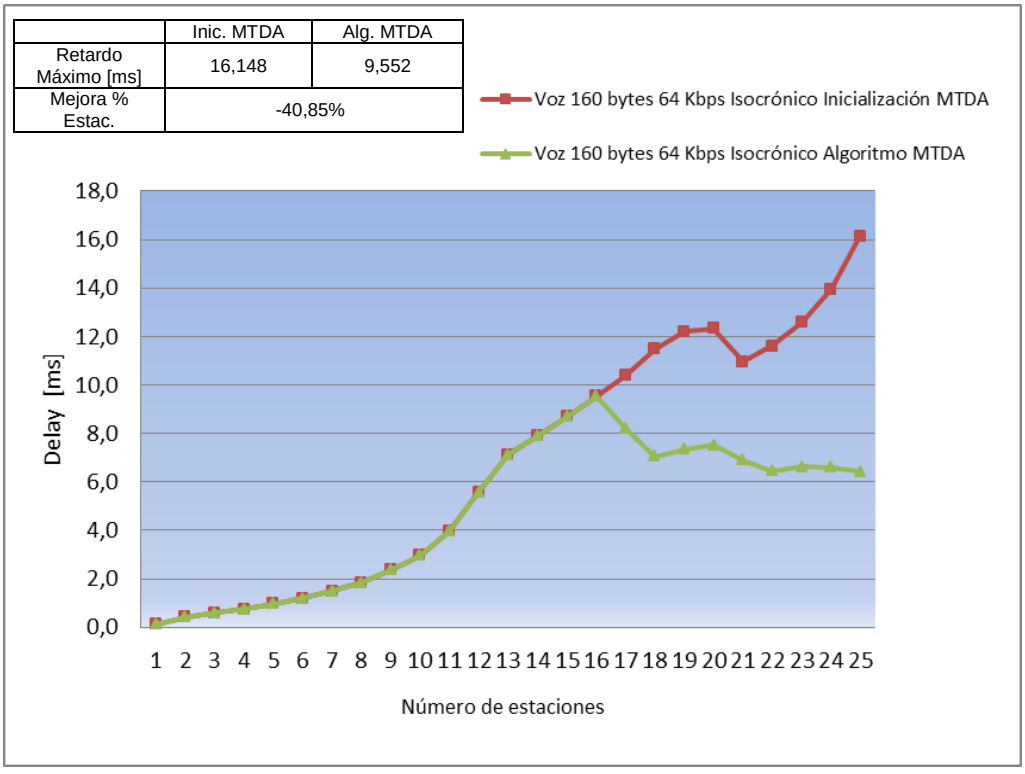


Figura 5.7 Comparación de delays del tráfico de voz
usando Inicialización MTDA y el Algoritmo MTDA Escenario 1.1

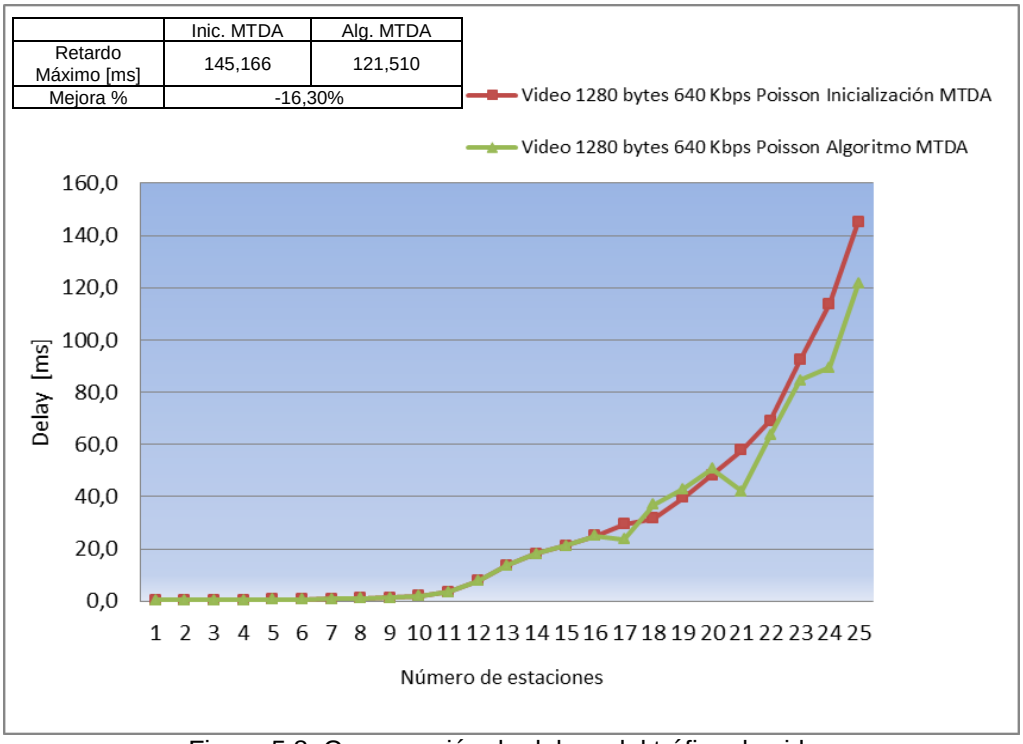


Figura 5.8 Comparación de delays del tráfico de video usando Inicialización MTDA y el Algoritmo MTDA Escenario 1.1

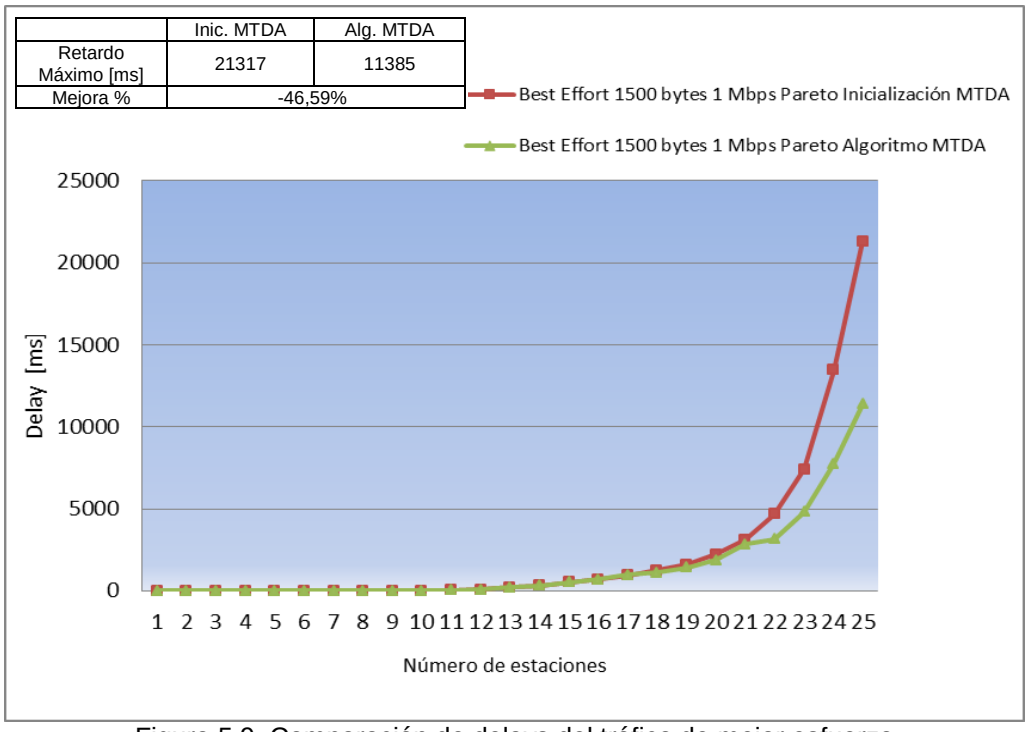


Figura 5.9 Comparación de delays del tráfico de mejor esfuerzo usando Inicialización MTDA y el Algoritmo MTDA Escenario 1.1

Desde la estación 17, el algoritmo MTDA produce una mejor respuesta de los delay de todos los tráficos. En el caso del tráfico de voz, la tendencia es una reducción de los valores en la medida que crece el número de estaciones. En el caso del tráfico de video y mejor esfuerzo, los tiempos en general tienden a crecer, pero menos que cuando se usa inicialización MTDA. Además, la evolución del delay y del tamaño de la cola de video muestra claramente el efecto de los cambios de los parámetros cuando se aplica el algoritmo MTDA.

La Tabla 5.8 resume las características más importantes de este escenario.

Escenario 1 todos los tráficos	Inicializ. MTDA	Algoritmo MTDA	% de Variación
Rendimiento Máximo de voz [Mbps]	1,530	1,593	4,15%
Rendimiento Máximo video [Mbps]	15,931	16,222	1,83%
Rendimiento Máx. best effort [Mbps]	12,226	12,226	0%
Retardo Máximo de Cola de voz [ms]	16,148	6,438	-60,13%
Retardo Máximo de Cola de video [ms]	145,166	121,510	-16,30%
Retardo Máximo de Cola de best effort [ms]	21317,996	11385,141	-46,59%
Tamaño de Cola de voz 25 Estaciones [paq]	0,772	0,320	-58,47%
Tamaño de Cola video 25 Estaciones [paq]	9,044	7,710	-14,756%
Tamaño Cola best effort 25 Estaciones [paq]	49,517	49,197	-0,65%

Tabla 5.8 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 1.1

V.3.1.3 Comparación de Métricas usando Parámetros por Defecto con Algoritmo MTDA: Mejora de Rendimiento

Se plantea evaluar el impacto general en el rendimiento que introduce el uso del algoritmo MTDA. En las Figuras 5.10, 5.11 y 5.12 se observan las comparaciones del rendimiento directo de los flujos de voz, video y de mejor esfuerzo, cuando se usa la configuración con los parámetros estáticos por defecto respecto a cuándo se ejecuta el algoritmo MTDA. La carga crece desde 1 a 25 estaciones.

En la Figura 5.10 se destaca que el tráfico de voz con los parámetros estáticos por defecto alcanza un máximo de 0,923 Mbps en la estación 19, y con el Algoritmo MTDA un pico de 1,593 Mbps en la estación 25. Esto introduce una mejora del 72,54%.

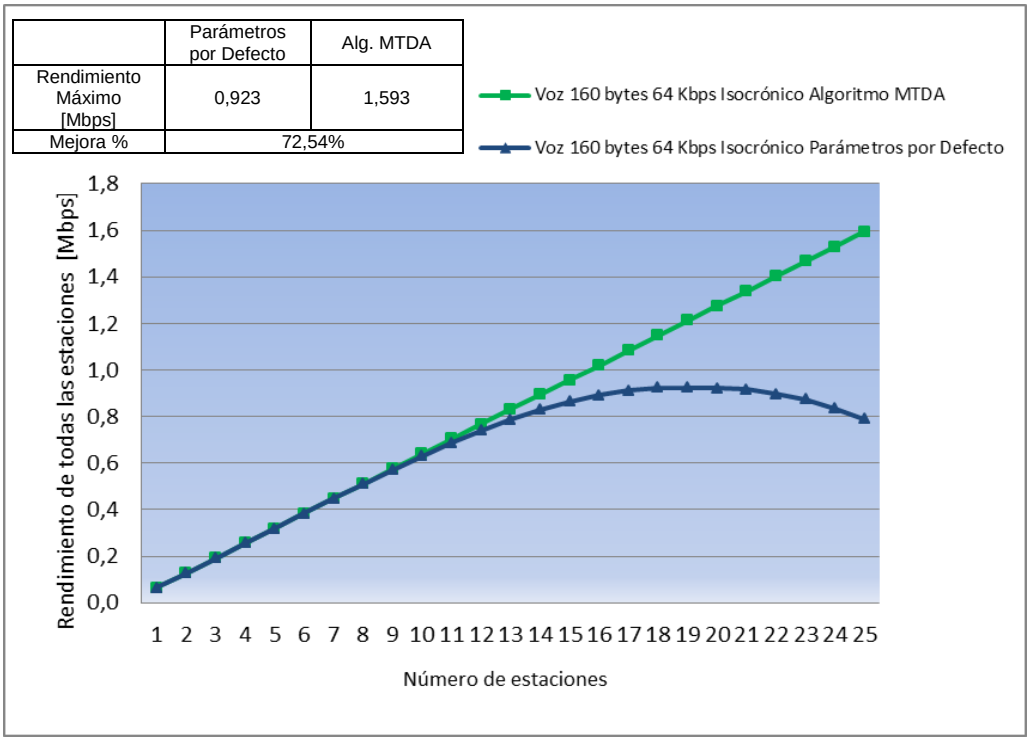


Figura 5.10 Comparación del rendimiento del tráfico de voz usando Parámetros por Defecto y el Algoritmo MTDA Escenario 1.1

En la Figura 5.11 se compara el tráfico de video; con el Algoritmo MTDA alcanza un máximo de 16,222 Mbps para 25 estaciones, mejorando en 49,44% respecto a si se usa la configuración por defecto; en este último caso el rendimiento máximo es de 10,855 Mpbs en la estación 18.

Finalmente, en la Figura 5.12 se presenta el tráfico de mejor esfuerzo con un pico 10,285 Mbps en la estación 10 cuando se usa configuración por defecto. Con la configuración usando el algoritmo MTDA se obtiene 12,226 Mpbs en la estación 12, con una mejora de 18,87 %.

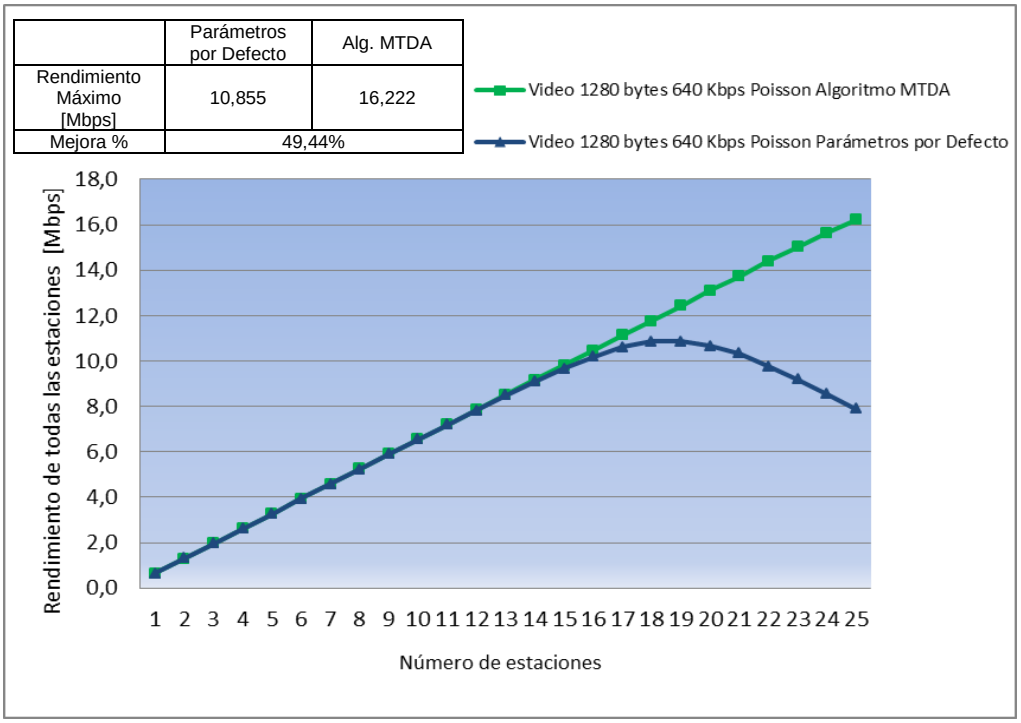


Figura 5.11 Comparación del rendimiento del tráfico de video usando Parámetros por Defecto y el Algoritmo MTDA Escenario 1.1

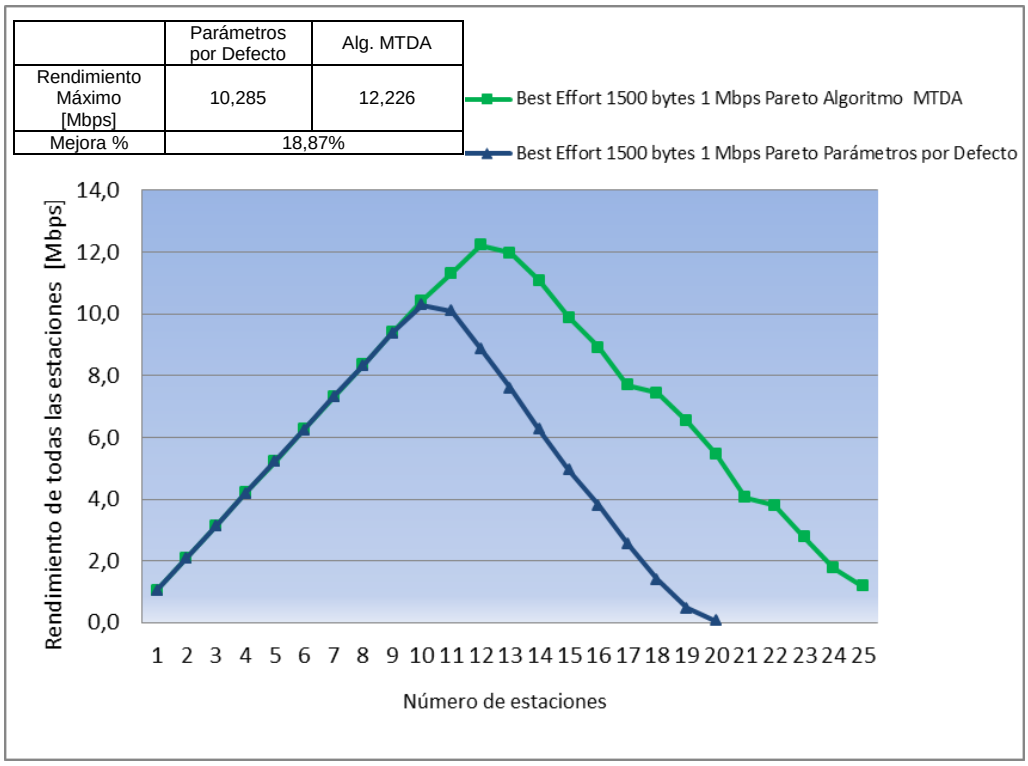


Figura 5.12 Comparación del rendimiento del tráfico de mejor esfuerzo usando Parámetros por Defecto y el Algoritmo MTDA Escenario 1.1

Se muestra que el uso del algoritmo MTDA, para 25 estaciones, obtiene mejoras significativas en el rendimiento de todos los tráficos presentes, mientras se da satisfacción a los requerimientos de QoS.

Si comparamos globalmente el uso del algoritmo respecto a la configuración estática por defecto, la mejora del rendimiento de la red es del orden del 47% promedio, y en los tráficos de voz y de video del orden del 70% y 50%, respectivamente.

La Tabla 5.9 resume esta comparación.

Escenario 1 todos los tráficos	Parámetros por Defecto	Algoritmo MTDA	% de Variación
Rendimiento Máximo de voz [Mbps]	0,923	1,593	72,54%
Rendimiento Máximo video [Mbps]	10,855	16,222	49,44%
Rendimiento Máx. best effort [Mbps]	10,285	12,226	18,87%
Rendimiento de la red	47%		

Tabla 5.9 Resumen de las comparaciones de rendimiento Escenario 1.1

V.3.2 Escenario 2.1 – 60 % estaciones de voz, 20 % de video y 20 % de mejor esfuerzo

A los fines de evaluar el comportamiento del algoritmo MTDA, sobre el Escenario 2.1 con la proporción indicada, se adoptaron los siguientes umbrales para los tráficos de voz y video:

- Caída promedio máxima del 0,70 % del rendimiento relativo de voz,
- Retardo de cola promedio máximo de 150 ms en el tráfico de voz,
- Caída promedio máxima del 1,00 % del rendimiento relativo de video,
- Retardo de cola promedio máximo de 200 ms en el tráfico de video.

Para un análisis más detallado del funcionamiento del algoritmo, se procedió a extender la variación de la carga hasta las 50 estaciones (30 estaciones de voz, 10 de video y 10 de mejor esfuerzo).

V.3.2.1 Evolución del algoritmo MTDA

La Tabla 5.10 presenta la evolución del algoritmo MTDA, para este escenario, con los detalles del estado del algoritmo en la medida que crece el número de estaciones.

Se sobreentiende que hasta las 40 estaciones no era necesario ajustar los parámetros EDCA de inicialización. Estando en el paso 3 del

algoritmo, se observa que cuando llega la solicitud de alta para 3 estaciones de voz, 1 de video y 1 de mejor esfuerzo, para un total 45 estaciones, es necesario ejecutar el paso 4 de cálculo de las métricas para verificar el cumplimiento de las consignas de QoS. Con la incorporación eventual de estas estaciones, el sistema quedaría con un rendimiento promedio de voz por estación de 0,0634808 Mbps, que el rendimiento relativo de 99,19% caería por debajo del umbral de 99,30% y que el descarte superaría el 0,81%. Mientras que en el tráfico de video, el rendimiento relativo promedio sería de 99,61% y el descarte del 0,39%, cuyos valores no superan los umbrales de QoS. Dado que no se cumplen las condiciones establecidas para el tráfico de voz, es necesario aplicar el paso 5 del algoritmo. Como en el caso del Escenario 1.1, con todos los tráficos presentes, los ajustes se suceden hasta que se logren los objetivos. Esto se alcanza cuando el parámetro AIFSN de video toma el valor 4, simbolizado con AIFSNvi+4.

El juego de valores de los parámetros que permiten el alta de 45 estaciones, fallan cuando se trata de 50 estaciones. Luego de varias iteraciones del algoritmo, el cumplimiento de las premisas se da cuando el parámetro AIFSN de mejor esfuerzo alcanza el valor 9, que representamos como AIFSNbe+9.

El algoritmo MTDA presenta una rápida convergencia, debido fundamentalmente a los valores seleccionados para la inicialización de los parámetros, y a las pocas iteraciones adicionales (a los sumo unas 40) para determinar si se acepta o rechaza una nueva solicitud de tráfico. Para los escenarios planteados, se han necesitado unas 20 iteraciones aproximadamente para el cumplimiento de las consignas de QoS. Parte de este comportamiento, como se observa en la lógica del algoritmo, se debe a que se “congela” el parámetro, cuando se detecta que un nuevo valor del mismo produce un alejamiento o ningún cambio en las premisas de QoS establecidas.

La Tabla 5.11 presenta la evolución de los valores de los parámetros EDCA del algoritmo MTDA para el escenario 2.1.

N° Estaciones	Paso Algoritmo	Rendimiento Voz [Mbps]	Rendimiento relativo voz	Descarte	Rendimiento relativo video	Descarte
45 Estaciones	Ajuste MTDA	0,0634808	99,19%	0,81%	99,61%	0,39%
	AIFSNbe+6	0,0635448	99,29%	0,71%		
	AIFSNvi+4	0,0636856	99,51%	0,49%	99,81%	0,19%
50 Estaciones	No Ajuste MTDA	0,0631320	98,64%	1,36%		
	CWminbe+127	0,0631456	98,67%	1,33%		
	TXOPvo+3008	0,0631456	98,67%	1,33%		
	TXOPbe-13536	0,0631944	98,74%	1,26%		
	TXOPvi-13536	0,0631944	98,74%	1,26%		
	AIFSNbe+7	0,0632400	98,81%	1,19%		
	AIFSNvi+5	0,0633984	99,06%	0,94%		
	CWminbe+255	0,0634328	99,11%	0,89%		
	TXOPbe-12032	0,0634352	99,12%	0,88%		
	TXOPvi-12032	0,0634352	99,12%	0,88%		
	AIFSNbe+8	0,0634632	99,16%	0,84%		
	AIFSNvi+6	0,0635200	99,25%	0,75%		
	CWminbe+512	0,0635216	99,25%	0,75%		
	TXOPbe-10528	0,0635424	99,28%	0,72%		
	TXOPvi-10528	0,0635424	99,28%	0,72%		
	AIFSNbe+9	0,0635520	99,30%	0,70%	99,70%	0,30%

Tabla 5.10 Evolución del algoritmo MTDA Escenario 2.1

Tipo de tráfico	Parámetros	Valor Inicial	Valor Final
Voz	AIFSN	2	2
	CWmin	7	7
	CWmax	31	31
	TXOP	1504	3008
Video	AIFSN	3	6
	CWmin	31	31
	CWmax	63	63
	TXOP	15040	10528
Best Effort	AIFSN	5	9
	CWmin	63	512
	CWmax	1023	1023
	TXOP	15040	10528

Tabla 5.11 Valores iniciales y finales de los parámetros del algoritmo MTDA Escenario 2.1

V.3.2.2 Comparación de Métricas usando Inicialización MTDA con Algoritmo MTDA: Capacidad de Convergencia

Como en el caso del Escenario 1.1, se plantea el análisis de la capacidad de convergencia del algoritmo, para evaluar la influencia de la selección de los valores iniciales del mismo. En las Figuras 5.13, 5.14 y 5.15 se observan las comparaciones del rendimiento directo de los flujos de voz, video y de mejor esfuerzo, cuando se usa como configuración los valores de la inicialización del algoritmo MTDA, respecto a cuándo además se varían los parámetros a causa del algoritmo MTDA, con una carga que varía de 5 a 50 estaciones.

En la Figura 5.13 se destaca que el tráfico de voz con los parámetros de inicialización MTDA alcanza un máximo de 1,873 Mbps con 50 estaciones, y con el Algoritmo MTDA un pico de 1,906 Mbps, con una mejora del 1,76%.

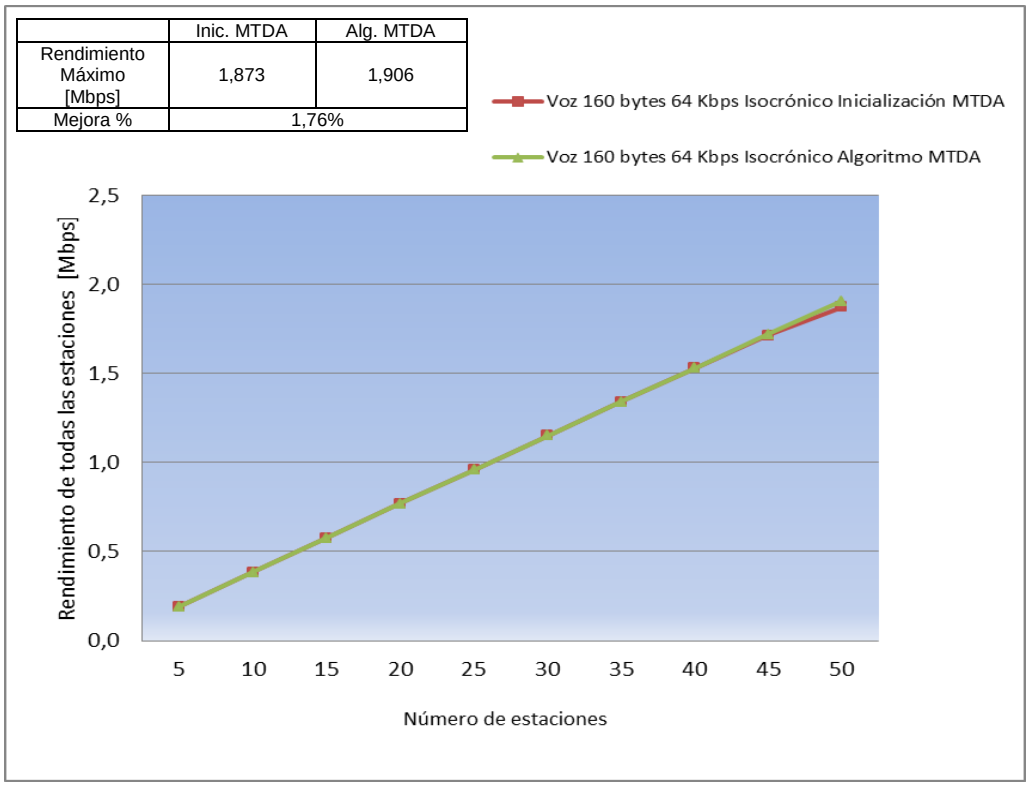


Figura 5.13 Comparación del rendimiento del tráfico de voz usando Inicialización MTDA y el Algoritmo MTDA Escenario 2.1

Mientras que en la Figura 5.14 el tráfico de video, con el Algoritmo MTDA alcanza un máximo de 6,555 Mbps para 50 estaciones, prácticamente el mismo valor cuando se usa la configuración por inicialización MTDA; en este último caso el rendimiento máximo es de 6,556 Mbps.

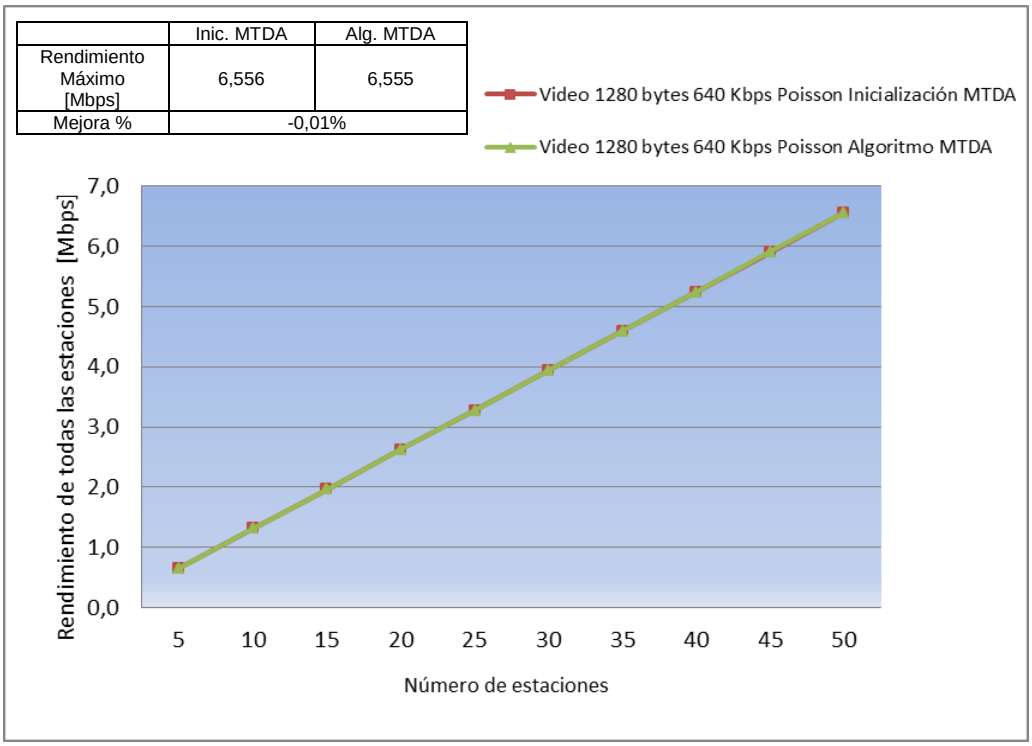


Figura 5.14 Comparación del rendimiento del tráfico de video usando Inicialización MTDA y el Algoritmo MTDA Escenario 2.1

Por último, en la Figura 5.15, el tráfico de mejor esfuerzo alcanza un pico 9.151 Mbps usando los valores de inicialización MTDA en 45 estaciones. Mientras que usando los parámetros dinámicos del algoritmo MTDA se obtiene un pico de 9,275 Mbps con una mejora de 1,36% en la misma cantidad de estaciones. Para ambos casos, el rendimiento luego cae, pero más significativamente usando los parámetros de inicialización MTDA.

Las conclusiones dadas en V.3.1.2 para la comparación de rendimiento de los tráficos del Escenario 1.1 pueden aplicarse para este Escenario 2.1. Resumimos entonces que 1) El algoritmo MTDA sostiene o mejora el rendimiento de los tráficos con el objeto del cumplimiento de las premisas establecidas, especialmente las de voz; 2) No implica que la mejora sea a costa del rendimiento del tráfico de mejor esfuerzo que también mejora; y 3) El rendimiento global de la red mejora en este caso un 1% promedio.

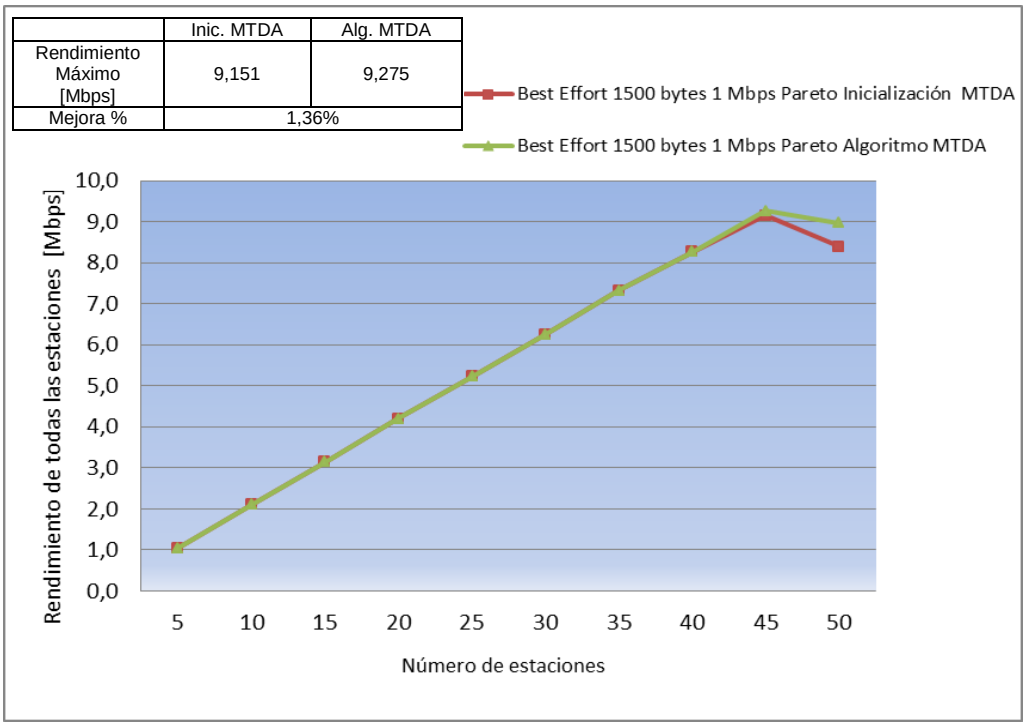


Figura 5.15 Comparación del rendimiento del tráfico de mejor esfuerzo usando Inicialización MTDA y el Algoritmo MTDA Escenario 2.1

Desde la Figura 5.16 a la Figura 5.21 se observan las comparaciones del tamaño de cola y retardos de los flujos de voz, video y de mejor esfuerzo, cuando se usa inicialización MTDA, respecto a cuándo se aplica el algoritmo MTDA, variando la carga de 5 a 50 estaciones.

En la Figura 5.16 se presenta el tamaño de la cola promedio de voz con inicialización MTDA. La cola alcanza un máximo de 0,450 paquetes para 50 estaciones, que supera los 0,358 paquetes que se obtienen como valor máximo para la misma cantidad de estaciones usando el algoritmo MTDA. Esto significa una mejora del 20,41%.

El tamaño de la cola promedio de video con inicialización MTDA alcanza un máximo de 1,255 paquetes en 50 estaciones, como se destaca en la Figura 5.17. Cuando se usa el algoritmo MTDA, el tamaño de cola máximo se reduce a 0,907 paquetes, con una mejora del 27,71%.

Finalmente, se presenta en la Figura 5.18 el caso de mejor esfuerzo. Con inicialización MTDA, se obtiene un máximo de 20,816 paquetes para 50 estaciones. Mientras que cuando se usa el algoritmo MTDA se obtiene un valor de 23,708 paquetes con una desmejora del 13,93%.

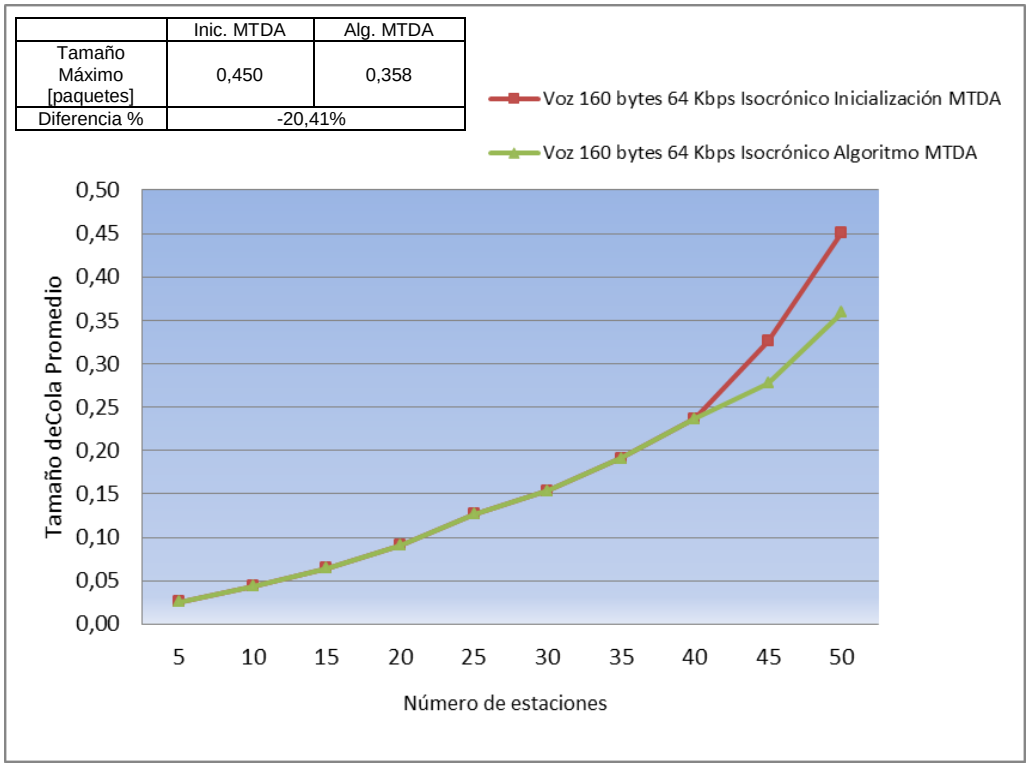


Figura 5.16 Comparación del tamaño de cola del tráfico de voz usando Inicialización MTDA y el Algoritmo MTDA Escenario 2.1

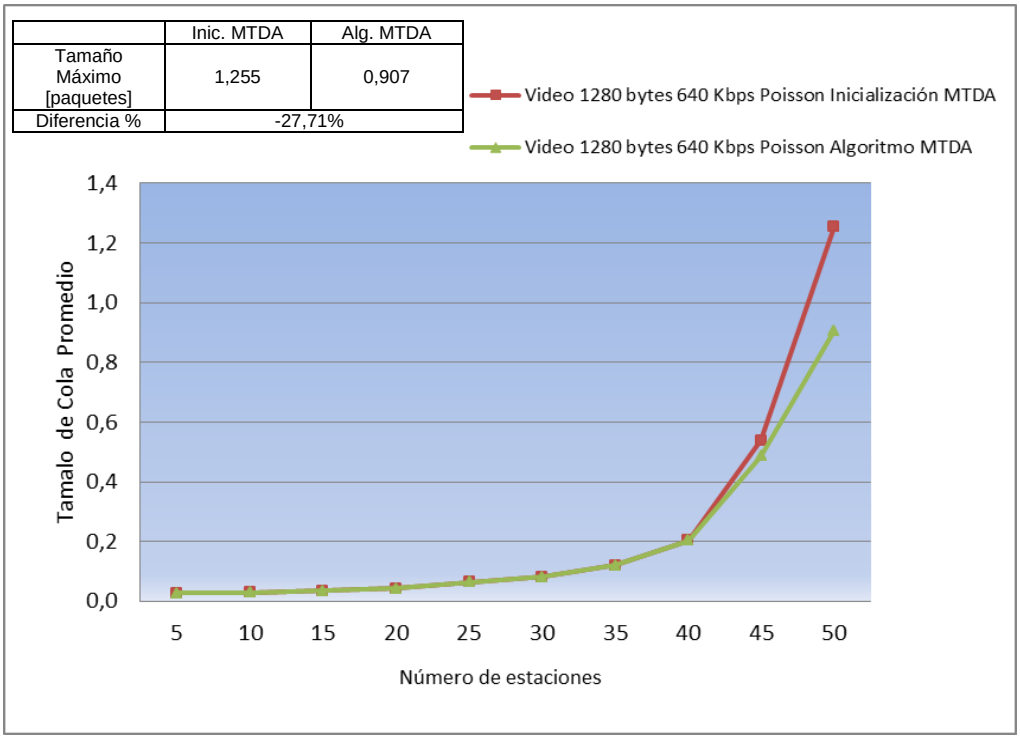


Figura 5.17 Comparación del tamaño de cola del tráfico de video usando Inicialización MTDA y el Algoritmo MTDA Escenario 2.1

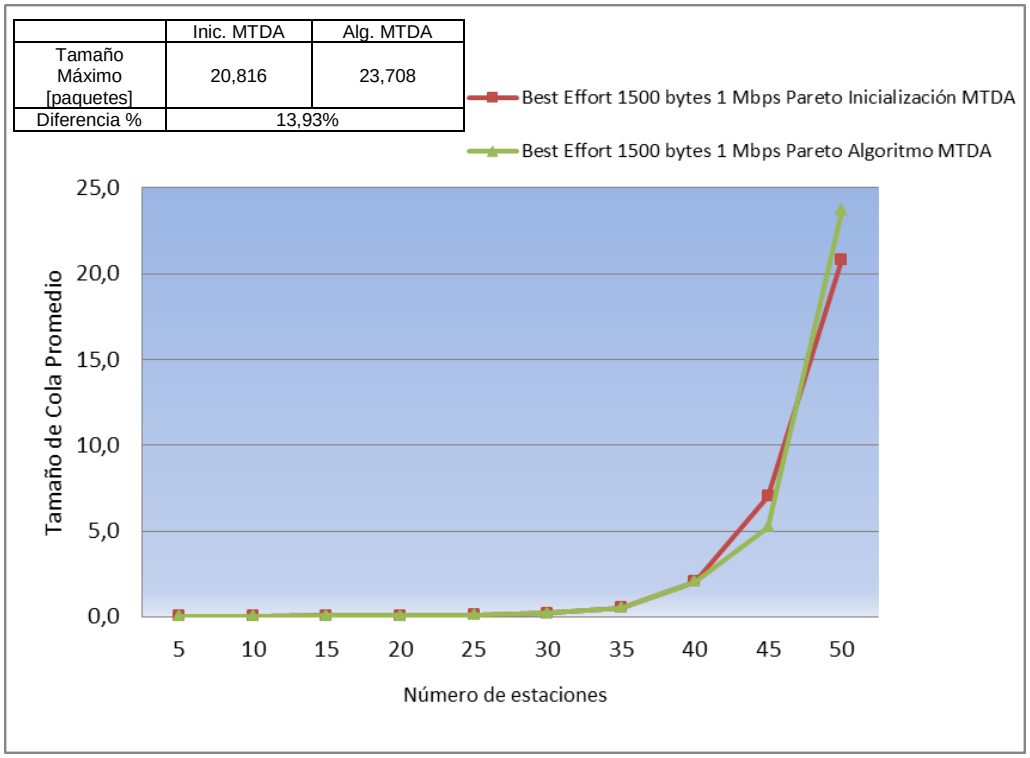


Figura 5.18 Comparación del tamaño de cola del tráfico de mejor esfuerzo usando Inicialización MTDA y el Algoritmo MTDA Escenario 2.1

El uso del algoritmo MTDA sostiene los valores de rendimiento, con tamaños de cola de voz y video crecientes, pero menores que cuando se usa inicialización MTDA. Por el contrario, el ajuste dinámico en los parámetros EDCA hace que el tamaño de la cola de mejor esfuerzo se incremente, a pesar de la leve mejoría que se da en el rendimiento.

El delay del tráfico de voz con inicialización MTDA se presenta en la Figura 5.19, con un máximo de 9,242 ms para 50 estaciones. Usando el algoritmo MTDA, el valor máximo se reduce a 7,228 ms para el mismo número de estaciones. Esto es una mejora del 21,79%.

Para el caso del delay del tráfico de video con inicialización MTDA, se obtiene un máximo de 19,639 ms con 50 estaciones, como se observa en la Figura 5.20. Mientras que cuando se usa el algoritmo MTDA, el valor baja a 14,180 ms, con una mejora de 27,80%.

Por último, la Figura 5.21 presenta el tráfico de mejor esfuerzo, que con inicialización MTDA, alcanza un pico de 297,297 ms cuando hay 50 estaciones. Este valor aumenta a 315,670 cuando se usa el algoritmo MTDA, con una desmejora del 6,18%.

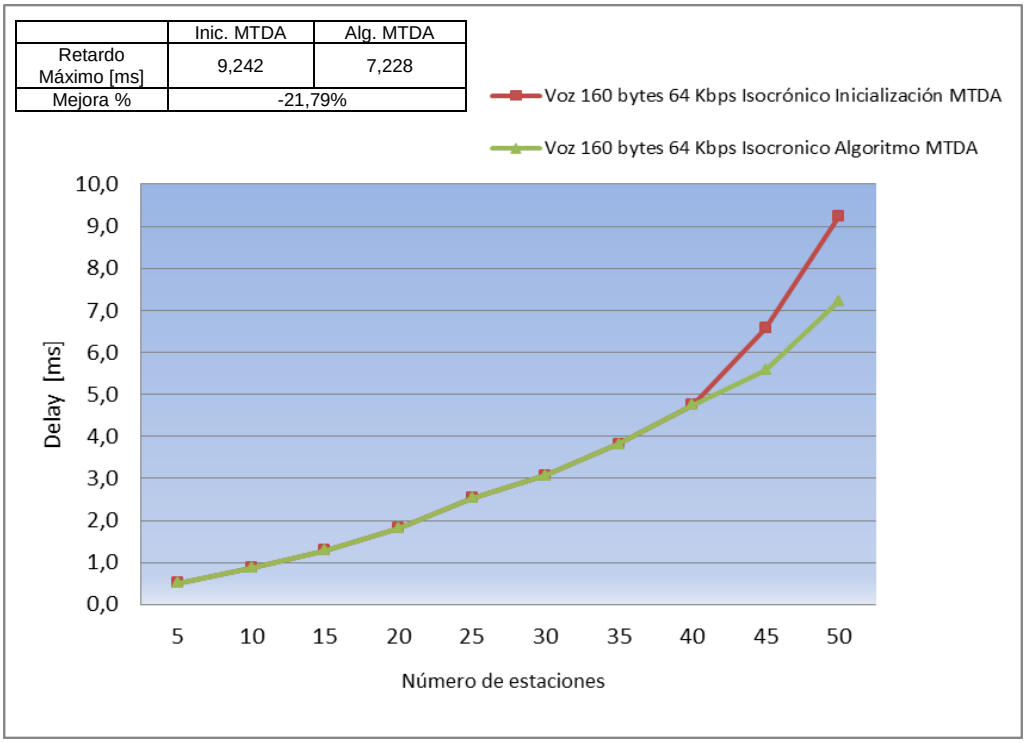


Figura 5.19 Comparación de delays del tráfico de voz
usando Inicialización MTDA y el Algoritmo MTDA Escenario 2.1

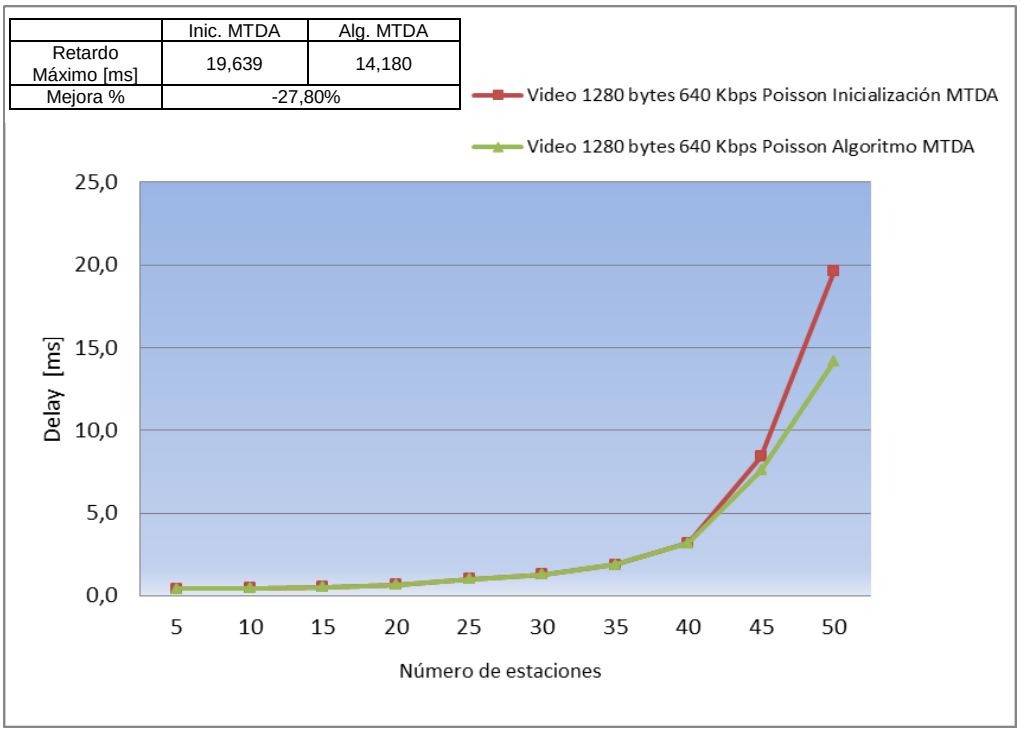


Figura 5.20 Comparación de delays del tráfico de video
usando Inicialización MTDA y el Algoritmo MTDA Escenario 2.1

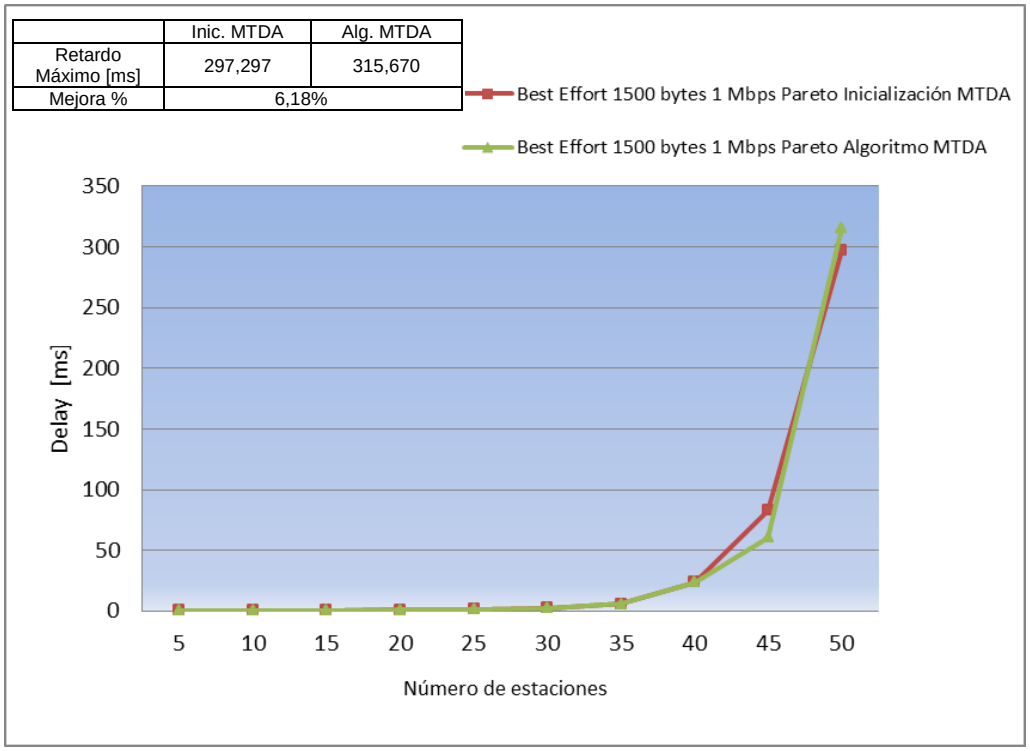


Figura 5.21 Comparación de delays del tráfico de mejor esfuerzo usando Inicialización MTDA y el Algoritmo MTDA Escenario 2.1

Desde las 40 estaciones, el algoritmo MTDA genera una mejor respuesta de los delays de los tráficos de voz y video. Los delays de estos tráficos crecen, pero en menor medida que cuando se usa inicialización MTDA. En el caso del tráfico de mejor esfuerzo, los tiempos en general tienden a crecer, al principio con mejor respuesta, pero luego desmejorando respecto a cuándo se usa inicialización MTDA. Evidentemente, cuando comienza a funcionar el algoritmo MTDA, se produce un cambio de parámetros que dan al principio una mejor respuesta, prolongando la calidad de respuesta de mejor esfuerzo. Luego, el tráfico de mejor esfuerzo se deteriora.

La Tabla 5.12 resume las características más importantes de este escenario.

Escenario 2 60% voz -20%-20%	Inicializ. MTDA	Algoritmo MTDA	% de Variación
Rendimiento Máximo de voz [Mbps]	1,873	1,906	1,76%
Rendimiento Máximo video [Mbps]	6,556	6,555	-0,01%
Rendimiento Máx. best effort [Mbps]	9,151	9,275	1,36%
Retardo Máximo de Cola de voz [ms]	9,242	7,228	-21,79%
Retardo Máximo de Cola de video [ms]	19,639	14,180	-27,80
Retardo Máximo de Cola de best effort [ms]	297,297	315,670	6,18%
Tamaño de Cola de voz 50 Estaciones [paq]	0,450	0,358	-20,41%
Tamaño de Cola video 50 Estaciones [paq]	1,255	0,907	-27,71%
Tamaño Cola best effort 50 Estaciones [paq]	20,810	23,708	13,93%

Tabla 5.12 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 2.1

V.3.2.3 Comparación de Métricas usando Parámetros por Defecto con Algoritmo MTDA: Mejora de Rendimiento

Efectuamos en este apartado la evaluación en el rendimiento que tiene el uso del algoritmo MTDA. En las Figuras 5.22, 5.23 y 5.24 se observan las comparaciones del rendimiento directo de los flujos de voz, video y de mejor esfuerzo, cuando se usa la configuración con los parámetros estáticos por defecto respecto a cuándo se ejecuta el algoritmo MTDA. La carga crece desde 5 a 50 estaciones.

En la Figura 5.22 se observa que el tráfico de voz con los parámetros por defecto obtiene un pico de 1,332 Mbps con 50 estaciones, y con el Algoritmo MTDA la mejora es del 43,14, con un pico de 1,906 Mbps con la misma cantidad de estaciones.

En la Figura 5.23 se presenta el tráfico de video; con la configuración por defecto se alcanza un máximo de 6,440 Mbps y con el Algoritmo MTDA 6,555 Mbps, en ambos casos para 50 estaciones. La mejora es del 1,80%.

Finalmente, en la Figura 5.24 observamos el tráfico de mejor esfuerzo que alcanza un pico 8,185 Mbps con los parámetros por defecto en 40 estaciones. Mientras que usando los parámetros dinámicos del algoritmo MTDA se obtiene un pico de 9,275 Mbps en 45 estaciones, con una mejora de 13,31%.

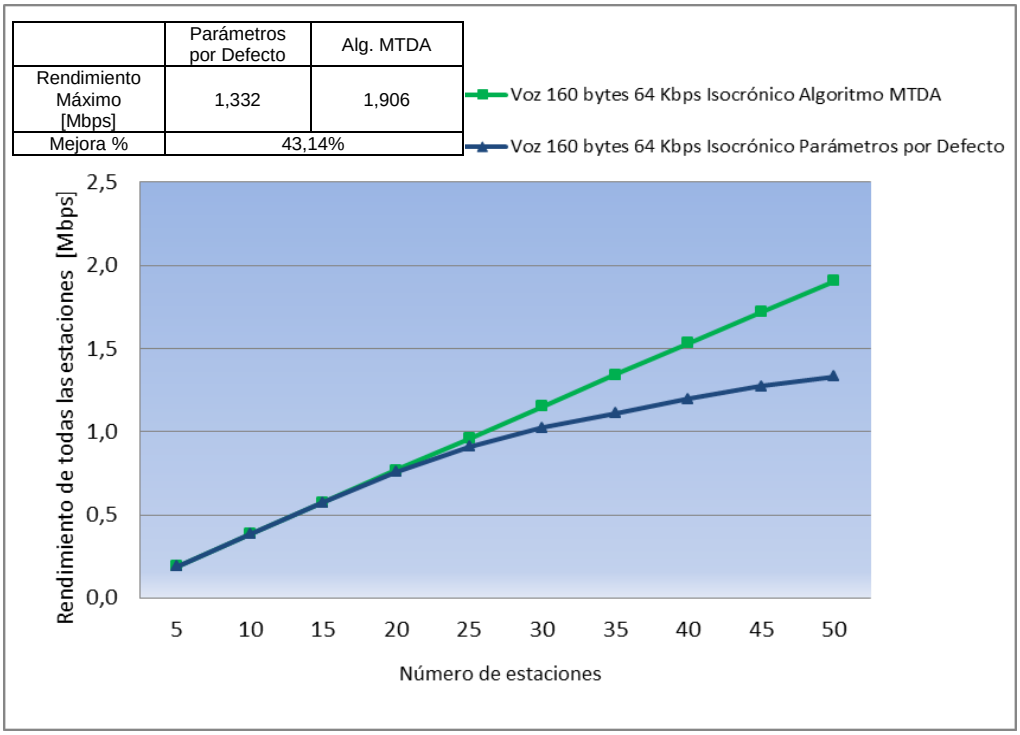


Figura 5.22 Comparación del rendimiento del tráfico de voz Escenario 2.1 usando Parámetros por Defecto y el Algoritmo MTDA

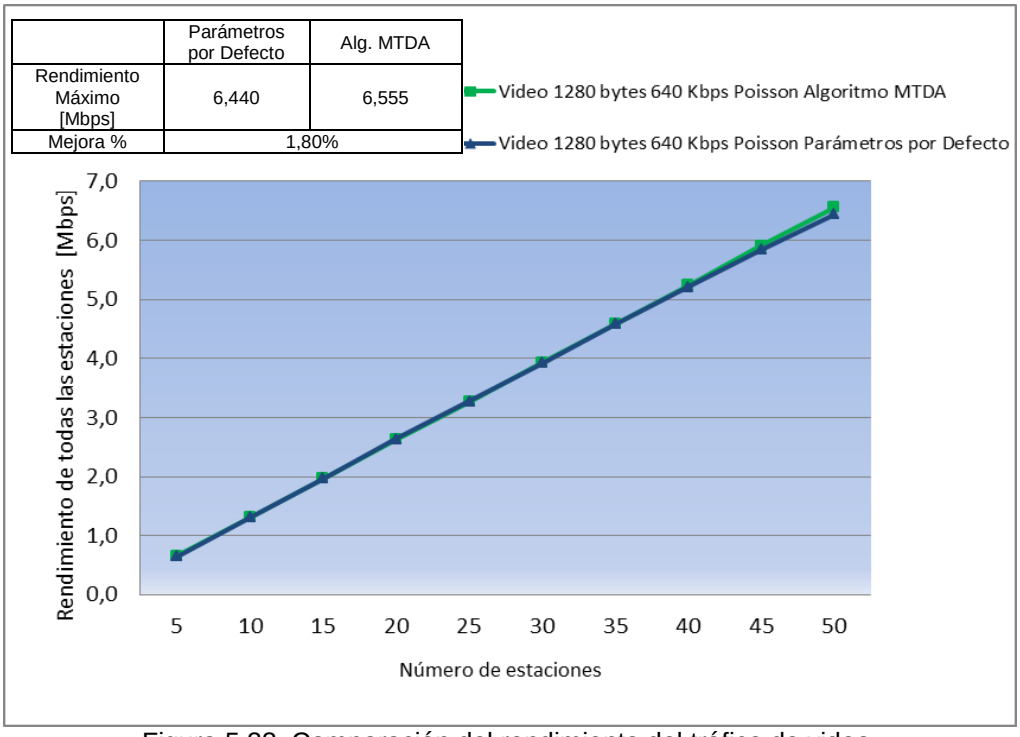


Figura 5.23 Comparación del rendimiento del tráfico de video usando Parámetros por Defecto y el Algoritmo MTDA Escenario 2.1

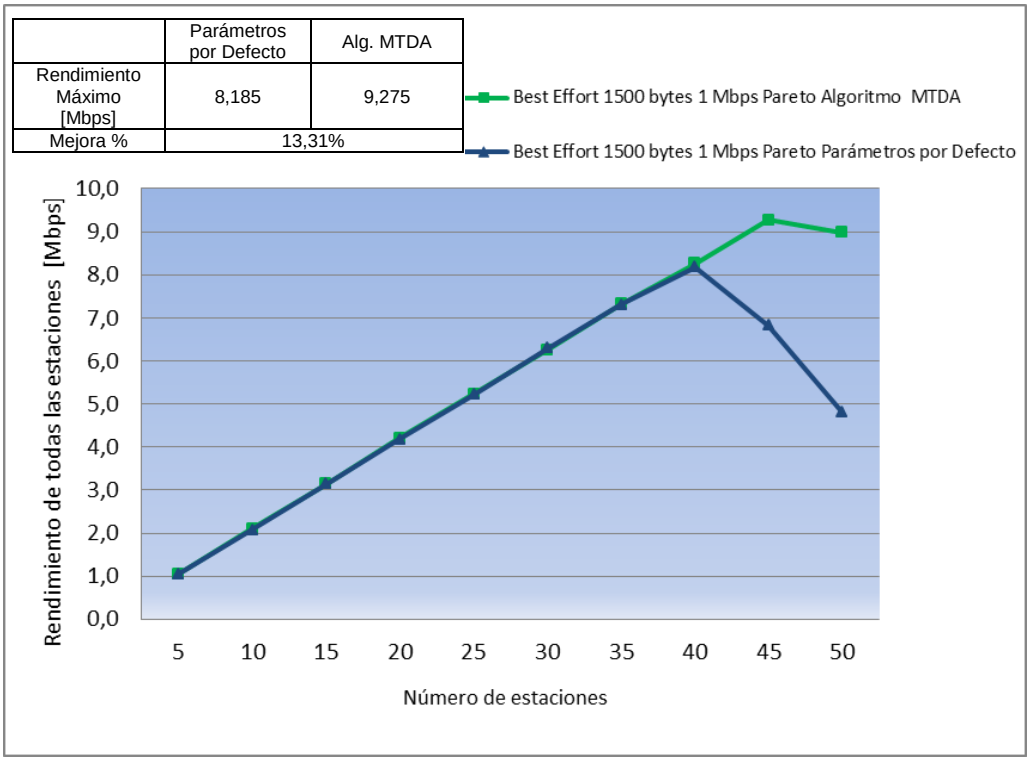


Figura 5.24 Comparación del rendimiento del tráfico de mejor esfuerzo Escenario 2.1 usando Parámetros por Defecto y el Algoritmo MTDA

En el caso del Escenario 2, también se obtiene mejores prestaciones con el algoritmo MTDA para todos los tráficos presentes. La evaluación se ha efectuado para una carga que varía de 5 a 50.

El uso del algoritmo MTDA respecto a la configuración estática por defecto, genera una mejora global del rendimiento del orden del 20% promedio, y en los tráficos de voz y de mejor esfuerzo un incremento promedio del orden del 45% y 15%, respectivamente.

La Tabla 5.13 resume esta comparación.

Escenario 2 todos los tráficos	Parámetros por Defecto	Algoritmo MTDA	% de Variación
Rendimiento Máximo de voz [Mbps]	1,332	1,906	43,14%
Rendimiento Máximo video [Mbps]	6,440	6,555	1,80%
Rendimiento Máx. best effort [Mbps]	8,185	9,275	13,31%
Rendimiento de la red	20%		

Tabla 5.13 Resumen de las comparaciones de rendimiento Escenario 2.1

V.4) SUMARIO

En el presente Capítulo se ha propuesto y experimentado por simulación un algoritmo de sintonización que llamamos MTDA [75-76]. Se ha demostrado su funcionamiento en escenarios más realistas, incluyendo interferencias, tráfico de mejor esfuerzo con distribución Pareto, combinado con flujos de voz y video. Se ha comprobado su arranque efectivo y rápida convergencia, al seleccionar como valores de inicialización de los parámetros EDCA aquellos que resultaron ser superiores en rendimiento respecto a los valores estáticos por defecto.

El algoritmo de sintonización tiene en cuenta el estado dinámico del sistema, y experimenta trabajar siempre en puntos de mejora, indiferente de los cambios aleatorios en el tráfico WLAN, y de todos los tipos de tráficos presentes, especialmente focalizando sobre aquellos asociados con la regulación del tráfico de mejor esfuerzo (elástico).

Dado que las redes Wi-Fi con QoS, son esencialmente dinámicas, el algoritmo MTDA responde a esa dinámica variando y adaptando los parámetros EDCA, en contraposición a mantener los valores estáticos por defecto. Para ciertos escenarios, pueden obtenerse ganancias en las métricas de rendimiento, con mejoras del orden del 45% para la red, y por ejemplo, del 70% para el tráfico de voz.

EDCA 802.11e, por si sola, asegura la diferenciación de tráfico, y el algoritmo de sintonización combinado con un algoritmo de control de admisión complementan el protocolo, con mejores prestaciones y el cumplimiento de las restricciones de QoS, aún en las condiciones de alta carga.

CAPITULO VI

ASPECTOS DE IMPLEMENTACIÓN

Como el nombre de este Capítulo indica, su contenido trata sobre las cuestiones de implementación. En sucesivos apartados se tratan: el uso del protocolo EDCA 802.11e en dispositivos de red comerciales, el mecanismo de control de admisión de tráfico básico del estándar, la previsión del estándar para la asignación dinámica de los parámetros EDCA para dichos dispositivos, los ajustes necesarios en firmware o hardware de las placas de red de los APs y los nodos clientes móviles, las opciones de almacenamiento de las constantes o variables dentro del código de EDCA 802.11e que contienen los valores de los parámetros, y finalmente, las consecuencias en el plano económico de la mejora del rendimiento y cumplimiento en las restricciones de QoS cuando se usa el algoritmo de sintonización MTDA.

VI.1) LA QoS EN DISPOSITIVOS WI-FI COMERCIALES

VI.1.1 Introducción

Hay productos comerciales que implementan algunas características EDCA de manera común. Aunque la adopción de 802.11e aún no es completa, puede afirmarse que todos los fabricantes han acumulado varios años de experiencia para dar QoS al tráfico de voz. Sin embargo, no ha sucedido lo mismo con el tráfico de video. (Recién en estos tiempos han crecido las investigaciones sobre el impacto del tráfico de video Wi-Fi, en la medida que ha crecido su presencia en la mezcla general de los tráficos de la red. Este interés se debe a que un flujo de video puede introducir fácilmente 10 veces la carga de un flujo de voz, con una distribución no determinística, lo que pondrá verdaderamente a prueba la QoS dada por el protocolo IEEE 802.11e).

Como con varios estándares, y debido a que hay componentes opcionales y sugerencias de implementación, algunos fabricantes resuelven su propia evolución de QoS en WLANs con alternativas propietarias, y en sus dispositivos de media y alta gama.

Como un primer paso concertado, los grupos de industrias (como la Alianza Wi-Fi) y los líderes industriales (como Cisco, y otros) definieron en 2004 los requerimientos fundamentales de la QoS en WLAN a través de su EDCA/WMM (Wi-Fi MultiMedia) [181-183], asegurando el soporte de las características claves e interoperación a través de sus programas de

certificación. Los APs y las placas de red se ofrecen comercialmente bajo la denominación WMM.

En WMM se usa el mapeo de categorías de servicios dadas por ToS (Type of Service) o DS (Differentiated Services) de la cabecera IP, o por CoS (Class of Service) de la norma 802.1Q sobre VLANs, con EDCA 802.11e usando los parámetros por defecto. De manera complementaria, con soluciones propietarias, algunos fabricantes permiten la configuración manual de los parámetros EDCA, en las líneas de productos inalámbricos avanzados.

VI.1.2 Configuración de la QoS en productos comerciales

La línea de productos de Cisco Aironet 1600/2600/3600 Series APs [184] presentados en la Figura 6.1 soportan WMM [185]. Efectivamente, cuando se habilita la QoS, el AP usa el modo WMM por defecto. El AP aplica las mejoras WMM en los paquetes que envía a los dispositivos clientes (estaciones) WMM, y las políticas de QoS básicas a los clientes que no soportan WMM.



Figura 6.1 APs Aironet Series 2600 de Cisco

La Figura 6.2 presenta la página ADVANCED sobre la configuración de políticas de QoS sobre este dispositivo. Se observan los modos de configuración posibles de

- QoS Element for Wireless Phones,
- Snooping Helper,
- AVVID Priority Mapping, y
- WiFi Multimedia (WMM).

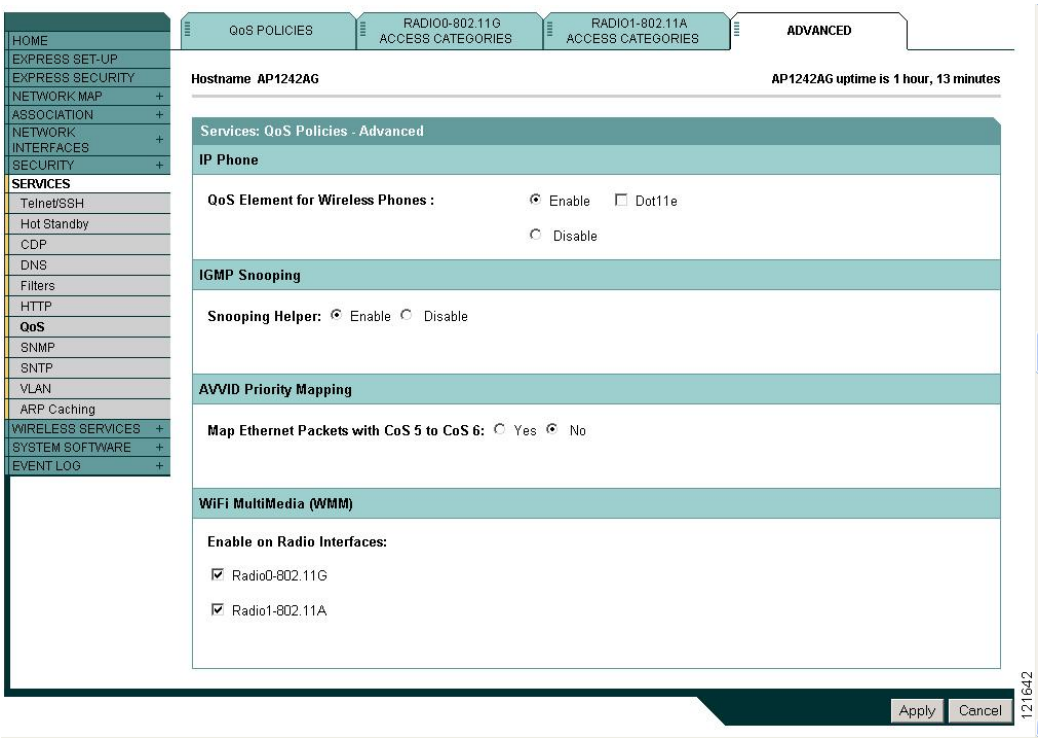


Figura 6.2 Vista pantalla ADVANCED de configuración de las políticas de QoS APs Aironet Serie 2600 de Cisco

Cuando se habilita el Wi-Fi Multimedia (WMM) sobre las interfaces de radio y el procedimiento de control de admisión, las estaciones asociadas al AP deben completar dicho procedimiento, antes que puedan usar su AC (Access Category).

Y en la Figura 6.3 se observa la página de configuración RADIO1-802.11A ACCESS CATEGORIES. El AP usa las categorías de acceso para calcular los tiempos backoff para cada paquete. Los valores por defecto de los campos CWmin, CWmax y TXOP de la Tabla 6.1 se basan en las configuraciones dadas por el estándar IEEE EDCA 802.11e. Cisco recomienda el uso de estas configuraciones por defecto, aunque permite su configuración manual, advirtiendo que el cambio en estos valores puede conducir a comportamientos imprevisibles. El AP computa los valores de la ventana de contención con la ecuación $CW = 2^{X-1}$, donde X es el valor de la Tabla 6.1.

Además, en la parte inferior de la Figura 6.3 se observa la posibilidad de habilitación del control de admisión para el tráfico de voz y de video por separado. En el caso del tráfico de voz, se especifica en % la porción de la máxima capacidad del canal que se le destina.

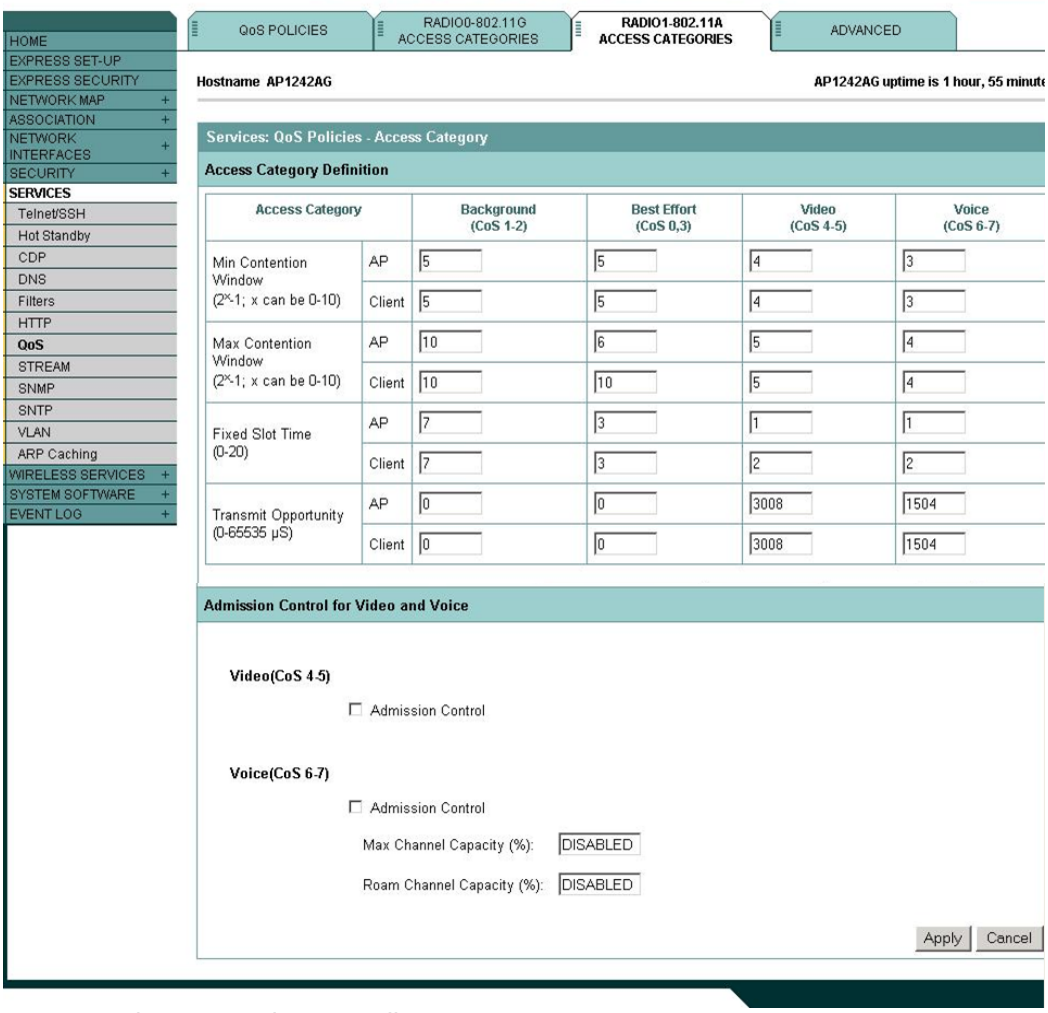


Figura 6.3 Vista pantalla RADIO1-802.11A ACCESS CATEGORIES
de configuración manual de los parámetros EDCA en APs Aironet Serie 2600 de Cisco

Class of Service	Min Contention Window		Max Contention Window		Fixed Slot Time		Transmit Opportunity		Admission Control	
	Local	Cell	Local	Cell	Local	Cell	Local	Cell	Local	Cell
Background	4		10		6		0			
Best Effort	4		10		2		0			
Video <100ms Latency	3		2		1		3008			
Voice <100ms Latency	2		3		1		1504			

Tabla 6.1 Los valores por defecto de los campos CWmin, CWmax y TXOP

Otros productos de la misma marca, de menores costos, como la línea de AP Linksys EA-Series EA2700 – EA 3500 – EA 4500, sólo soportan la habilitación del servicio de QoS WMM. De esta forma, se configura al AP con los parámetros por defecto EDCA IEEE 802.11e, pero no es posible en el dispositivo el cambio manual a otros valores.

En la Figura 6.4 se presenta la pantalla de configuración de QoS del AP Linksys 2700. Como se observa en la Figura, solo es posible habilitar o deshabilitar (activar o desactivar) el servicio WMM (Wi-Fi MultiMedia). Este servicio está habilitado por defecto.

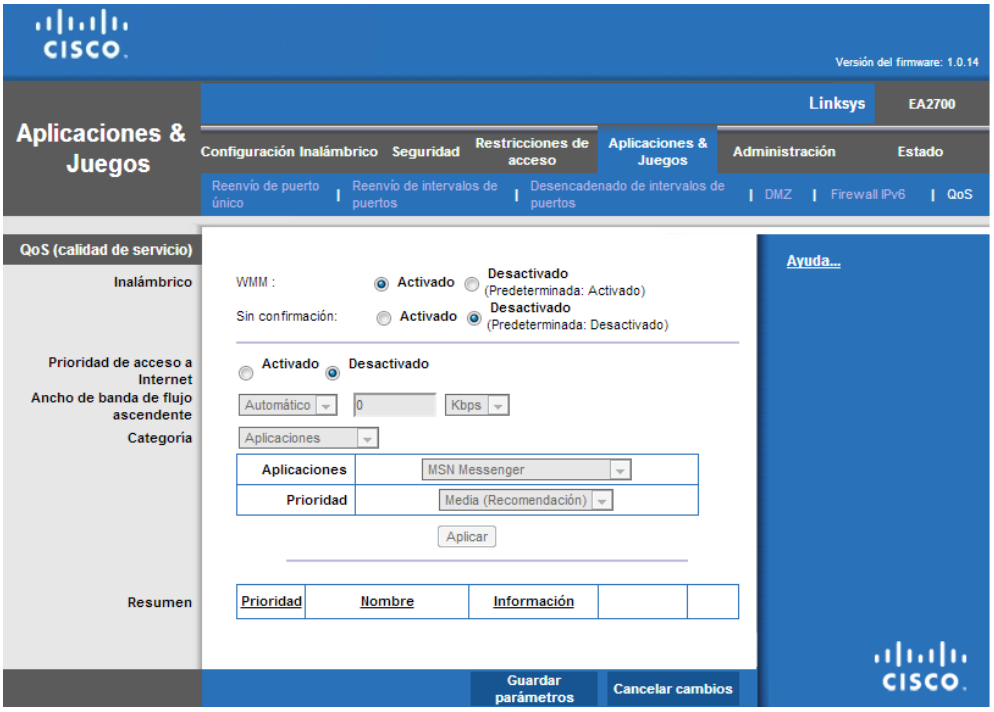


Figura 6.4 Vista pantalla QoS (CALIDAD DE SERVICIO)
de activación o desactivación del servicio WMM APs 2700 de Linksys-Cisco

Y en las Figuras 6.5 y 6.6 se muestran los certificados de interoperabilidad correspondientes al AP Cisco 1941 y al AP Linksys 2700 que otorga Wi-Fi. Ambos productos están certificados en WMM.



Wi-Fi CERTIFIED™ Interoperability Certificate

This certificate lists the features that have successfully completed Wi-Fi Alliance interoperability testing.
Learn more: www.wi-fi.org/certification/programs

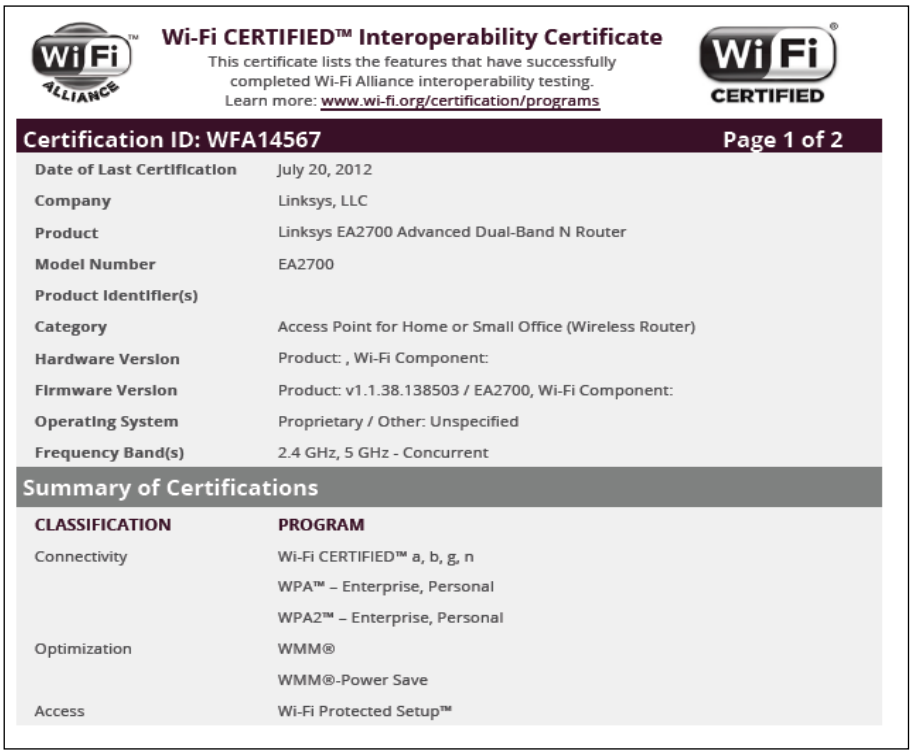
Certification ID: WFA16851 Page 1 of 2

Date of Last Certification	April 19, 2013
Company	Cisco Systems
Product	Cisco Aironet 2600 Series AIR-SAP2602
Model Number	AIR-SAP2602
Product Identifier(s)	
Category	Enterprise/Service Provider Access Point, Switch/Controller or Router
Hardware Version	Product: , Wi-Fi Component:
Firmware Version	Product: 15.2(20130305), Wi-Fi Component:
Operating System	Proprietary / Other: Unspecified
Frequency Band(s)	2.4 GHz, 5 GHz - Concurrent

Summary of Certifications

CLASSIFICATION	PROGRAM
Connectivity	Wi-Fi CERTIFIED™ a, b, g, n
	WPA™ – Enterprise, Personal
	WPA2™ – Enterprise, Personal
Optimization	WMM®
	WMM®-Power Save

Figura 6.5 Certificado de Interoperabilidad Wi-Fi del AP Cisco Aironet 2600.



Wi-Fi CERTIFIED™ Interoperability Certificate

This certificate lists the features that have successfully completed Wi-Fi Alliance interoperability testing.
Learn more: www.wi-fi.org/certification/programs

Certification ID: WFA14567 Page 1 of 2

Date of Last Certification	July 20, 2012
Company	Linksys, LLC
Product	Linksys EA2700 Advanced Dual-Band N Router
Model Number	EA2700
Product Identifier(s)	
Category	Access Point for Home or Small Office (Wireless Router)
Hardware Version	Product: , Wi-Fi Component:
Firmware Version	Product: v1.1.38.138503 / EA2700, Wi-Fi Component:
Operating System	Proprietary / Other: Unspecified
Frequency Band(s)	2.4 GHz, 5 GHz - Concurrent

Summary of Certifications

CLASSIFICATION	PROGRAM
Connectivity	Wi-Fi CERTIFIED™ a, b, g, n
	WPA™ – Enterprise, Personal
	WPA2™ – Enterprise, Personal
Optimization	WMM®
	WMM®-Power Save
Access	Wi-Fi Protected Setup™

Figura 6.6 Certificado de Interoperabilidad Wi-Fi del AP Linksys-Cisco EA2700.

VI.1.3 Algoritmos de Control de Admisión y de Sintonización

La provisión de la QoS en las redes Wi-Fi se introdujo a través del estándar IEEE 802.11e. Pero el uso de IEEE 802.11e no puede garantizar por si solo la congestión en la red ni la QoS demandada por los tráficos Wi-Fi, especialmente multimediales. Por ese motivo, se necesitan esquemas de control de admisión de alta eficiencia y de calidad.

Los algoritmos de control de admisión son un componente clave en la administración de los recursos basada en principios de QoS. En resumen, para admitir un nuevo flujo de tráfico deben cumplirse dos condiciones:

- que haya suficientes recursos para cumplir con la QoS del nuevo tráfico, y
- que el nuevo tráfico de tiempo real, en un clase de servicio particular, no degrade la QoS de los tráficos existentes, mientras que simultáneamente se asegura que el ancho de banda sea utilizado eficientemente.

Los esquemas de control de admisión varían de acuerdo a los principios de diseño que se hayan utilizado. Básicamente, el control de admisión toma su decisión considerando tres componentes fundamentales: un criterio de admisión, un control de admisión, e información de estado de QoS y flujos de la red (Figura 6.7). Estos componentes actúan en conjunto para obtener los objetivos mencionados precedentemente.

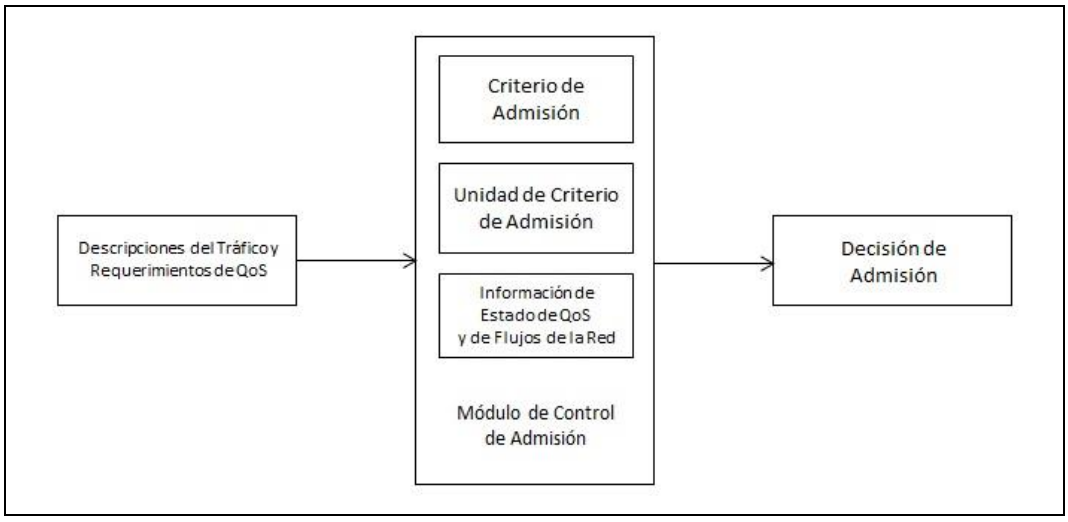


Figura 6.7 Componentes básicos de un Algoritmo de Control de Admisión

El módulo de control de admisión tiene como entradas el descriptor del tráfico y los requerimientos de QoS del flujo, y como su salida la

decisión de admitir el flujo en la QoS demandada, o denegarlo si no se puede cumplir con la QoS. Un descriptor de tráfico es un conjunto de parámetros del cliente (estación) que describen las características del tráfico. Para tomar la decisión de control de admisión, el módulo de control de admisión ejecuta el criterio de admisión que es un conjunto de reglas establecidas.

Recordemos que un algoritmo de sintonización de parámetros EDCA es la función o mecanismo que selecciona los parámetros EDCA futuros a partir de los valores actuales y el estado corriente de la red. Por lo tanto, ambos algoritmos cumplen diferentes funciones. Y se observa, entonces, que un algoritmo de control de admisión puede funcionar sin un algoritmo de sintonización, pero no tendría sentido práctico un algoritmo de sintonización sin un control de admisión.

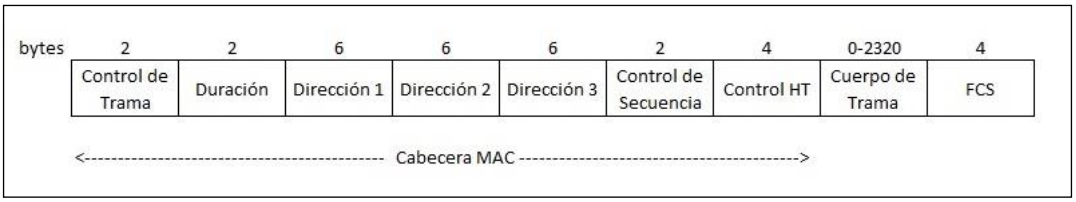
En esta instancia es necesario destacar que aunque los mensajes de señalización requeridos para soportar el procedimiento de Control de Admisión están definidos en el estándar 802.11e, las reglas de admisión permanecen aún abiertas, es decir, no están especificadas. Y por eso, se suceden diferentes propuestas de investigación sobre EDCA 802.11e, para proveer servicios Wi-Fi mejorados, basados en el uso de nuevas propuestas en las reglas de los algoritmos de control de admisión.

Finalmente, en la Figura 6.3 puede observarse que el equipo CISCO Aironet 2600 es un ejemplo de una implementación concreta propietaria de control de admisión de voz o video (por separado). Y que el equipo permite, a su vez, modificar los parámetros EDCA manualmente (sin un algoritmo de sintonización).

VI.2. DETALLES DE FUNCIONAMIENTO DEL ESTÁNDAR 802.11E

VI.2.1 Elemento Conjunto de Parámetros EDCA

Existe un mecanismo de comunicación entre el AP y sus estaciones (o clientes) que se basa en el uso de las tramas beacons que emiten los APs. Los beacons son uno de los tipos de tramas de administración previstos en 802.11e (Figura 6.8).



El cuerpo de la trama de una trama de administración del subtipo beacon contiene más de 55 tipos distintos de elementos de información (en subcampos), entre los que se encuentra el elemento Conjunto de Parámetros EDCA (EDCA Parameter Set). Este elemento suministra información necesaria a las estaciones (clientes) Wi-Fi, para una operación con QoS durante los instantes o periodos de contención CP (Figura 6.9).

1	1	1	1	4	4	4	4
ID de Elemento	Longitud	Info de QoS	Reservado	Registro Parámetro AC_BE	Registro Parámetro AC_BK	Registro Parámetro AC_VI	Registro Parámetro AC_VO

Figura 6.9 Vista de los campos del elemento de Conjunto de Parámetros EDCA

El elemento Conjunto de Parámetros EDCA está preparado para ser usado por el AP para establecer o cambiar políticas cuando aceptan nuevas estaciones Wi-Fi, o un nuevo tráfico dentro de la estación. El formato del campo de Info de QoS contiene el subcampo Cuenta de Actualización del Conjunto de Parámetros EDCA, que es inicialmente configurado a 0 y se incrementa cada vez que cambia cualquiera de los parámetros EDCA. Se observa que para almacenar los parámetros EDCA se destina un campo de 4 bytes para cada una de las 4 AC: voz (AC_VO Parameter Record), video (AC_VI Parameter Record), mejor esfuerzo (AC_BE Parameter Record) o background (AC_BK Parameter Record). Estos campos, a su vez se subdividen en: 1 byte para el subcampo ACI/AIFSN, 1 byte para el subcampo ECWmin/ECWmax y 2 bytes para el subcampo TXOP Limit, como se presenta en la Figura 6.10.

bytes	1	1	2
	ACI/AIFSN	ECWmax / ECWmax	TXOP Limit

Figura 6.10 Vista del formato de campos de los Registros de Parámetros (AC_BE, AC_BK, AC_VI y AC_VO)

El formato del campo ACI/AIFSN se presenta en la Figura 6.11. El valor del campo ACI (AC Index) señala todos los parámetros EDCA del registro correspondiente. El subcampo ACM (Admission Control Mandatory) indica que control de admisión se utilizará para la AC. Si el subcampo ACM es igual a 0, no hay control de admisión para el correspondientes AC. Si el subcampo ACM vale 1, el control de admisión tiene que usarse, antes de la transmisión, usando los parámetros de acceso de esa AC. El subcampo AIFSN indica el valor de prioridad expresado en número de slots necesarios que una estación STA debe esperar antes de iniciar una transmisión. El valor mínimo para el subcampo AIFSN es 2.

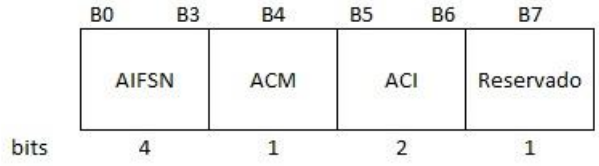


Figura 6.11 Campo ACI/AIFSN

Los campos ECMmin y ECWmax se presentan en la Figura 6.12 Los campos ECWmin y ECWmax codifican los valores de CWmin y CWmax, respectivamente.

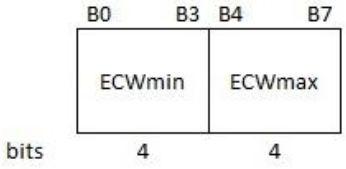


Figura 6.12 Campos ECWmin y ECWmax

VI.2.2 Elemento TSPEC para la señalización del control de admisión

El estándar IEEE 802.11e especifica el mecanismo de señalización básico requerido para implementar el Control de Admisión en Wi-Fi basadas en EDCA [82]. El Control de Admisión se aplica a cualquier AC cuando está activo el campo Control de Admisión Obligatorio (ACM - Admission Control Mandatory). En este caso, todas las STAs que quieren usar esta AC deben enviar una trama de solicitud ADDTS (Add Traffic Stream) que contiene el TSPEC (Traffic SPECification) del nuevo flujo (Figura 6.13).

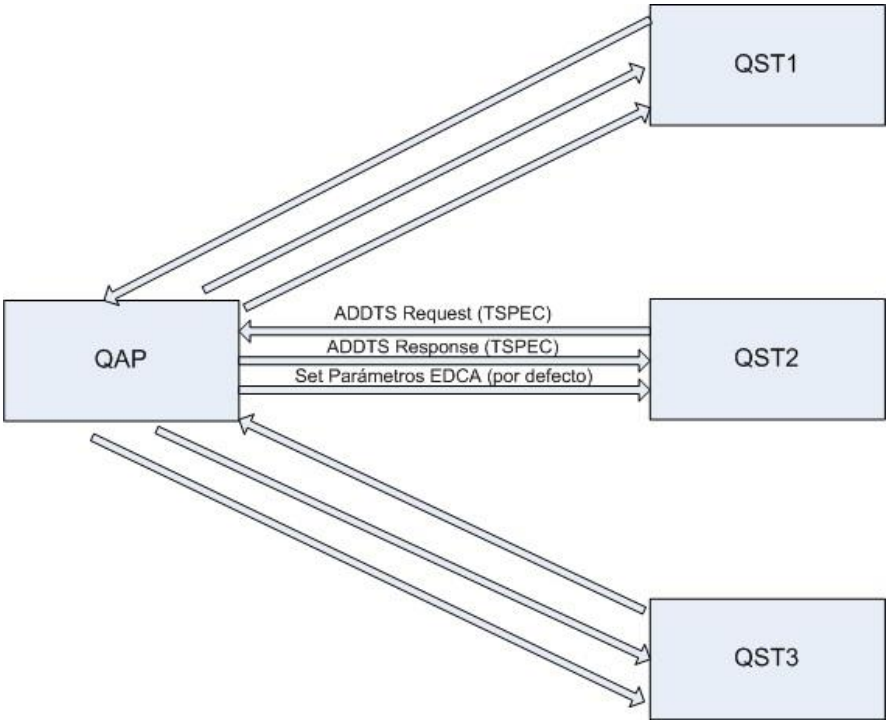


Figura 6.13 Mecanismo de señalización entre el AP y las estaciones Wi-Fi (por defecto)

El elemento TSPEC contiene el conjunto de parámetros que definen las características y expectativas de QoS de un flujo de tráfico. El formato del elemento de información comprende varios ítems, como se muestra en la gráfica en la Figura 6.14. Entre ellos, la velocidad de datos mínima, pico o promedio; intervalo de servicio mínimo, máximo o de inactividad; velocidad de capa física mínima; etc. El TSPEC permite un conjunto más extenso de parámetros que puedan necesitarse o que estén disponibles, para cualquier instancia particular de un tráfico con QoS parametrizado. Si los parámetros TSPEC no están especificados, los campos se llenan con 0s.

bytes	1	1	3	2	2	4	4	4	4
	ID elemento	Longitud	Info TS	Tamaño MSDU Nominal	Tamaño MSDU Máximo	Intervalo de Servicio Mínimo	Intervalo de Servicio Máximo	Intervalo de Inactividad	Intervalo de Suspensión

bytes	4	4	4	4	4	4	4	2	2
	Tiempo de Inicio del Servicio	Velocidad de Datos Mínimo	Velocidad de Datos Media	Velocidad de Datos Pico	Tamaño de Ráfaga	Límite de Retardo	Velocidad Física Mínima	Exceso de Ancho de Banda	Tiempo Medio

Figura 6.14 Formato del elemento de información TSPEC

Después de la recepción de una solicitud ADDTS, el Control de Admisión que corre en el AP, en base a la TSPEC recibida y el estado corriente del sistema, decide si:

- Admitir el nuevo flujo con la TSPEC demandada,
- Sugerir otra TSPEC que podría admitir la red, o
- Rechazar el flujo.

Una vez que se ha tomado una decisión, el Control de Admisión envía a la correspondiente STA un paquete ADDTS de respuesta, notificando la decisión (Figura 6.13). Cuando la estación recibe la respuesta, debe decidir si la misma satisface sus requerimientos de tráfico. De otro modo, la STA puede planificar otra solicitud ADDTS, después de un periodo de tiempo.

Si tanto la Llamada de Control de Admisión (CAC - Call Admission Control) y la STA aceptan, el flujo se vuelve activo. Cuando el flujo finaliza, la STA debe enviar un paquete DELTS (DELete Traffic Stream) para permitir al CAC liberar los recursos usados por este flujo.

VI.2.3 Caso de Estudio de Control de Admisión con Sintonización de los Parámetros EDCA

En [179], se propone un protocolo de Control de Admisión, basado sobre el protocolo de señalización del estándar de 802.11e, que incluye un algoritmo de sintonización para el ajuste dinámico de los parámetros EDCA. El mismo se representa en las Figuras 6.15 y 6.16, y será tomado como un caso de estudio para entender el funcionamiento de un algoritmo de control de admisión combinado con sintonización automática.

Para decidir si un flujo se puede aceptar, en [186] se presentó un modelo analítico (sintético) de EDCA (construido con Teoría de Colas), que se usa para estimar la factibilidad de las nuevas condiciones de estado (incluyendo el flujo solicitado).

Así, cada vez que un nuevo flujo arriba o deja el sistema el CAC decide si el nuevo flujo podría aceptarse, y cuál es la configuración más apropiada de los parámetros EDCA. Para ello, el modelo permite evaluar todas las características EDCA, tales como las oportunidades de transmisión (TXOP), el uso de diferentes espacios intertramas (AIFS) y valores diferentes de la instancia de back-off (CWmin, CWmax).

Los valores de estos parámetros EDCA resultarán de la lógica del algoritmo de sintonización utilizado (como sería el caso del algoritmo MTDA propuesto en el presente trabajo de tesis), que trabaja en conjunto con (o embebido en) el protocolo del Control de Admisión.

En la Figura 6.15, el algoritmo de sintonización estaría representado esquemáticamente en los pasos algorítmicos dónde se indica “Selección de parámetros EDCA”.

El desarrollo de un control de admisión de tiempo real combinado con un algoritmo de sintonización es crucial para proveer soluciones prácticas que podrían ser implementadas en APs y placas de red wireless comerciales.

El control de admisión debería sólo usar la información que el estándar IEEE 802.11e puede almacenar, de acuerdo a la propuesta del estándar, tal como el número de flujos activos, el ancho de banda solicitado por cada flujo rígido, o en caso de un flujo elástico, el ancho de banda mínimo requerido (aunque se prevé que las ACs de best-effort y background pueden usarse sin solicitudes de TSPEC).

Los elementos TSPEC de las ACs de EDCA son suficientemente simples para permitir asignar capacidad a partir de ellos. Aunque, podrían proponerse cambios menores para definir nuevas características del tráfico que ayuden a mejorar la calidad de la especificación de tráfico, e incluirlos en la señalización del estándar IEEE 802.11e.

Alternativamente se podría plantear el uso de los campos opcionales previstos en el estándar.

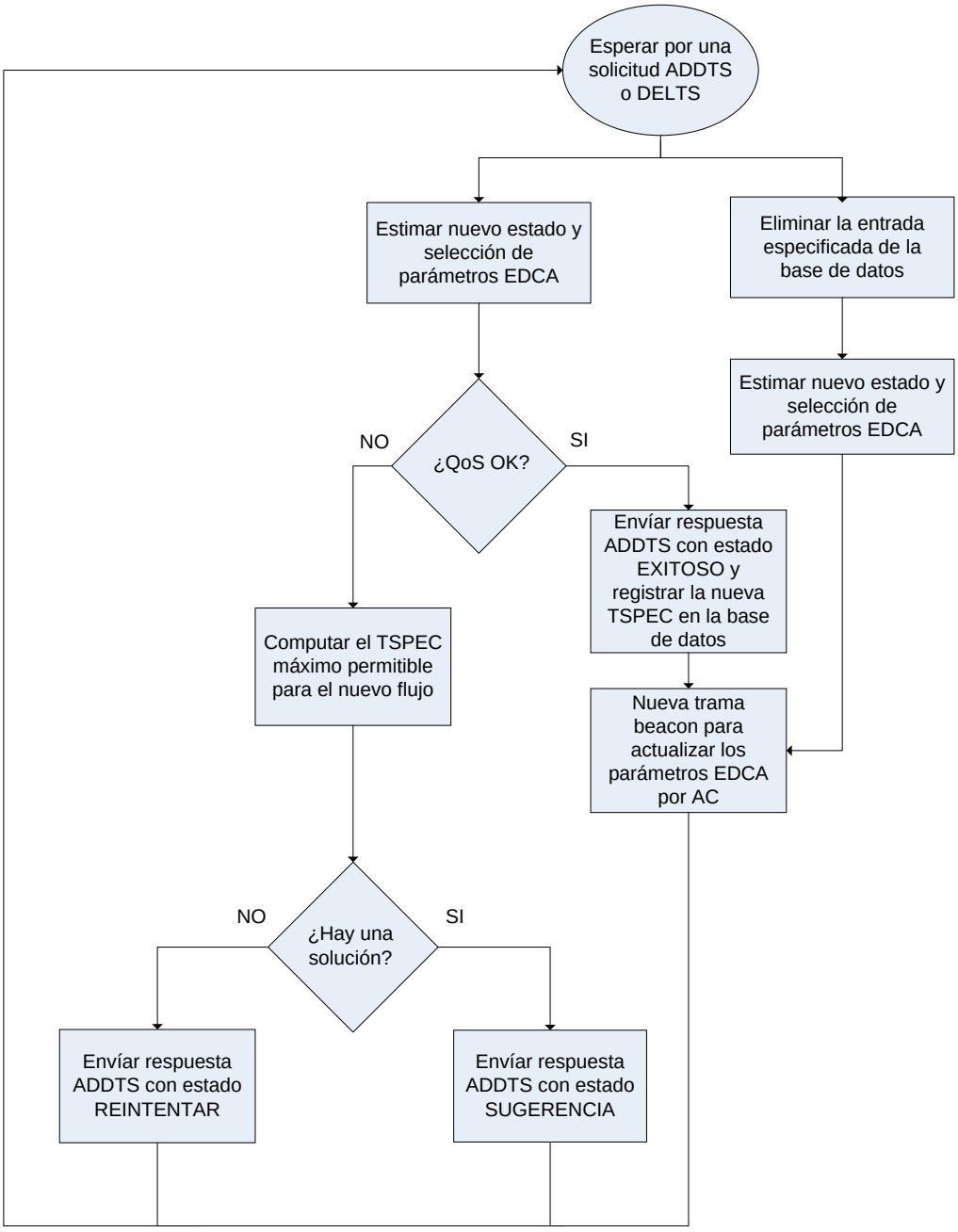


Figura 6.15 Procedimiento de Control de Admisión en el AP

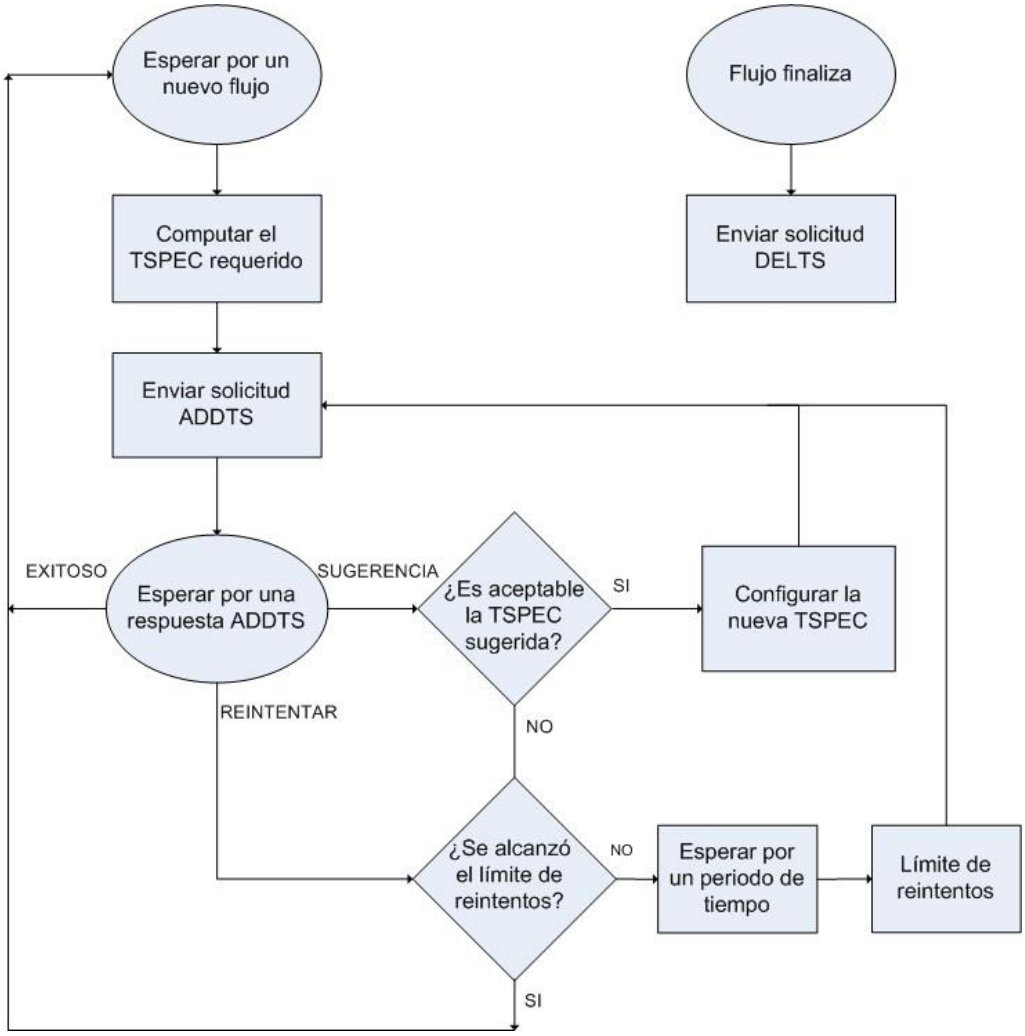


Figura 6.16 Procedimiento de Control de Admisión en la STA

VI.3) ASIGNACIÓN DINÁMICA DE PARÁMETROS EDCA

VI.3.1 Previsión en el estándar EDCA IEEE 802.11e

De [82] se desprende que el AP con soporte de QoS debe anunciar los parámetros EDCA en el elemento de Conjunto de Parámetros EDCA incorporado en las tramas Beacon, en todas las Respuestas de Prueba seleccionadas, y las tramas de Respuesta de Reasociación. Si las STAs no reciben ningún elemento, pueden usar los valores por defecto para los parámetros EDCA (Figura 6.13).

De esta forma, se observa que las últimas versiones de 802.11 permiten un mecanismo básico de actualización dinámica de los parámetros, ante eventuales cambios que pudiesen determinarse en el AP. Aunque no se especifica si los nuevos valores se obtienen por

reconfiguraciones manuales (Figuras 6.17) o de manera automática (Figura 6.18). Aun así, esto implica una facilidad mayor al momento de la implementación de las mejoras algorítmicas de sintonización adaptativas de los parámetros EDCA.

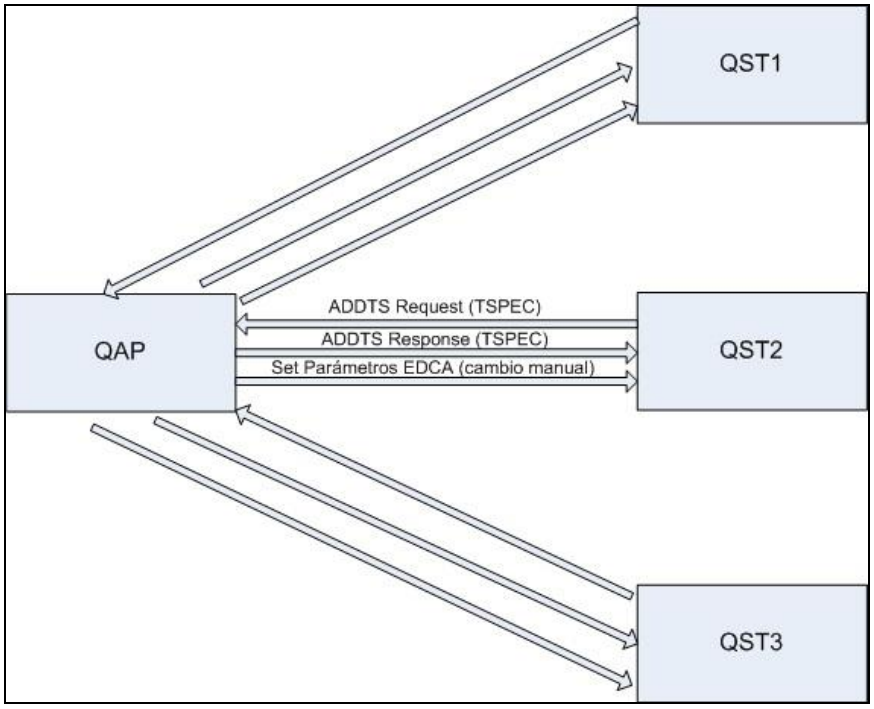


Figura 6.17 Mecanismo de señalización entre el AP y las estaciones Wi-Fi (cambio manual)

VI.3.2 Ajustes en el hardware o firmware del AP y los clientes Wi-Fi

VI.3.2.1 Introducción

Una WNIC (Wireless network interface controller) es un controlador de interface de red que usan los APs y otros dispositivos Wi-Fi. Como las NICs Ethernet, la WNIC operan sobre la Capa 1 y Capa 2 del modelo OSI.

La WNIC Wi-Fi es fundamental para el funcionamiento de los dispositivos en estos tipos de redes. La placa de red usa una antena para comunicarse por medio de microondas. Puede venir integrada en la placa principal o motherboard de las computadoras, notebooks, netbooks, tablets y otros dispositivos móviles. Además, puede opcionalmente instalarse usando un slot PCI, o utilizar un puerto USB.

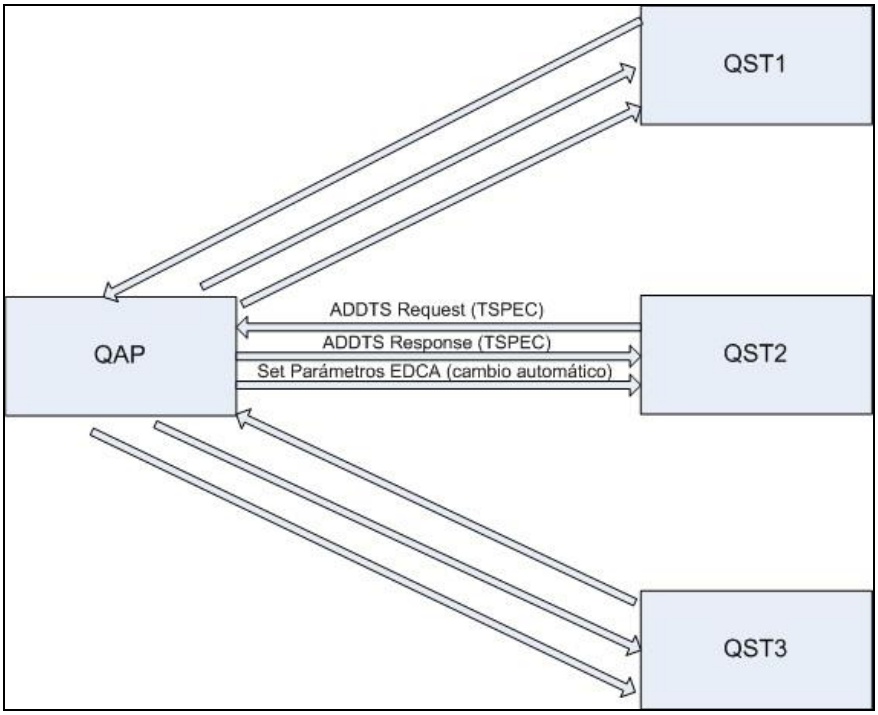


Figura 6.18 Mecanismo de señalización entre el AP y las estaciones Wi-Fi (cambio automático)

La WNIC Wi-Fi incluye el hardware digital, controladores, buffers, y el firmware que ejecuta las versiones de los protocolos que soporta. Efectivamente, el conjunto de estándares IEEE 802.11 establece las especificaciones de bajo nivel que permite a un puerto Wi-Fi operar en una red de este tipo. Los controladores de una interface 802.11 temprana son sólo compatibles con las variantes tempranas del estándar 802.11, mientras que las placas de red más nuevas soportan los estándares nuevos y los más viejos. Para el caso particular de un AP con QoS (QAP), el puerto Wi-Fi correspondiente con WMM cumple las especificaciones de la norma IEEE 802.11e.

En las WNIC 802.11, la MLME (MAC Sublayer Management Entity) puede estar implementada en el hardware o firmware de la WNIC. Opcionalmente, puede ejecutarse como software de un host. Una WNIC que tiene la función MLME en hardware o firmware se llama una FullMAC NIC o HardMAC NIC. Un dispositivo FullMAC oculta la complejidad del protocolo 802.11 a la CPU principal o procesador del dispositivo.

Los chips FullMAC son típicamente usados en dispositivos móviles porque:

- Son más fáciles de integrar en productos pequeños y complejos,

- Se ahorra tiempo de procesamiento cuando se dispone de una CPU especializada en 802.11,
- Los vendedores de los chips tiene un mejor control para la fabricación y actualización de la MLME de la versión 802.11 correspondiente.

El firmware de una WNIC 802.11 es el programa o software que se ejecuta en su CPU. Comprende los módulos de código de programas, para ejecutar las especificaciones de la norma, e interactuar con los otros componentes de la pila TCP/IP.

Finalmente, y sólo con el objeto de dar una visión integral, se aclara que existen implementaciones de estudio e investigación, puramente de software, que se ejecutan sobre plataformas tipo Linux combinadas con el popular driver de código abierto MadWifi v0.9.4.

VI.3.2.2 Almacenamiento en memoria de los parámetros EDCA

La implementación efectiva del algoritmo del protocolo EDCA 802.11e, y por lo tanto, la certificación WMM, ya sea por hardware o firmware, se trata básicamente de un programa con sus constantes y variables, locales y globales.

Cuando se utilizan los parámetros EDCA, pueden darse diversas situaciones según cómo estén almacenados los parámetros, y si sus valores son constantes por defecto o modificables, a saber:

- Que los dispositivos no permitan el cambio manual de los parámetros EDCA. En este caso es posible que el algoritmo del protocolo tenga embebidas las constantes asociadas a los parámetros EDCA dentro de las instrucciones del código de lenguaje de máquina correspondiente (direccionamiento inmediato). El administrador solo habilita o no el soporte WMM. En lenguaje assembler se presentaría de la siguiente forma:

```
MOV AX,31        ; AX=CWmin
MOV BX,1023      ; BX=CWmaX
```

- Que los dispositivos no permitan el cambio manual de los parámetros EDCA, pero almacenando los datos en memoria. En este caso, las constantes asociadas a los parámetros EDCA por defecto estarán almacenados en posiciones de memoria, a las que accede el algoritmo del protocolo EDCA 802.11e (Figura 6.19). Este ajuste sólo requiere un cambio en el modo de direccionamiento de los datos que contienen los parámetros EDCA dentro del algoritmo.

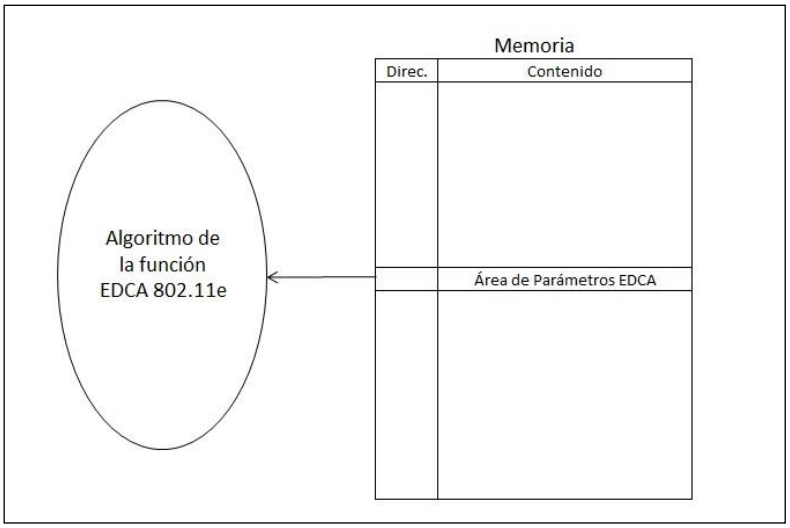


Figura 6.19 Representación de los parámetros EDCA por defecto en memoria

- Que se permita la configuración manual de los parámetros EDCA. En este caso, los datos asociados a dichos parámetros estarán almacenados como variables del programa en posiciones de memoria, a las que accede el algoritmo del protocolo EDCA 802.11e (Figura 6.20). Para el cambio manual, el administrador de red puede configurar esas variables a través de las instrucciones de línea de comando, entornos gráficos, o wizards construidas al efecto.

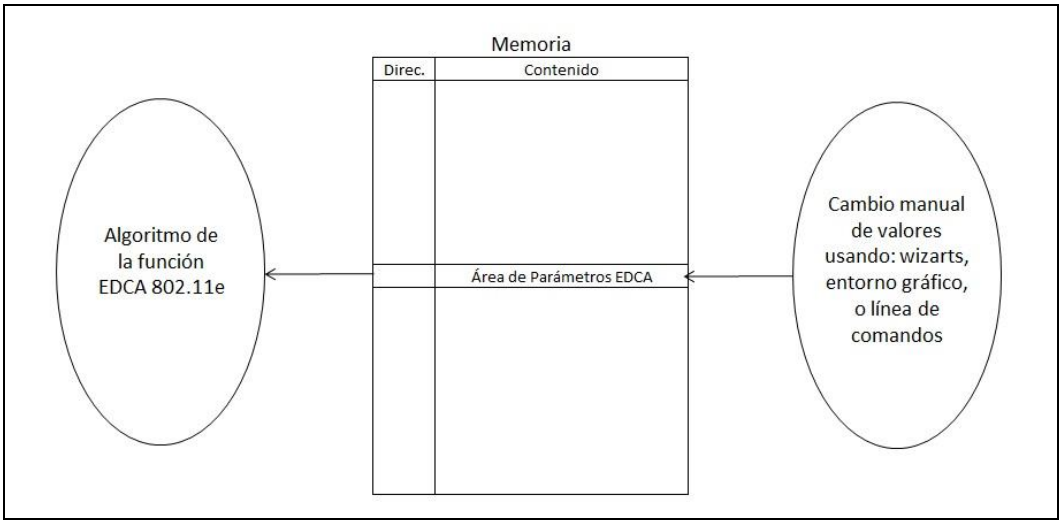


Figura 6.20 Representación de los parámetros EDCA en memoria (cambio manual)

- Para poder usar el algoritmo de sintonización complementariamente al estándar IEEE 802.11e, podría adoptarse el esquema de los parámetros EDCA almacenados en memoria. En esta situación, sería el algoritmo de sintonización (o el algoritmo de control de admisión de

acuerdo a la perspectiva de estudio) el que seleccionaría el nuevo valor de los parámetros EDCA, y lo almacenaría automáticamente en las posiciones de memoria correspondientes. El algoritmo de la función EDCA 802.11e tomará los nuevos valores de esas posiciones de memoria (Figura 6.21). En estos términos, no se requeriría cambios del estándar, y el algoritmo de sintonización MTDA sería un complemento que dinámicamente seleccionaría los valores más apropiados de los parámetros EDCA.

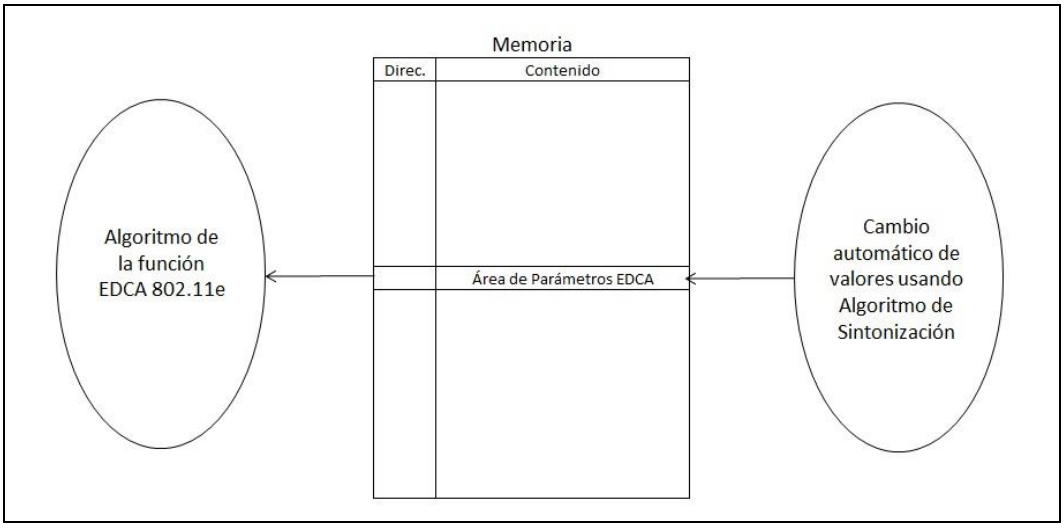


Figura 6.21 Representación de los parámetros EDCA en memoria (cambio automático)

En resumen, los ajustes necesarios para la utilización del algoritmo MTDA estarían referidos a actualizaciones del firmware de los APs y de las placas de red. Habría que adicionar la lógica algorítmica adaptativa en el AP para seleccionar los parámetros EDCA según el estado de la red, y cambios menores de la función EDCA y de la señalización entre el AP y las STAs. La implementación se realizaría sin modificaciones (o cambios menores) en el módulo del código de la función EDCA IEEE 802.11e, y su inclusión dentro del código del control de admisión.

VI.4 IMPLICANCIAS ECONÓMICAS DE LA IMPLEMENTACIÓN

La optimización de los parámetros EDCA es una forma efectiva de incrementar la capacidad de manipulación de tráficos heterogéneos simultáneos y con restricciones determinadas de QoS, y por lo tanto, usar menos APs por cantidad de STAs, permitiendo la reducción de costos en equipamiento.

Por ejemplo, considerando un parque de 20 estaciones Wi-Fi, con los requerimientos de QoS para el tráfico de voz (1% de máxima pérdida de rendimiento) y el Escenario 1.1 planteados en V.3.1, la reducción en la cantidad del número de APs sería de 2 a 1 (Figura 6.17). Del análisis, Figuras y Tablas dadas en III.3.1.1 se desprende que para dar esa QoS se necesitarían 2 APs (1 cada 10 estaciones) usando los parámetros EDCA por defecto, y 1 usando la sintonización MTDA.

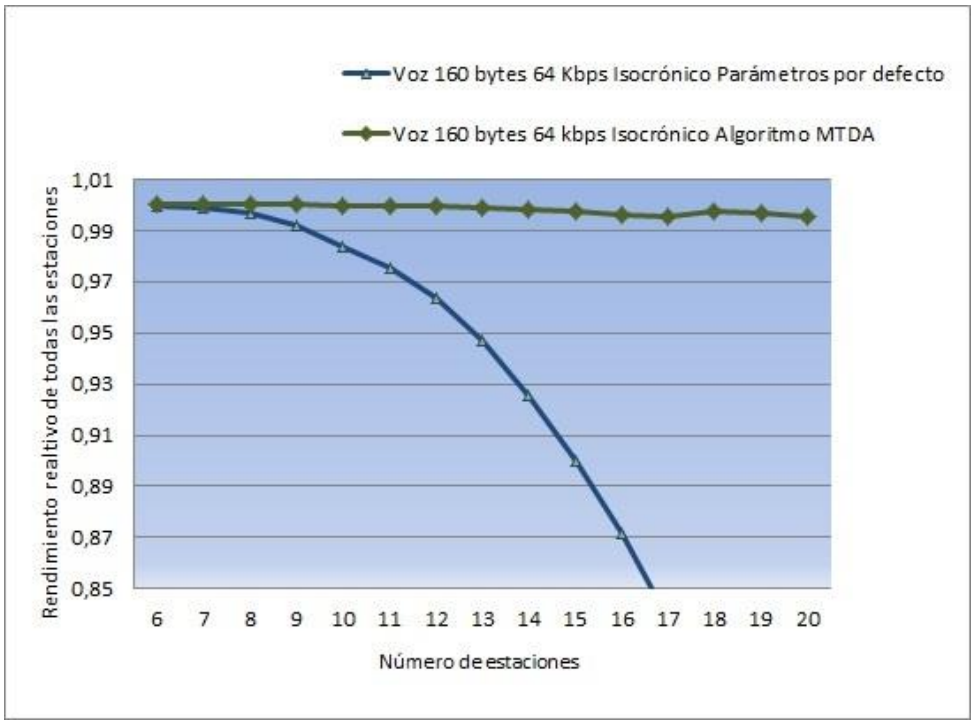


Figura 6.22 Rendimiento relativo para el tráfico de voz por defecto y con el Algoritmo MTDA

Además, se observa que la versión actual de la norma 802.11 favorece la inclusión de las mejoras de EDCA analizadas, combinando la propuesta del algoritmo de sintonización MTDA y un mecanismo de Control de Admisión.

VI.5) SUMARIO

En este Capítulo se ha tratado sobre la certificación EDCA/WMM introducida por la Alianza Wi-Fi y líderes industriales de las comunicaciones de red, que aseguran el soporte del estándar EDCA 802.11e, sobre los dispositivos de diversos fabricantes, a los fines de la compatibilidad y de su cumplimiento.

Posteriormente, se efectúa una visión general del estándar EDCA IEEE 802.11e sobre los mecanismos previstos de control de admisión de tráfico, y de posible cambio manual o automático de los parámetros EDCA. Ambos aspectos, fundamentales para la QoS, especialmente en los escenarios de saturación.

Luego, se analizaron las posibilidades prácticas de almacenar en memoria las variables que contienen los parámetros EDCA en el firmware. Esto se constituye en una facilidad, dado que permite almacenar en dicha área los nuevos valores desde el Algoritmo de Sintonización MTDA que consume el algoritmo de EDCA 802.11e. La implementación del algoritmo de sintonización puede realizarse sin modificaciones (o con cambios menores) en el módulo del código de la función EDCA.

En este escenario, la optimización de la red actualizando dinámicamente los parámetros EDCA, se realizaría a un costo relativamente bajo. Y entonces, se podría incrementar la capacidad de cada AP con QoS, y el uso de menos APs por STAs, especialmente en los escenarios con tráficos provenientes de aplicaciones estrictas, como los son las de tiempo real y multimedia.

CAPITULO VII

CONCLUSIONES y TRABAJOS FUTUROS

Este capítulo resume los principales resultados y conclusiones de investigación obtenidos a través de esta tesis, destacando cómo los diversos aspectos analizados satisfacen los objetivos originales. Se plantean posibles trabajos futuros como una continuación de la presente tesis.

VII.1) CONCLUSIONES

La más importante motivación para el trabajo de investigación de esta tesis fue proponer soluciones novedosas que permitan mejores prestaciones y el cumplimiento de las especificaciones de QoS en las comunicaciones de redes Wi-Fi. En este contexto, el foco principal ha sido el análisis de soluciones y alternativas complementarias a aplicar sobre el protocolo EDCA IEEE 802.11e, para soportar QoS en un ambiente de comunicaciones compartido con tráfico diverso.

Inicialmente, se efectuó un estudio y relevamiento de las tecnologías inalámbricas y de las tendencias de los servicios que serán demandados en el futuro sobre dispositivos fijos o móviles. Además, se presentaron taxonomías de las diversas líneas de investigación definidas para dar soporte de QoS en redes Wi-Fi. La clasificación general organiza estas líneas en: a) basadas en la diferenciación de servicio en la capa MAC, b) basadas en el control de admisión y la reserva de ancho de banda en las capa MAC y superiores, y c) basadas en la adaptación de enlace en la capa física. En este amplio panorama, el trabajo de tesis se focalizó dentro de la primera taxonomía, y específicamente, sobre la categoría referida al mecanismo de diferenciación de servicios en capa MAC, conocido como EDCA, del estándar IEEE 80211e.

La presentación de estas taxonomías es muy ilustrativa de la diversidad de aportes que confluyen en un objetivo común: proveer un mejor comportamiento de QoS en las redes Wi-Fi. Puede deducirse que algunas de las contribuciones de estas líneas son efectivamente independientes entre sí, aunque también en otros casos se produce una gama diversa de interacciones mutuas. Además, a lo largo del relevamiento queda en claro que las múltiples técnicas no limitan los esfuerzos para el tratamiento de las colisiones en este ambiente compartido, buscando evitar, resolver o reducir las mismas. Ni tampoco se ahorra tiempo para evaluar las posibilidades de coexistencia de

estaciones de tiempo real y comunes, en un mismo ambiente de comunicación, con o sin una arquitectura que provea estricto control.

En el Apéndice A, se presentó un estudio sobre la evolución de diversos formalismos utilizados en la modelación de los Sistemas Dinámicos de Eventos Discretos (DEDS), donde los estados y eventos discretos tienen un rol fundamental. Los conceptos de los DEDS y los formalismos que los representan se aplican en una gran diversidad de ámbitos de aplicación, como sistemas de fabricación flexibles, sistemas de transporte, sistemas distribuidos, redes de telecomunicaciones, sistemas de control automático, etc. Progresivamente, y haciendo un breve repaso de la evolución histórica de varios formalismos para representar DEDS, se presentó la definición de la conducta de las Redes de Actividades Estocásticas Jerárquicas (HSANs), recurso matemático que integra las más importantes contribuciones para la modelación de sistemas complejos. Así, se justificó la conveniencia de la selección y adopción de un modelo HSAN de la función EDCA 802.11e, corriendo sobre el simulador Möbius, que cumple con las especificaciones del estándar. El modelo fue validado satisfactoriamente, replicando los escenarios propuestos por autores de reconocida trayectoria internacional. Las comparaciones se realizaron contrastando el rendimiento sobre un canal 802.11a a 24 Mbps, libre de estaciones ocultas y móviles, con un número creciente de 1 a 20 estaciones, y con ensayos para obtener el máximo rendimiento en función de la longitud de las tramas. Las estaciones introducen en un canal tres tipos de tráfico: un flujo de voz isocrónico, un flujo de video y otro de mejor esfuerzo con distribución Poisson.

Ingresando en aspectos más puntuales de análisis del comportamiento de EDCA, usando variantes del modelo de simulación construido con HSAN, se evaluó las condiciones del protocolo EDCA 802.11e para soportar QoS en escenarios 802.11a en 36 Mbps, con tráfico diverso, interferencias electromagnéticas, y usando la configuración estática por defecto de los parámetros AIFSN, CWmin, CWmax y TXOP. Además, se sustituyó el tráfico de mejor esfuerzo con distribución Poisson por distribución Pareto. Los escenarios de simulación tuvieron en cuenta categorías de tráfico de distinta prioridad que interactúan entre si, en presencia o ausencia de algunas de las fuentes, o al cambiar la proporción relativa entre ellas.

Dentro de este contexto, con todos los escenarios propuestos, e incluida la experiencia novedosa cuando se modifica la proporción entre tráficos, se realizó un análisis exhaustivo de métricas, como el rendimiento directo y relativo, tamaño de cola, retardos, y descarte de cola y de colisión. Se demostró que la variación en la proporción relativa de

diferentes tipos de tráficos de nodos wíreless con QoS tiene un efecto diferenciado sobre el comportamiento y estado general de la red WLAN que integran. Se concluyó entonces, que el estado de la red Wi-Fi con QoS es esencialmente dinámico, donde las prestaciones de las diversas métricas de cada tráfico y de la red, dependen de las características de los tráficos existentes y de la proporción relativa entre ellos.

Además, se verificó que es erróneo asumir que los parámetros estáticos por defecto aseguren las mejores prestaciones, dentro de esta dependencia de tipo y mezcla de tráficos. Para ello, se propuso una metodología novedosa para encontrar rápidamente los valores de los parámetros EDCA que maximicen las métricas de rendimiento. Se demostró que el parámetro AIFSN influye más significativamente que los otros parámetros, al efecto de asegurar QoS. Los resultados sugieren asignar un valor distinto de AIFSN para los flujos de voz, de video y de mejor esfuerzo; y en general, alejar los valores de AIFSN, CWmin y CWmax del tráfico de mejor esfuerzo de los valores usados para el tráfico de video, y estos de los valores usados para el tráfico de voz. Adoptando nuevos valores de mejora de los parámetros EDCA, y ensayando sobre los escenarios de trabajo, se demostró que pueden obtenerse mejoras del rendimiento en todos los casos, con respecto a los parámetros por defecto, con un máximo de 35% para el tráfico de voz, y de un 25% para la red, con una carga variable de 1 a 20 estaciones. Estos valores de mejora de los parámetros EDCA podrían ser utilizados para la configuración manual de los dispositivos Wi-Fi que siendo certificados WMM, permitan estos ajustes por parte del administrador de red, para mejores prestaciones de los tráficos presentes.

Luego, se propuso y experimentó un novedoso algoritmo de sintonización que llamamos MTDA. Se demostró su funcionamiento en escenarios más realistas, y que tiene en cuenta el estado dinámico del sistema, y experimenta trabajar siempre en puntos de mejora, indiferente de los cambios aleatorios en el tráfico WLAN. Es decir, que el algoritmo MTDA responde a la dinámica de la red, variando y adaptando los parámetros EDCA. Para ciertos escenarios, pueden obtenerse ganancias en las métricas de rendimiento, con mejoras del orden del 70% para el tráfico de voz, y del 45% para la red, incrementando el número de estaciones de 1 a 25. Se ha verificado que EDCA 802.11e, por sí sola, asegura la diferenciación de tráfico, y el algoritmo de sintonización complementa el protocolo, con mejores prestaciones y el cumplimiento de las restricciones de QoS, aún en las condiciones de alta carga.

Finalmente, se presentó una secuencia de temas vinculados a la implementación práctica del algoritmo MTDA, sus costos asociados, y las ganancias técnicas y económicas. Se trató sobre la certificación

EDCA/WMM introducida por la Alianza Wi-Fi y líderes industriales de las comunicaciones de red, que aseguran el soporte del estándar EDCA 802.11e, sobre los dispositivos de diversos fabricantes, a los fines de la compatibilidad y de su cumplimiento. Posteriormente, se efectuó una visión general sobre los mecanismos previstos de control de admisión de tráfico, y de posible cambio manual o automático de los parámetros EDCA. Y se analizó que la implementación del algoritmo de sintonización puede realizarse sin modificaciones en el módulo del código de la función EDCA, a un costo relativamente bajo, y con ahorros significativos en el equipamiento.

VII.2) CONTRIBUCIONES PRINCIPALES

Del apartado anterior, se resumen las siguientes contribuciones principales:

1. La especificación de un nuevo algoritmo de sintonización que llamamos MTDA (Algoritmo de Diferenciación de Tráfico Múltiple) que selecciona los parámetros EDCA futuros, dados los valores actuales y el estado corriente de la WLAN [75-77].
2. Las conclusiones experimentales obtenidas del algoritmo MTDA evaluado por simulación utilizando múltiples escenarios sobre la capa física IEEE 802.11a con una velocidad de datos de 36 Mbps, en presencia de ruido de 1.10^{-4} BER [78-80].
3. La especificación y experimentación de un nuevo tipo de escenario que plantea la evaluación de las métricas cuando se cambia la proporción relativa de los tipos de tráficos en la red [78-80].
4. La especificación y experimentación de una nueva metodología de análisis cuantitativo para determinar el grado de impacto diferenciado de los parámetros EDCA (AIFSN, CWmin, CWmax y TXOP) [81].
5. La determinación de valores de los parámetros EDCA que aseguran mejores rendimientos y pueden utilizarse para la configuración manual de los mismos en los dispositivos Wi-Fi certificados WMM [81].
6. La demostración de que las características de mecanismo estándar EDCA IEEE 802.11e combinado con un algoritmo de sintonización son apropiadas para soportar todo tipo de tráfico de datos multimedia, de tiempo real y control automático en los ambientes administrativos e industriales de próxima generación [75-77].
7. La implementación de variantes del modelo de simulación sobre el simulador Möbius que describe EDCA IEEE 802.11e (Enhanced Distributed Channel Access – EDCA), usado en cada una de las situaciones descriptas en los apartados anteriores [75-81].

VII.3) TRABAJOS FUTUROS

Los trabajos futuros que pueden plantearse desde esta tesis pueden relacionarse con la profundización de los estudios de comportamiento de EDCA 802.11e.

Inicialmente, una línea de investigación posible es evaluar cuantitativamente el comportamiento de EDCA, con un algoritmo de sintonización, para tráfico de control automático. Los estudios preliminares sugieren que puede usarse el canal de voz con dicho objeto, asignando los mismos parámetros que se le asignan dinámicamente. Alternativamente, podría usarse para el tráfico de control una prioridad superior a todos los tráficos presentes, incluido el tráfico de voz.

Otra instancia de trabajos futuros es la determinación cualitativa y cuantitativa de interferencias EMI. Los escenarios usados han supuesto una tasa de error determinada. Se observó que para ese valor, el impacto sobre las prestaciones generales de la red no es significativo. Para ello, podría plantearse el estudio de escenarios en un ambiente industrial, variando la tasa de interferencias en una banda de valores máximos y mínimos.

Además, es posible introducir estudios complementarios de EDCA y MTDA, pero en las diferentes capas físicas de 802.11. Preliminarmente, es de esperar un mejor comportamiento general de la red para mayores velocidades Wi-Fi. Estos aspectos de estudio podrían combinarse con la selección de modelos analíticos de mayor precisión y velocidad de computación, apropiados para utilizarse en los procesos de admisión de estaciones. El uso de los modelos analíticos para la evaluación del estado de la red es factible con los procesadores y memorias corrientes de los AP de alta gama. Aunque, podría evaluarse su sustitución por el uso de tablas que almacenen el estado de la red, obtenidas por simulación, e indexadas a partir de las TSPEC de los tráficos presentes y los parámetros EDCA corrientes.

Por otro lado, se ha iniciado la medida, modelación y simulación del tráfico de video Wi-Fi de video de movimiento total y de videoconferencias sobre EDCA 802.11e. El escenario bajo estudio considera que el tráfico de video alcanza el 70% del tráfico total, como son las tendencias esperadas para los próximos años. El modelo de estos tráficos tiene una función de distribución probabilística del tipo Gamma, con una función de distribución autorregresiva. Al efecto, es necesario determinar previamente los parámetros de las funciones mencionadas.

Finalmente, otro curso de investigación podría desarrollarse sobre el impacto en el rendimiento máximo que tiene el tamaño de la trama. A lo largo de la tesis, en el proceso de validación del modelo utilizado, se presentaron los valores de rendimiento máximo alcanzables para varios tamaños de tramas, configurando el canal en 802.11a en 24 Mpbs. Podría realizarse un análisis comparativo detallado abarcando otras capas físicas y velocidades de 802.11.

BIBLIOGRAFÍA/REFERENCIAS

[1] W. Hsu, D. Dutta and A. Helmy, “TRACE: Structural Analysis of User Association Patterns in University Campus Wireless LANs", IEEE Transactions on Mobile Computing (TMC), vol. 11, no. 11, pp. 1734-1748, November 2012.

[2] M. Balazinska and P. Castro, “Characterizing mobility and network usage in a corporate wireless local-area network”, Proceeding MobiSys '03 Proceedings of the 1st international conference on Mobile systems, applications and services, pp. 303-316, ACM New York, NY, USA, 2003.

[3] J. Kim and A. Helmy, "The Evolution of WLAN User Mobility and Its Effect on Prediction", IEEE IWCMC International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing, July 2011

[4] M. Karaliopoulos, M. Papadopouli, E. Raftopoulos and H. Sen, “On scalable measurement-driven modeling of traffic demand in large WLANs”, 15th IEEE Workshop on Local & Metropolitan Area Networks 2007, LANMAN 2007, pp. 102-110, New York, NY, 2007.

[5] M. Karaliopoulos and C. Rohner, “Trace-based performance analysis of opportunistic forwarding under imperfect node cooperation”, Proceeding IEEE INFOCOM 2012, pp. 2651-2655, Orlando, Florida, USA, 2012.

[6] W. Hsu and A. Helmy, “Principal Component Analysis of User Association Patterns in Wireless LAN Trace”, Department of Electrical Engineering, University of Southern California, 2003.

[7] W. Hsu and A. Helmy, “On Modeling User Associations in Wireless LAN Traces on University Campuses”, Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks, 4th International Symposium on, 2006.

[8] W. Hsu and A. Helmy, “On Nodal Encounter Patterns in Wireless LAN Traces”, Mobile Computing, IEEE Transactions on, vol. 9 , no. 11, pp. 1563 – 1577, nov 2010.

[9] C. Taduce and T. Gross, “A Mobility Model Based on WLAN Traces and its Validation”, INFOCOM 2005. 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings IEEE, vol.1, pp. 664 – 674, march 2005.

[10] M. Papadopouli, H. Shen and M. Spankis, “Characterizing the Duration and Association Patterns of Wireless Access in a Campus”, Wireless Conference 2005, Next Generation Wireless and Mobile Communications and Services (European Wireless), 11th European, Nicosia, Cyprus, 2005.

[11] T. Henderson, Ilya Abyzov and D. Kotz, “The Changing Usage of a Mature Campus-wide Wireless Network”, Computer Networks 52 (2008) 2690–2712, Elsevier, 2008.

[12] X. Meng, S. Wong, Y. Yuan and S. Lu, “Characterizing Flows in Large Data Networks”, Proceedings of the 10th annual international conference on Mobile computing and networking, pp. 174-186, Proceedings of ACM MobiCom, New York, NY, USA, 2004.
[13] CRAWDAD project (Community Resource for Archiving Wireless Data At Dartmouth), <http://au.crawdad.org/>, (Accessed November 26th, 2014).
[14] N. C. Taher, Y. Ghamri-Doudane, B. El Hassan and N. Agoulmine, “An Accurate Analytical Model for 802.11e EDCA under Different Traffic Conditions with Contention-Free Bursting”, Hindawi Publishing Corporation, Journal of Computer Networks and Communications, vol. 2011, Article ID 136585, pp. 24, March 2011.
[15] N. Chendeb, Y. Ghamri-Doudane and B. El Hassan, “Effect of transmission opportunity limit on transmission time modeling in 802.11e”, in Proceedings of the 7th IEEE International Workshop on IP Operations and Management 2007, IPOM ’07, pp. 156–167, San José, California, USA, 2007
[16] K. Kosek-Szott, M. Natkaniec and A. Pach, “A simple but accurate throughput model for IEEE 802.11 EDCA in saturation and non-saturation conditions”, Journal Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking, vol. 55, no. 3, pp. 622-635, February, 2011.
[17] Z. Qinglin, D. Tsang and T. Sakurai, “A simple nonsaturated IEEE 802.11e EDCA model”, Performance Evaluation of Computer & Telecommunication Systems (SPECTS), 2011 International Symposium, pp. 135-142, June 2011.
[18] Y. Lee, “Throughput Analysis Model for IEEE 802.11e EDCA with Multiple Access Categories”, Journal of Applied Research and Technology 2013, Nov 2013.
[19] H. Chongyang and S. Shioda, “Analytical model for IEEE 802.11e EDCA with non-saturated stations”, Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2013 9th International, pp. 437,442, July 2013.
[20] S. Datta and S. Das, “Performance analysis of multiple classes of traffic in Wi-Fi networks: A Markov chain-based approach”, Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2013 9th International, pp. 299-304, July 2013.
[21] C. Huang and S. Shioda, “Detailed analysis for IEEE 802.11e EDCA in non-saturated conditions - Frame-transmission-cycle approach”, Modeling & Optimization in Mobile, Ad Hoc & Wireless Networks (WiOpt), 2013 11th International Symposium on, pp. 601-608, May 2013.

[22] G. Prakash and P. Thangaraj, “Throughput analysis of IEEE 802.11e EDCA under non saturation condition”, 3rd International Conference on Electronics Computer Technology, ICECT 2011, pp. 117-121, 2011.
[23] G. Prakash and P. Thangaraj, “Analytical modeling of IEEE 802.11 e enhanced distributed channel access under a non-saturation condition”, Journal of Computer Science, vol. 7, no. 4, pp. 554, 2011.
[24] S. Szott, M. Natkaniec and A. Pach, “An IEEE 802.11 EDCA Model with Support for Analysing Networks with Misbehaving Nodes”, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking 2010, vol. 2010, 2010.
[25] Y. Shimoyamada, K. Sanada, and H. Sekiya, "Non-saturated and saturated throughput analysis for IEEE 802.11e EDCA multi-hop networks", Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), 2013 16th International Symposium on, pp. 1 - 6, June 2013.
[26] S. Tursunova, and K. Young-Tak, “Realistic IEEE 802.11e EDCA model for QoS-aware cloud service provisioning”, IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE) 2012, pp. 55-56, January 2012.
[27] Y. Zhang, W. Li, J. Zhang, H. Long and W. Wang, “Performance Analysis and QoE-Aware Enhancement for IEEE 802.11e EDCA under Unsaturations”, 2011 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall), pp. 1-5, San Francisco, California, USA, September 2011.
[28] F. Peng, “Theoretical performance evaluation of EDCA in IEEE 802.11e wireless LANs”, European Transactions of Telecommunications, Published online in Wiley InterScience, John Wiley & Sons, Ltd.September 25, 2010.
[29] In. Inan, F. Keceli and E. Ayanoglu, “Analysis of the 802.11e enhanced distributed channel access functions”, IEEE Transactions on Communications, vol. 57, no. 6, June 2009.
[30] J. Hu, G. Min, M. Woodward and W. Jia, “A comprehensive analytical model for IEEE 802.11e QoS differentiation schemes under unsaturated traffic loads”, in Proceedings of the IEEE International Conference on Communications 2008, ICC’08, May 2008.
[31] I. Hwang and H. Chang, “Performance assessment of IEEE 802.11e EDCF using three-dimension Markov chain model”, Applied Mathematical Sciences, vol. 2, no. 3, pp. 139-151, 2008.
[32] J. Lim, H. Yun and S. Seo, “Throughput model of IEEE 802.11e EDCF with consideration of delay bound constraint”, in Proceedings of the IEEE International Conference on Communications 2008, ICC’08, May 2008.

[33] F. Daneshgaran, M. Laddomada, F. Mesiti and M. Mondin, “Unsaturated throughput analysis of IEEE 802.11 in presence of non ideal transmission channel and capture effects”, IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 7, no. 4, pp. 1276-1286, 2008.
[34] NS-2/NS-3 network simulator - version 3.20, Available at <http:// http://www.nsnam.org/ >, 2014, (Accessed November 26th, 2014).
[35] O. Tech. OPNET, Available at: < http://www.riverbed.com/products/ performance-management-control/opnet.html?redirect=opnet>, 2014, (Accessed November 26th, 2014).
[36] Scalable Network Technologies (SNT), GloMoSim, http://web.scalable-networks.com/content/qualnet, 2014, (Accessed November 26th, 2014).
[37] IP Traffic, ZTI, Available at <http://www.zti-telecom.com>, 2014, (Accessed November 26th, 2014).
[38] G. Prakash and P. Thangaraj, “Performance Comparison of IEEE 802.11e EDCA and 802.11b DCF Under Non-Saturation Condition using Network Simulator”, Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, ISSN: 2040-7467, November 2012.
[39] D. Vir, S. Agarwal and S. Imam, “Productivity Analysis of Reactive Routing Protocol for IEEE 802.11e standard using QualNet Simulator”, International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), ISSN: 2248-9622, vol. 3, Issue 3, pp.1190-1196, May 2013.
[40] R. Moraes, F. Vasques, P. Portugal, and J. Fonseca, “A traffic separation mechanism (TSm) allowing the coexistence of CSMA and real-time traffic in wireless 802.11e networks”, Proceeding ROCOM'06 Proceedings of the 6th WSEAS international conference on Robotics, control and manufacturing technology , vol. 5, no. 5, pp. 890-897, 2006.
[41] J. W. T. Robinson, “An analytical model for the service delay distribution of IEEE 802.11e enhanced distributed channel access,” Master’s thesis, School of Engeneering Science, 2005, Available at <. http://summit.sfu.ca/item/9229>, (Accessed November 26, 2014)
[42] T. Murata, “Petri nets: Properties, analysis and applications”, Proceedings of the IEEE, vol. 77, no. 4, pp. 541 – 580, 1989.
[43] E. Teruel, G. Franceschinis and M Silva, ”Untimed Petri Nets” , Performance Models for Discrete Event Systems with Synchronisations: Formalisms and Analysis Techniques Vol.1, HCM-MATCH Advanced Schools - Capitulo 2- set/98.
[44] M. Silva, “Las Redes de Petri en la Automática y la Informática”, Editorial Alfa Centauro S.A, ISBN 9788472880450, 1985.
[45] M. Silva, “Introducing Petri nets”, In Practice of Petri Nets in Manufacturing, páginas 1-62, Chapman & Hall, 1993.

[46] G. Chiola, C. Dutheillet, G. Franceschinis and S. Haddad, “Stochastic well-formed coloured nets form symmetric modeling applications”, IEEE Transactions on Computers, vol. 42, no. 11, pp 42, November 1993.
[47] G. Chiola, ”Timed Petri Nets”, Performance Models for Discrete Event Systems with Synchronisations: Formalisms and Analysis Techniques Vol.1, HCM-MATCH Advanced Schools, Capitulo 3, set/98.
[48] J. Campos, G. Chiola, J. Colom and M. Silva, ”Properties and performance bounds for timed marked graphs”, IEEE Transactions on Circuits and Systems: Fundamental Theory and Applications, vol. 39, no. 5, pp. 386-401, Mayo 1992.
[49] M. Molloy, ”Performance analysis using stochastic Petri nets”, IEEE Transaction on Computers, vol. C-31, no. 9, pp. 913-917, Septiembre 1982.
[50] G. Chiola, M. Marsan, G. Balbo and G. Conte, “Generalized stochastic Petri nets: A definition at the net level and its implications”, IEEE Transactions on Software Enginneering, vol. 19, no. 2, pp. 89-107, Feb 1993.
[51] M. Marsan, G. Chiola and A. Fumagalli, ”Timed Petri net model for accurate performance analysis of CSMA/CD bus LAN”, Journal of Computer Communications, vol. 10, no. 6, pp. 304-312, Diciembre 1987.
[52] R. Zurawski and M. Zhou, “Petri nets and industrial applications: A tutorial”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 41, no. 6, pp. 567 – 583, 1994.
[53] J. Billington, M. Diaz and G. Rozenberg, “Application of Petri nets to communication networks: Advances in Petri nets”, Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag, vol. 1605, ISBN 978-3-540-65870-2, 1999.
[54] R. German, “Performance Analysis of Communication Systems - Modeling with Non-Markovian Stochastic Petri Nets”, Wiley interscience series in systems and optimization, Chichester: John Wiley & Sons, ISBN 978-0-471-49258-0, 2000.
[55] P. Portugal, A. Carvalho and F. Vasques, “A model based on a stochastic Petri net approach for dependability evaluation of controller area networks (CAN)”, 5th IFAC International Conference on Fieldbus Systems and their Applications, vol. 6, no.1, pp. 150-157, Puebla, México, 2005.
[56] W. Sanders and J. Meyer, “Stochastic Activity Networks: Formal Definitions and Concepts”, Lectures Notes in Computer Science, Springer, vol. 2090, pp. 315–343, ISBN 978-3-540-42479-6, 2001.

[57] C. Lindemann, “Performance Modelling with Deterministic and Stochastic Petri nets”, ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review, Special issue on Stochastic Petri Nets, vol. 26, no. 2, pp. 3, ACM New York, NY, USA, 1998.

[58] R. German and A. Heindl, “Performance evaluation of IEEE 802.11 wireless LANs with stochastic Petri nets”, Proceedings 8th International Workshop on Petri Nets and Performance Models, pp. 44 – 53, Zaragoza, España, 1999.

[59] A. Heindl and R. German, “Performance modeling of IEEE 802.11 wireless LANs with stochastic Petri nets”, Elsevier Performance Evaluation, vol. 44, no. 1-4, pp. 139 – 164, 2001.

[60] A. Heindl and R. German, “The impact of backoff, EIFS, and beacons on the performance of IEEE 802.11 wireless LANs”, Proceedings IEEE International Computer Performance and Dependability Symposium (IPDS), pp. 103 – 112, Chicago, Illinois, USA, 2000.

[61] R. Moraes, P. Portugal and F. Vasques, “A Stochastic Petri Net Model for the Simulation Analysis of the IEEE 802.11e EDCA Communication Protocol”, In Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), pp. 38-45, Prague, Czech Republic, September 20-22, 2006

[62] S. Mangold, C. Sunghyun, O. Klein, G. Hiertz and L. Stibor, “IEEE 802.11e wireless LAN for quality of service”, In Proceedings of the European Wireless, vol. 1, pp. 32-39, Florence, Italy, 2002.

[63] S. Wiethoelter and C. Hoene, “Design and verification of an IEEE 802.11e EDCF simulation model in NS-2.26 (TKN-03-19)”, Technical University of Berlin - Telecommunication Networks Group (TKN), Berlín, November 2003.

[64] S. Wiethoelter, M. Emmelmann, C. Hoene and A. Wolisz, “TKN EDCA model for NS-2 (TKN-06-003)”, Technical University of Berlin - Telecommunication Networks Group (TKN), Berlín, June 2006.

[65] W.H. Sanders et al., "Model-Based Environment for Validation of System Reliability, Availability, Security, and Performance", http://otm.illinois.edu/technologies/model-based-environment-validation-system-reliabil>, <https://www.mobius.illinois.edu/>, (Accessed November 26th, 2014).

[66] D. Daly, D. Deavours, J. Doyle, P. Webster and W. Sanders, “Möbius: An extensible tool for performance and dependability modeling”, in Computer Performance Evaluation: Modelling Techniques and Tools, Proceedings of the 11th International Conference, TOOLS 2000, vol. 1786 of Lecture Notes in Computer Science, pp. 332-336, Berlin, Springer-Verlag, 2000.

[67] W. H. Sanders, “Integrated frameworks for multi-level and multi-formalism modeling”, The 8th International Workshop on Petri Nets and Performance Models 1999, Zaragoza, Spain, pp. 2-9, September 1999.
[68] J. F. Meyer, A. Movaghar and W. Sanders, “Stochastic activity networks: structure, behavior and application", Proceeding International Workshop on Timed Petri Nets, pp. 106-115, 1985.
[69] A. Movaghar and J. Meyer, “Performability modeling with stochastic activity networks", in Proceeding 1984 of the Real-Time Systems Symposium, pp. 215-224, Austin, Texas, USA, December 1984.
[70] A. Movaghar, “Performability modeling with stochastic activity networks”, Doctoral Dissertation, University of Michigan, ACM Digital Library, 1985.
[71] W. Sanders and J. Meyer, "Reduced Base Model Construction Methods for Stochastic Activity Networks", Proceedings of the Third International Workshop on Petri Nets and Performance Models 1989, PNPM89, pp. 84-84, Kyoto, Japan, 1989.
[72] A. Stillman, “Model Composition within Möbius Modelling Framework”, University of Illinois at Urbana-Champaign, 128 páginas,1999.
[73] W. Sanders and R. Freire, "Efficient Simulation of Hierarchical Stochastic Activity Network Models", Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications, vol. 3, no. 2-3, pp. 271-299, 1993.
[74] A. Williamson, “Discrete Event Simulation in the Möbius Modelling Framework”, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1998.
[75] S. Pérez, J. Campos, H. Facchini, and G. Cangemi, "Tuning mechanism for IEEE 802.11 e EDCA optimization", Revista IEEE Latin America Transactions, vol. 11, no. 4, pp. 1134-1142, September 2013.
http://www.ewh.ieee.org/reg/9/etrans/issues/vol11/vol11issue4June2013/11TLA4:21CristobalPerez.pdf>, (Accessed November 26th, 2014),
[76] S. Pérez, H. Facchini and L. Bisaro, “Mejorando el rendimiento y QoS en Wi-Fi con sintonización de parámetros EDCA 802.11e”, XVIII CACIC 2012, Congreso Argentino de la Computación 2012, <http:/latys.griditics.frm.utn.edu.ar>, (Accessed November 26th, 2014), <http://redunci.info.unlp.edu.ar/cacic.html>, <http://redunci.info.unlp.edu.ar/files/indice_Cacic_2012.pdf>,
[77] S. Pérez, H. Facchini, G. Mercado and L. Bisaro, “Estudio sobre la Distribución de Tráfico Autosimilar en Redes Wi-Fi”, XVIII CACIC 2012, Congreso Argentino de Ciencias de la Computación 2012, B. Blanca, Bs.As. <http:/latys.griditics.frm.utn.edu.ar>, (Accessed November 26th, 2014), <http://redunci.info.unlp.edu.ar/cacic.html>, <http://redunci.info.unlp.edu.ar/files/indice_Cacic_2012.pdf>,

[78] S. Pérez, J. Campos, H. Facchini, G. Mercado and L. Bisaro, “EDCA 802.11e performance under different scenarios – Quantitative analysis”, AINA 2013 – 27th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Aplications, Barcelona, España, 25 al 28 de marzo de 2013.
<http:/latys.griditics.frm.utn.edu.ar>, (Accessed November 26th, 2014)

[79] 2013 – Publicación en la IEEE Computer Society - IEEE Computer Society Digital Library (CSDL), del artículo "EDCA 802.11e Performance under different scenarios – Quantitative Analysis”, abril 2013.
http://www.computer.org/portal/web/guest/home
http://www.computer.org/csdl/proceedings/aina/2013/4953/00/4953a802-abs.html

[80] S. Pérez, J. Campos, H. Facchini, G. Mercado and L. Bisaro, "Throughput Quantitative Analysis of EDCA 802.11e in Different Scenarios”, Journal of Computer Science and Technology (JCS&T), vol. 13, no. 1, ISSN 1666-6038, abril 2013.
http://journal.info.unlp.edu.ar/journal/journal35/papers/JCST-Apr13-3.pdf, (Accessed November 26th, 2014).
<http:/latys.griditics.frm.utn.edu.ar>, (Accessed November 26th, 2014)

[81] S. Pérez, H. Facchini, A. Dantiacq and G. Cangemi, “Análisis por Simulación del Impacto de los Parámetros EDCA de la norma IEEE 802.11e Rendimento Wi-Fi”, ECEFI 2014, Agosto 2014.

[82] IEEE Std 802.11e, “802.11-2012 - IEEE Standard for Information technology--Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks--Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications”, pp. 1-2793, March 2012.

[83] W. Pattara-Atikom, P. Krishnamurthy and S. Banerjee, “Distributed Mechanisms for Quality of Service in Wireless LANs”, IEEE Wireless Communications, vol. 10, no. 3, pp. 26–34, June 2003.

[84] Y. Ge and J. Hou, “An Analytical Model for Service Differentiation in IEEE 802.11”, IEEE International Conference on Communications 2003 (ICC '03), vol. 2, pp. 1157–1162, Anchorage, Alaska, May 2003.

[85] A. Banchs and X. Pérez, “Providing Throughput Guarantees in IEEE 802.11e Wireless LAN”, Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), IEEE WCNC ’02, vol. 1, pp. 130–38, Orlando, Florida, March 2002.

[86] A. Banchs and X. Pérez, “Distributed Weighted Fair Queuing in 802.11 Wireless LAN”, IEEE International Conference on Communications 2002, ICC 2002, vol. 5, pp. 3121–3127, New York, April. 2002.

[87] N. Vaidya, A. Dugar, P. Bahl and S. Gupta, “Distributed Fair Scheduling in a Wireless LAN”, IEEE Transactions on Mobile Computing 2005, ACM MOBICOM 2000, vol. 4, no. 6, pp. 616–629, November 2005.
[88] W. Pattara-Atikom, S. Banerjee and P. Krishnamurthy, “Starvation Prevention and Quality of Service in Wireless LANs”, 5th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications 2002, vol. 3, pp. 1078-1082, Honolulu, Hawaii, Oct. 2002.
[89] S. Ahsanuzzaman and F. Granelli, “Performance Analysis of Wireless Ad-Hoc Network Based on EDCA IEEE 802.11e”, Journal Academic, World Academy of Science, Engineering and Technology, no. 45, pp. 33, 2010.
[90] H. Singh, T. Singh and M. Kaur, “Improving the quality of Service of EDCF over DCF For Real Time Applications Using Probability Algorithm”, International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering, vol. 3, vol. 4, April 2014.
[91] S. Nguyen, H. Swinburne and L. Andrew, “Service Differentiation without Prioritization in IEEE 802.11 WLANs”, IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 12, no. 10, pp. 2076-2090, October 2013.
[92] Jagadevikoodi, Kalaiselvi and Rakeshmarturkar, “Providing Fair Transmission Opportunity By Detecting And Penalizing Malicious Stations In IEEEE 802.11e EDCA WLAN And Analyzing The Performance Of IEEE 802.11e”, International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), vol.3, no.4, pp. 200-206, Jul-Aug 2013.
[93] K. Kosek-Szott, M. Natkaniec and A. Pach, “A new busy signal-based MAC protocol supporting QoS for ad-hoc networks with hidden nodes”, Wireless Networks, Springer Link, vol. 19, no. 6, pp. 1135-1153, August 2013
[94] H. Liu, C. Li, S. Hao and X. Cai, “A novel internal collision managing mechanism of IEEE 802.11e EDCA”, 19th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC) 2013, pp. 473-478, Aug 2013.
[95] A. Banerjee, J. Tantra, C. Foh, C. Yeo and B. Lee, “A Service/Device Differentiation Scheme for Contention-Tone-Based Wireless LAN Protocol”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 59, no. 8, pp. 3872-3885, 2010.
[96] I. Tinnirello, G. Bianchi, and Y. Xiao, “Refinements on IEEE 802.11 Distributed Coordination Function Modeling Approaches”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 59, no. 3, pp. 1055-1067, 2010.

[97] I. Tinnirello and G. Bianchi, “Rethinking the IEEE 802.11e EDCA Performance Modeling Methodology”, IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 18, no. 2, pp. 540-553, 2010.
[98] S. Szott, M. Natkaniec and R. Canonico, “Detecting backoff misbehaviour in IEEE 802.11 EDCA”, European Transactions on Telecommunications, vol. 22, no. 1, pag. 31-34, Juanary 2011.
[99] R. Mackenzie and T. O’Farrell, “Achieving service differentiation in IEEE 802.11e enhanced distributed channel access systems”, IET Communications, vol. 6, no. 7, pp. 740–750, May 2012.
[100] K. Kosek-Szott, “A comprehensive analysis of IEEE 802.11 DCF heterogeneous traffic sources”, Ad Hoc Networks, vol. 16, Elsevier Science Publishers B. V., May 2014.
[101] A. Lindgren, A. Almquist and O. Schelén, “Evaluation of Quality of Service Schemes for IEEE 802.11 Wireless LANs”, 26th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks 2001, pp. 348-351 Tampa, Florida, November 2001.
[102] H. Zhu, M. Li, I. Chlamtac and B. Prabhakaran, “Distributed Admission Control for IEEE 802.11 Ad Hoc Networks”, Eric Jonsson School of Engineering and Computer Science, University of Texas at Dallas, 2003.
[103] M. Barry, A. Campell and A. Veres, “Distributed Control Algorithms for Service Differentiation in Wireless Packet Networks”, INFOCOM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings, vol. 1, pp. 582-590, Anchorage, Alaska, 2001.
[104] S. Valaee and B. Li, “Distributed Call Admission Control in Wireless Ad Hoc Networks”, 55 th Proceedings IEEE Vehicular Technology Conference VTC 2002, vol. 2, pp. 1244-1248, Vancouver, Canada, Sept. 24–28, 2002.
[105] S. Shah, K. Chen and K. Nahrstedt, “Dynamic Bandwidth management for Single-Hop Ad Hoc Wireless Networks”, Proceedings of the First IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications 2003, PerCom 2003, pp. 195.203, Fort Worth, Texas, USA, March 2003.
[106] M. Kazantzidis, M. Gerla and S. Lee, “Permissible Throughput Network Feedback for Adaptive Multimedia in AODV MANETs”, IEEE International Conference on Communications 2001, ICC 2001, vol. 5, pp. 1352–56, Helsinki, Finlandia, June 2001.
[107] M. Li, B. Prabhakaran and S. Sathyamurthy, “On Flow Reservation and Admission Control for Distributed Scheduling Strategies in IEEE802.11 Wireless LAN”, Proceedings of the 6th ACM international workshop on Modeling analysis and simulation of wireless and mobile systems, MSWIM '03, pp. 108-115, New York, USA, September. 2003.

[108] K. Liu, T. Wong, L. Jiandong, L. Bu and J. Han, “A Reservation-based Multiple Access Protocol with Collision Avoidance for Wireless Multihop Ad Hoc Networks”, IEEE International Conference on Communications 2003, ICC '03, vol. 2, pp. 1119–1123, May 2003.
[109] Y. Liu and M. Meng, “Survey of admission control algorithms in IEEE 802.11e Wireless LANs”, International Conference on Future Computer and Communication 2009, FCC '09, pp. 230-233, Wuhan, Hubei, China, 2009.
[110] L. Khoukhi, H. Badis, L. Merghem-Boulahia and M. Esseghir, “Admission control in wireless ad hoc networks: a survey”, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2013.
[111] R. Achary, V. Vaithiyanathan and P. Raj, “Admission Control Scheme for QoS Support in IEEE 802.11e Wireless LAN”, Research Journal of Information Technology, pp. 291-303, June 2013.
[112] M. El Masri, G. Juanole and S. Abdellatif, “Algorithm for IEEE 802.11e EDCA”, CiteSeerX Scientific Literature Digital Library and Search Engine, On enhancing a hybrid admission control, January 2014.
[113] N. Taher, Y. Doudane, B. El Hassan and N. Agoulmine, “First step towards an efficient admission control: A complete analytical model for 802.11e EDCA for throughput and delay prediction”, IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management-Workshops 2009, IM '09, pp. 217-224, 2009.
[114] C. Youngkyu and C. Sunghyun, “A joint design of admission control and transmission rate adaptation for VoIP over wireless network”, International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks 2008, WoWMoM 2008, pp. 1-12, 2008.
[115] I. de la Cruz, L. Okhwan and C. Sunghyun, “Measurement-based Call Admission Control algorithm for multi-rate VoWLANs”, 9th Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks (SECON) 2012 9th, pp. 100-102, 2012.
[116] N. Taher, Y. Ghamri-Doudane, B. El Hassan and N. Agoulmine, “An efficient model-based admission control algorithm to support voice and video services in 802.11e WLANs”, Global Information Infrastructure Symposium 2009, GIIS '09, pp.1-8, 2009.
[117] A. Banchs, P. Serrano and L. Vollero, "Providing Service Guarantees in 802.11e EDCA WLANs with Legacy Stations", IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 9, no. 8, August 2010.
[118] L. Ming and B. Prabhakaran, “On supporting reliable QoS in multi-hop multi-rate mobile ad hoc networks”, Wireless Networks, Publisher: Kluwer Academic Publishers, vol. 16, no. 3, 2010.

[119] C. Weng and H. Hung, “Performance Analysis of Priority Schemes for IEEE 802.11e Wireless Local Area Networks Using Multiple Flows Distributed Weighted Fair Queuing Algorithm”, Universal Journal of Communications and Network, 2014.
[120] S. Sirsgi, “A Routing Protocol for Efficient Bandwidth Utilization of IEEE 802.11e in Ad-hoc Network”, International Journal of Engineering Research & Technology, vol. 1, Issue 7, September 2012.
[121] A. Ruscelli and G. Cecchetti, “A IEEE 802.11e HCCA Scheduler with a Reclaiming Mechanism for Multimedia Applications”, TeCIP Institute, Scuola Superiore Sant’Anna, 56124 Pisa, Italy, March 2014.
[122] R. Skehil, M. Barry, M, W. Kent, M. O'Callaghan, N. Gawley and S. McGrath, “The common RRM approach to admission control for converged heterogeneous wireless networks”, Wireless Communications IEEE, vol. 14, no. 2, pp. 48-56, 2007.
[123] J. Pavon and S. Choi, “Link Adaptation Strategy for IEEE 802.11 WLAN via Received Signal Strength Measurement”, IEEE International Conference on Communications 2003, ICC '03, vol. 2, pp. 1108–1113, Anchorage, Alaska, May 2003.
[124] M. Lampe, T. Giebel, H. Rohling and W. Zirwas, “Per-prediction for PHY mode selection in OFDM communication systems”, IEEE Global Telecommunications Conference 2003, GLOBECOM '03, vol. 1, pp. 25-29 2003.
[125] D. Qiao, S. Choi and K. Shin, “Goodput Analysis and Link Adaptation for IEEE 802.11a Wireless LANs”, IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 1, no. 1, pp. 278–92, October 2002.
[126] P. Chevillat J. Jelitto, A. Barreto, H. Truong, “A Dynamic Link Adaptation Algorithm for IEEE 802.11a Wireless LANs”, IEEE International Conference on Communications 2003, ICC '03, vol. 2, pp. 1141–1145, Anchorage, Alaska , May 2003.
[127] B. Mullins, N. Davis and S. Midkiff, “An Adaptive Wireless Local Area Network Protocol that Improves Throughput via Adaptive Control of Direct Sequence Spectrum Parameters”, ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, vol. 1, no. 3, pp. 9–20, New York, USA Sept. 1997.
[128] K. Kosek-Szott, “Survey Paper: A survey of MAC layer solutions to the hidden node problem in ad-hoc networks”, Ad Hoc Networks, vol. 10, no. 3, Elsevier Science Publishers B. V, May 2012.
[129] A. Khan, D. Smith, S. Hussein and H. Helgert, “Performance analysis of VoIP codecs over multi-rate EDCA”, Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 2012 IEEE”, January 2012.

[130] Y. Shin, M. Choi, J. Koo, Y. Kim, J. Ihm and S. Choi, “Empirical analysis of video multicast over WiFi”, Third International Conference on Ubiquitous and Future Networks 2011, ICUFN 2011, pp. 381 – 386, 2011.
[131] S. Lakshmanan, S. Sanadhya and R. Sivakumar, “On link rate adaptation in 802.11n WLANs”, INFOCOM 2011, Proceedings IEEE, Shangai, April 2011
[132] V. Miliotis, A. Apostolaras, T. Korakis, Z. Tao and L. Tassiulas, “New channel allocation techniques for power efficient WiFi networks”, IEEE 21st International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Workshops 2012, PIMRC Workshops 2010, pp. 347-351, 2010.
[133] A. Garcia-Saavedra, P. Serrano, A. Banchs and. M. Hollick, “Energy-efficient fair channel access for IEEE 802.11 WLANs”, IEEE International Symposium on a World of Wireless”, Mobile and Multimedia Networks, WoWMoM) 2011, pp. 1-9, 2011.
[134] P. Serrano, A. Garcia-Saavedra, M. Hollick and A. Banchs, “On the energy efficiency of IEEE 802.11 WLANs”, 2010 European Wireless Conference (EW) 2010, pp. 932-939, 2010.
[135] P. Gallo, F. Gringoli and I. Tinnirello, “On the flexibility of the IEEE 802.11 technology: Challenges and directions”, Future Network & Mobile Summit, FutureNetw 2011, pp. 1-10, 2011.
[136] I. Tinnirello, G. Bianchi, P. Gallo, D. Garlisi and F. Giuliano and F. Gringoli, “Wireless MAC processors: Programming MAC protocols on commodity Hardware”, Proceedings IEEE INFOCOM 2012, pp. 1269-1277, 2012.
[137] P. Gallo, A. Krasilov, A. Lyakhov, A., I. Tinnirello and G. Bianchi, “Breaking layer 2: A new architecture for programmable wireless interfaces”, International Conference on Convergence, ICTC 2012, pp. 342-347, 2012.
[138] L. Chung-Yu, “PER prediction for convolutionally coded MIMO OFDM systems — An analytical approach”, Military Communications Conference 2012, MILCOM 2012, pp. 1-6, Orlando Florida, 2012.
[139] G. Wu, P. Havinga and M. Mizuno, “Wireless Internet over heterogeneous wireless networks”, IEEE Global Telecommunications Conference 2001, GLOBECOM '01, pp. 1759 – 1765, vol.3, San Antonio, Texas, USA, Feb. 2001.
[140] S. Park, K. Kim, D. Kim, S. Choi and S. Hong, “Collaborative QoS Architecture between DiffServ and 802.11e Wireless LAN”, The 57th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference 2003, VTC 2003, vol. 2, pp. 945-949, Jeju, Korea, April 2003.

[141] M. Li, H. Zhu, I. Chlamtac and B. Prabhakaran, “End-to-end QoS framework for heterogeneous wired-cum-wireless networks”, Journal Wireless Networks, vol. 12, no. 4, pp. 439-450, Springer-Verlag New York, Inc. Secaucus, New York, USA, July 2006.
[142] F. Vasques, "Wireless Real-Time Communication for Industrial Environments using the IEEE 802.11e Communication protocol", <http://paginas.fe.up.pt/~vasques/ieee80211e/>, (Accessed November 26th, 2014).
[143] R. Viegas, L. Guedes, F. Vasques, P. Portugal and R. Moraes, “A new MAC scheme specifically suited for real-time industrial communication based on IEEE 802.11e”, Journal Computers and Electrical Engineering, vol. 39, no. 6, pp. 1684-1704, Pergamon Press, Tarrytown, NY, USA, August 2013.
[144] R. Costa, F. Vasques, P. Portugal, R. Moraes and R. Custodio, “A coordination layer to handle real-time communication in Wi-Fi networks with uncontrolled traffic sources”, IEEE 36th Conference on Local Computer Networks Proceedings LCN '11, pp. 263-266, IEEE Computer Society Washington, USA, 2011.
[145] F. Vasques, P. Portugal, R. Moraes, and R. Custodio, “Assessment of the IEEE 802.11e EDCA protocol limitations when dealing with real-time communication”, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking , vol. 2010, no. 29, Hindawi Publishing Corp. New York, NY, United States, April 2010
[146] P. Garg, R. Doshi, R. Greene, M. Baker, M. Malek and X. Cheng, “Using IEEE 802.11e MAC for QoS over wireless”, Conference Proceedings of the 2003 IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference, pp. 537 – 42, Phoenix, Arizona, USA, 2003.
[147] Q. Ni, L. Romdhani and T. Turletti, “A survey of QoS enhancements for IEEE 802.11 wireless LAN”, Wireless Communications and Mobile Computing, vol. 4, no. 5, pp. 547 – 566, 2004
[148] Q. Ni, “Performance analysis and enhancements for IEEE 802.11e wireless networks”, IEEE Network, vol. 19, no. 4, pp. 21–27, 2005.
[149] A. Willig and A. Wolisz, “Ring stability of the PROFIBUS tokenpassing protocol over error-prone links”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 48, no. 5, pp. 1025– 033, 2001.
[150] G. Gamba, F. Tramarin and A. Willig, “Retransmission Strategies for Cyclic Polling Over Wireless Channels in the Presence of Interference”, IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 6, no. 3, pp. 405-415, August 2010.

[151] S. Pérez, H. Facchini, G. Mercado and L. Bisaro; “Análisis del Comportamiento Autosimilar del tráfico Ethernet de las Redes de Datos”, XVI CACIC 2010, Congreso Argentino de Ciencias de la Computación 2010, Capital Federal, Argentina. <http:/latys.griditics.frm.utn.edu.ar>, (Accessed November 26th, 2014), <http://redunci.info.unlp.edu.ar/cacic.html>, <http://redunci.info.unlp.edu.ar/files/indice_Cacic_2010.pdf>

[152] G. He and J. Hou, “An In-Depth, Analytical Study of Sampling Techniques for Self-Similar Internet Traffic”, 25th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems 2005, ICDCS 2005, pp. 404-413, 2005.

[153] M. Li, “Self-similarity and long-range dependence in teletraffic”, Proceedings of the 9th WSEAS international conference on Multimedia systems & signal processing 2009, MUSP'09, World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS, May 2009.

[154] M. Abu-Tair, G. Min, Q. Ni and H. Liu, “An adaptive medium access control scheme for mobile ad hoc networks under self-similar traffic”, The Journal of Supercomputing, vol. 53, no. 1, Kluwer Academic Publishers, July 2010.

[155] S. Choi, J. del Prado, N. Sai Shankar and S. Mangold, “IEEE 802.11e Contention-based Channel Access (EDCF) Performance Evaluation”, IEEE International Conference on Communications 2003, ICC '03, vol. 2, pp. 1151-1156, Anchorage, Alaska, May 2003.

[156] G. Bianchi, “Understanding 802.11e Contention-Bases Priorization Mechanism and Their Coexistence with Legacy 802.11 Stations”, IEEE Network, pp. 28-34, 2005.

[157] J. Villalón, P. Cuenca and L. Orozco, “Estudio de QoS en WLANs IEEE 802.11e”, I Congreso Español de Informática (CEDI 2005), Publicación: Actas de las Jornadas de Paralelismo, pp. 267-274, I.S.B.N.: 84-9732-430-7, Granada, España, Setiembre 2005.

[158] C. Cano, B. Bellalta, A. Sfairopoulou and J. Barceló, “Tuning the EDCA parameters in WLANs with heterogeneous traffic: A flow-level analysis”, Computer Networks, pp. 2199-2214, Elsevier B.V, September 2010.

[159] P. Serrano, “Estrategias de Configuración de Redes WLAN IEEE 802.11e EDCA”, Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería Telemática, Universidad Carlos III de Madrid, September 2006.

[160] V. Siris and M. Kavouridou, “Achieving service differentiation and high utilization in IEEE 802.11”, Personal Wireless Communications, Lecture Notes in Computer Science, vol. 2775, pp.128–137, 2003.

[161] J. Freitag, N. da Fonseca and J. de Rezende, “Tuning of 802.11e network parameters”, IEEE Communications Letters, vol. 10, no. 8, pp. 611-613, 2006.
[162] B. Bellalta, C. Cano, M. Oliver and M. Meo, “Modeling the IEEE 802.11e EDCA for MAC parameter optimization”, in Proceedings of the Performance Modelling and Evaluation of Heterogeneous Networks Conference, Het-Nets 06, IlKley, England, September 2006.
[163] M. Tüysüz and H. Mantar, “Adaptive Channel Access Tuning and QoS Support for Multimedia Applications over IEEE 802.11e WLANs”, Proceedings of the 5th International Conference on IT & Multimedia UNITEN, Malasya, nov 2011.
[164] M. Ghazvini, N. Movahedinia and K. Jamshidi K, “GTXOP: A Game Theoretic Approach for QoS Provisioning Using Transmission Opportunity Tuning”, Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran, PLoS ONE, Academic Journal, vol. 8, no. 5, May 2013.
[165] S. Rashwand and J. Misic, “IEEE 802.11e EDCA Under Bursty Traffic—How Much TXOP Can Improve Performance”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 60, no. 3, pp. 1099–1115, March 2011.
[166] J. Misic, S. Rashwand and V. Misic, “Analysis of Impact of TXOP Allocation on IEEE 802.11e EDCA under Variable Network Load”, IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, vol. 23, no. 5, pp.g 785-799, 2012.
[167] P. Patras, A. Banchs and P. Serrano, "A Control Theoretic Scheme for Efficient Video Transmission over IEEE 802.11e EDCA WLANs", ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications and Applications, vol. 8, no. 3, July 2012.
[168] Y. Gao and L. Dai, “Achieving optimum network throughput and service differentiation for IEEE 802.11e EDCA networks”, Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2013 IEEE, pp. 362-367, April 2013
[169] S. El Housseini and H. Alnuweiri, “Adaptative contention-window MAC algorithms for QoS-enabled wireless LANs”, 2005 International Conference on Wireless Networks, Communications and Mobile Computing, vol. 1, pp. 368-374, June 2005.
[170] C. Ojeda Guerra and I. Alonso Gonzalez, “Adaptative tuning mechanism for EDCA in IEEE 802.11e wireless LANs”, 14th European Wireless Conference, pp. 1-7, Prague, Czech Republic, 2008.
[171] Paul Patras, A. Banchs and P. Serrano, “A Control Theoretic Approach for Throughput Optimisation in IEEE 802.11e EDCA WLANs”, Journal of Mobile Networks and Applications, vol. 14, no. 6, pp. 697-708, December 2009.

[172] J. Misic, “Stable operation of IEEE 802.11e EDCA: Interaction between offered load and MAC parameters”, Recent Advances in Analysis and Deployment of IEEE 802.11e and IEEE 802.11p Protocol Families, Ad Hoc Networks, vol. 10, pp. 162-173, March 2012.
[173] V. Azhaguramyaa and S. Jagadeesh Kumar, “Analysis of Contention Based Method for MAC Layer in Wireless Networks”, Computer Science & Engineering: An International Journal (CSEIJ), vol. 2, no. 1, Febrero 2012.
[174] P. Serrano, A. Banchs, P. Patras and A. Azcorra, “Optimal Configuration of 802.11e EDCA for Real-Time and Data Traffic”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 59, no. 5, pp. 2511-2528, June 2010.
[175] D. Rawat, D. Popescu and M. Song, “Performance Enhancement of EDCA Access Mechanism of IEEE 802.11e Wireless LAN”, IEEE Radio and Wireless Symposium 2008, pp. 507-510, Orlando, Florida, USA, 2008.
[176] A. Andreadis, G. Benelli and R. Zambon, “Evaluation of QoS Support for Multimedia Traffics in IEEE 802.11e”, International Conference on Software in Telecommunications and Computer Networks 2006, SoftCOM 2006, pp. 91-95, Split, Croatia, 2006.
[177] J. Lee, J. Chen, W. Liao, H. Lee and M. Chen, “A Practical Cross-layer QoS Mechanism for Voice over IP in IEEE 802.11e WLANs”, IEEE International Conference on Multimedia and Expo 2007, ICME 2007, pp. 1067-1070, Beijing, China, 2007.
[178] M. Narbutt and M. Davis, “The Capability of the EDCA Mechanism to Support Voice Traffic in a Mixed Voice/Data Transmission over 802.11e WLANS: an Experimental Investigation”, 32nd IEEE Conference on Local Computer Networks, IEEE Computer Society, pp. 463-470, October 2007.
[179] C. Cano, B. Bellalta and M. Oliver, “Adaptive admission control mechanism for IEEE 802.11e WLANs”, 18th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC’07, pp. 1-5, Athens, Greece, 2007.
[180] Q. Zhao, D. Tsang and T.Sakurai, “A Scalable and Accurate Nonsaturated IEEE 802.11e EDCA Model for an Arbitrary Buffer Size”, IEEE Transactions on mobile computing, vol. 12, no. 12, pp. 2455-2469, 2013.
[181] http://www.wi-fi.org/, (Accessed November 26th, 2014).
[182] http://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/wi-fi-certified-wmm-programs, (Accessed November 26th, 2014).
[183] http://www.wi-fi.org/news-events/newsroom/wi-fi-alliance-introduces-two-new-certification-programs-for-advanced, (Accessed November 26th, 2014).

[184] www.cisco.com/en/US/prod/collateral/wireless/ps5678/ps12534/data_sheet_c78-709514.html, (Accessed November 26th, 2014).
[185] http://www.wi-fi.org/certified-products-search, (Accessed November 26th, 2014).
[186] B. Bellalta, M. Meo and M. Oliver, “VoIP Call Admision Control in WLANs in Presence of Elastic Traffic”, IEEE Journal of Communications Software and Systems, December 2006.
[187] W. Sanders and J. Meyer, “METASAN: A Performability Evaluation Tool Based on Stochastic Activity Networks”, in Proceedings of the IEEE-ACM Fall Joint Computer Conference, pp. 807-816, Dallas, Texas, USA, November 1986.
[188] W. Sanders, W. Obal, M. Qureshi and F. Widjanarko, “The UltraSAN Modeling Environment”, Journal of Performance Evaluation - Special issue: performance modeling tools, vol. 24, no. 1, pp. 89-115, October-November 1995.
[189] M. Abdollahi Azgomi and A. Movaghar, "A Modelling Tool for Hierarchical Stochastic Activity Networks", Proceedings of 11th Int. Conference on Analytical and Stochastic Modelling Technical and Applications, ASMTA04, pp141-146, Magdeburg, Germany, 2004.
[190] Y. Dallery, ”Queueing Networks”, Performance Models for Discrete Event Systems with Synchronisations: Formalisms and Analysis Techniques Vol.1, HCM-MATCH Advanced Schools. - Capítulo 1-set/98.
[191] L. Kleinrock, ”Queueing Systems” - John Wiley, A Wiley – Interscience Publication John Wiley & SonsNew York, 1975.
[192] F. Baskett, K. Chandy, R. Muntz and F. Palacios, “Open, Closed and Mixed Networks of Queues with Different Classes of Customers”, Journal of the ACM, vol. 22, no. 2, pp. 248-260, April1975.
[193] L. Kleinrock, “On the Modeling and Analysis of Computer Networks”, Special Issue of IEEE Proceedings, vol. 81, no. 8, pág.1179-1191, Aug 1993.

APENDICE A

DESDE LAS REDES DE PETRI A LAS REDES DE ACTIVIDADES ESTOCÁSTICAS

El presente Apéndice discute la evolución y conceptos básicos de algunos de los métodos formales disponibles que se utilizan para la especificación, verificación y evaluación de rendimiento de sistemas en diversas áreas de la ingeniería. Específicamente, se introducen las denominadas Redes de Petri, y sus variantes estocásticas, utilizadas en esta tesis para la modelación y evaluación de métricas de prestaciones de las redes WLAN 802.11.

A.1) INTRODUCCIÓN

Los Sistemas Dinámicos de Eventos Discretos (DEDS) están basados sobre los sistemas dinámicos, donde los estados y eventos discretos tienen un rol fundamental. Los DEDS se están volviendo de interés creciente en la medida que la importancia de la automatización y control crecen en la tecnología moderna. Los dominios de aplicación como sistemas de fabricación flexibles, sistemas de transporte, sistemas distribuidos, y redes de telecomunicaciones usan intensivamente los conceptos y técnicas de los DEDS. La optimización del diseño, la planificación (control de rendimiento), el monitoreo, y la implementación (posiblemente tolerante a fallos) son los usos críticos que requieren el uso de la modelación, y de análisis cualitativo y cuantitativo. Los métodos formales para la especificación, verificación y evaluación de rendimiento de los DEDS se están así volviendo incrementalmente importantes en la medida que crecen el tamaño y la complejidad de los sistemas.

El desarrollo de estos métodos basados en modelos para las evaluaciones de sistemas tiene tan larga historia como los sistemas en si mismos. Cuando estas técnicas son aplicadas apropiadamente pueden proveer comprensión valorable de las propiedades no funcionales de un sistema, tal como su rendimiento, dependabilidad o confiabilidad. Una aproximación en este sentido ha sido el desarrollo de las extensiones estocásticas de las Redes de Petri (RdP – Petri Nets – PNs). Estas extensiones permiten la representación de restricciones de tiempo real, como así también el paralelismo en una configuración estocástica. Los modelos permiten la evaluación de la confiabilidad, de tolerancia a fallos y rendimiento degradable. El uso de estas redes se facilitó al observarse que con una apropiada definición, su conducta podría representarse y evaluarse matemáticamente como procesos de Markov de estado

discreto. Motivados por esta potencia representacional y capacidad de solución, los investigadores definieron variantes particulares de las Redes de Petri Estocásticas (SPNs – Stochastic Petri Nets) bien apropiadas para necesidades de aplicación o métodos de solución particulares (por ejemplo: DSPNs (Determistic SPNs), GSPNs (Generalized SPNs), SANs (Stochastic Activity Nets) y HSANs (Hierarchical SANs), entre otras).

Las SANs se definieron con el expreso propósito de facilitar la evaluación de rendimiento y confiabilidad unificadas. En el tiempo, desde su introducción, ellas han sido soportadas por varias herramientas de modelación (METASAN [187], UltraSAN [188], Möbius [65-67] entre otras), y usadas para evaluar una amplia variedad de sistemas.

Las HSANs se propusieron para remover algunas de las limitaciones y proveer constructores de modelación de alto nivel para las SANs. Los modelos HSANs permiten la composición de una jerarquía de submodelos SANs que se tratan como una actividad macro. Las HSANs encapsulan las jerarquías. Un beneficio clave de estos modelos es la posibilidad de selección y uso automático de técnicas para construir modelos con espacios de estado reducido. Algunas herramientas soportan fielmente la propuesta de las HSANs (SANBuilder [189] y Möbius, por ejemplo).

En todos los casos, un esquema de modelación para ser efectivo y generalmente aplicable debería tener una base formal que describa sus primitivas y conducta de una forma no ambigua. Además, debe también ser lo suficientemente general para permitir la fácil representación de sistemas realistas, y suficientemente formal para permitir la derivación de resultados útiles.

A.2) REDES de COLAS [190-192]

Las redes de colas han sido ampliamente usadas en la evaluación de rendimiento de los DEDS como los sistemas de computación, redes de comunicaciones y sistemas de fabricación. Las redes encoladas son frecuentemente vistas como técnicas de modelación y análisis. Esto es a causa que la modelación y los aspectos de análisis han sido usualmente tratados juntos. La parte de análisis ha resultado en el desarrollo de varios métodos analíticos diferentes, que son de amplio interés y que también han conducido el camino para el desarrollo de métodos similares en el contexto de las Redes de Petri u otros formalismos como las Redes de Actividades.

La discusión general de las redes considera los conceptos de colas simples, colas multiclase, redes de colas, redes de colas multiclase, redes de colas con capacidad finita y ruteo de estado dependiente.

A.2.1 Redes de colas básicas

Las colas simples consisten de una cola, también llamada buffer, y uno o más recursos llamados servidores (Figura n° A.1). Las entidades llamadas clientes o trabajos generados por procesos de arribo externo se unen a la cola para recibir un servicio de uno de los servidores. A la finalización del servicio, este cliente deja el sistema. Para caracterizar completamente la conducta de este sistema, se pueden definir los siguientes conceptos: el número de servidores, la disciplina del servicio, la capacidad de la cola, los procesos de arribo y los procesos de servicio.

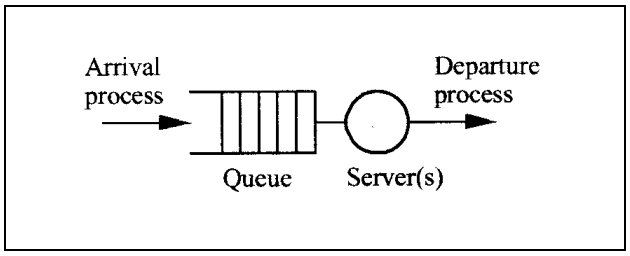


Figura A.1 Un simple sistema de cola

El número de servidores puede ser uno, un número finito mayor que uno, o infinito. La disciplina de servicio, o regla de planificación, define la política por la cual los servidores son asignados a los varios clientes presentes en el sistema. La capacidad de la cola es el número total de clientes que pueden estar simultáneamente presentes en el sistema (esperando o recibiendo servicio). Los procesos de arribo caracterizan la forma en que los clientes arriban al sistema. Los procesos de servicio caracterizan los requerimientos de los clientes en términos del servicio.

La importancia de la evaluación de rendimiento es que proveen información cuantitativa sobre la conducta de un sistema de evento discreto. Los parámetros principales de rendimiento de interés son: el tiempo de respuesta promedio, el tiempo de espera promedio, la longitud de cola promedio, la productividad, y la utilización de los servidores. Además, de los valores promedios, puede ser de interés conocer la varianza de las cantidades promedio, o más generalmente a cerca de sus distribuciones. Por ejemplo, puede ser importante conocer la varianza del tiempo de espera, además de conocer su valor promedio.

Un camino para determinar estas cantidades es registrar la conducta de un sistema durante un periodo largo de tiempo y derivar las cantidades de interés de esta observación. Una alternativa es construir un modelo estocástico de este sistema real. Un sistema puede ser modelado con una cola simple.

Es importante destacar que cuando se trabaja con los parámetros de rendimiento se prioriza la representación de la conducta típica de un cliente y no la conducta específica de cualquiera en particular. Se llama caracterización de la carga de trabajo o tráfico, a las distribuciones de los tiempos de interarribo y de servicio, las cuales deben corresponder con la del sistema real.

En las representaciones de colas simples puede ser apropiado distinguir entre diferentes tipos de clientes. Esta es la noción de clases de clientes, o colas multiclase. En este caso, se pueden definir parámetros de rendimiento total y parámetros de rendimiento dependiente de la clase.

A.2.2 Redes de colas

Una generalización natural de las colas simples es considerar las redes de colas. Una red de colas consiste de un conjunto de colas también llamadas estaciones. Cada estación consiste de una cola y un conjunto de servidores (simple servidor, múltiple servidor o infinitos servidores). La suposición usual es que todas las colas tienen capacidad infinita. La caracterización de las disciplinas de servicios y los procesos de servicios en cada estación es la misma como en el caso de colas simples.

Hay dos tipos básicos de redes de colas llamadas redes de colas abiertas y redes de colas cerradas (open queueing networks y closed queueing networks) (Figuras A.2, A.3 y A.4).

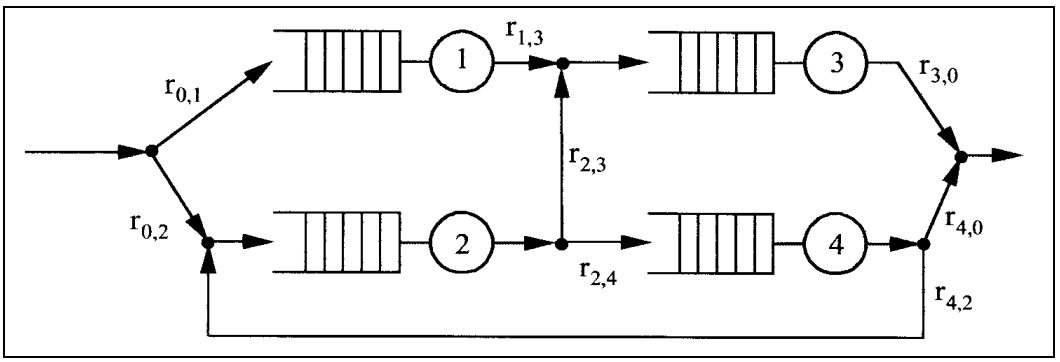


Figura A.2 Ilustración de una red de colas abierta

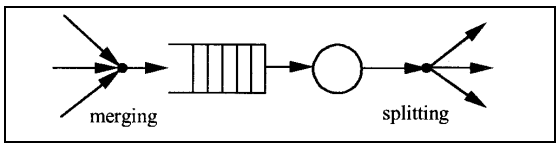


Figura A.3 Ilustración de los mecanismos de mezcla y división

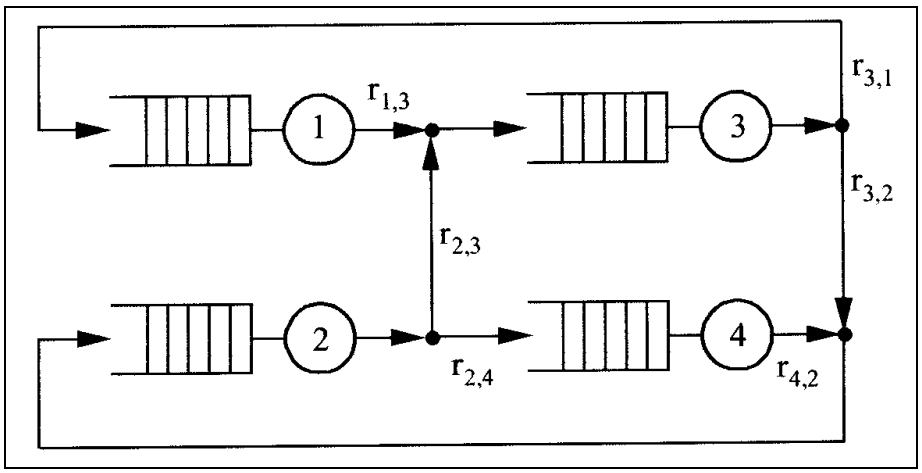


Figura A.4 Ilustración de una red de cola cerrada

En una red de colas abierta, los clientes arriban desde el exterior de acuerdo a un proceso de arribo dado y visitan un conjunto de estaciones después de lo cual ellos dejan el sistema.

En una red de colas hay dos clases de parámetros de rendimiento que son de interés, llamados parámetros de rendimiento local y global, que se refieren a las colas en particular o a toda la red, respectivamente.

En una red de cola cerrada hay un número fijo de clientes, llamados la población de la red, que viajan a través de la red, y por lo tanto, los clientes nunca entran ni dejan el sistema.

La caracterización de los procesos de arribo es la misma como en el caso de las colas simples. La característica adicional que necesitan ser especificadas es el ruteo de los clientes, es decir, como los clientes viajan a través de la red. El ruteo está normalmente caracterizado en una forma probabilística. El ruteo en las redes de colas da origen a dos mecanismos llamados la mezcla y la división de flujos de clientes, también llamados superposición y descomposición de flujos, respectivamente.

Como en el caso de las colas simples, puede haber situaciones para las cuales se requiere especificar la noción de clases de clientes. Esto puede deberse a la necesidad de distinguir los clientes con respecto a los procesos de arribo, los procesos de servicio y las disciplinas de servicio en las colas diferentes. Además, en el caso de red de colas, la

distinción puede también ser con respecto al ruteo de los clientes, es decir, clases diferentes de clientes pueden tener diferentes ruteos probabilísticos a través de la red. Esto conduce a la definición de diferentes tipos de redes de colas multiclase: redes de colas multiclase abiertas, redes de colas multiclase cerradas y redes de colas multiclase mixtas. Este último caso sería la clase más general ya que incluye redes abiertas y cerradas como situaciones especiales (Figura A.5).

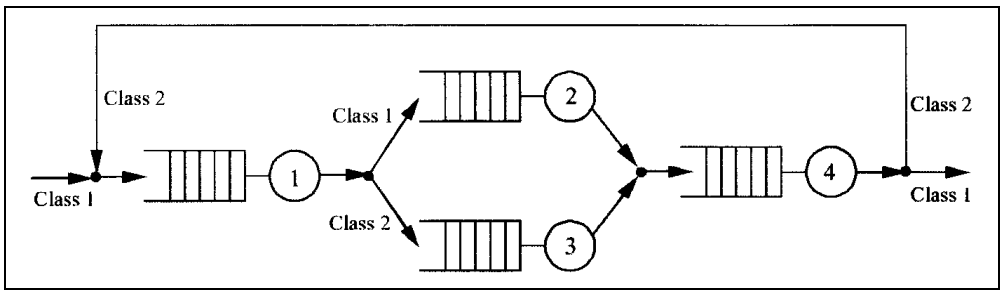


Figura A.5 Ilustración de una red de cola multiclase

En una red de colas multiclase, se puede combinar la noción de parámetros de rendimiento total y clase-dependientes, además de los parámetros de rendimiento local y global.
Finalmente, en algunas situaciones puede ser de interés permitir que los clientes cambien mientras viajan a través de la red, es decir, un cliente dejando una estación como un cliente de una clase conmuta a otra clase (con alguna probabilidad). Tales redes son llamadas redes de colas multiclase con conmutación de clase.

A.2.2.1 Redes de colas con capacidad infinita y ruteo dependiente del estado

Las redes de colas con colas de capacidad infinita no permiten modelar sistemas que tengan buffers finitos. En las redes de colas con capacidad finita debe especificarse el número máximo de clientes que pueden estar simultáneamente presentes en cada estación, incluyendo aquellos en servicio. Para tales redes, se necesita especificar la conducta de la red cuando una o más colas están llenas. Cuando una cola está llena durante algún periodo de tiempo, la conducta del sistema puede estar especificada en las siguientes formas diferentes: mecanismo de bloqueo antes del servicio, mecanismo de bloqueo después del servicio, mecanismo de bloqueo y recirculación, y mecanismo de pérdida.

Estos diferentes mecanismos nos permiten modelar diferentes conductas encontradas en los sistemas reales. En particular, los sistemas de fabricación son frecuentemente modelados usando los mecanismos de servicio después del bloqueo y también de servicio antes del bloqueo.

Mientras que las redes de comunicaciones son frecuentemente modeladas usando los mecanismos de bloqueo y recirculación, o el mecanismo de pérdida.

Los mecanismos de ruteo dependiente del estado pueden también ser introducidos en las redes de colas. Esto corresponde a la situación en la cual el ruteo de los clientes depende sobre el estado real de la red, por ejemplo, el número de clientes actualmente presentes en cada cola. Uno de tales mecanismos es llamado ruteo de cola más corto, que sucede cuando un cliente completa su servicio en una estación, y se une a la cola que tiene el número más pequeño de clientes, entre un número predeterminado de colas. El caso más general puede ser definido en términos de un mecanismo de ruteo dependiente del estado probabilístico.

A.2.2.2 Redes de colas extendidas (Extended Queueing Networks)

El formalismo de red de colas básico es útil para modelar algunas importantes clases de sistemas reales. Sin embargo, no nos permite representar sistemas reales que incluyan mecanismos de sincronización entre diferentes clientes, y mecanismos de ensamblado/desensamblado. Esto puede ser manipulado usando un formalismo más general llamado formalismo de red de colas extendido.

A.2.3 Notación de Kendall-Lee

Según la notación propuesta por Kendall-Lee, cada sistema de colas se representa con seis características, de acuerdo al siguiente esquema: 1/2/3/4/5/6, donde:

1. Indica la naturaleza del proceso de llegada (clientes), siendo M cuando el tiempo entre llegadas es independiente y distribuido idénticamente, y siguen una distribución exponencial, D cuando el tiempo entre llegadas es independiente y distribuido idénticamente, y determinista, y G cuando el tiempo entre llegadas es independiente y distribuido, y de distribución general.

2. Indica la naturaleza de los tiempos de servicio (servidores), y se representan como en 1.

3. Indica el número de servidores en paralelo.

4. Indica la disciplina de la cola, siendo FCFS (First Come First Served- Primero Llegar- Primero en ser Atendido), LCFS (Last Come First Served- Último Llegar Primero en ser Atendido), y SIRO (Service in random order-Servicio en Orden Aleatorio).

5. Indica el número máximo permitido de clientes en el sistema, incluyendo los que esperan y los que están siendo atendidos.

6. Indica el tamaño de la población de la que se toman los clientes.

A.3) REDES DE PETRI NO TEMPORIZADAS Y TEMPORIZADAS

Los DEDS típicos exhiben evoluciones paralelas, las cuales conducen a conductas complejas debido a la presencia de fenómenos de sincronización y recursos compartidos. Las Redes de Petri (RdP – Petri Nets - PNs) son un formalismo matemático apropiados para modelación de DEDS concurrentes [43-46]. Las RdP han sido aplicadas satisfactoriamente a campos tales como redes de comunicación, sistemas de computación, sistemas de fabricación de partes discretas, etc. Los modelos de red son frecuentemente observados como especificaciones autodocumentadas, a causa de que su naturaleza gráfica facilita la comunicación entre diseñadores y usuarios. Los fundamentos matemáticos del formalismo permiten corrección lógica y análisis de eficiencia. Además, estos modelos pueden ser automáticamente implementados usando una variedad de técnicas de hardware y software, y pueden ser usados para propósitos de monitoreo, una vez que el sistema está trabajando. En otras palabras, las RdP pueden ser usadas a lo largo de todo el ciclo de vida de un sistema.

Más que un simple formalismo, las RdP son una familia de ellos, desde bajo a alto nivel, cada una de ellos más apropiados para diferentes propósitos. En cualquier caso, ellos pueden representar conductas muy complejas desde la simplicidad del modelo real, consistiendo de unos pocos objetos, relaciones y reglas. Más precisamente, un modelo de un sistema dinámico consiste de dos partes:

1. Una estructura de red, un grafo dirigido bipartito inscripto, que representa la parte estática del sistema. Las dos clases de nodos son llamadas lugares y transiciones, gráficamente representadas como círculos y cajas, respectivamente. Los lugares corresponden a las variables de estado del sistema y las transiciones a sus transformaciones. El hecho que ellos sean representados en el mismo nivel es una de las características destacadas de las RdP comparadas a otros formalismos. Las inscripciones pueden ser

muy diferentes, conduciendo a varias familias de redes. Si las inscripciones son simplemente números naturales asociados con los arcos, llamados pesos, se obtienen las redes lugares/transiciones. En este caso, los pesos permiten la modelación de servicios y arribos masivos. Una subclase interesante históricamente y conceptualmente de redes lugares/transiciones se obtiene cuando todos los pesos son uno. Estas redes se dicen son ordinarias y ellas conducen, por ejemplo, a una directa pero importante generalización de modelos de autómata. Inscripciones más elaboradas, asociadas con lugares, transiciones y arcos, conducen a los llamados formalismos de RdP de Alto Nivel.

2. Un marcado, gráficamente representado por marcas dentro de los lugares, que representan un estado total distribuido sobre la estructura. El marcado de un lugar (variable de estado) es su valor de estado. Un sistema de red es una estructura de red junto con una marcado inicial. La dinámica del sistema (la conducta del sistema) está dada por las reglas de evolución del marcado. La regla básica permite la ocurrencia de una transición cuando los valores de estado de entrada cumplen alguna condición expresada por las inscripciones de los arcos. La ocurrencia de una transición cambia los valores de sus variables de estado adyacentes, de acuerdo nuevamente a las inscripciones de los arcos.

La separación de este planteo permite razonar a los modelos basados en redes en dos diferentes niveles: estructural y conductional. Desde la primera forma podemos derivar algunas conclusiones rápidas como la conducta posible del sistema modelado. Los razonamientos puramente conductionales pueden ser más concluyentes, pero pueden requerir computaciones costosas, o tal vez no puedan ser factibles. El razonamiento estructural puede ser observado como una abstracción de la conducta. Por ejemplo, en lugar de estudiar si un sistema dado tienen un espacio de estado finito, podríamos investigar si el espacio de estados es finito para cada estado inicial posible, o podríamos estudiar si hay un estado inicial que garantiza actividad infinita mas que decidir esto por un estado inicial dado.

La interpretación de un modelo precisa la semántica de objetos y su conducta, eventualmente haciendo explícita la conexión de este modelo al mundo exterior dentro de un tipo de aplicaciones. Es decir, la interpretación considera el entorno en el cual el modelo será ejercitado. Una interpretación puede dar un significado físico a las entidades de la red (lugares, transiciones, marcas), condiciones de evolución y, posiblemente, definirá las acciones generadas por las evoluciones. Los

grafos interpretados, como las Redes de Petri, son comunes en la modelación de sistemas.

El formalismo de Red de Petri básico puede ser interpretado para describir diferentes perspectivas de un sistema dado a lo largo de su ciclo de vida. La variedad de interpretaciones es una de las mayores ventajas de modelar con redes. Los sistemas de redes provistas con interpretaciones apropiadas puede ser usadas a lo largo del diseño y operación, y los conceptos y resultados básicos son compartidos (pueden ser reusados) por las diferentes interpretaciones, conduciendo a alguna economía en el análisis y síntesis de los modelos. Una particularmente interesante familia de interpretaciones de red se obtiene cuando el tiempo y las probabilidades se asocian con el modelo. El formalismo básico es convencionalmente conocido como Red de Petri autónomo ó básico, cuando la dinámica del sistema de red está gobernada solo por las reglas de evolución de la red, y no por eventos externos, temporizaciones, etc. También el nombre Red de Petri no temporizada se usa cuando la clase de una de las interpretaciones ulteriores tiene en cuenta alguna cosa para hacer con el tiempo. La evolución autónoma de un modelo de red se dice ser completamente no determinista en el sentido que ni la resolución de conflictos ni el tiempo de ocurrencia de una transición habilitada están especificada del todo.

A.3.1 Redes y Sistemas Lugar/Transición (Place/Transition P/T)

Inicialmente corresponde introducir formalmente los sistemas de red lugar/transiciones, enfatizando la distinción entre la (estructura de la) red y el sistema (la red con un marcado y sus reglas de evolución), y como son capaces para modelar DEDS. Además, se debe describir en algún detalle las características de modelación de los sistemas de P/T, llamadas la localidad de estados y acciones, y la representación de los diversos fenómenos encontrados en sistemas paralelos y distribuidos. Estas características de modelación permiten representar en una forma natural situaciones típicas tales como las sincronizaciones, exclusión mutua, conflictos, etc, y aplicar las metodologías de síntesis top-down y bottom-up al diseño de los sistemas.

En los sistemas de Red de Petri, el estado está descrito en una conducta distribuida por medio de un conjunto de variables de estado. Los lugares (representados como círculos) son el soporte de estas variables de estado. Las acciones individuales, que transforman las variables de estado a la que están conectadas, son modeladas por transiciones (representadas como barras o cajas). En el formalismo P/T, los lugares y las transiciones están relacionados a través de una relación de flujo ponderada.

Una red P/T es una cuádrupla:

$$N = (P, T, F, W)$$

Donde:

1. P y T son conjuntos no vacíos finitos disjuntos, los lugares y las transiciones, respectivamente.
2. F <=(PxT)U(TxP) es la relación de flujo (conjunto de arcos dirigidos).
3. W:F→ N+ asigna un peso o multiplicidad a cada arco.

El grafo de la Figura A.6 es una estructura de red. Los arcos están rotulados con números naturales, los pesos o multiplicidades de arcos. Por convención, los arcos no rotulados están ponderados en uno. Todos los pesos de los arcos en la red ejemplo son uno, excepto para W(p6,t6) y W(t6,p1) que son dos. Un lugar p es un lugar de entrada (salida) de transiciones t si hay un arco yendo desde p a t (t a p). En la figura, {p3,p5} son lugares de entrada de t3, mientras que {t2,t5} son las transiciones de salida de p2. Las relaciones adyacentes entre nodos, las cuales determinarán luego la relación entre los estados y las acciones, son fijas para la estructura de la red, desde que ellas son estáticas.

Hay una representación alternativa de las redes P/T donde la relación de flujo está descripta en forma matricial. Esto naturalmente conduce a una interesante ecuación de estado, como descripción de la evolución del sistema.

Una red P/T es una cuádrupla:

$$N = (P,T,Pre,Post)$$

Dónde:

1. P y T son conjuntos como antes.
2. Pres, Post $\in N^{PxT}$ son las matrices de pre-incidencia y post-incidencia.

Con la notación matricial, hay un arco yendo desde el lugar p a la transición t cuando Pre[p,t]<>0, y el valor de Pre[p,t] es precisamente el peso del arco. Igualmente, para post-incidencia, Post[p,t]=W(t,p) cuando es diferente de cero

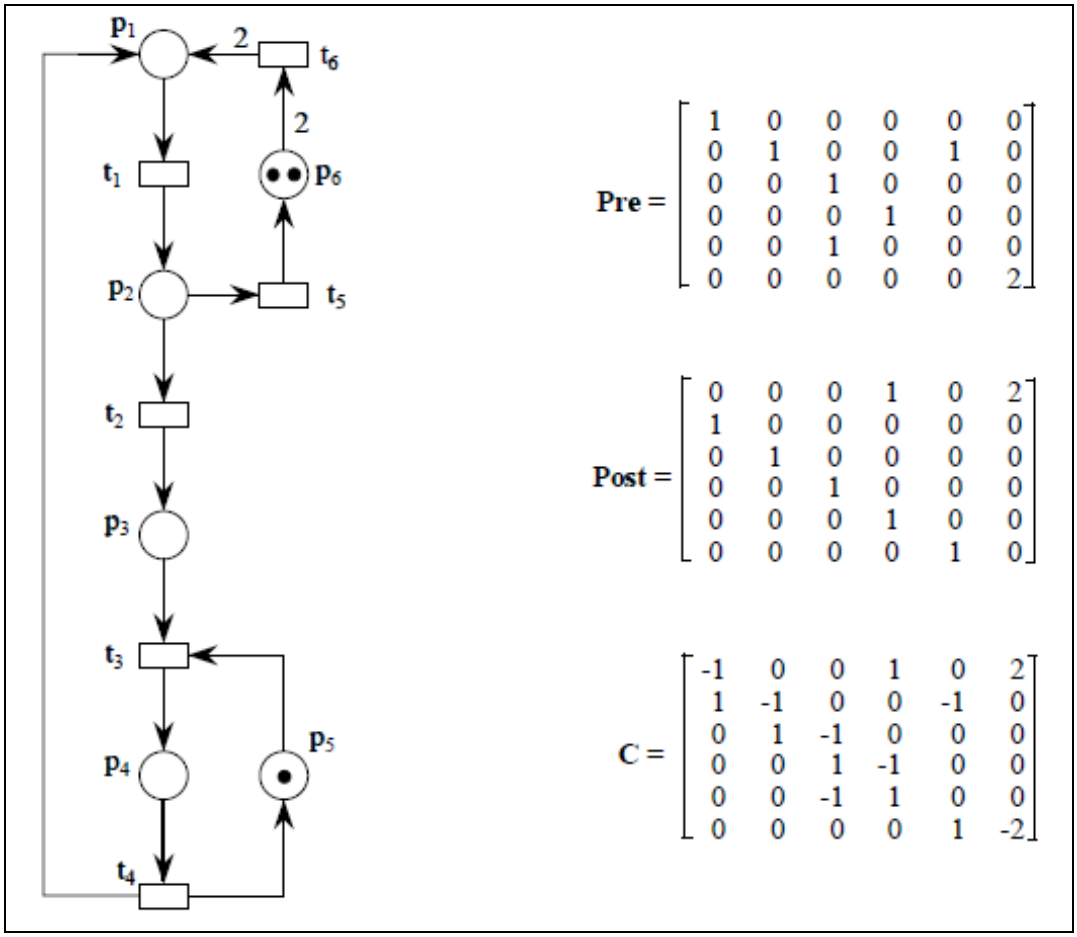


Figura A.6 Un sistema de red Lugar/Transición (P/T) y sus matrices incidentes

En el ejemplo de la figura anterior, t4 es un fork (bifurcación), t3 es un join (unión), p2 es un distribuidor y p1 es un colector. Un par formado de un lugar p y una transición t es llamado un autoloop si p es entrada y salida de t. Las Figuras A.7b, A.7c y A.7d muestran ejemplos de autoloops, y la Figura A.7d presentación una modificación de la red de la Figura A.7c para la eliminación del autoloop. Una red se dice pura si no tiene loop. Las redes puras son completamente caracterizadas por una simple matriz: C = Post – Pre. Esta es llamada la matriz de incidencia de la red pura. Las entradas positivas (negativas) en C representan la función de incidencia post (pre). Si la red no es pura, C “no ve” los loops (así C no es una matriz de incidencia sino justamente una matriz de flujo de marcas).

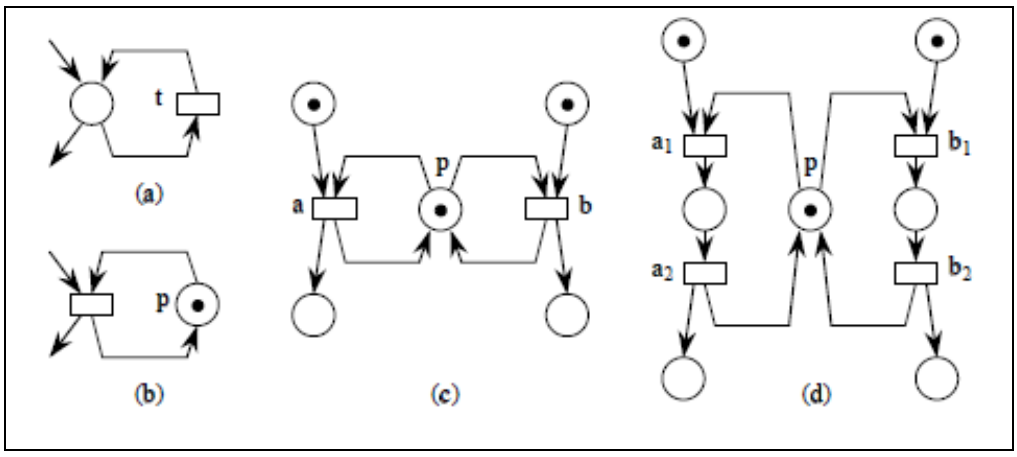


Figura A.7 Auto loops

A.3.1.1 Sistemas de Red: Marcado y Juego de marcas

La estructura de una red es estática. Asumiendo que la conducta de un sistema puede ser descrito en términos del estado y sus cambios, la dinámica sobre una estructura de red es creada al definir su estado inicial y las reglas de evolución del estado.

El marcado de una red N es un vector indexado de lugar m que asigna un entero no negativo (número de marcas) a cada lugar. Un sistema de red P/T tiene el par S=(N,m0), o más explícitamente, S=(P,T,F,W,m0) o S=(P,T,Pre,Post,m0) donde N es una red P/T y m0 es su marcado inicial.

El número de marcas en un lugar representa el estado local del lugar, es decir, el valor de la variable de estado representada por ese lugar, que en el formalismo es un entero (de modo que puede ser interpretado como un contador o deposito). El estado del sistema de red total está definido por la colección de los estados locales de los lugares. Por lo tanto, el vector m es el vector estático del DEDS descrito por el sistema de red. Gráficamente, ponemos m[p] puntos negros (tokens) en el circulo que representa el lugar p. El marcado del sistema de red en la figura es m0=[0,0,0,0,1,2]. Por cuestiones de conveniencia, frecuentemente se usa una notación alternativa para marcado, por ejemplo, m=p5 + 2p6.

La evolución del estado distribuido está definida a través de una regla de disparo u ocurrencia, informalmente llamada como el “juego de marcas”. Esto es a causa que las estructuras de red pueden ser vistas como una clase de chequeadores, las marcas como marcadores, y las reglas de disparo como la regla del juego. Las transiciones representan movimientos potenciales en el juego de marcas. Debe observarse que las

marcas no se mueven, sino destruidos y creados en cada movimiento, posiblemente en un numero diferente.

El marcado en un sistema de red evoluciona como sigue:

1. Una transición se dice estar habilitada en un marcado dado cuando cada lugar de entrada tiene al menos tantas marcas como el peso de los arcos uniéndolos. Formalmente, t está habilitada en m si m>=Pre[P,t]. El número de habilitaciones simultáneas de una transición t en un marcado dado m se llama su grado de habilitación, y es denotado por e(m)[t].

2. La ocurrencia, o disparo, de una transición habilitada es una operación atómica que remueve de (suma a) cada lugar de entrada (salida) un número de marcas igual al peso de los arcos uniendo el lugar (transición) a la transición (lugar). Formalmente, la ocurrencia de t en el marcado m, denotado por m—t→mt, viendo el marcado mt=m + C[P,t].

La precondición de una transición puede ser vista como los recursos requeridos para que la transición se dispare. La postcondición representa los recursos producidos por el disparo de la transición. En un modelo teórico o abstracto, las transiciones habilitadas pueden no estar forzadas a dispararse. Esta es una forma de no determinismo. En la modelación práctica, la interpretación gobierna parcialmente el disparo de transiciones habilitadas (dependiendo de si o no ocurre un evento externo asociado a una transición habilitada). Además, debe observarse que no está preciso si la ocurrencia de una transición tomo algún tiempo, dado que el tiempo no ha sido introducido aún.

A.3.1.2 Semántica de Intercalación: Observaciones secuenciales

Una forma común de describir la conducta de un sistema P/T es por medio de sus observaciones secuenciales. Así, decimos que el observador se supone ve solo eventos simples, es decir, una transición ocurriendo en un momento. La semántica de intercalación de un sistema de red está dada por todas las posibles secuencias de las ocurrencias de transiciones individuales que podrían ser observadas desde el marcado inicial. Si dos transiciones a y b están habilitadas simultáneamente y la ocurrencia de una no hace deshabilitar la otra, en principio ellas podrían ocurrir en el mismo momento, pero el observador secuencial verá a seguido por b, o viceversa. El nombre semántica de intercalación viene de esta forma de ver ocurrencias simultáneas.

Consideremos a S como un sistema P/T

1. Una secuencia de ocurrencia o disparo de m es una secuencia t1, ..tk....E Tw, tal que m→m1→....→mk... Si la secuencia de disparo llega al marcado m', este es indicado como m→m'.
2. El lenguaje de S, denotado como L(S), es el conjunto de todas las secuencias de ocurrencias desde m0.
3. El conjunto de alcanzabilidad de S, denotado como RS(S), es el conjunto de todos los marcados alcanzables desde m0 al disparar alguna secuencia en L(S).
4. El grafo de alcanzabilidad de S, denotado por RG(S) es un grafo rotulado donde los vértices son los marcados alcanzables, y hay un arco rotulado desde el vértice m a el vértice m' si m→m'.

Integrando la ecuación de evolución desde m0 a un m arbitrario obtenemos:

$$m0 \rightarrow m \rightarrow m = m0 + C.$$

Esta es conocida como la ecuación de estado del sistema, sobre la cual se basan algunos métodos de análisis estructural. Las Redes de Petri, como introducidas hasta ahora, son una formalismo matemático, en el mismo sentido como son las ecuaciones diferenciales. Mientras estas últimas son útiles para describir sistemas dinámicos continuos, la primera forma es introducida para la descripción de sistemas dinámicos de eventos discretos (DEDS).

A.3.1.3 Localidad y la Síntesis del Modelo

Está claro de las definiciones de la estructura de red, la representación de estado y las reglas de evolución, que existe un principio de localidad en los estados y las acciones. La localidad de la representación del estado y de las acciones es otra característica crucial de las Redes de Petri, la cual le permite la modelación de conductas distribuidas complejas. Su importancia para la síntesis de modelos reside en el hecho que las redes pueden ser localmente modificadas, o bien, refinadas, sin ninguna alteración del resto del modelo. También es posible que diferentes redes, modelando diferentes partes de un sistema, puedan estar compuestas por algunos nodos compartidos (representando actividades y estados comunes). En otras palabras, las redes pueden estar sintetizadas usando las aproximaciones top-down y botton-up (Figura A.8). La síntesis top-down es cualquier procedimiento que comienza con un modelo abstracto inicial, y conduce al modelo final a través de pasos de refinamiento. En una aproximación bottom-up, los módulos son producidos, posiblemente en paralelo por diferentes grupos de diseñadores, luego compuestos.

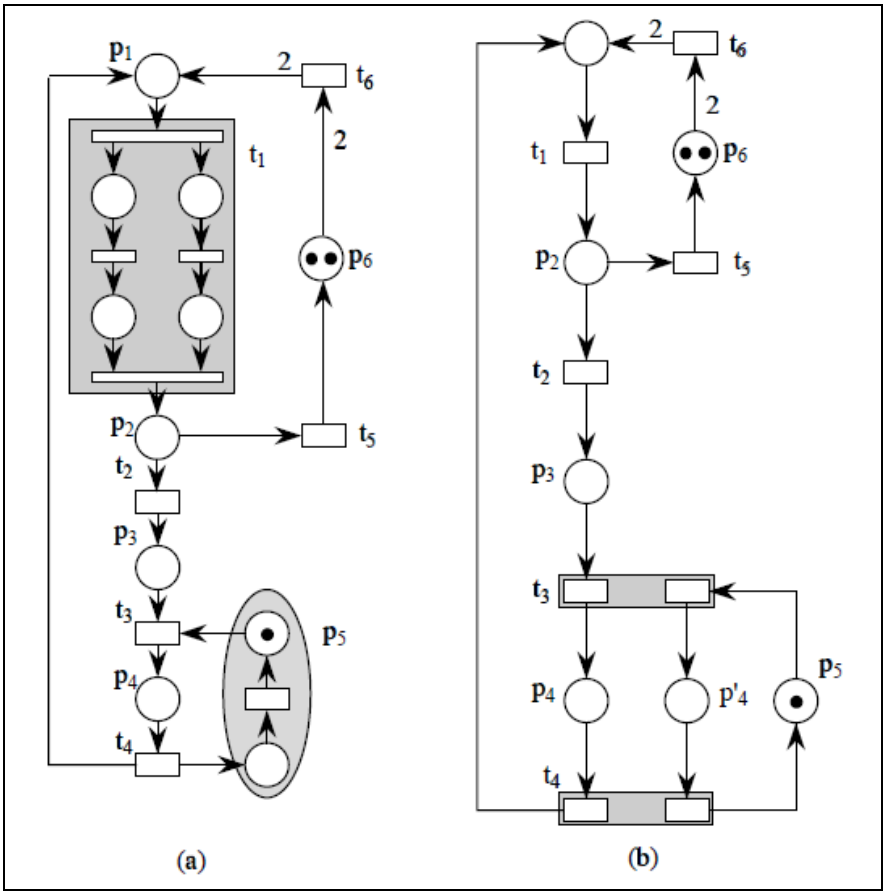


Figura A.8 Sintetización del modelo de la multicomputadora PLC de la Figura 2.6
(a) Un modelo refinado (b) Como una sincronización de dos submodelos

A.3.1.4 Dependencia causal, conflictos y concurrencia

Es posible adecuar el formalismo para modelar DEDS con actividades de concurrencia y paralelas. Informalmente, los tres fenómenos básicos a ser representados son la dependencia causal, es decir, algunas acciones requieren que otras sean realizadas primero; los conflictos, es decir, algunas acciones son alternativas, y debe tomarse una decisión sobre cual ocurrirá; y concurrencia, es decir, hay acciones que deben ocurrir simultáneamente. Estos fenómenos son realmente representados por modelos de Redes de Petri en una forma muy natural (Figura A.9 y A.10). Ellos son la base para la modelación de esquemas típicos en sistemas paralelos y distribuidos, como la exclusión mutua, ensamblado, aleatoriedades, etc. La dependencia causal y conflictos son nociones clásicas en los sistemas secuenciales, como los autómatas finitos:

a) Concurrencia. Dos transiciones son concurrentes en un marcado dado si ellas pueden ocurrir simultáneamente. En el caso de la semántica de intercalación, la concurrencia de dos o

más acciones a y b, se representa por la posibilidad de realizarse en cualquier orden (primero a y luego b, o viceversa). No obstante, la presencia de todas las secuencializaciones posibles de las acciones, no implica que ellas estén verdaderamente en concurrencia. Dos acciones pueden ocurrir en cualquier orden, pero ellas tal vez no puedan ocurrir simultáneamente. Es importante distinguir entre concurrencia de transiciones y la concurrencia de actividades de sistema, lo cual es nuevamente una manera de interpretación del modelo. En el caso de que las transiciones implementen las actividades del sistema, ambas cosas coinciden: la ocurrencia de transiciones tomarían algún tiempo, de modo que sus ocurrencias pueden solaparse en el tiempo. En este sentido, ellas podrían ocurrir simultáneamente.

b) Dependencia causal. Las dependencias causales están representadas por el ordenamiento de las acciones inducidas por la relación de flujo. Las dependencias aparecen en la forma de secuencia, como en los sistemas secuenciales, pero también en la forma de sincronizaciones. La construcción de red muy básica usada para modelar dependencias causales es un lugar conectando dos transiciones. Las transiciones conectadas a través de un lugar se dice están en relación causal estructural. La estructura de red muy básica usada para modelar las sincronizaciones es una transición con más que un lugar de entrada, es decir, una transición join. Puede también decirse que un arco múltiple desde un lugar a una transición es una clase de sincronización, a causa que algunas tokens individuales deben ensamblarse en frente de la transición a habilitar.

c) Conflictos: Los conflictos en los sistemas secuenciales son claramente la situación en la cual dos acciones están habilitadas de modo que una debe ser elegida para que ocurra. Las cosas se vuelven más complicadas en el caso de sistemas concurrentes, donde el hecho que dos transiciones estén habilitadas no necesariamente implica que deba elegirse una. Algunas veces, la definición secuencial es apropiada, pero en otros no. La construcción de red muy básica usada para modelar conflictos es un lugar con más que una transición de salida, es decir, un lugar distribuidor. De hecho, los lugares distribuidos son necesarios para modelar conflictos, pero lo inverso no es verdad. Las transiciones de salida de un lugar distribuidor se dicen estar en relación de conflicto estructural. Muy frecuentemente en la literatura, nuestros conflictos estructurales son simplemente conflictos, pero se prefiere sumar el adjetivo estructural para mejorar la distinción de la

conducta, de la dinámica, noción de conflicto efectivo, que depende del marcado. Se quiere hacer notar, que un conflicto estructural hace posible la existencia de un conflicto efectivo, pero no lo garantiza.

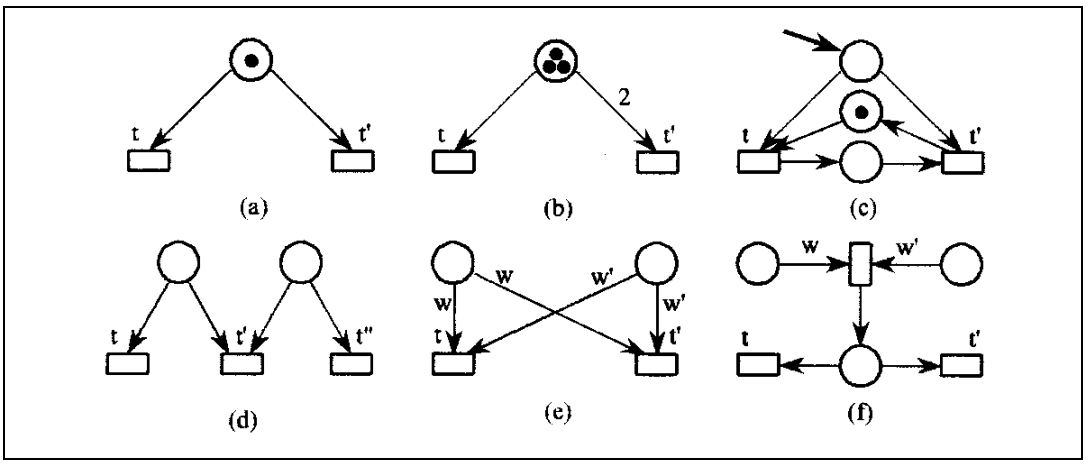


Figura A.9 Conflictos y conflictos estructurales

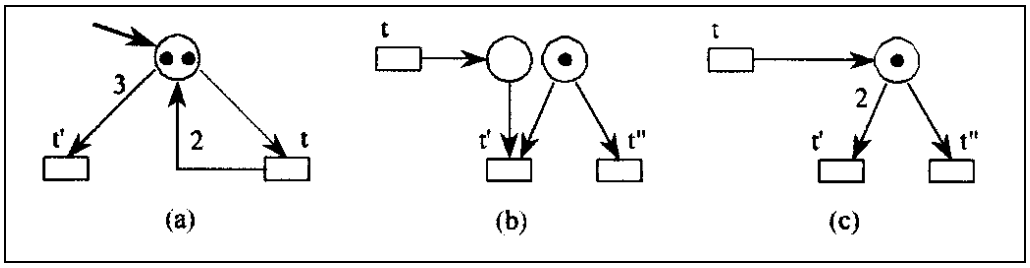


Figura A.10 Conflictos no igual y confusión

A.3.1.5 Subclases y Extensiones del Formalismo Básico

En este punto, es importante hacer una distinción entre potencia y conveniencia de modelación o expresión, en orden para apreciar mejor los méritos relativos de los diferentes formalismos, restricciones y extensiones. Diremos que un formalismo tiene mayor potencia de modelación teórica que otra cuando la primera puede modelar sistemas que no puede el último. Por ejemplo, la Red de Petri tiene mayor potencia de modelación que el autómata finito dado que ellos pueden modelar sistemas con un espacio de estado finito. Cuando los sistemas que dos formalismos pueden modelar son los mismos, es decir, cuando ellos tienen la misma potencia de modelación, la distinción de estos formalismos es una materia de la conveniencia. Además, al tamaño y claridad de un modelo en cada formalismo, otros aspectos son importantes en juzgar la conveniencia relativa de dos formalismos; es decir, la habilidad para construir modelos por refinamiento y composición,

la habilidad para representar adecuadamente datos y control, la analizabilidad, o el grado de parametrización. El orden para un formalismo, como más o menos conveniente que otro, no es siempre fácil o aún posible, dado que la conveniencia comprende aspectos que son típicamente contradictorios, tales como la compactación y la analizabilidad. En algunos casos, existen las transformaciones completas (preferiblemente sintácticas) para trasladar modelos desde un formalismo a otro, lo cual puede ser usado para aplicar técnicas de análisis desarrolladas por un formalismo a un modelo producido en un formalismo abreviado, lo cual es entonces visto como más conveniente.

A.3.2 Redes de Petri Temporizadas [47-51]

Las Redes de Petri fueron originalmente propuestas como un modelo causal, que explícitamente despreciaba el tiempo. La introducción del tiempo en el modelo de red básico implica dificultades en la definición de un modelo coherente. En particular, la especificación de la conducta en el tiempo para evaluar el rendimiento requiere un gran tratamiento de interpretación a ser sumado sobre el modelo de sistema básico. Aproximamos el problema en dos pasos: primero definimos la idea de observación de la conducta de un modelo autónomo en el tiempo; segundo definimos un modelo no autónomo en la cual cada actividad modelada por los retardos de disparo de transición es especificada en una manera apropiada.

A.3.2.1 Temporización de transición

Uno de los objetivos principales para un modelo de Red de Petri temporizado de un sistema distribuido es describir las actividades del sistema para entender sus interacciones mutuas y sus temporizaciones.

Tomando conceptos de los modelos de colas, podemos identificar los servidores que transportan tales actividades en una conducta asíncrona e independiente (excepto para interacciones representadas explícitamente en el nivel de Red de Petri). Ampliamente hablando, una actividad puede ser definida como una cantidad de trabajo realizada por un servidor para producir algunos resultados comenzando desde una precondición dada. La terminación de tal actividad toma tiempo, y la cantidad de tiempo necesaria depende de la velocidad del servidor, como así también de la cantidad de trabajo.

La finalización de una actividad puede ser vista como un cambio en el estado del sistema: “los resultados producidos por la actividad se vuelve disponible”. Dado que los cambio de estado en las Redes de Petri están determinadas por disparos de transición, es natural e intuitivo

relacionar la finalización de las actividades al disparo de las transiciones. Sobre el otro extremo, las transiciones pueden dispararse solo después de sus habilitaciones. Un mapeo natural de las actividades sobre los modelos de Red de Petri consiste en identificar servidores con transiciones habilitadas: la habilitación de una transición corresponde a poner un servidor a trabajar en una actividad, y el disparo de la transición corresponde a la finalización de la actividad, con la producción de resultados.

Más que un servidor pueden estar iniciando actividades de un tipo dado. Por ejemplo, en un marcado genérico m, el grado de habilitación *ei(m)* dice el número de servidores que pueden trabajar concurrentemente para llevar adelante las actividades del tipo representado por la transición ti T (es decir, consideramos una noción de auto-concurrencia). El tiempo necesario para completar la actividad es modelado por el intervalo de tiempo entre la habilitación y el disparo de una instancia de transición. Con este mapeo en mente, podemos fácilmente mantener la idea de disparo atómico para las transiciones (que es una suposición crucial para los modelos de Red de Petri no temporizadas), dado que el disparo en si mismo puede ser pensado como un evento instantáneo que concluye una actividad temporizada. Usando la terminología de las Redes de Colas, las transiciones pueden así ser interpretadas como estaciones que pueden tener hasta *ebi* servidores, donde *ebi* es llamado el límite de habilitación de la transición ti.

Aparece un problema cuando consideramos el caso de las transiciones conflictivas. Por ejemplos, si se analiza un conflicto de free-choice entre dos transiciones. Cuando una marca es depositada en el lugar de entrada, ambas transiciones están habilitadas. Con nuestra interpretación, dos servidores son iniciados (simultáneamente) para trabajar sobre las dos actividades conflictivas modeladas por las transiciones. Sin embargo, solo una de ellas puede llegar a su finalización (modelada por el correspondiente disparo de transición). La otra actividad debe malograrse por el conflicto. ¿Qué hacemos con la porción de trabajo realizado por el servidor antes de malograrse? Algunas políticas de memoria y muestreo pueden ser definidas para especificar la conducta de un modelo de Red de Petri conteniendo transiciones temporizadas conflictivas.

A.3.2.2 Reducción del No Determinismo

El punto inicial para la definición de las Redes de Petri Temporizadas es un sistema de red no determinístico, en el cual algunos detalles relacionados a la conducta son dejados sin definición. Una

interpretación temporizada del sistema de red consiste entonces en especificar la conducta “en el tiempo” en tal forma que:

1. Es compatible con el modelo no temporizado y no determinístico,
2. La “cantidad de no determinismo” es reducido al tener en cuenta las condiciones de temporización.
3. La conducta del sistema es especificada en forma suficientemente precisa para derivar medidas de rendimiento (el grado de precisión requerido depende de las técnicas de análisis que son usadas).

El problema de reducir el no determinismo puede ser atacado en algunas formas diferentes. Existen tres técnicas diferentes que pueden ser combinadas unas con otras, y cuya combinación cubre todas las clases de “redes de Petri temporizadas” propuestas en las diversas bibliografías sobre el particular hasta ahora:

N) reduce la cantidad de no determinismo, aun manteniendo el modelo no determinístico (pero a una extensión menor);

S) introduce una medida estocástica para el no determinismo del modelo subyacente;

D) define algoritmos determinísticos para sustituir especificaciones no determinísticas.

El no determinismo puede asumir dos formas (levemente) diferentes en una sistema de red temporizado: la elección entre transiciones conflictivas y la “duración” de la habilitación para las transiciones (independientemente del hecho que ellas pueden ser persistentes o en conflicto con otras transiciones). Ambos tipos de no determinismo pueden ser resueltos por cualquiera de las tres técnicas básicas mencionadas (o combinaciones de ellas).

Reducción no determinística

El ejemplo clásico de esta aproximación es la definición de los así llamados sistemas de red de “intervalo temporizado”, originalmente introducido en el contexto de verificación de protocolos de comunicaciones involucrando mecanismos de time-out. Un tiempo de disparo mínimo y uno máximo son asociados con cada transición t como parte de la interpretación de la red (tm(t) y tM(t) respectivamente). La regla de disparo es redefinida en el tiempo como sigue: cualquier transición t debe permanecer habilitada al menos tm(t) unidades de tiempo antes de ser capaz para dispararse; una transición que permanece

habilitada por tM(t) unidades de tiempo es forzada a dispararse a la finalización del periodo máximo. Por supuesto, la inequidad tm(t)<tM(t) debe siempre ser satisfecha por la definición de tiempo para tener sentido. Nada se dice con respecto al tiempo de disparo real en el caso tm(t)<tM(t): puede asumir cualquier valor dentro del intervalo en una forma totalmente no determinística. Por ello, en el caso que es no persistente, t puede ser deshabilitada ante de disparar y antes de alcanzar su máximo tiempo de habilitación tM(t).

Además, los sistemas de red no interpretados pueden ser redefinidos como redes de intervalo temporizado con tm(t)=0 y tM(t)=infinito para todo t, sin cambiar su conducta no determinística. Por el contrario, la conducta de un modelo temporizado con tm(t)>0 y/o tm(t)<infinito para algún t, puede ser diferente de uno de un sistema de red no interpretado, siempre desde un punto de vista puramente cualitativo.

Claramente, este tipo de reducción no determinística sola, no hace suficientemente precisa a la conducta especificada del modelo para computar la rendimiento “exacta” (a menos que tm(t)=tM(t) para todas las transiciones). A lo sumo los límites (superior e inferior) pueden ser computados, debido a la falta de conocimiento sobre las instancias de ocurrencias reales para el disparo de transiciones. De hecho, esta clase de modelos temporizados han sido usados esencialmente para exámenes de las propiedades cualitativas, como una alternativa a los sistemas de red no interpretados para tener en cuenta las condiciones de temporización.

Reducción estocástica

Esta es la forma principalmente usada para la reducción del no determinismo en el caso que uno quiera usar el modelo interpretado para la evaluación de rendimiento. La idea es preservar la “variabilidad posible” que es inherente a el sistema de red subyacente no determinístico, y al mismo tiempo hacer la descripción de la conducta suficientemente precisa para ser capaz de aplicar las técnicas de análisis estadísticas para computar la rendimiento. En este caso, la reducción es completa, en el sentido que se da una descripción matemáticamente precisa, y nada se deja indefinido.

Esta clase de reducción es obtenida al sumar una “medida probabilística” al espacio de variabilidad del modelo no determinístico. Una función de densidad de probabilidad (pdf) con soporte infinito [0, infinito) se asocia con cada instancia de retardo de disparo de transición, y una probabilidad discreta es asignada a cada transición conflictiva para la

elección dentro de cada conjunto conflictivo efectivo. El valor real de cada instancia de retardo de disparo se vuelve así una variable aleatoria, que en principio puede asumir cualquier valor en el rango de [0, infinito), como en sistema de red subyacente. Sin embargo, diferentemente del sistema de red no interpretado, ahora podemos aplicar análisis estadístico para estimar probabilidades de ocurrencia de algunos eventos. Se nota que de hecho en el modelo no interpretado no tiene sentido introducir el concepto de probabilidad y/o frecuencias esperadas de eventos debido a su naturaleza puramente no determinística que hace asumir cualquier clase de conducta típica o esperada para los tiempos de disparo o superar las elecciones de conflictos.

Desde un punto de vista cualitativo, la interpretación estocástica no hace cambiar la conducta del modelo con respecto al sistema de red no interpretado. La suma de una medida de probabilidad puede solo complementar tal conducta con información adicional que permite la aplicación de la idea de conducta esperada de la observación del modelo. Si pensamos por ejemplo en la relación de alcanzabilidad, el análisis de alcanzabilidad del sistema de red no interpretado podemos decir si un marcado dado puede se alcanzado desde el marcado inicial o no. La propiedad de alcanzabilidad no es afectada por la interpretación estocástica. Sin embargo, la suma de una interpretación estocástica le permite a uno hacer preguntas adicionales: “¿Como comúnmente el evento a alcanzar esta marcado después de t unidades de tiempo desde el comienzo de la observación, cuando el modelo pueda asegurar que estaba en su marcado inicial?”.

Se nota que la interpretación estocástica puede seguir dos diferentes aproximaciones. Podemos asumir que conocemos los procesos estocásticos que gobiernan la conducta del sistema de red (asumimos un modelo matemático) o queremos estimar sus parámetros basados sobre la observación de la conducta real de tal modelo (medimos experimentalmente el sistema o su modelo de simulación).

Reducción determinística

Esta es nuevamente una forma de reducir el no determinismo en una forma completa. Esta vez, la reducción es obtenida eliminando la posibilidad de variación. En algún sentido, esto podría ser visto como un caso especial de la reducción no determinística, en la cual tm=tM. Sin embargo, se prefiere mantener este caso separado para entender totalmente todas las implicancias de esta case de reducción. Por ejemplo, el hecho que la conducta completa del modelo interpretado es especificada en una forma determinística permite a uno computar todos los resultados de rendimiento (al menos todos los resultados de tiempo

transitorio por simple simulación). Sobre el otro extremo, el modelo interpretado puede disponer de más propiedades seguras y diferentes propiedades de vivacidad cuando es comparada al sistema de red subyacente.

Las políticas de resolución de conflictos determinísticos pueden obviamente ser definidas además a la definición de retardo de disparo de transiciones fijas determinísticamente.

A.3.2.3 Mezcla de técnicas de reducción diferentes

Algunas veces uno puede encontrar en la literatura propuestas de interpretaciones temporizadas para redes de Petri en las cuales los retardos de disparo y la elección estocástica se mezclan entre las transiciones conflictivas. Esto es probablemente el ejemplo más común de mezcla de técnicas diferentes para la reducción del no determinismo.

Otro ejemplo, es la definición de soporte finito para los retardos de disparo de transición en el marco de la interpretación estocástica. Además, esto puede ser visto como la superposición de la primer técnica (para reducir el soporte desde [0,infinito) a [tm,tM]) y de la segunda técnica (para proveer una medida de probabilidad sobre el rango de variabilidad). Esta forma de presentar la interpretación deja en claro que esta interpretación hereda todas las propiedades de las dos técnicas de reducción, llamadas para permitir el análisis de rendimiento exacto, y en general, cambio de la conducta cualitativa con respecto al sistema de red subyacente sin interpretación.

A.3.2.4 Transiciones Temporizadas e Inmediatas

Intuitivamente, antes de discutir todos los detalles de las interpretaciones de temporización de las transiciones, tiene sentido introducir una primera distinción estricta entre eventos de tiempo cero y actividades de tiempo no cero. Las motivaciones para hacer tal distinción son varias. Desde el punto de vista de la modelación, algunas veces es útil implementar en forma de sistema de red, algún pequeño algoritmo para computar resultados más complejos que no pueden ser expresados directamente en términos de primitivas de Redes de Petri. En estos casos, no queremos hacer que el disparo de estas “transiciones adicionales” perturbe la conducta en el tiempo de nuestro modelo, de modo que los podemos especificar como “transiciones inmediatas”, implementando todos los pasos de nuestro algoritmo en tiempo cero.

En otras palabras, la duración de algunas actividades podría ser despreciable comparada con otras. En estos casos, podría ser

conceptualmente más simple y/o más conveniente desde el punto de vista del análisis definir las actividades “cortas” como realmente teniendo tiempo cero.

En cualquier caso, la interacción entre las transiciones inmediatas y temporizadas debe estar claramente definida. La forma usual de definir esta interacción es introducir el concepto de prioridad. Esto está intuitivamente justificado en la forma siguiente. Si observamos la conducta de dos transiciones t1 y t2, una inmediata y la otra caracterizada por un retardo de disparo $\varepsilon>0$ (Figura A.11). Una vez que las dos están habilitadas simultáneamente, debido al disparo de una transición t3, la transición inmediata se disparará siempre antes que la temporizada. Por ello, podríamos intuitivamente decir que t1 tiene prioridad sobre t2 debido al hecho que ella es inmediata más que temporizada.

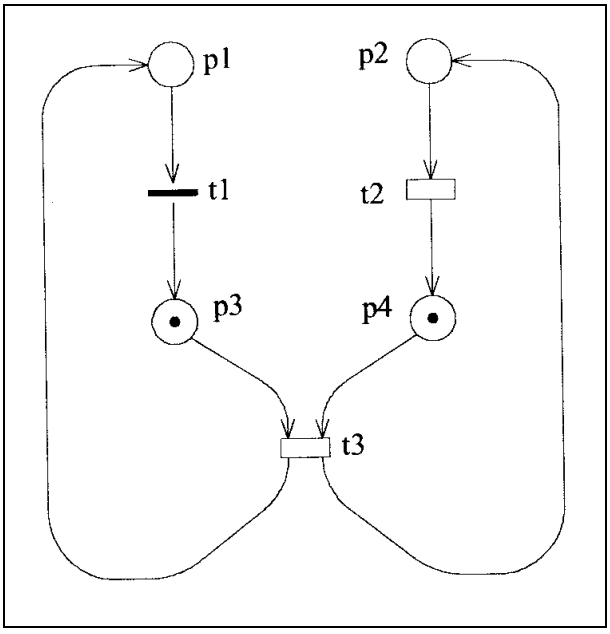


Figura A.11 Transiciones inmediatas y temporizadas

Esta idea intuitiva de prioridad de transiciones inmediatas sobre las transiciones temporizadas puede ser formalizada (y extendida) como una interpretación adicional y separada del sistema de red básico, independientemente del concepto de temporización. Esta introducción de prioridades en sistemas de red no temporizadas nos permite estudiar la interacción entre transiciones temporizadas e inmediatas sin realmente tener que definir la interpretación de la red, y ver cuales son los efectos sobre las propiedades cualitativas del sistema de red.

Además, para establecer esta consistencia entre la interpretación del tiempo y el uso de las prioridades, se requiere que:

- las transiciones temporizadas tengan prioridad 0, y sean graficadas como una caja rectangular en el representación de la red;
- las transiciones inmediatas tengan prioridad mayor que 0, y sean graficadas con barras delgadas en la representación de la red.

Bajo estas condiciones, las especificaciones de prioridad y temporización son complementarias para la definición de la conducta observable en el tiempo; por lo tanto, las transiciones inmediatas siempre disparan antes que las temporizadas.

A.3.2.5 Observación en el tiempo: Ecuaciones de ocurrencia

La conducta en el tiempo de un modelo de red P/T, puede ser completamente representada en términos de secuencias de tiempos de ocurrencias de los eventos de interés en la red, es decir, la creación y destrucción de marcas en lugares, y la habilitación y disparo de transiciones. Al efecto, podría construirse un diagrama de tiempo de ocurrencias. Además, para formalizar el estudio de esta clase de descripción conductional extremadamente detallada, se comienza por definir las ecuaciones de ocurrencias, para usarlas en la descripción de la conducta en el tiempo de un modelo de Red de Petri, en una forma matemáticamente precisa.

A.3.2.6 Análisis Operacional

El análisis operacional de los modelos de Redes de Petri puede ser considerado como un caso particular del uso de las ecuaciones de ocurrencias, en la que los eventos y sus relaciones son explotados para derivar algunas medidas de rendimiento de alto nivel y exactas relaciones entre ellas. Los principios básicos del análisis operacional de sistemas de eventos discretos son:

- Definir cantidades básicas que en principio son observables y medibles en un experimento corriendo desde tiempo 0 a un tiempo dado,
- Definir cantidades derivadas en términos de otras básicas,
- Probar simples relaciones algebraicas entre las cantidades básicas y derivadas que se mantienen válidas para cualquier posible experimento realizado usando un modelo.
- Dar una interpretación física consistente a las cantidades operacionales.

Algunas de las definiciones básicas para cantidades operacionales son:

- Marcado instantáneo: es el número de marcas presentes en el lugar p en el tiempo T,
- Marcado promedio: es la relación entre el área generado por el marcado en función del tiempo, hasta una cierta coordenada de tiempo, dividida por el valor de esa coordenada de tiempo,
- Grado de habilitación instantáneo: es el número de servidores que están corrientemente activos, que están realizando trabajo de disparo de transición,
- Trabajo de habilitación total: es el tiempo activo total para todos los servidores asociados con el disparo de transición durante un tiempo T,
- Grado de habilitación promedio: es el número promedio de servidores activos asociados con el disparo de transición durante un tiempo T,
- Cuenta de disparo total: es el número total de disparos de una transición t observados desde un tiempo 0 a T,
- Rendimiento: es la frecuencia de disparo real de la transición t observada durante un tiempo T, y
- Tiempo de disparo promedio: es el tiempo promedio para que un servidor complete un disparo durante un tiempo T.

A.3.2.7 Observación y especificación de modelos temporizados

Con la introducción de las ecuaciones de ocurrencia y del análisis operacional, direccionamos el problema de la observación de la conducta de un modelo temporizado, con el objeto de medir algunos de sus números relacionados al rendimiento, como por ejemplo un rendimiento de transición particular. Esto se suma al problema de especificar la conducta en el tiempo para un sistema de Red de Petri no temporizado, no interpretado. Los dos aspectos (especificación y observación-computación de las medidas de rendimiento) están, sin embargo, fuertemente relacionadas, en el sentido que las medidas de cantidades operacionales deben ser consistentes con la interpretación/especificación del modelo.

El punto crítico en establecer una relación consistente entre la especificación de temporización y las medidas de rendimiento es el concepto de intervalo de habilitación de transición. Si se especifica el retardo de habilitación de la transición, o bien determinísticamente o estocásticamente, entonces se puede computar una cantidad operacional, sin realmente tener que efectuar una medida experimental de nuestro modelo, y ser capaz de aplicar leyes operacionales para computar otras medidas de rendimiento directamente de la especificación de nuestro modelo interpretado temporizado.

En este punto, la idea detrás del uso de las Redes de Petri temporizadas para las medidas de rendimiento debería ser intuitivamente clara.

A.4) REDES DE ACTIVIDADES ESTOCÁSTICAS JERÁRQUICAS

Las Redes de Actividades Estocásticas (Stochastics Activiy Networks - SANs), una variante de las Redes de Petri Estocásticas, han sido usadas como modelo formal, desde mediados de los 80, para evaluación de rendimiento, dependabilidad y confiabilidad, en diversas herramientas, como METASAN, UltraSAN y Möbius.

Las Redes de Actividad (ANs) son el modelo no probabilístico sobre el cual las SANs están construidas, justamente como de una manera similar, las Redes de Petri no temporizadas proveen la base para las Redes de Petri Estocásticas. La ejecución de las SANs puede describirse entonces como una secuencia de marcados, finalización de actividades y selecciones de caso.

A.4.1 Redes de Actividad

El deseo de representar las características de paralelismos y restricciones de tiempo en los sistemas, como así también la tolerancia a fallas y rendimiento degradable, precipitó el desarrollo de los modelos de rendimiento a nivel de red general, conocidos como Redes de Actividad Estocástica [68-70].

A.4.1.1 Definiciones

Informalmente, las Redes de Actividad son Redes de Petri generalizadas con las siguientes primitivas:

- Las actividades: que son de dos clases: actividades temporizadas y actividades instantáneas. Cada actividad tiene un número entero de casos no cero.
- Los lugares: como en las Redes de Petri.
- Las compuertas de entrada: cada una de las cuales tiene un conjunto finito de entradas y una salida. Cada compuerta de entrada está asociada con un predicado computable n-ario y una función parcialmente computable n-aria sobre el conjunto de números naturales, los cuales son llamados el predicado de habilitación y la función de entrada, respectivamente. La función de entrada está definida por todos los valores para los cuales el predicado de habilitación es verdadero.

- Las compuertas de salida: cada una de las cuales tiene un conjunto finito de salidas y una entrada. Cada compuerta de salida está asociada con una función computable n-aria sobre el conjunto de números naturales, llamada la función de salida.

Las actividades temporizadas representan las actividades del sistema modelado cuyas duraciones impactan en la capacidad del sistema de trabajar. Las actividades instantáneas, en el otro extremo, representan las actividades del sistema que, relativas al rendimiento variable en cuestión, son finalizadas en una cantidad de tiempo despreciable. Los casos asociados con las actividades permiten la realización de dos tipos de incertidumbre espacial. La incertidumbre acerca del estado siguiente se asume sobre la finalización de una actividad temporizada, para los casos asociados con esa actividad. Las compuertas son introducidas para permitir mayor flexibilidad en la definición de reglas de habilitación y finalización.

Se puede definir formalmente una Red de Actividad en términos de las interconexiones permitidas entre estas primitivas del modelo.

Una Red de Actividad (AN) es una óctupla

$$AN = (P, A, I, O, \gamma, \tau, \iota, o)$$

Donde:
- *P* es algún conjunto finito de lugares,
- *A* es un conjunto finito de actividades,
- *I* es un conjunto finito de compuertas de entrada, y
- O es un conjunto finito de compuertas de salida.

Y además, donde

$$\gamma : A \rightarrow \mathbb{N}^+$$

especifica el número de casos para cada actividad, y

$$\tau : A \rightarrow \{Timed, Instantaneous\}$$

especifica el tipo de cada actividad.

La estructura de la red queda establecida vía las funciones *i* y *o,* donde

$$\iota : I \rightarrow A$$

Mapea las compuertas de entrada a las actividades, mientras que

$$o : O \rightarrow \{(a, c) | a \in A \text{ and } c \in \{1, 2, \ldots, \gamma(a)\}\}$$

Mapea las compuertas de salida a los casos de las actividades.

Algunas implicancias de esta definición son inmediatamente aparentes. Primero, cada compuerta de entrada o salida está conectada a una actividad simple. Además, cada entrada de una compuerta de entrada, o salida de una compuerta de salida, está conectada a un único lugar. Las diferentes compuertas de salida y las compuertas de entrada de una actividad pueden estar conectadas a idénticos lugares, como se ha hecho en la práctica. La ambigüedad en la ejecución de la red se evita requiriendo que el marcado obtenido a la finalización de cada actividad no dependa del orden de aplicación de las funciones de compuerta de entrada, ni del orden de aplicación de las funciones de compuerta de salida.

A.4.1.2 Representación Gráfica

Para ayudar en el proceso de modelación de las Redes de Actividad se emplea típicamente una representación gráfica, como en el caso de las Redes de Petri. De hecho, salvo para las redes más pequeñas, la especificación vía la formulación de tuplas presentada en la definición es extremadamente voluminosa. No solo la representación gráfica es más compacta, sino también provee mayor comprensión de la conducta de la red. Por ejemplo, consideremos que *i* y *j* son números naturales y la siguiente Red de Actividad:

$$
\begin{aligned}
P &= \{A, B, C\}, \text{ where } A < B < C \\
A &= \{T1, T2, I1\} \\
I &= \{GA1, GA2, GB, GC, G2\} \\
O &= \{AG, BG, CG, G1\} \\
\gamma &= \{(T1, 2),\ (T2, 1),\ (I1, 1)\} \\
\tau &= \{(T1, Timed),\ (T2, Timed),\ (I1, Instantaneous)\} \\
GA1 &= (\{A\},\ \{(i,1) \mid i > 0\} \cup \{(0,0)\},\ \{(i, i-1) \mid i > 0\} \cup \{(0,0)\} \\
GA2 &= (\{A\},\ \{(i,1) \mid i > 0\} \cup \{(0,0)\},\ \{(i, i-1) \mid i > 0\} \cup \{(0,0)\} \\
GB &= (\{B\},\ \{(i,1) \mid i > 0\} \cup \{(0,0)\},\ \{(i, i-1) \mid i > 0\} \cup \{(0,0)\} \\
GC &= (\{C\},\ \{(i,0) \mid i > 0\} \cup \{(0,1)\},\ \{(i,i) \mid \forall i\}) \\
G2 &= (\{B, C\},\ \{((i,j),1) \mid i > 0 \text{ or } j > 0\} \cup \\
&\qquad \{(0,0),0)\},\ \{((i,j),(0,0)) \mid \forall i, j\}) \\
AG &= (\{A\},\ \{(i, i+1) \mid \forall i\}) \\
BG &= (\{B\},\ \{(i, i+1) \mid \forall i\}) \\
CG &= (\{C\},\ \{(i, i+1) \mid \forall i\}) \\
G1 &= (\{A, B\},\ \{((i,j),(i+2,j)) \mid i < 5 \text{ and } j < 5\} \cup \\
&\qquad \{((i,j),(i-1,j)) \mid j > 5 \text{ and } i = 0\} \cup \\
&\qquad \{((i,j),(i,j)) \mid j > 5 \text{ and } i \neq 0\}) \\
\iota &= \{(GA1, T1),\ (GA2, I1),\ (GB, I1),\ (GC, I1),\ (G2, T2)\} \\
o &= \{(AG, (T2, 1)),\ (BG, (T1, 2)),\ (CG, (I1, 1)),\ (G1, (T1, 1))\}
\end{aligned}
$$

La Figura A.12 muestra la representación gráfica de esta red. Inmediatamente se puede observar la utilidad de una representación gráfica. Aquí los lugares están representados por círculos (*A*, *B* y *C*), como en las Redes de Petri. Las actividades temporizadas (*T1* y *T2*) están representadas cómo óvalos vacíos. Las actividades instantáneas (*I1*) están representadas como barras sólidas. Los casos asociados con una actividad están representados por círculos pequeños sobre un lado de la actividad (como sobre *T1*). Una actividad con solo un caso está representada sin círculos sobre el lado de la salida (como sobre *T2*).

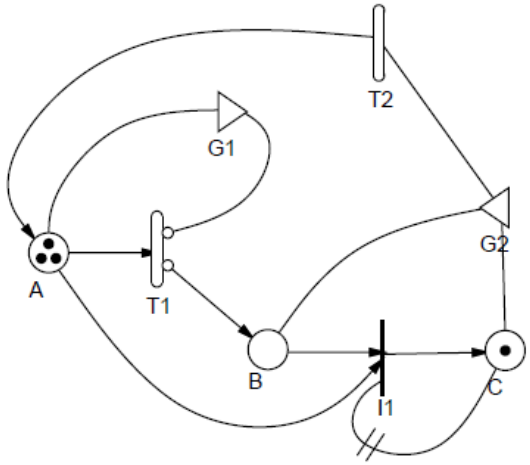


Figura A.12 Gráfica de Representación de una Red de Actividad

Gate	Predicate	Function
G1	-	if (MARK(A) < 5 and MARK(B) < 5) then MARK(A) = MARK(A) + 2; else if (MARK(A) > 0) then MARK(A) = MARK(A) - 1;
G2	MARK(B)>0 or MARK(C)>0	MARK(B) = 0; MARK(C) = 0;

Tabla A.1 Descripción de las compuertas G1 y G2

Las compuertas están representadas por triángulos. *G2* es un ejemplo de una compuerta de entrada con 2 entradas. *G1* es un ejemplo de una compuerta de salida con 2 salidas (Tabla A.1). Los predicados y funciones de habilitación para las compuertas están típicamente dados de forma tabular. Tres tipos de compuertas usadas comúnmente, tienen representaciones dadas por default (no por triángulos) por facilidad de interpretación y para ilustrar su similitud a las clásicas primitivas de las Redes de Petri. En particular, una compuerta de entrada con una entrada, predicado de habilitación

$$\{(i,1) \mid i > 0\} \cup \{(0,0)\}$$

Y función

$$\{(i,i-1) \mid i > 0\} \cup \{(0,0)\}$$

(Por ejemplo *G A1*) se representa como una línea dirigida desde su entrada a su salida.

Igualmente, una compuerta de salida con una entrada y función de salida

$$\{(i,i+1) \mid \forall i\}$$

(Por ejemplo *AG*) se muestra como una línea dirigida desde su entrada a su salida. Finalmente, una compuerta de entrada con una entrada, predicado de habilitación

$$\{(i,0) \mid i > 0\} \cup \{(0,1)\}$$

Y función

$$\{(i,i) \mid \forall i\}$$

(Por ejemplo *GC*) se muestra como una línea dirigida desde su entrada a su salida atravesada por dos líneas paralelas cortas. Este tipo de compuerta de entrada corresponde a un arco inhibidor en las Redes de Petri Extendidas. Estas breves notaciones para las compuertas ayudan al observador a entender la conducta de una red desde su representación gráfica.

A.4.1.3 Redes de Actividad Estocástica

Las Redes de Actividad (ANs) son interesantes en su propio derecho, y algunas de sus propiedades se han discutido por diversos autores [87]. Sin embargo, para los propósitos de este apartado, sirven como una base no probabilística para una extensión estocástica, llamada Redes de Actividad Estocástica (SANs), que son usadas para evaluación de rendimiento. Cuando se usan de esta manera, debe tenerse cuidado para asegurar que la conducta probabilística de la extensión estocástica esté completamente definida. Específicamente, dado que se quiere la capacidad de consulta, observando las secuencias posibles de las finalizaciones de actividades temporizadas, y los marcados estables intervinientes, es necesario que se alcance un marcado estable eventualmente después de cualquier secuencia de finalizaciones de actividades instantáneas consecutivas.

La definición de una Red de Actividad Estocástica ha variado en algunos aspectos, respecto a las definiciones tempranas [85] en tres aspectos. Primero, se requieren las probabilidades asociadas con casos, para depender solo de los lugares de entrada y salida de la actividad asociada. Este requerimiento permite el desarrollo de algoritmos más eficientes para verificar si la conducta probabilística de una Red de Actividad Estocástica está completamente especificada. Dado que cualquier lugar en la red puede tener un lugar de entrada o salida, a cualquier actividad, este no es un requerimiento restrictivo.

El segundo aspecto en que la función de distribución de probabilidad asociada con cada actividad temporizada en un marcado posible sea continúa. Este requerimiento asegura que dos actividades temporizadas no finalicen al mismo tiempo, dado que no esta especificada la conducta cuando esto ocurre. Este requerimiento no es demasiado estricto para las Redes de Actividad Estocástica que van a ser resueltas

analíticamente, dado que el método de solución usualmente coloca restricciones más estrictas sobre las distribuciones. En el caso de las SANs que van a ser resueltas vía simulación, la ambigüedad puede ser evitada al asignar un orden a las actividades temporizadas que pueden completarse en el mismo momento.

Y por ultimo, el tercer aspecto surge a partir del hecho que la definición actual no requiere que la Red de Actividad subyacente este formalmente bien definida en su marcado inicial. Una Red de Actividad se dice estar formalmente bien en un marcado inicial μ si:

1. Ninguna secuencia infinita de actividades instantáneas puede completarse en cualquier marcado alcanzable desde el marcado μ, y
2. Si un marcado alcanzable desde μ tiene más que una actividad instantánea habilitada, entonces desde ese marcado, todas las posibles secuencias de marcados alcanzables resultan en el mismo marcado estable.

Estos requerimientos conducen a las Redes de Actividad Estocástica con conductas probabilísticas completamente especificadas.

A.4.2 Redes de Actividades Estocásticas Jerárquicas

En la definición original de Redes de Actividad Estocástica, estos modelos han sido definidos como una red plana de primitivas. Sin embargo, unas pocas técnicas se habían introducido para construir modelos SAN jerárquicos y compuestos.

Una importante técnica que es implementada en las herramienta de modelación UltraSAN y Möbius, es el constructor Replicate/Join. Este constructor provee un método jerárquico, como un árbol, para combinar submodelos para formar un modelo compuesto más grande. Como el nombre lo indica, hay dos métodos que pueden ser usadas para combinar submodelos: Replicas y Uniones. Las Réplicas son usadas para replicar un modelo cualquier número de veces, frecuentemente con una o más variables de estado compartidas entre todas las réplicas como un medio de conexión. Las Uniones son usadas para unir dos o más modelos distintos, conectándolos por medio de ciertas variables de estado compartido entre ellos. El constructor Replicate/Join ha sido extendido y generalizado, en el formalismo de composición gráfica en el framework de modelación de Möbius.

Las SANs tienen dos restricciones más:

- Hay una ausencia de facilidades para construir modelos de complejidad incremental, arrancando con componentes abstractos y fácilmente reemplazándolos con componentes detallados y realzados. Aquí, nuevamente se necesita un paradigma top-down para la construcción del modelo.
- Dado que los modelos SAN son planos, usando una parte de un modelo existente, como un componente para construir uno nuevo es difícil. Especialmente, construir y compartir un repositorio de submodelos con interfaces bien definidas no es fácilmente posible.

Teniendo en mente que los lenguajes de programación, especialmente los lenguajes orientados a objetos, tienen formas simples e intuitivas de encapsular jerarquías, se han podido superar estas dificultades y restricciones de las SANs.

A.4.2.1 Definiciones de Redes de Actividad Estocástica Jerárquicas

Los modelos HSAN proveen jerarquías para una nueva definición de las SANs. Estos modelos tienen un nuevo elemento llamado macro actividad, además de las cinco primitivas de las SANs. Una macro actividad es un submodelo HSAN, que está compuesto de elementos SAN u otras macro actividades. La sintaxis de uso de una macro actividad es similar al uso de las actividades temporizadas o instantáneas. La fusión de lugar es usado como un mecanismo para interfacear las macro actividades a las otras partes de un modelo HSAN.

Una actividad macro puede tener cero o más lugares de fusión de entrada y salida. Los lugares de fusión son un subconjunto de lugares normales. Una actividad macro tiene una interface bien definida que es similar al pasaje de parámetros de procedimientos y funciones en los lenguajes de alto nivel. Los lugares alrededor de una actividad macro son lugares de fusión formal. Cuando una actividad macro es usada en un modelo HSAN, estos lugares formales estarán limitados por lugares reales, que son lugares normales de SANs. En una representación gráfica, un lugar de fusión puede presentarse como dos círculos concéntricos. Una representación gráfica y uso de una actividad macro se muestra en la Figura A.13.

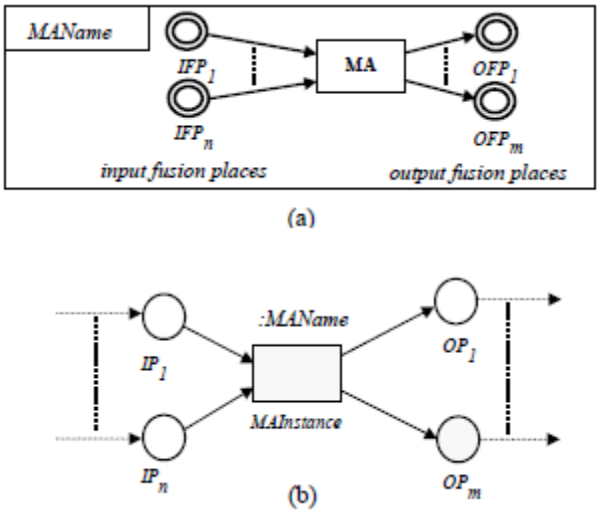


Figura A.13 Representación de una Actividad macro

Como un ejemplo de modelos HSANs, vemos el modelo graficado en la Figura A.14. En la Figura A.14 (a) se muestra una actividad macro, llamada MM1NQ, para la cola M/M/1/N. La actividad macro tiene los siguientes elementos: *input* (un lugar de fusión de entrada), *Arrival* (una actividad temporizada que modela los procesos de arribo), *ChkFull* (una compuerta de salida que verifica la capacidad de la cola N), *Queue* (un lugar que modela la línea de cola), *Service* (una actividad temporizada que modela el tiempo de servicio) y *output* (un lugar de fusión de salida.

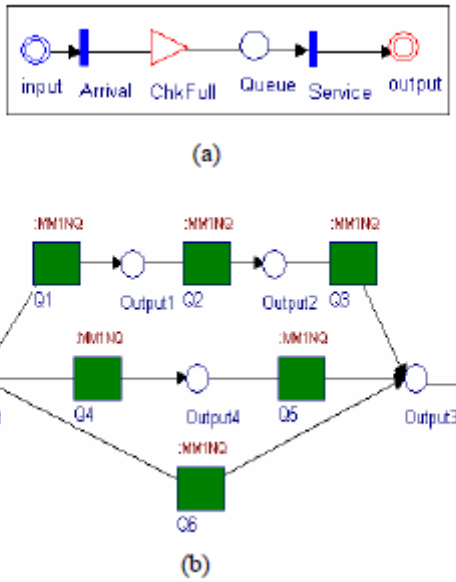


Figura A.14 Ejemplo de modelo HSAN

La tabla de compuerta para la actividad macro MM1NQ se muestra en la Tabla A.2. En esta tabla, está definida la función de la compuerta de salida ChkFull. Esta función verifica si la cola está llena o no. Arrivals,

Rejected y N son tres variables globales, que denotan el número de arribos al sistema, el número de clientes rechazados y la capacidad de la cola, respectivamente.

La Figura A.14 (b) muestra el modelo HSAN para una red de colas, compuesto de seis colas tándem/paralelo. Q1 hasta Q6, son algunas instantáneas de la MM1NQ. Las actividades temporizadas Arrival y Departure modelan los procesos de entrada y salida de la red. Input, Output1 hasta Output4 son algunos lugares, que están limitados a los lugares de fusión de entrada/salida de Q1 hasta Q6.

Gate Name	Function
Output	Arrivals++; if (MARK(Queue) < N) MARK(Queue)++; else Rejected++;

Tabla A.2 Descripción de la compuerta ChkFull

A.4.2.2 Definiciones Formales y Conducta de HSANs

La definición formal de HSANs es la base para solución analítica y simulación de estos modelos. En las siguientes definiciones formales N denota el conjunto de los números naturales y R+ representa el conjunto de los números reales no negativos.

Una Red de Actividad Estocástica *(SAN)* está definida como 11-tupla

$$HSAN = (P, IA, TA, IG, OG, IR, OR, C, F, \Pi, \rho)$$

Donde:

- P es un conjunto finito de lugares,
- IA es un conjunto finito de actividades instantáneas,
- TA es un conjunto finito de actividades temporizadas,
- IG es un conjunto finito de compuertas de entrada. Cada compuerta de entrada tiene un número finito de entrada. Para cada G Є IG, con m entradas, está asociada una función $f_G : N^m \rightarrow N^m$, llamada la función de G, y un predicado $g_G: N^m \rightarrow \{true, false\}$, llamado el predicado habilitante de G,
- OG es un conjunto finito de compuertas de salida. Cada compuerta de salida tiene un número finito de salidas. Para cada G Є OG, con m salidas, está asociada una función $f_G : N^m \rightarrow N^m$, llamada la función de G,
-

$$IR \subseteq P \times \{1, ..., |P|\} \times IG \times (IA \cup TA)$$

IR es la relación de entrada y satisface las siguientes condiciones:

. Para cualquier (*P*1, *i*, *G*, *a*) Є *IR* tal que *G* tiene *m* entradas, *i* ≤ *m*,

. Para cualquier G Є IG con m entradas e *i* Є *N*, i ≤ m, existe *a* ∈ (*IA* ∪ *TA*) y *P*1 ∈ *P* tal que (*P*1, *i*, *G*, *a*) Є *IR*,

. Para cualquier (*P*1, *i*, *G*1, *a*), (*P*1, *j*, *G*2, *a*) Є *IR*, *i* = *j* y *G*1 = *G*2.

En una representación gráfica, (*Pk*, *k*, G, *a*) ∈ *IR* significa que el lugar *Pk* está linkeado a la entrada *k*-th de una compuerta de entrada *G* cuya salida está conectada a la actividad *a*. *Pk* se dice que es un lugar de entrada de *a* y *G* es referido como una compuerta de entrada de *a*.

-

$$OR \subseteq (IA \cup TA) \times OG \times \{1, ..., |P|\} \times P$$

OR es la relación de salida y satisface las siguientes condiciones:

. Para cualquier (*a*, *i*, *G*, *P*1) Є *OR* such that *G* has *m* salidas, *i* ≤ *m*,

. Para cualquier *G* Є *OG* con *m* salidas y *i* Є *N*, *i* ≤*m*, existe *a* Є (*IA* ∪ *TA*) y *P*1 Є *P* tal que (*a*, *G*, *i*, *P*1) Є *OR*,

. Para cualquier (*a*, *G*1, *i*, *P*1), (*a*, *G*2, *j*, *P*1) Є *OR*, *i* = *j* y *G*1 = *G*2.

En una representación gráfica, (*a*, G, *k*, *Pk*) Є *OR* significa que la *a* está linkeada a la entrada de una compuerta de salida *G* cuya salida *k*-th está conectada al lugar *Pk*. *G* se dice que es una compuerta de salida de *a* y *Pk* es referido como un lugar de salida de *a*.

-

$$C: N^n \times IA \rightarrow [0, 1]$$

C es la función de probabilidad de caso, donde *n* = |*P*|.

-

$$F = \{F(.|\mu, a); \mu \in N^n, a \in TA\}$$

Fs el conjunto de funciones de distribución de tiempo de actividad, donde *n* = |*P*| y, para cualquier μ ∈ *Nn*, y *a* ∈ *TA*, *F*(.|μ, *a*) es una función de distribución de probabilidad,

- Π: *Nn* × *TA* → {*true*, *false*} es el predicado de reactivación, donde *n* está definido como antes,
- ρ: *Nn* × *TA* → *R*+ es la función de velocidad de habilitación, donde *n* está definido como antes.

A.4.2.3 Transformación de HSANs en un Modelo SAN Plano

Si un modelo HSAN está bien definido, tiene un equivalente modelo SAN plano. Puede usarse un algoritmo de sustitución para aplanar el modelo HSAN. En cada paso del algoritmo, todas las actividades macro

en las hojas del grafo serán sustituidas por sus definiciones. Esto será repetido hasta que el único nodo en el grafo sea el nodo raíz. El modelo resultante es un modelo SAN plano.

Dado que la identificación con nombres de los modelos HSANs es local, los nombres de dos elementos en dos diferentes niveles de la jerarquía de un modelo HSAN pueden ser idénticos. Para resolver el problema de nombres duplicados en la sustitución de la actividad macro con su definición, el nombre de cada elemento de una actividad macro es precedido por el nombre de su padre en la actividad macro. Por ejemplo, si tenemos que una actividad macro es llamada *ma1* en un modelo HSAN, y hay un lugar llamado *p1* en la definición de *ma1*, debe sumarse un lugar llamado *ma1.p1* al modelo aplanado.

A.4.2.4 Transformación de HSANs en Formalismos de Composición

La desventaja principal del método de aplanado es que la explosión de los nodos en el modelo resultante puede conducir a la explosión del espacio de estados del modelo. Hay algunas técnicas para construir modelos SAN de una forma que eviten el problema de la explosión del espacio de estados. Un beneficio clave de los modelos HSAN es la posibilidad de emplear automáticamente tales técnicas por sus herramientas de modelación. Una herramienta de modelación para HSANs puede transformar un modelo en los siguientes formalismos de composición:

1. Constructor Replicate/Join: Una técnica de composición para SAN es el constructor Replicate/Join. Una forma posible de la solución de los modelos HSAN es transformarlos vía este constructor. Una herramienta de modelación para HSANs puede verificar para una estructura árbol el grafo de dependencia del modelo. Y puede automáticamente encontrar los estados compartidos basada en los lugares de fusión de las actividades macro. Para la solución del modelo resultante pueden usarse las técnicas propuestas en [71-72].

2. Formalismo de Composición de Grafo: Otro formalismo de composición, que ha sido propuesto en el framework de modelación Möbius para modelos SAN y otros, es el formalismo de Composición de Grafo [72]. Este formalismo no limita la jerarquía del modelo a una estructura árbol, y es posible cualquier estructura arbitraria (tal como un ring o una malla). Una herramienta de modelación para HSAN puede verificar la posibilidad del uso de este formalismo.

A.4.2.5 Simulación de Eventos Discretos de Modelos HSAN

Cuando un modelo HSAN o uno de sus actividades macro está compuesta de uno o más actividades temporizadas no exponenciales o su espacio de estado es infinito, no puede resolverse analíticamente. En tales casos, para resolver el modelo HSAN, puede emplearse la simulación de eventos discretos, con técnicas rápidas y eficientes. Estos métodos pueden estar basados en la propuesta de simulación rápida de modelos compuestos de SAN [73], o técnicas para simulación de eventos discretos en el framework Möbius [74].

A.4.2.6 Ejemplos de herramientas de soporte de HSANs

Una de las herramientas es SANBuilder que fue desarrollada para la modelación y análisis con modelos basados en SANs y HSANs. SANBuilder corre bajo Windows 2000/XP y habilita al modelador a construir modelos SAN y HSAN en un editor gráfico, definir y salvar actividades macro y cargarlas para reuso en un nuevo modelo.

SANBuilder tiene un ambiente de desarrollo integrado (IDE) para construcción, compilación, animación, simulación de eventos discretos, y solución analítica de los modelos basados en SAN. Una vista de la interface de usuario de SANBuilder se muestra en la Figura A.15.

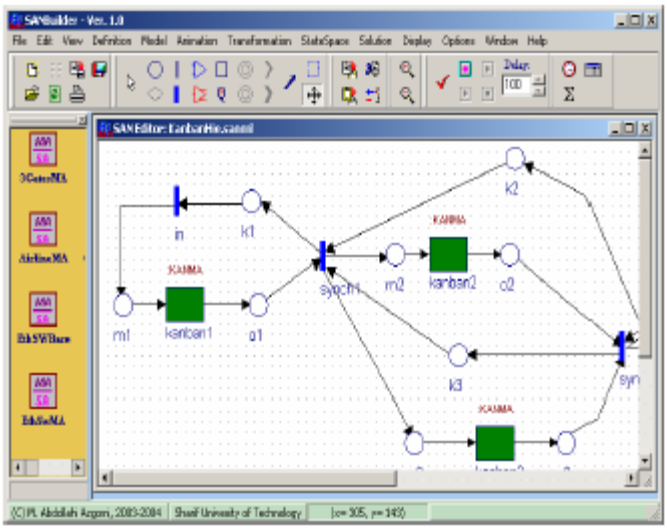


Figura A.15 Vista de interface del simulador SANBuilder

Otra herramienta muy difundida y usada en la presente tesis es Möbius. La primera versión fue liberada en 2001 como un sucesor a la herramienta UltraSAN. Su amplio rango de uso es posible a causa de la flexibilidad y potencia dada por el soporte de múltiple de formalismos de modelación de alto nivel y técnicas de solución.

El proyecto Möbius es uno de los mayores proyectos de investigación del Grupo de Investigación de Ingeniera de Rendimiento (Performability Engineering Research Group - PERFORM) en el Laboratorio de Ciencia Coordinada de la Universidad de Illionois en Urbana-Champaign. La investigación ha sido soportada por Motorola como parte del Centro Motorola para la Validación de Sistemas de Alta Disponibilidad, por la Fundación Nacional de Ciencia.

Una vista de la interface de usuario de Möbius se muestra en la Figura A.16.

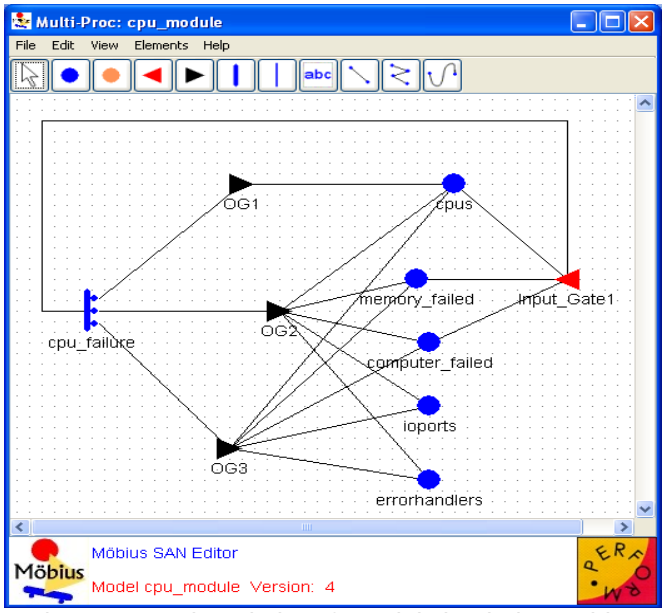


Figura A.16 Vista de interface del simulador Möbius

A.5) COMPARACIÓN ENTRE LAS REDES DE COLAS, REDES DE PETRI Y REDES DE ACTIVIDADES

A.5.1 Similitudes y Diferencias

Tanto en la utilización del formalismo para Redes de Petri – Redes de Actividades, como para Redes de Colas se encuentran varias extensiones que han sido propuestas y usadas para incrementar la potencia de modelación para la representación de los sistemas concurrentes con sincronizaciones. Han existido una serie de intentos publicados para comparar las Redes de Petri y las Redes de Actividades con las Redes de Colas (incluyendo la noción de tiempo), y han sugerido generalmente que existe una equivalencia sustancial entre estas dos clases de formalismos.

Tal conclusión puede ser más o menos convincente desde un punto de vista metodológico, pero en opinión del autor [193], sin ningún impacto práctico. Además, tal equivalencia sustancial no puede ser establecida para cualquier par de formalismos realmente propuestos, pero soportados por herramientas de software distintas. En las Tablas A.3 y A.4, se presenta un sumario planteado por [193] para la comparación, estableciendo las similitudes y diferencias, tratando de identificar algunas de las fortalezas y debilidades de tales formalismos, con la idea de que desde los ámbitos de investigación y/o desarrollo puedan proponerse algunas extensiones de los mismos que superen las dificultades.

Redes de Petri **Redes de Actividades**	**Redes de Colas**
Flujo de marcas	Flujo de clientes
Modelación abstracta	Modelación abstracta
Marcado paramétrico	Población paramétrica
Análisis operacional	Análisis operacional
Flujo de servidores equivalentes	Flujo de servidores equivalentes
Simulación discreta	Simulación discreta

Tabla A.3 Sumario de comparación: Similitudes

Redes de Petri **Redes de Actividades**	**Redes de Colas**
Posible modelación detallada	Solo modelación abstracta
Ninguna semántica especial	Semántica predefinida
Sistemas no paramétricos	Población siempre paramétrico

Tabla A.4 Sumario de comparación: Diferencias

A.5.2 Hacia un formalismo de Redes de Petri y Redes de Actividad útil prácticamente [193]

Durante los treinta últimos años, se han publicado un gran número de propuestas para la utilización de los formalismos basados en Redes de Petri, y por lo tanto, en las Redes de Actividades, para la evaluación de rendimiento. La mayoría de estas propuestas son sustancialmente diferentes una de otras desde algunos puntos de vista; el único punto de unión es el hecho que todos los formalismos introducen de alguna forma el concepto de tiempo que fue apropiadamente evitado en la definición original de las Redes de Petri, como de las Redes de Actividades.

Por lo tanto, el termino “Redes de Petri Temporizadas” y “Redes de Actividades Temporizadas” ha asumido un amplio sentido para indicar una clase de modelos más que una elección específica propuesta por un autor particular. Por lo tanto, hasta ahora cada autor se ha mantenido usando su propia versión desarrollada del formalismo Redes de Petri y Redes de Actividades Temporizadas más que intentar cualquier esfuerzo de

unificación con otras propuestas levemente diferentes. Parte de esta falta de unificación es probablemente debido a los diferentes requerimientos de modelación que aparecen en distintos dominios de aplicación y de formación cultural, más que a actitudes viciosas deliberadas.

A.5.2.1 Características de las Redes de Petri y Redes de Actividad temporizadas

Los formalismos basados en Redes de Petri y Redes de Actividad se han introducido en respuesta a las necesidades reales en el dominio de evaluación de rendimiento de los sistemas paralelos y distribuidos, donde no haya mecanismos incluidos en las Redes de Colas.

Las variaciones históricas de las Redes de Petri y Redes de Actividades Temporizadas derivan de:

- La gran flexibilidad de los formalismos de Redes de Petri y de Redes de Actividad en si mismos, que pueden aconsejar diferentes reinterpretaciones y extensiones,
- El uso de los formalismos dentro de diferentes dominios de aplicación,
- La elección de diferentes métodos y técnicas de modelación y análisis.

Ninguno de los formalismos de Redes de Petri y Redes de Actividades temporizados propuestos ha sido específicamente diseñado como un formalismo para sustituir las Redes de Colas. Además, algunos de ellos fueron diseñados para complementar las descripciones de las Redes de Colas para aplicaciones grandes y complejas.

Las Redes de Petri y las Redes de Actividad permiten tanto la modelación a nivel de red y a nivel de estado, usando el mismo formalismo. Este provee libertad en la definición que debe ser expresada por la estructura de la red y que puede se expresada por la interpretación. Esta libertad puede ser explotada para sintonizar la potencia de modelación del formalismo a las necesidades de diferentes dominios de aplicación.

Desde el punto de vista de la modelación a uno le gustaría expresar todos los mecanismos básicos que caracterizan un dominio de aplicación dado por la interpretación, de modo que la estructura del modelo se mantenga simple.

A.5.2.2 Formalismos de Redes de Petri/Redes de Actividades

En la Tabla A.5, se presenta un sumario para la comparación entre diferentes formalismos de Redes de Petri y Redes de Actividades, estableciendo sus similitudes y diferencias, tratando de identificar algunas de las fortalezas y debilidades de tales formalismos para su aplicación en cualquier ámbito.

Redes de Petri	Redes de Actividad	Propiedad/Objetivo
No temporizada (Petri Net-PN)	No temporizas (Activiy Net-AN) con nuevas primitivas para mayor flexibilidad en la descripción	Modelo Causal sin tiempo
Estocástica (Stochastic Petri Net-SPN)	Estocástica (Stochastic Activity Net-SAN)	Modelo con Interpretación Temporal y Política de Resolución de Conflicto
Markoviana (MPN)	---------	Modelo Particular de SPN en que los tiempos de servicios de transición son variables aleatorias independientes y con distribución de probabilidad exponencial y tasa de encaminamiento de política de competición
Generalizada (GSPN)	---------	Modelo Particular de MPN que incluye transiciones inmediatas
Coloreada (CPN)	---------	Modelo compacto de Redes de Petri complejas
---------	Estocásticas Jerárquicas (Hierarchical Stochastic Activity Net-HSAN)	Modelo compacto como una jerarquía de submodelos SAN para sistemas complejos

Tabla A.5 Sumario de comparación: Similitudes y Diferencias

A.5.2.3 Formalismos de Redes de Petri y Redes de Actividades y los protocolos de comunicaciones

En distintos trabajos se han usado las Redes de Petri y las Redes de Actividades para el análisis de los protocolos de comunicaciones. Sus aproximaciones difieren en la clase de Red de Petri y Red de Actividad que ellos han usado y también en los métodos de análisis. Y dependiendo sobre el método de análisis, los autores han validado protocolos de comunicaciones o han verificado algunas propiedades. Los autores difieren en si usan Redes de Petri de bajo nivel o de alto nivel.

Las Redes de Petri Coloreadas (CPN) han demostrado tener una gran potencia de modelación para los protocolos de comunicaciones, pero los modelos son menos transparentes debido a las expresiones matemáticas asociadas a los objetos de la Red de Petri. Además, en CPNs las herramientas de simulación existentes, los modelos no se convierten en Redes de Petri de bajo nivel antes de la simulación, sino en un lenguaje de programación especializado.

Otros autores han usado Redes de Petri Estocásticas o Generalizadas para la modelación y análisis de ciertas clases de sistemas de colas.

En el presente trabajo se adopto un modelo de Control de Acceso al Medio (MAC) en 802.11e, construido con HSANs, ejecutado sobre Möbius.

A.6) SUMARIO

En este Apéndice se han presentado sucesivamente las definiciones formales de las Redes de Colas, las Redes de Petri y las Redes de Actividad con sus variantes. Se describió formalmente su conducta y especificó las condiciones que describen cuando su conducta es definida completamente de manera probabilística.

Progresivamente, y de acuerdo a la evolución histórica de estos formalismos, y foco del presente trabajo, se presentaron las definiciones informales y formales, y la conducta de las Redes de Actividades Estocásticas Jerárquicas (HSANs). Los modelos HSAN proveen facilidades para componer una jerarquía de submodelos SANs, que son llamados actividades macro, con mayor capacidad descriptiva que las Redes de Petri. Los modelos HSAN encapsulan jerarquías de una forma similar a los lenguajes de programación.

Similarmente a las SANs ordinarias, las HSANs pueden ser usadas para modelar y analizar varias clases y diferentes aspectos de sistemas comunicaciones.

APENDICE B

TABLAS COMPARATIVAS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS TRÁFICOS DE VOZ, VIDEO Y MEJOR ESFUERZO

B.1 TABLA COMPARATIVA DEL COMPORTAMIENTO DEL TRÁFICO DE VOZ PARA CADA UNO DE LOS CASOS DE LOS ESCENARIOS 1 Y 2

Configuración por defecto	Escenario 1				Escenario 2		
Comportamiento Tráfico de Voz	Todo Trafico	Sin voz	Sin Video	Sin Best Effort	60 % Voz	60% Video	60% BestEffort
Rendimiento Máximo [Mbps]	0,923	-	1,113	0,967	1,273	0,435	0,565
Pérdida 1% Rendimiento	10 estaciones	-	12 estaciones	12 estaciones	20 estaciones	30 estaciones	45 estaciones
Pérdida 5 % Rendimiento	13 estaciones	-	15 estaciones	15 estaciones	25 estaciones	35 estaciones	-
Pérdida 10 % Rendimiento	15 estaciones	-	20 estaciones	17 estaciones	30 estaciones	40 estaciones	-
Retardo de Cola en Rendimiento Máximo [ms]	12,345	-	4,105	7,659	9,172	46,826	3,188
Retardo de Cola para 10/25 estaciones [ms]	2,889	-	1,920	1,840	3,196	1,939	2,160
Retardo Máximo de Cola para 20/45 estaciones [ms]	14,944	-	4,105	16,173	9,172	46,826	3,188
Tamaño de Cola para 10 estaciones [paquetes]	0,142	-	0,095	0,091	0,152	0,096	0,107
Tamaño Máximo de Cola para 20/45 estaciones [paquetes]	0,539	-	0,181	0,587	0,337	1,783	0,156

Tabla B.1 Tabla Comparativa del Comportamiento del tráfico de voz Escenarios 1 y 2.

B.2 TABLA COMPARATIVA DEL COMPORTAMIENTO DEL TRÁFICO DE VIDEO PARA CADA UNO DE LOS CASOS DE LOS ESCENARIOS 1 Y 2

Configuración por defecto	Escenario 1				Escenario 2		
Comportamiento Tráfico de Video	Todo Trafico	Sin voz	Sin Video	Sin Best Effort	60 % Voz	60% Video	60% BestEffort
Rendimiento Máximo [Mbps]	10,885	13,071	-	11,303	5,838	15,044	5,887
Pérdida 1% Rendimiento	15 estaciones	-	-	17 estaciones	45 estaciones	35 estaciones	30 Estaciones
Pérdida 5 % Rendimiento	18 estaciones	-	-	19 estaciones	-	40 estaciones	-
Pérdida 10 % Rendimiento	19 estaciones	-	-	20 estaciones	-	45 estaciones	-
Retardo de Cola en Rendimiento Máximo [ms]	6,777	3,269	-	8,298	3,526	130,793	1,842
Retardo de Cola para 10/25 estaciones [ms]	2,330	0,942	-	0,658	0,890	1,300	1,117
Retardo Máximo de Cola para 20/45 estaciones [ms]	11,912	3,269	-	34,595	3,526	130,793	1,842
Tamaño de Cola para 10 estaciones [paquetes]	0,148	0,060	-	0,042	0,056	0,083	0,071
Tamaño Máximo de Cola para 20/45 Estaciones [paquetes]	0,619	0,208	-	1,831	0,223	7,123	0,117

Tabla B.2 Tabla Comparativa del Comportamiento del tráfico de video Escenarios 1 y 2

B.3 TABLA COMPARATIVA DEL COMPORTAMIENTO DEL TRÁFICO DE MEJOR ESFUERZO PARA CADA UNO DE LOS CASOS DE LOS ESCENARIOS 1 Y 2

Configuración por defecto	Escenario 1				Escenario 2		
Comportamiento Tráfico de Best Effort	Todo Trafico	Sin voz	Sin Video	Sin Best Effort	60 % Voz	60% Video	60% BestEffort
Rendimiento Máximo [Mbps]	10,096	12,391	15,524	-	8,185	6,117	15,633
Pérdida 1% Rendimiento	9° estación	12° estación	12° estación	-	35 estaciones	30 estaciones	30 estaciones
Pérdida 5 % Rendimiento	10° estación	13° estación	16° estación	-	45 estaciones	35 estaciones	30 estaciones
Pérdida 10 % Rendimiento	11° estación	14° estación	17° estación	-	45 estaciones	35 estaciones	30 estaciones
Retardo de Cola en Rendimiento Máximo [ms]	324,870	258,869	228,995	-	22,669	74,754	43,239
Retardo de Cola para 10/25 estaciones [ms]	45,303	3,556	1,174	-	1,270	3,869	43,239
Retardo Máximo de Cola para 20/45 estaciones [ms]	197000	1743,130	691,479	-	598,841	254745	1441,013
Tamaño de Cola para 10 estaciones [paquetes]	3,912	0,310	0,102	-	0,110	0,338	3,753
Tamaño Máximo de Cola para 20/45 estaciones [paquetes]	50	48,286	40,334	-	38,086	50	47,501

Tabla B.3 Tabla Comparativa del Comportamiento del tráfico de mejor esfuerzo Escenarios 1 y 2

APENDICE C

RESULTADOS DE MÉTRICAS PARA PARÁMETROS DE MEJORA

C.1) ESCENARIO 1

C.1.1 Estaciones con todos los tráficos

Los valores promedios obtenidos para el tamaño de cola y retardo de paquete, variando la carga de 1 a 20 estaciones, se muestran en las Figuras C.1, C.2 y C.3. La Tabla C.1 presenta los valores de los parámetros de configuración para este escenario, y la Tabla C.2 resume las características más importantes cuando todos los tráficos están presentes.

	Voz	Video	Best Effort
AIFSN	2	3	5
CWmin	7	31	63
CWmax	31	63	1023
TXOP	1,504 ms	15,040 ms	15,040 ms
Paquete	160 bytes	1280 bytes	1500 bytes
Rate	64 Kbps	640 Kbps	1024 Kbps

Tabla C.1 Parámetros EDCA de mejora utilizados Escenario 1.1

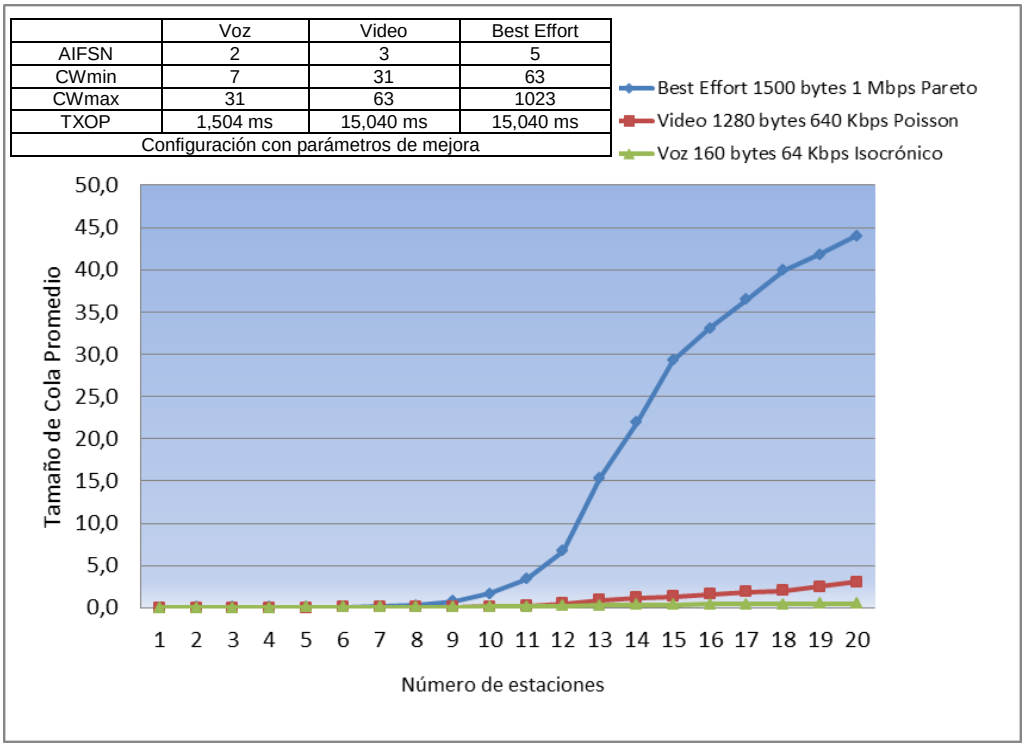


Figura C.1 Tamaño de Cola de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 1.1

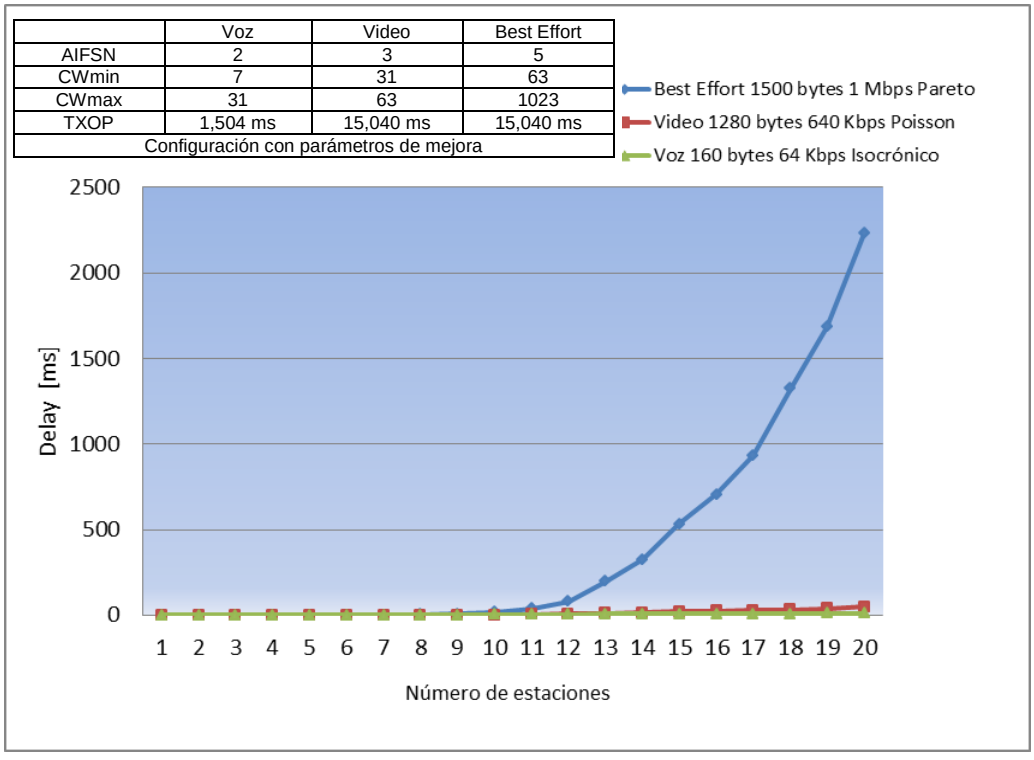


Figura C.2 Delays de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 1.1

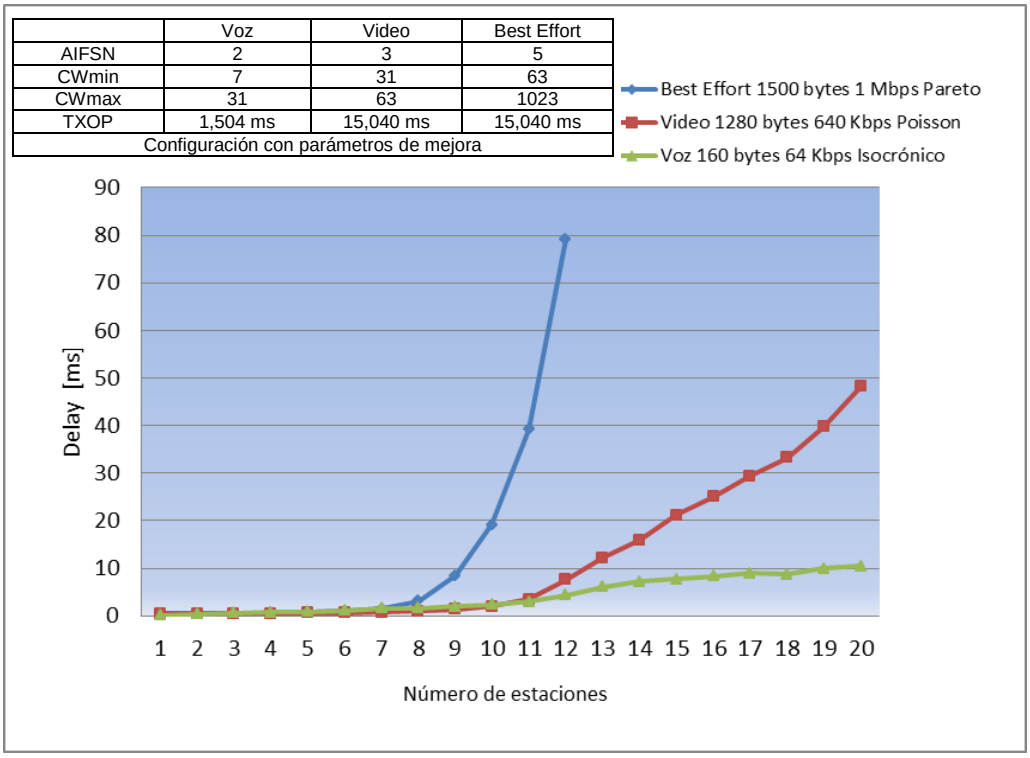


Figura C.3 Delays de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 1.1

	Voz	Video	Best Effort
Rendimiento Máximo [Mbps]	1,261	13,030	12,226
Pérdida 1% Rendimiento	19° estación	-	11° estación
Pérdida 5 % Rendimiento	-	-	13° estación
Pérdida 10 % Rendimiento	-	-	13° estación
Retardo de Cola en Rendimiento Máximo [ms]	10,442	48,184	704,626
Retardo de Cola para 10 estaciones [ms]	2,377	2,044	19,157
Retardo Máximo de Cola 20 estaciones [ms]	10,442	48,184	2233,011
Tamaño de Cola para 10 estaciones[paquetes]	0,118	0,130	1,666
Tamaño de Cola Máximo 20 estaciones [paquetes]	0,514	3,063	44,027

Tabla C.2 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 1.1

En las Figuras C.4, C5, C.6, C.7, C.8 y C.9 se observan las comparaciones de los tamaños de cola y retardos de los flujos de voz,

video y de mejor esfuerzo, configurados con los parámetros de mejora y con los parámetros por defecto.

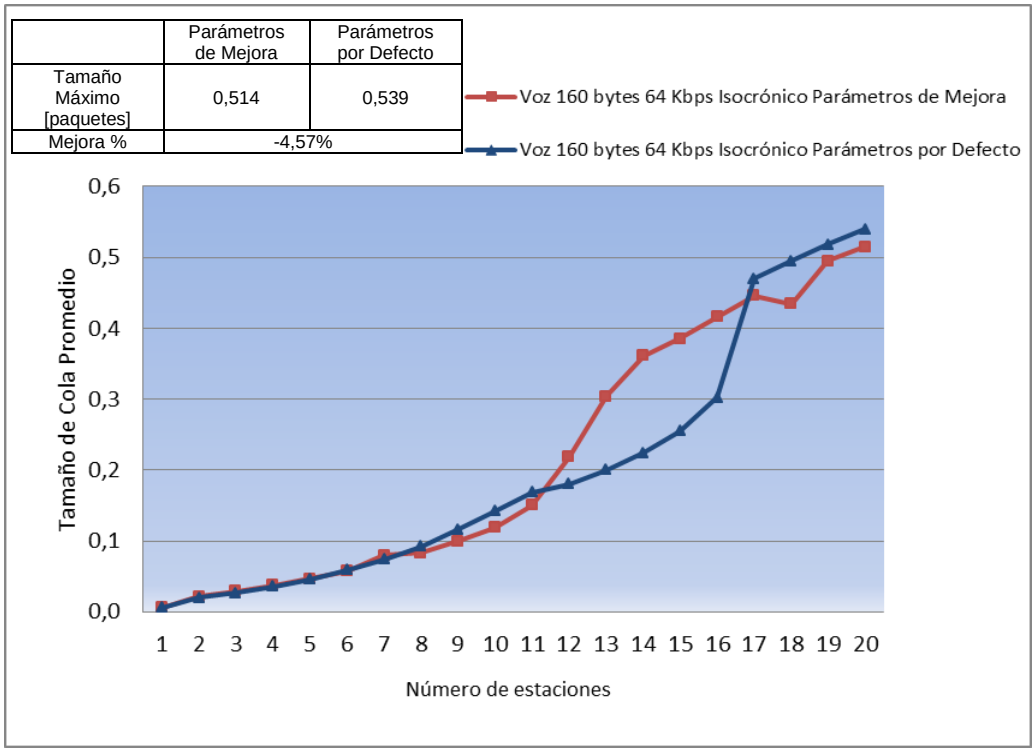


Figura C.4 Comparación del tamaño de cola del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.1

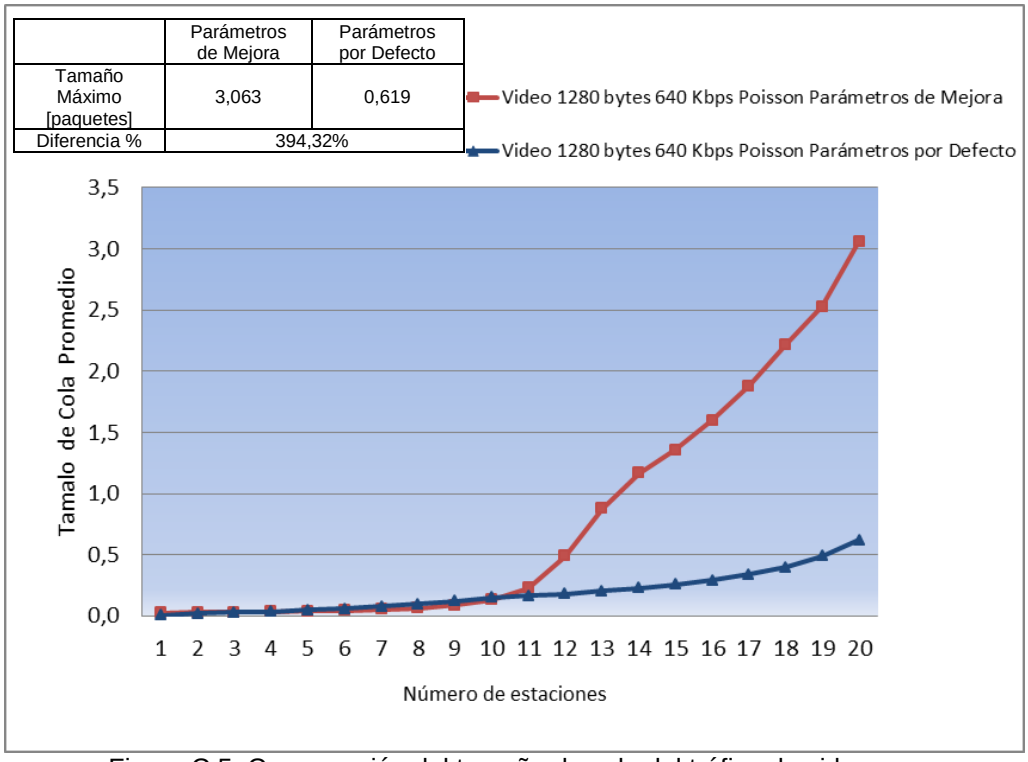


Figura C.5 Comparación del tamaño de cola del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.1

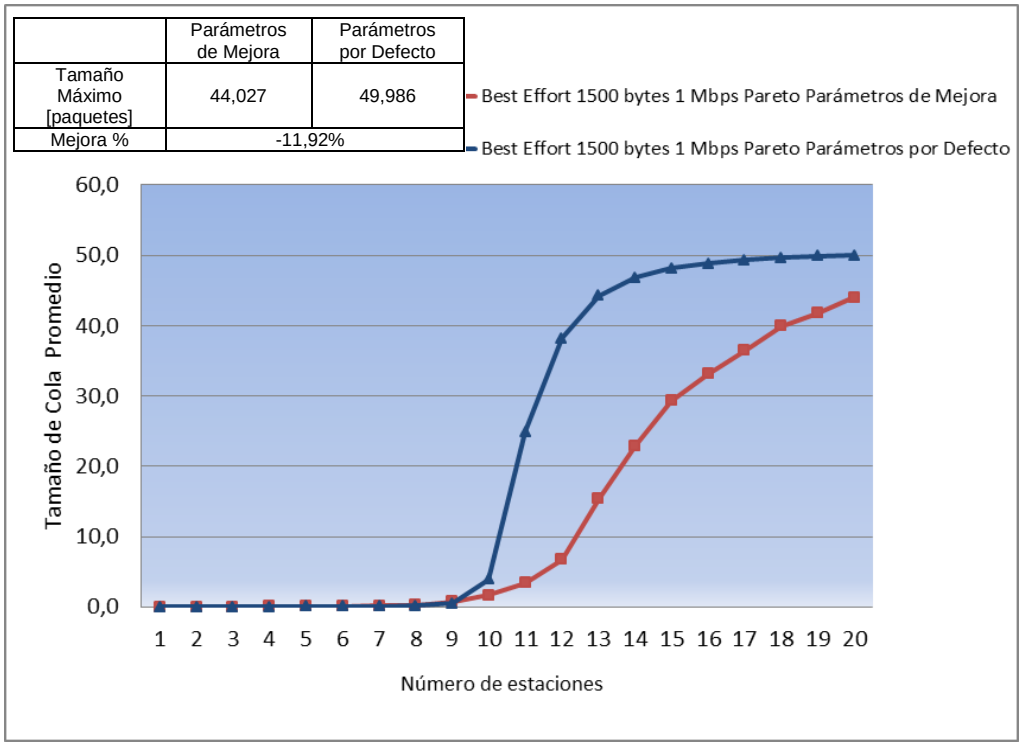


Figura C.6 Comparación del tamaño de cola del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.1

	Parámetros de Mejora	Parámetros por Defecto
Retardo Máximo [ms]	10,442	14,994
Mejora %	-30,36%	

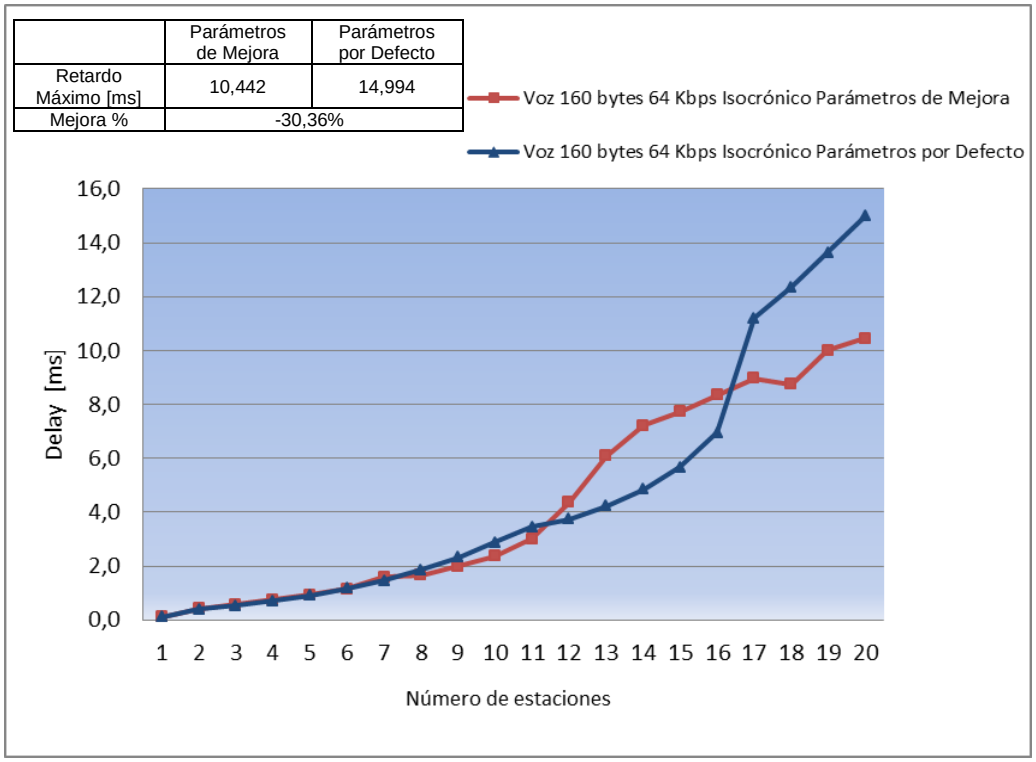


Figura C.7 Comparación de delays del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.1

	Parámetros de Mejora	Parámetros por Defecto
Retardo Máximo [ms]	48,184	11,912
Diferencia %	304,49%	

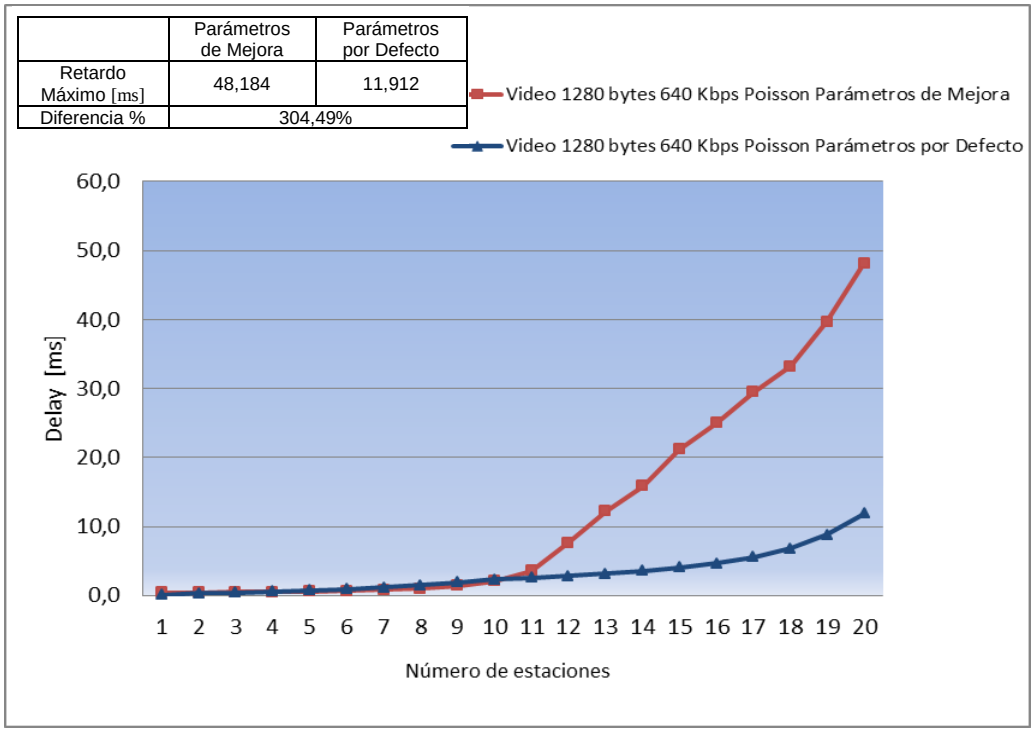


Figura C.8 Comparación de delays del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.1

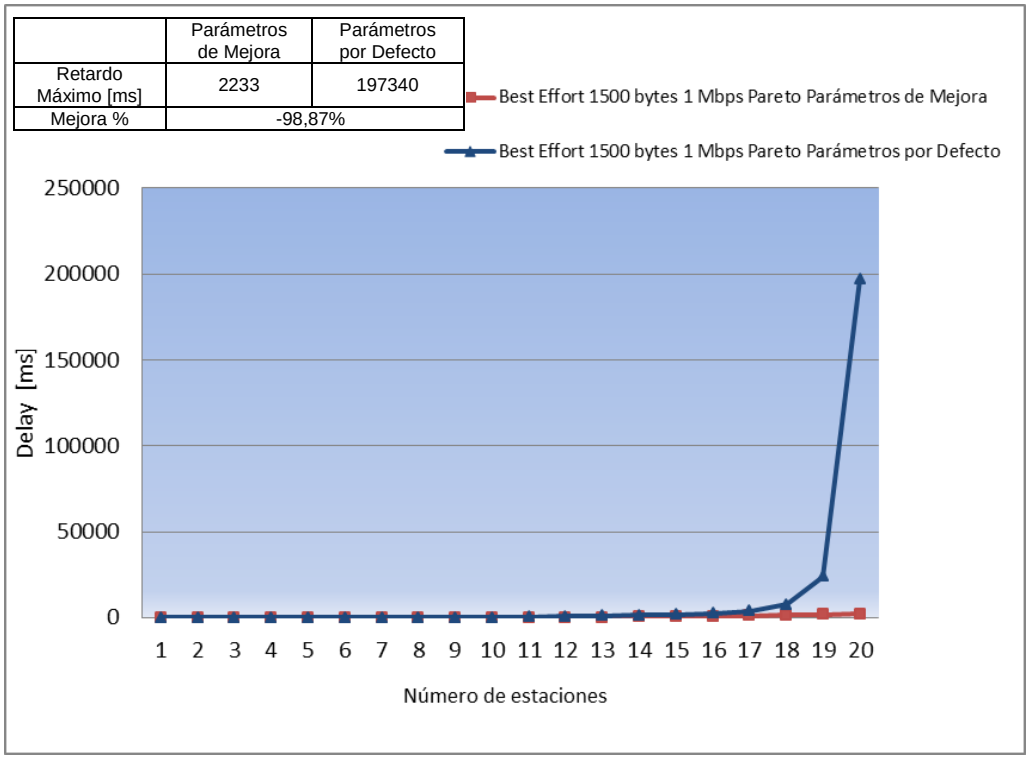


Figura C.9 Comparación de delays del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.1

C.1.2 Estaciones sin tráfico de voz

Los valores promedios obtenidos para el tamaño de cola y retardo de paquete, variando la carga de 1 a 20 estaciones, se muestran en las Figuras C.10, C.11, C.12 y C.13. La Tabla C.3 presenta los valores de los parámetros de configuración para este escenario, y la Tabla C.4 resume las características más importantes.

	Video	Best Effort
AIFSN	2	3
CWmin	7	31
CWmax	31	1023
TXOP	1,504 ms	15,040 ms
Paquete	1280 bytes	1500 bytes
Rate	640 Kbps	1024 Kbps

Tabla C.3 Parámetros EDCA de mejora utilizados Escenario 1.2

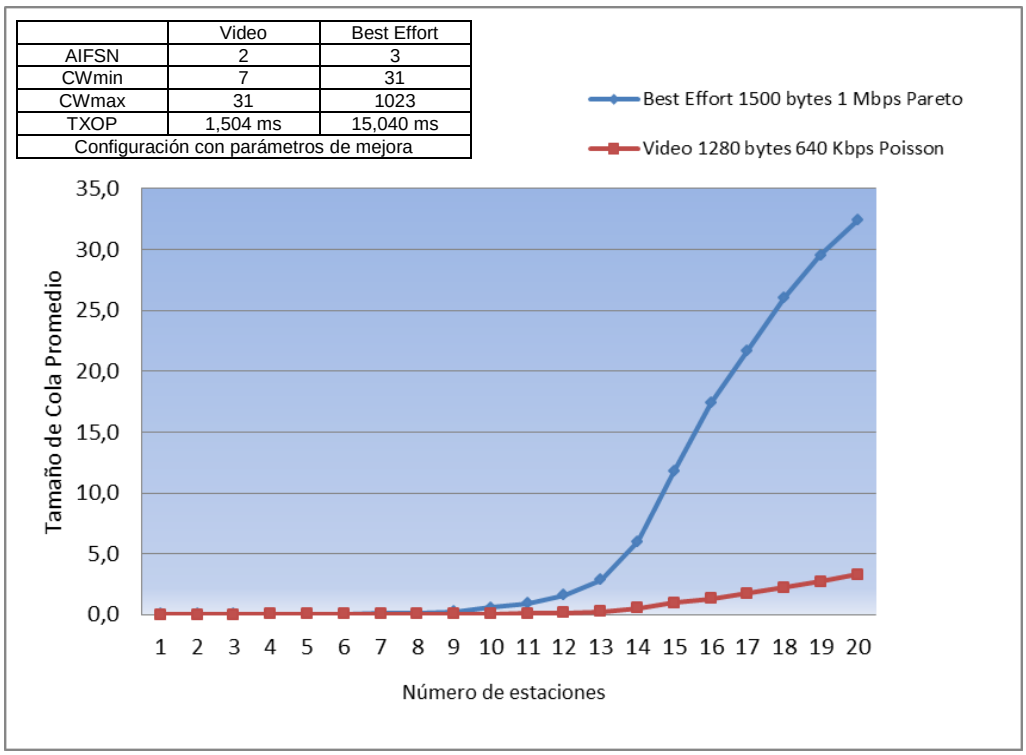


Figura C.10 Tamaño de Cola de los tráficos de video y mejor esfuerzo Escenario 1.2

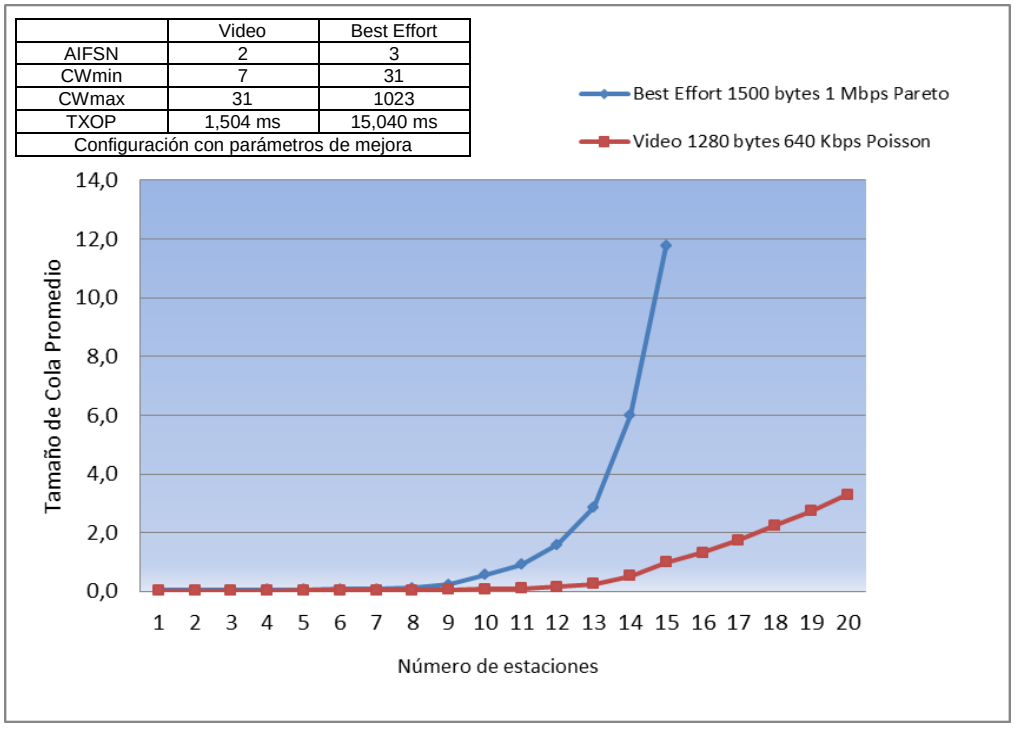


Figura C.11 Tamaño de Cola de los tráficos de video y mejor esfuerzo Escenario 1.2

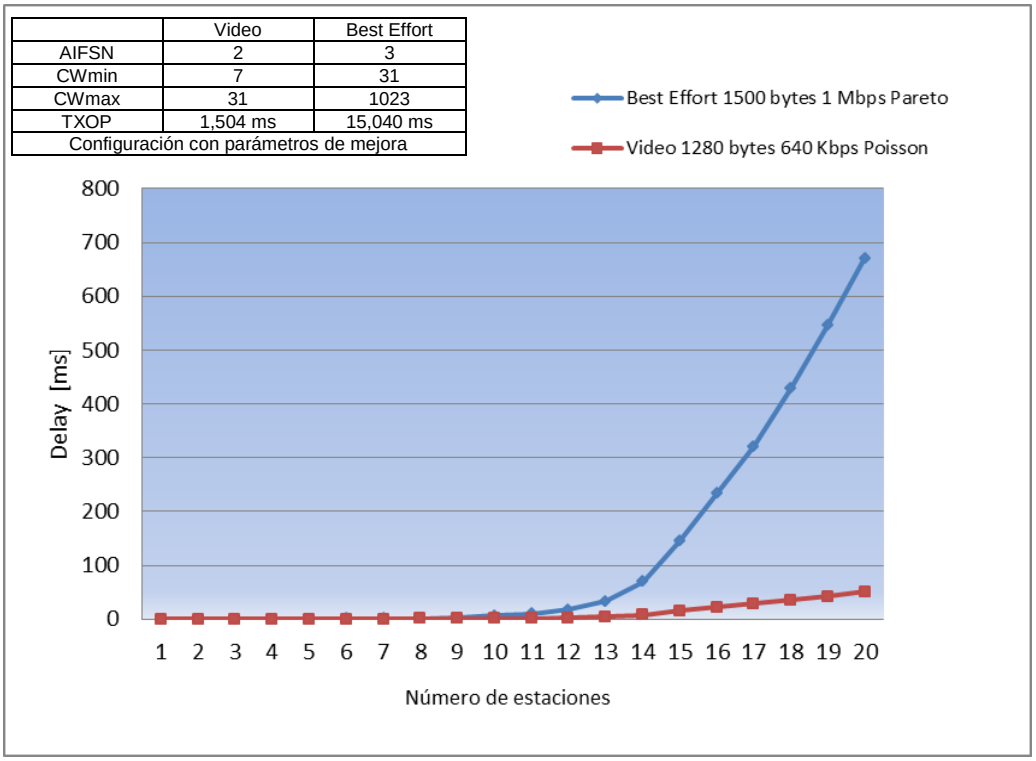


Figura C.12 Delays de los tráficos de video y mejor esfuerzo Escenario 1.2

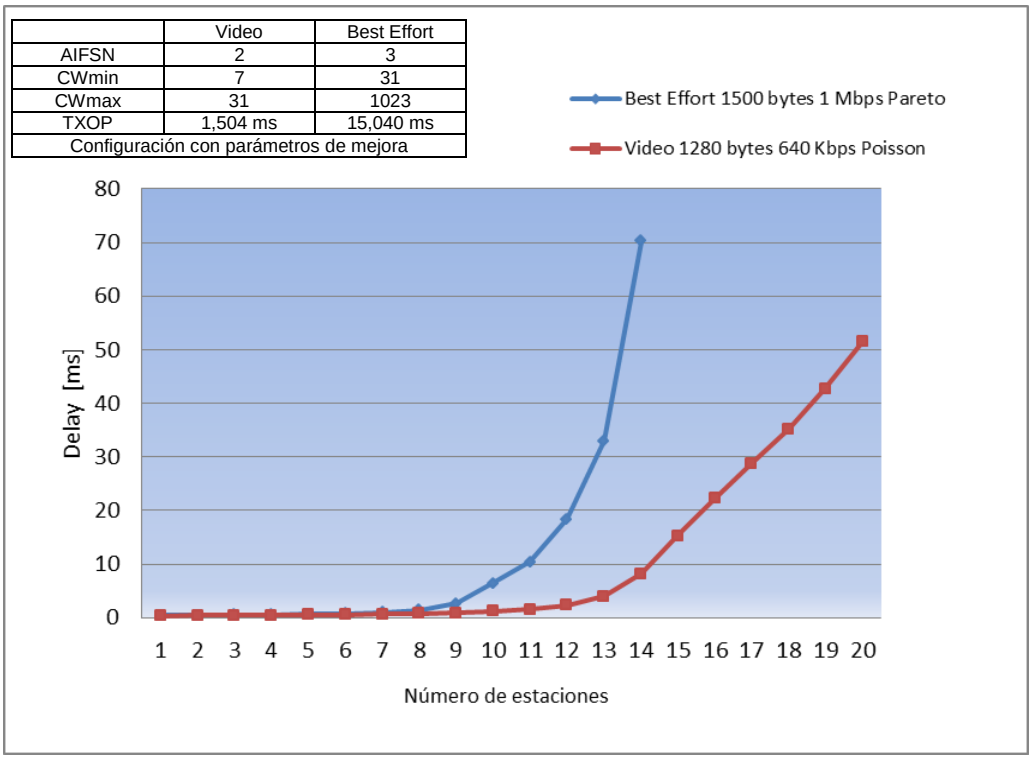


Figura C.13 Delays de los tráficos de video y mejor esfuerzo Escenario 1.2

	Video	Best Effort
Rendimiento Máximo [Mbps]	13,098	14,594
Pérdida 1% Rendimiento	-	14° estación
Pérdida 5 % Rendimiento	-	15° estación
Pérdida 10 % Rendimiento	-	16° estación
Retardo de Cola en Rendimiento Máximo [ms]	51,459	144,889
Retardo de Cola para 10 estaciones [ms]	1,199	6,459
Retardo de Cola Máximo 20 estaciones [ms]	51,459	670,957
Tamaño de Cola para 10 estaciones [paquetes]	0,076	0,563
Tamaño de Cola para 20 estaciones [paquetes]	3,290	32,394

Tabla C.4 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 1.2

En las Figuras C.14, C.15, C.16 y C.17 se observan las comparaciones de los tamaños de cola y retardos de los flujos de video y de mejor esfuerzo, configurados con los parámetros de mejora y con los parámetros por defecto.

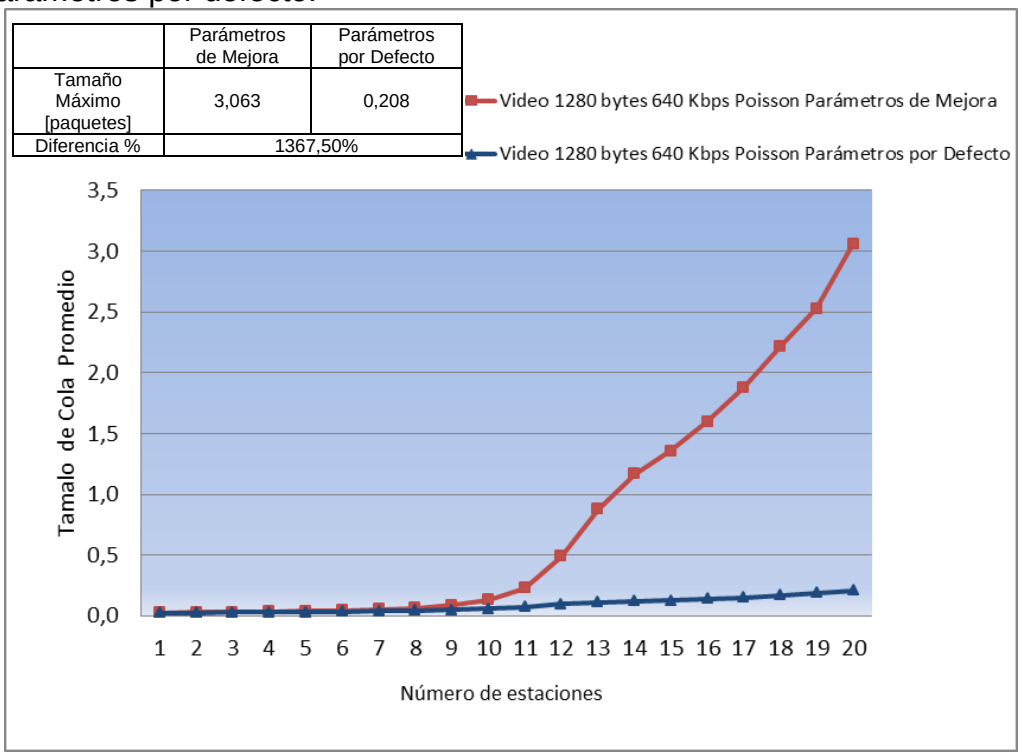


Figura C.14 Comparación del tamaño de cola del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.2

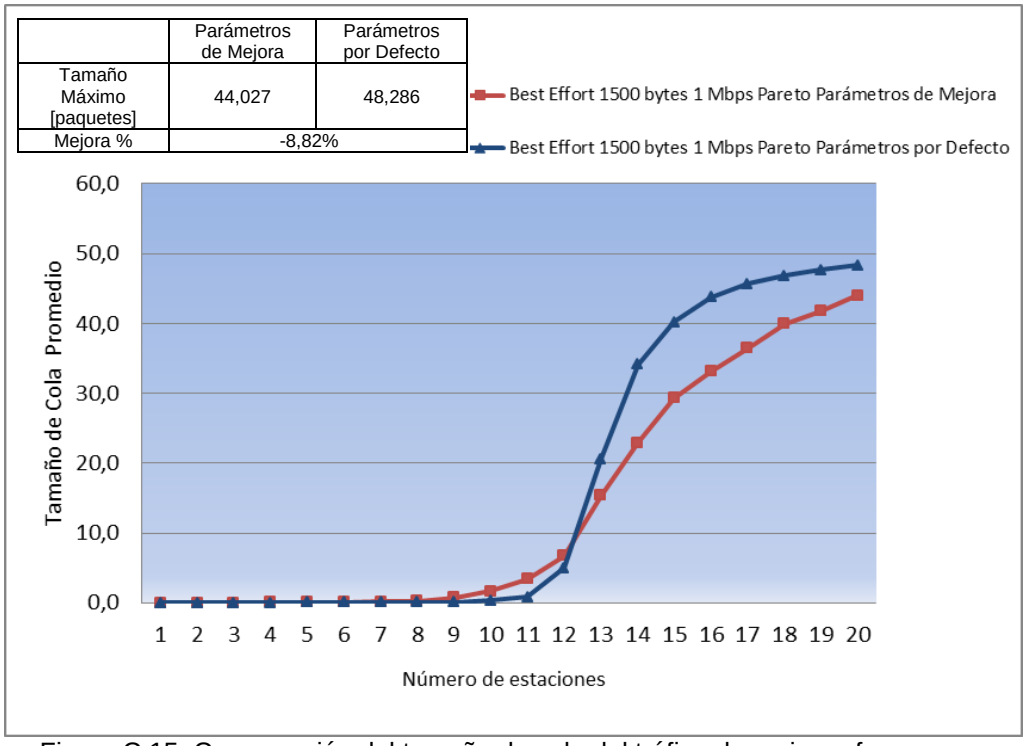


Figura C.15 Comparación del tamaño de cola del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.2

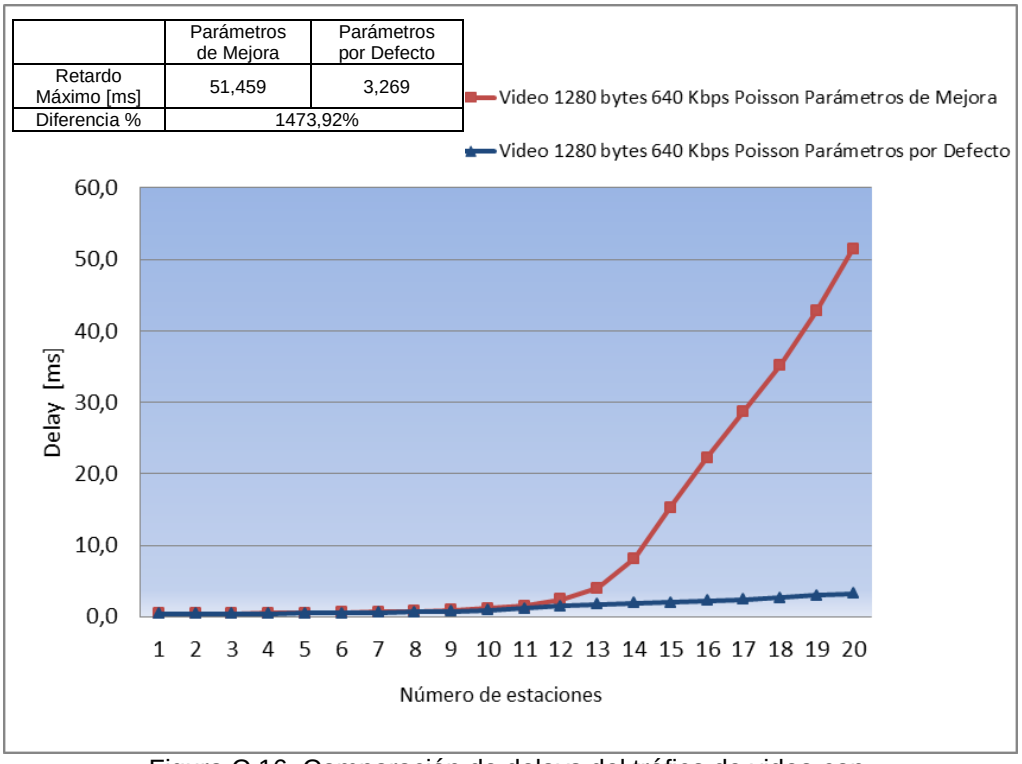


Figura C.16 Comparación de delays del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.2

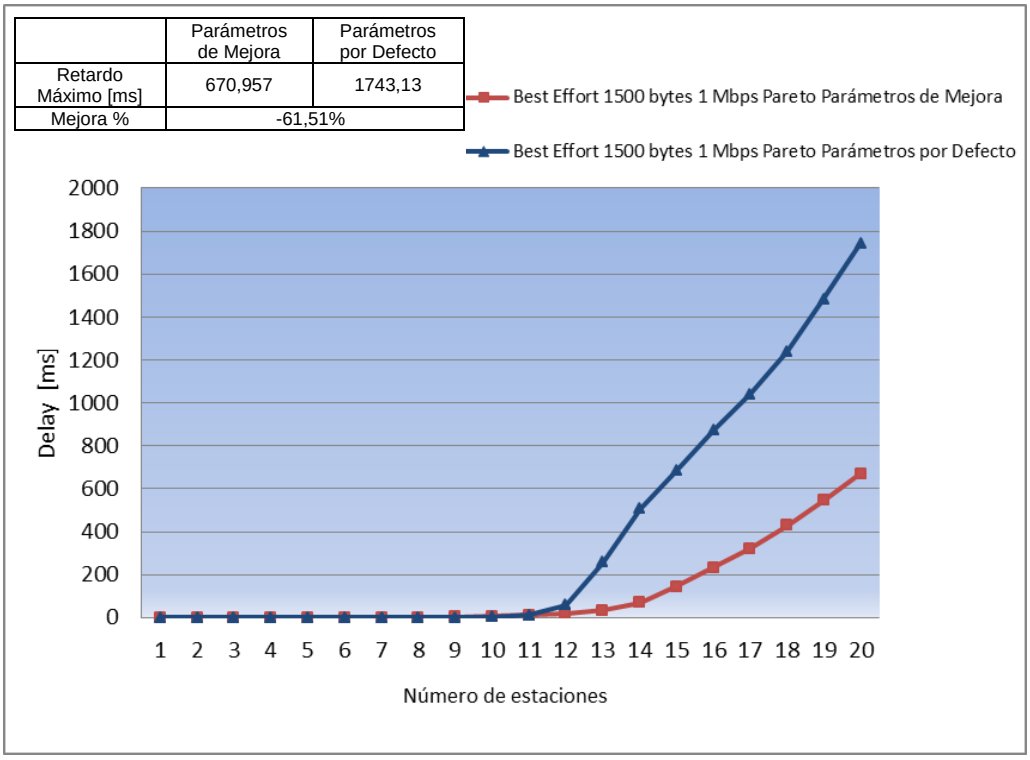


Figura C.17 Comparación de delays del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.2

C.1.3 Estaciones sin tráfico de video

Los valores promedios obtenidos para el tamaño de cola y retardo de paquete, variando la carga de 1 a 20 estaciones, se muestran en las Figuras C.18, C.19, C.20 y C.21. La Tabla C.5 presenta los valores de los parámetros de configuración para este escenario, y la Tabla C.6 resume las características más importantes.

	Voz	Best Effort
AIFSN	2	3
CWmin	7	63
CWmax	31	1023
TXOP	1,504 ms	15,040 ms
Paquete	160 bytes	1500 bytes
Rate	64 Kbps	1024 Kbps

Tabla C.5 Parámetros EDCA de mejora utilizados Escenario 1.3

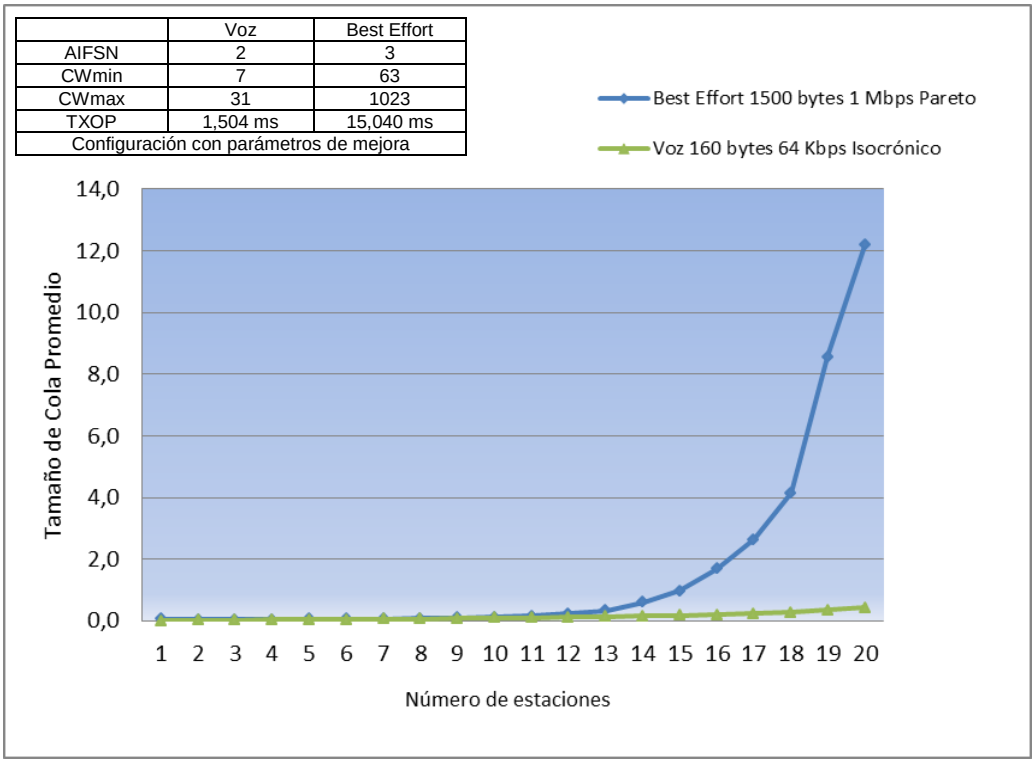


Figura C.18 Tamaño de Cola de los tráficos de voz y mejor esfuerzo Escenario 1.3

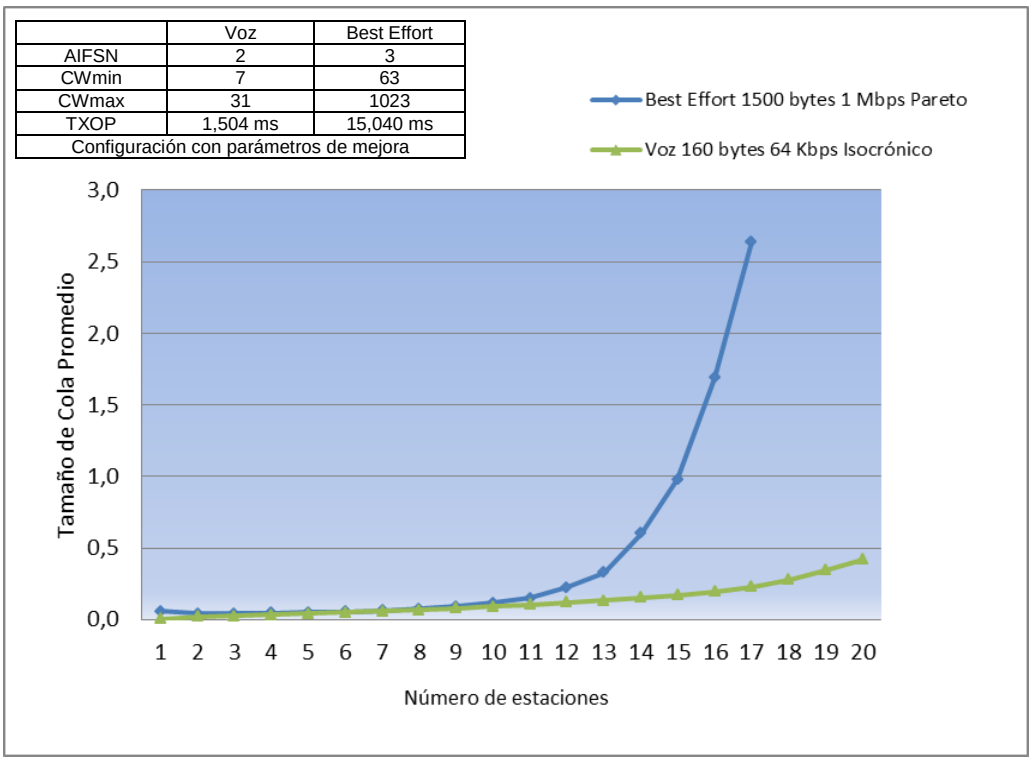
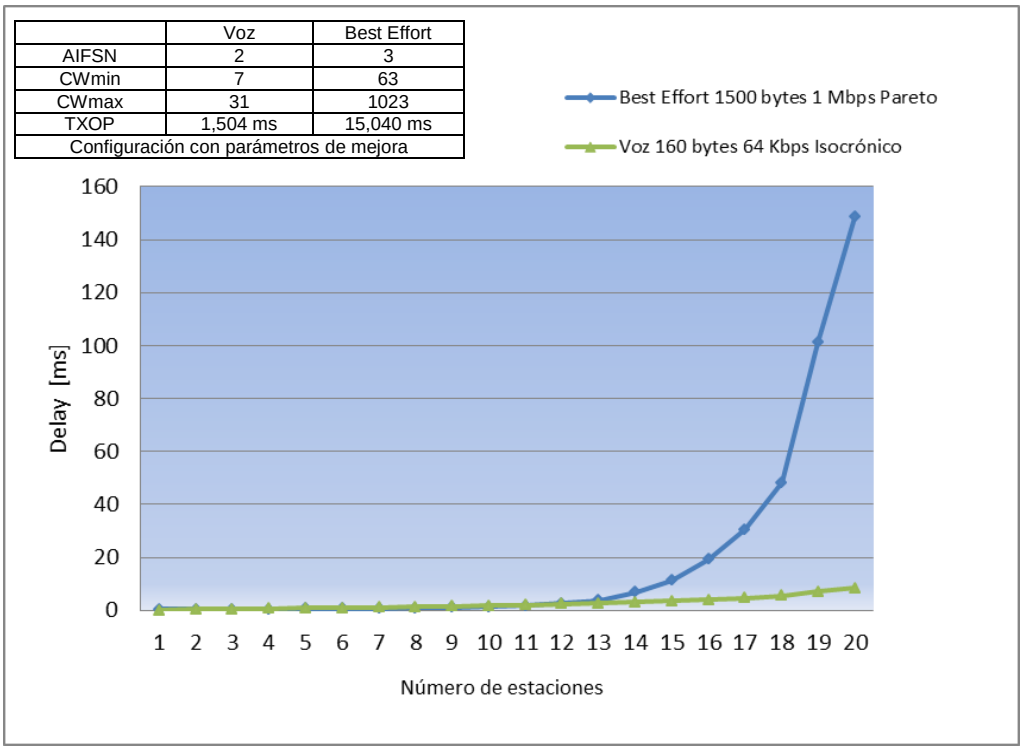
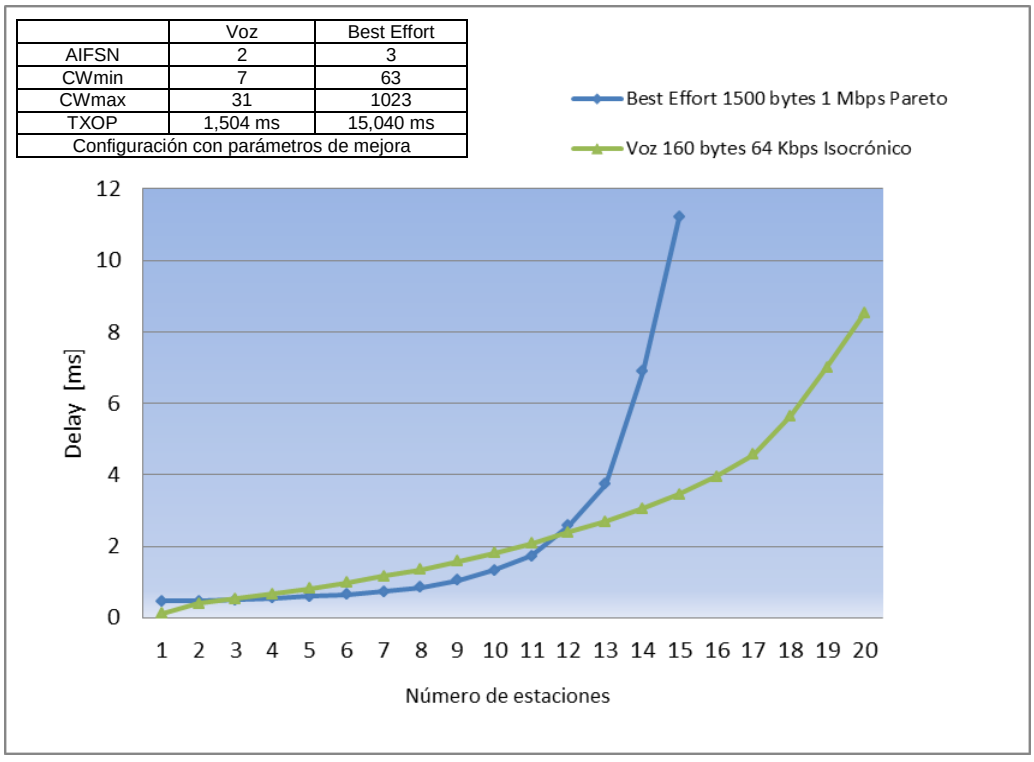


Figura C.19 Tamaño de Cola de los tráficos de voz y mejor esfuerzo Escenario 1.3



	Voz	Best Effort
AIFSN	2	3
CWmin	7	63
CWmax	31	1023
TXOP	1,504 ms	15,040 ms
Configuración con parámetros de mejora		

Figura C.20 Delays de los tráficos de voz y mejor esfuerzo Escenario 1.3



	Voz	Best Effort
AIFSN	2	3
CWmin	7	63
CWmax	31	1023
TXOP	1,504 ms	15,040 ms
Configuración con parámetros de mejora		

Figura C.21 Delays de los tráficos de voz y mejor esfuerzo Escenario 1.3

	Voz	Best Effort
Rendimiento Máximo [Mbps]	1,261	19,680
Pérdida 1% Rendimiento	20° estación	16° estación
Pérdida 5 % Rendimiento	-	20° estación
Pérdida 10 % Rendimiento	-	-
Retardo de Cola en Rendimiento Máximo [ms]	8,520	148,498
Retardo de Cola para 10 estaciones [ms]	1,812	1,328
Retardo de Cola Máximo 20 estaciones [ms]	8,520	148,498
Tamaño de Cola para 10 estaciones [paquetes]	0,090	0,116
Tamaño de Cola para 20 estaciones [paquetes]	0,420	12,180

Tabla C.6 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 1.3

En las Figuras C.22, C.23, C.24 y C.25 se observan las comparaciones de los tamaños de cola y retardos de los flujos de video y de mejor esfuerzo, configurados con los parámetros de mejora y con los parámetros por defecto.

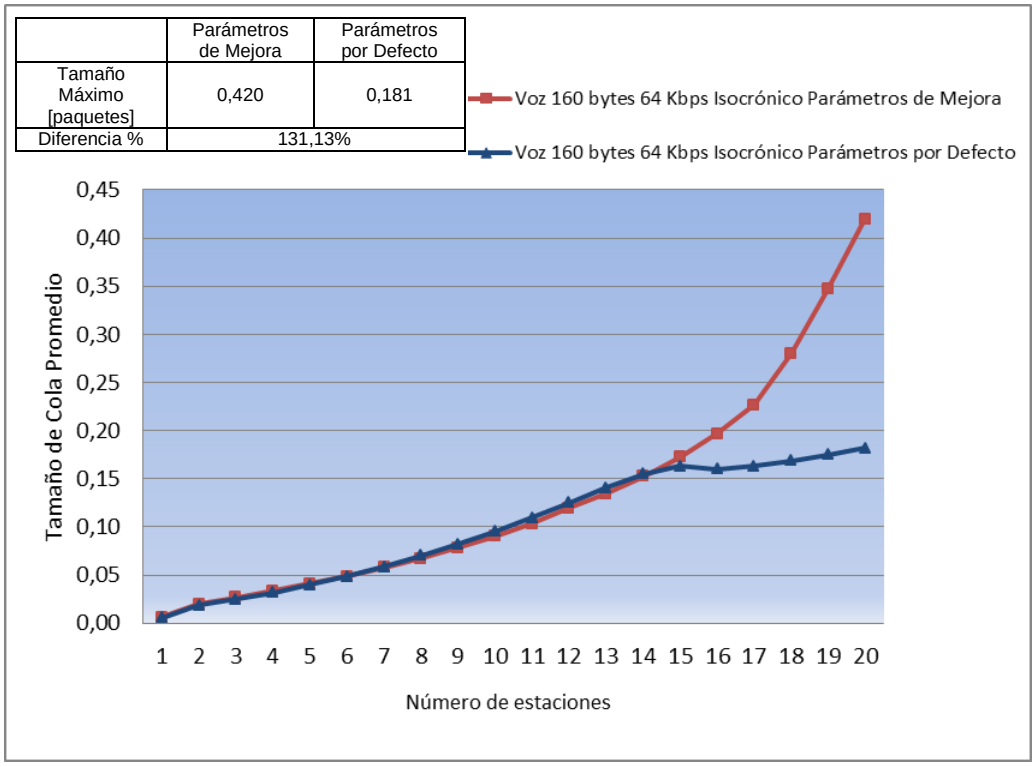


Figura C.22 Comparación del tamaño de cola del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.3

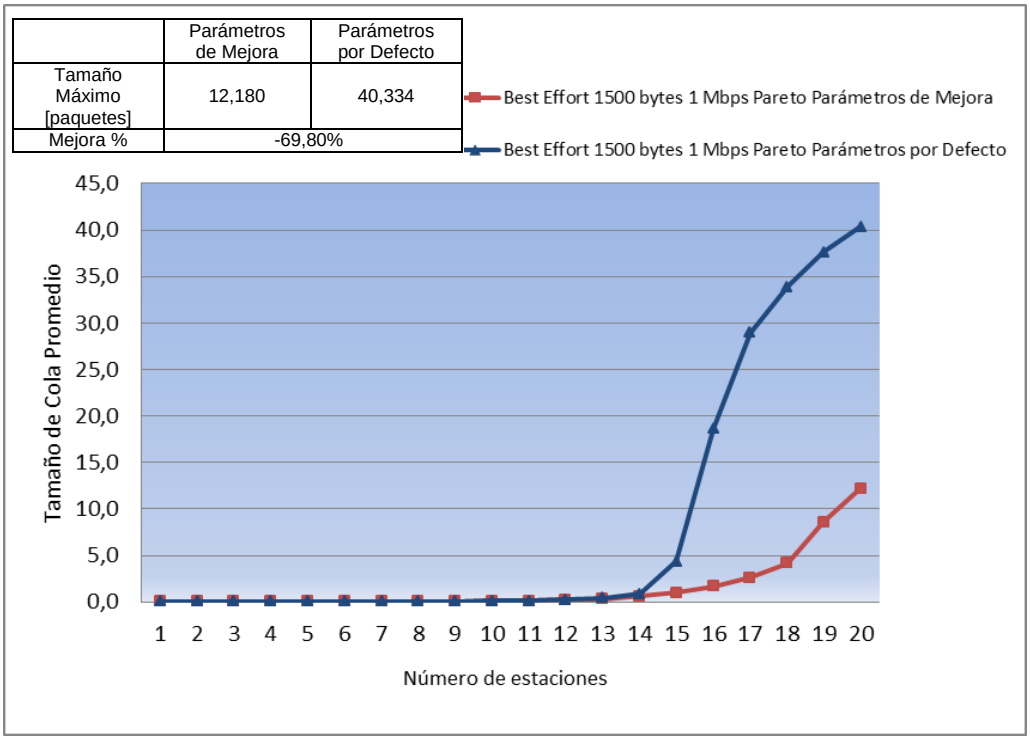


Figura C.23 Comparación del tamaño de cola del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.3

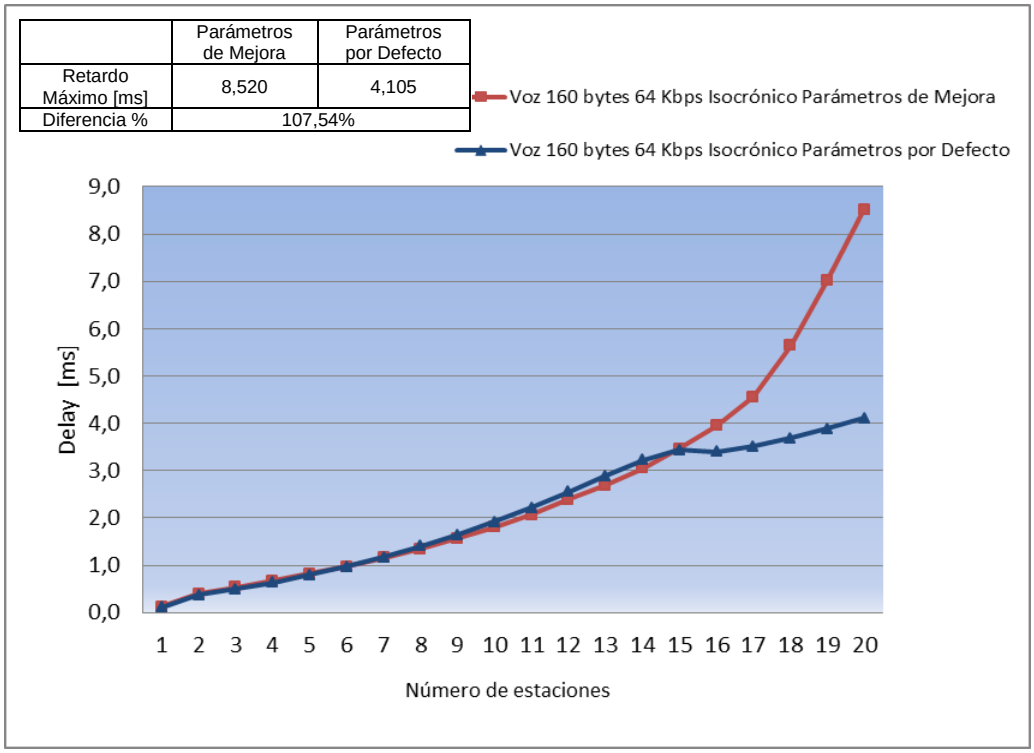


Figura C.24 Comparación de delays del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.3

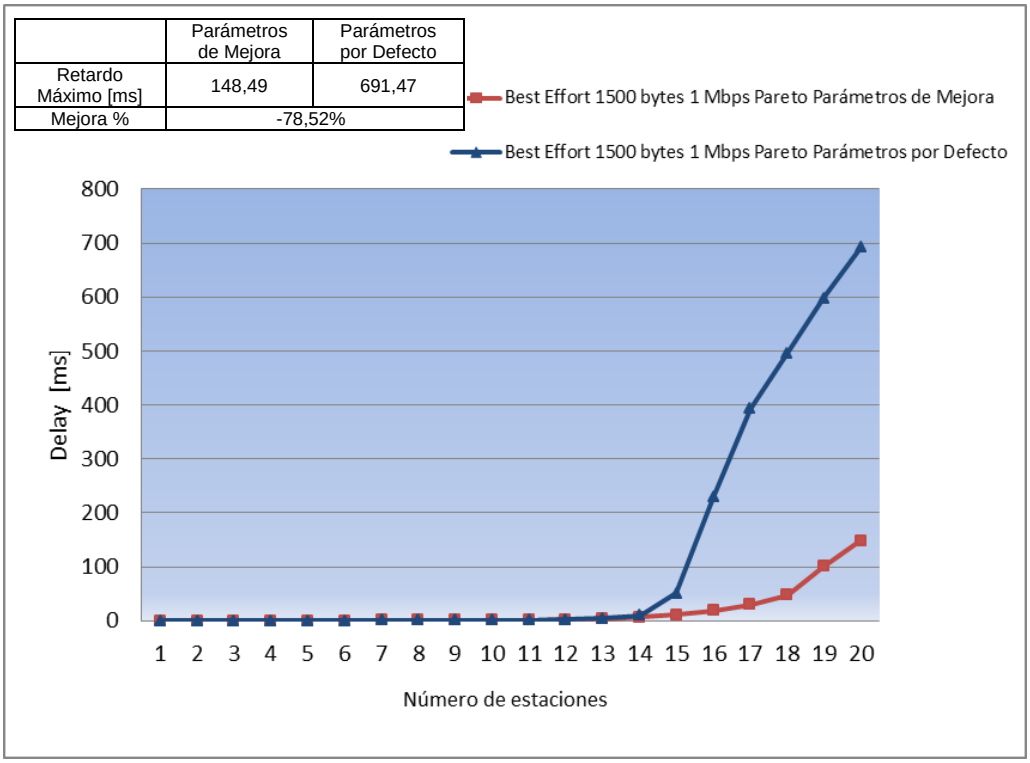


Figura C.25 Comparación de delays del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.3

C.1.4 Estaciones sin tráfico de mejor esfuerzo

Los valores promedios obtenidos para el tamaño de cola y retardo de paquete, variando la carga de 1 a 20 estaciones, se muestran en las Figuras C.26 y C.27. La Tabla C.7 presenta los valores de los parámetros de configuración para este escenario, y la Tabla C.8 resume las características más importantes.

	Voz	Video
AIFSN	2	3
CWmin	7	31
CWmax	31	63
TXOP	1,504 ms	15,040 ms
Paquete	160 bytes	1280 bytes
Rate	64 Kbps	640 Kbps

Tabla C.7 Parámetros EDCA de mejora utilizados Escenario 1.4

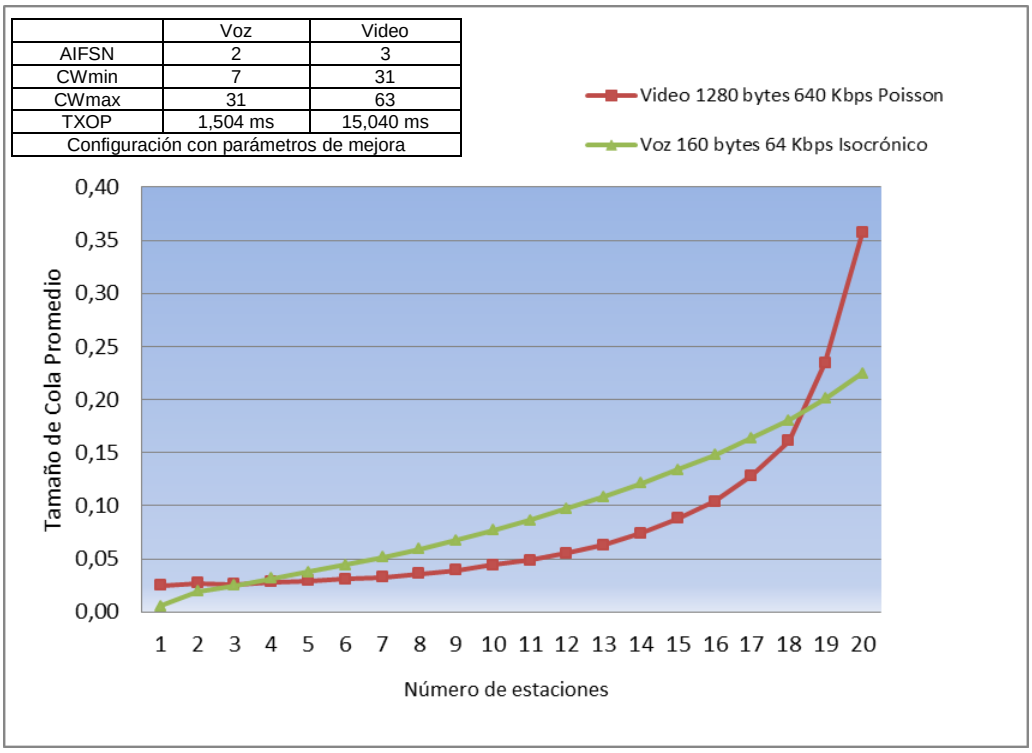


Figura C.26 Tamaño de Cola de los tráficos de voz y video Escenario 1.4

	Voz	Video
AIFSN	2	3
CWmin	7	31
CWmax	31	63
TXOP	1,504 ms	15,040 ms
Configuración con parámetros de mejora		

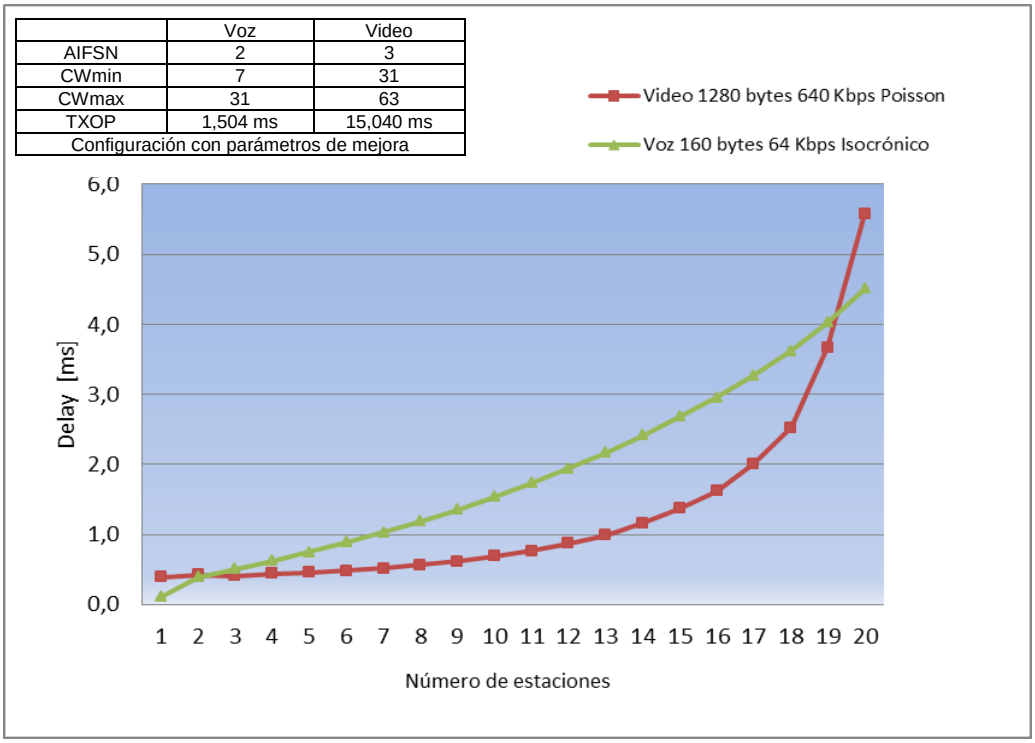


Figura C.27 Delays de los tráficos de voz y video Escenario 1.4

	Voz	Video
Rendimiento Máximo [Mbps]	1,277	13,098
Pérdida 1% Rendimiento	-	-
Pérdida 5 % Rendimiento	-	-
Pérdida 10 % Rendimiento	-	-
Retardo de Cola en Rendimiento Máximo [ms]	4,509	5,579
Retardo de Cola para 10 estaciones [ms]	1,536	0,690
Retardo de Cola Máximo 20 estaciones [ms]	4,509	5,579
Tamaño de Cola para 10 estaciones [paquetes]	0,076	0,044
Tamaño de Cola Máximo 20 estaciones [paquetes]	0,225	0,356

Tabla C.8 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 1.4

En las Figuras C.28, C.29, C.30 y C.31 se observan las comparaciones de los tamaños de cola y retardos de los flujos de video y

de mejor esfuerzo, configurados con los parámetros de mejora y con los parámetros por defecto.

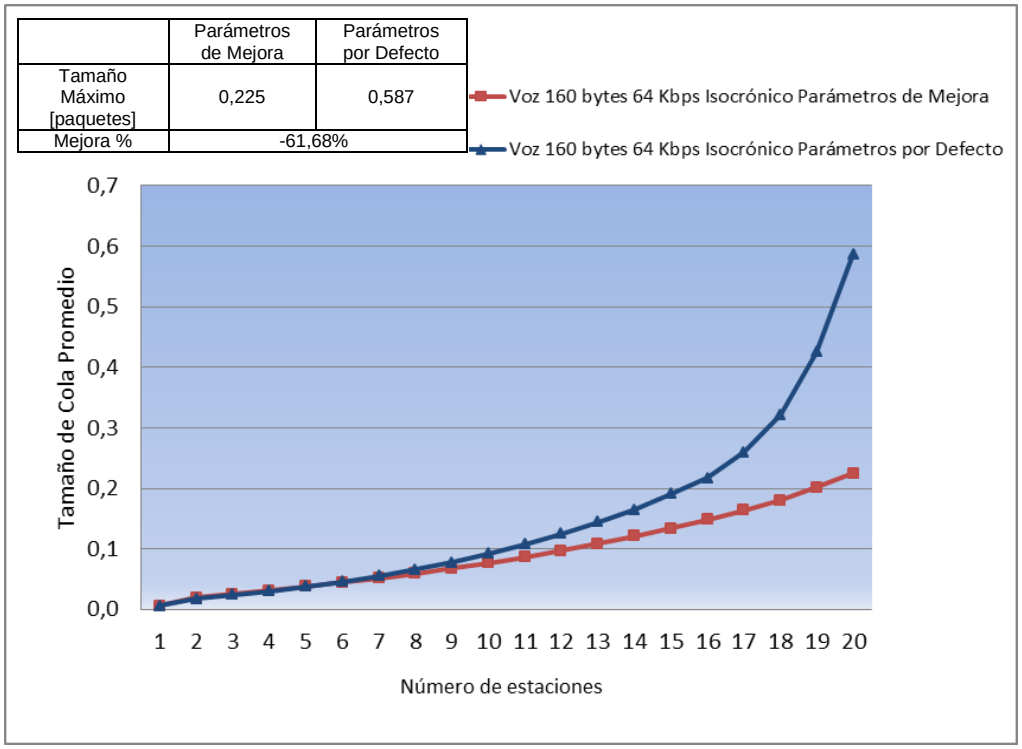


Figura C.28 Comparación del tamaño de cola del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.4

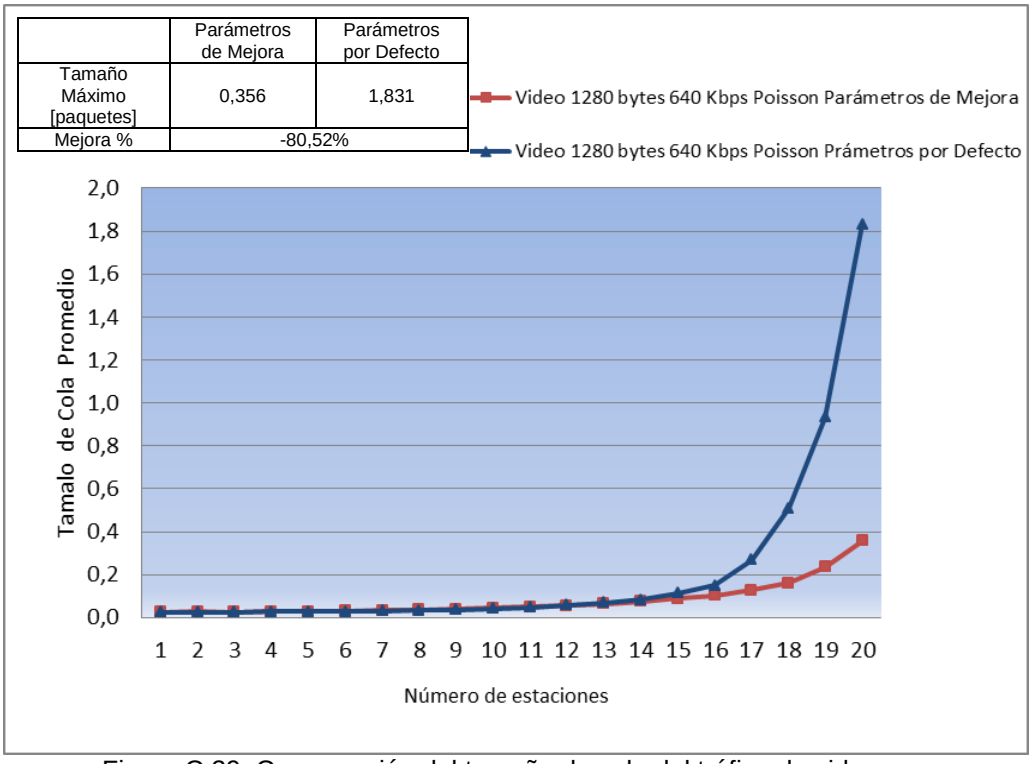


Figura C.29 Comparación del tamaño de cola del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.4

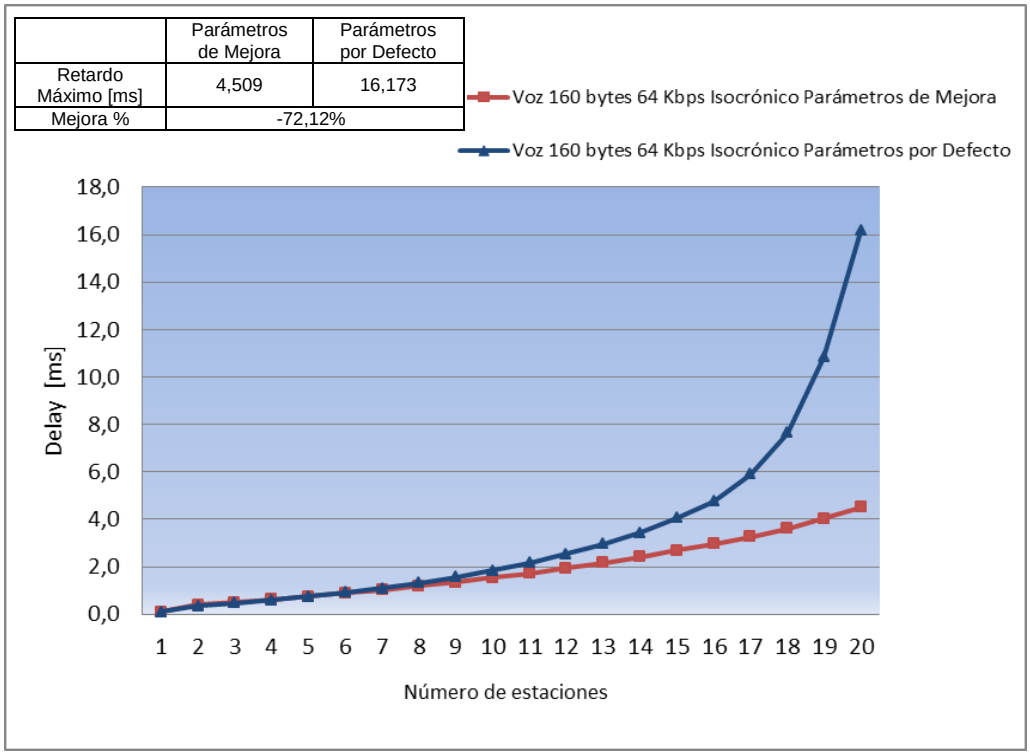


Figura C.30 Comparación de delays del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.4

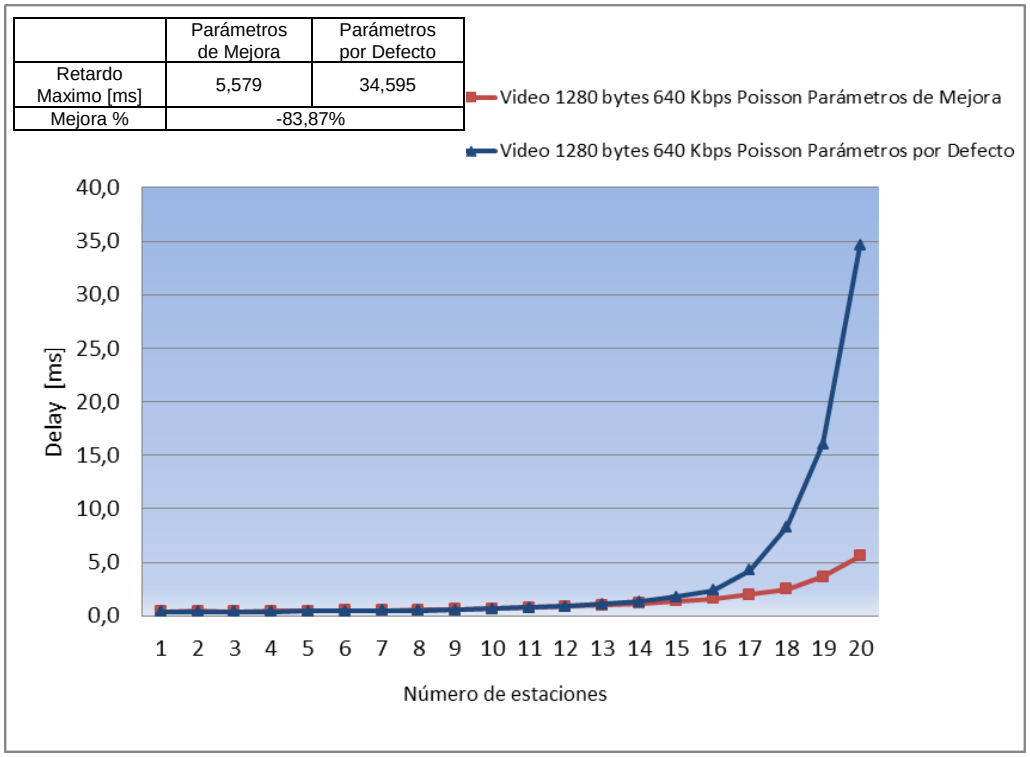


Figura C.31 Comparación de delays del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 1.4

C.2) Escenario 2

Para este escenario se configuró el modelo de estación EDCA HSAN con los mismos parámetros resumidos en las Tablas C.1.

C.2.1 60 % de estaciones de voz, 20 % de video y 20 % de mejor esfuerzo

Los valores promedios obtenidos para el tamaño de cola y retardo de paquete, variando la carga de 5 a 45 estaciones, se muestran en las Figuras C.32, C.33 y C.34. La Tabla C.9 resume las características más importantes para este caso.

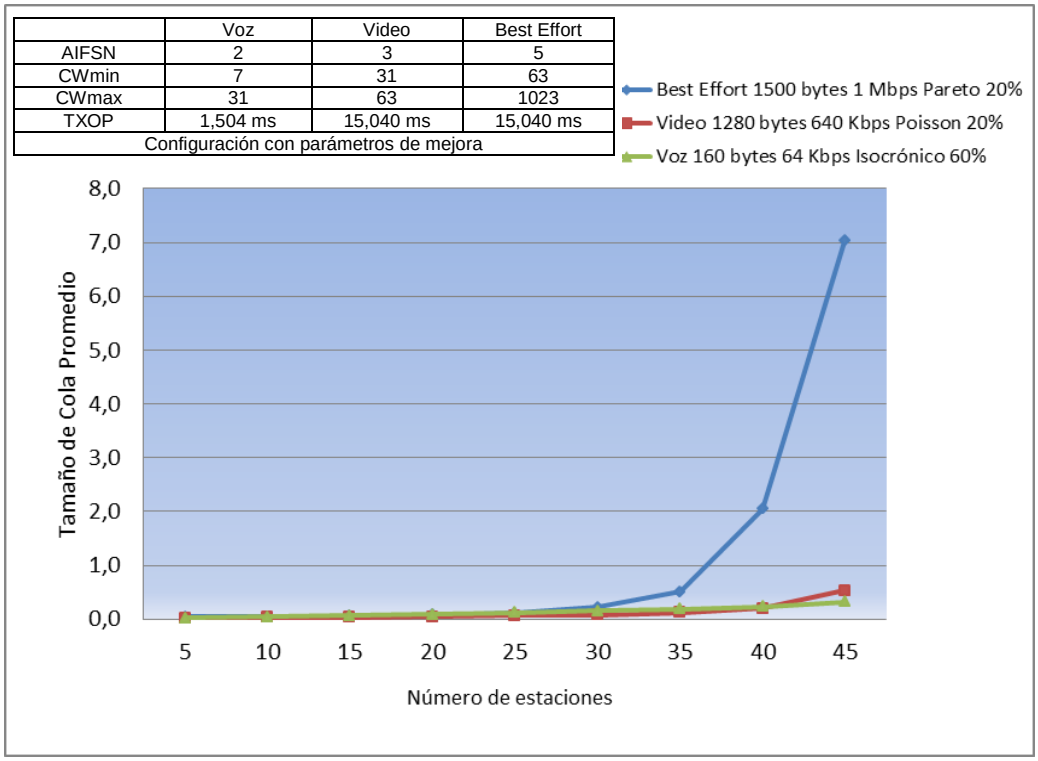


Figura C.32 Tamaño de Cola de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.1

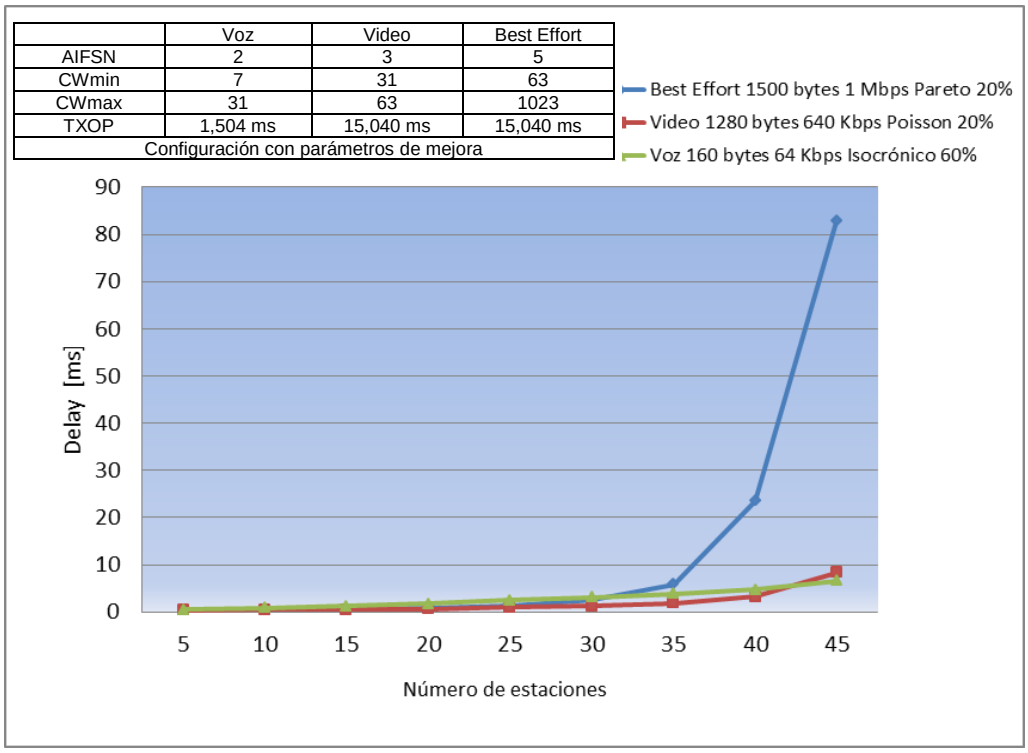


Figura C.33 Delays de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.1

	Voz	Video	Best Effort
AIFSN	2	3	5
CWmin	7	31	63
CWmax	31	63	1023
TXOP	1,504 ms	15,040 ms	15,040 ms
Configuración con parámetros de mejora			

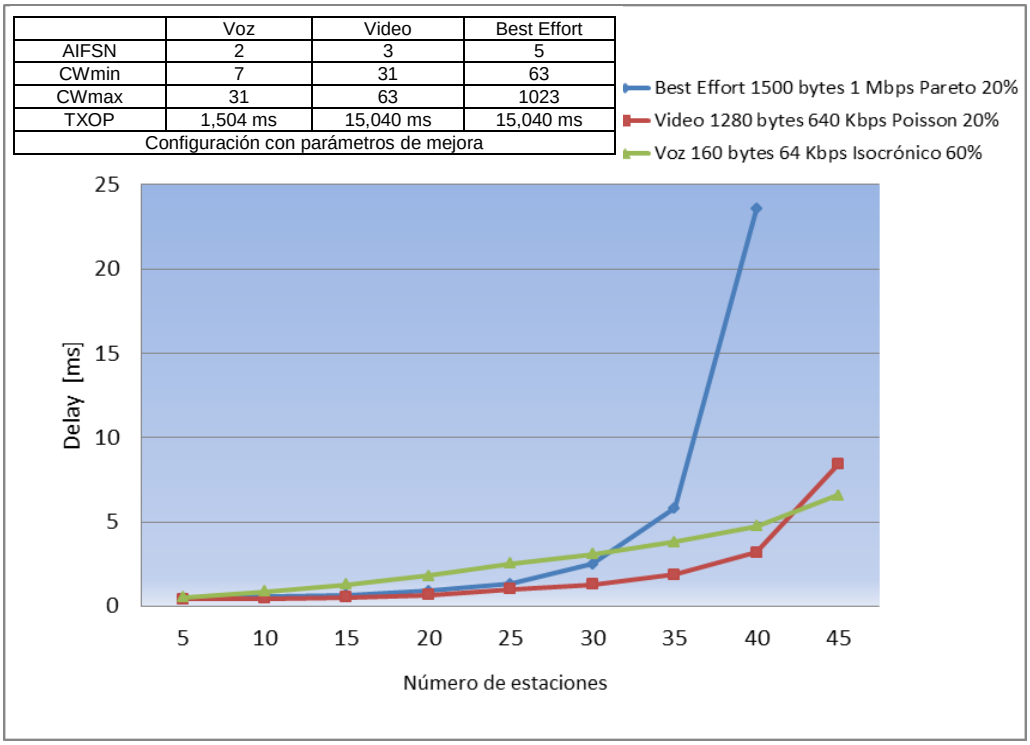


Figura C.34 Delays de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.1

	Voz	Video	Best Effort
Rendimiento Máximo [Mbps]	1,713	5,896	9,151
Pérdida 1% Rendimiento	-	-	7° estación
Pérdida 5 % Rendimiento	-	-	-
Pérdida 10 % Rendimiento	-	-	-
Retardo de Cola en Rendimiento Máximo [ms]	6,568	8,408	82,785
Retardo de Cola para 25 estaciones [ms]	2,538	1,004	1,310
Retardo de Cola Máximo 45 estaciones [ms]	6,568	8,408	82,785
Tamaño de Cola para 25 estaciones [paquetes]	0,126	0,064	0,114
Tamaño de Cola para 45 estaciones [paquetes]	0,325	0,537	7,025

Tabla C.9 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 2.1

En las Figuras C.35 a C.40 se observan las comparaciones de los tamaños de cola y retardos de los flujos de voz, video y de mejor

esfuerzo, configurados con los parámetros de mejora y con los parámetros por defecto.

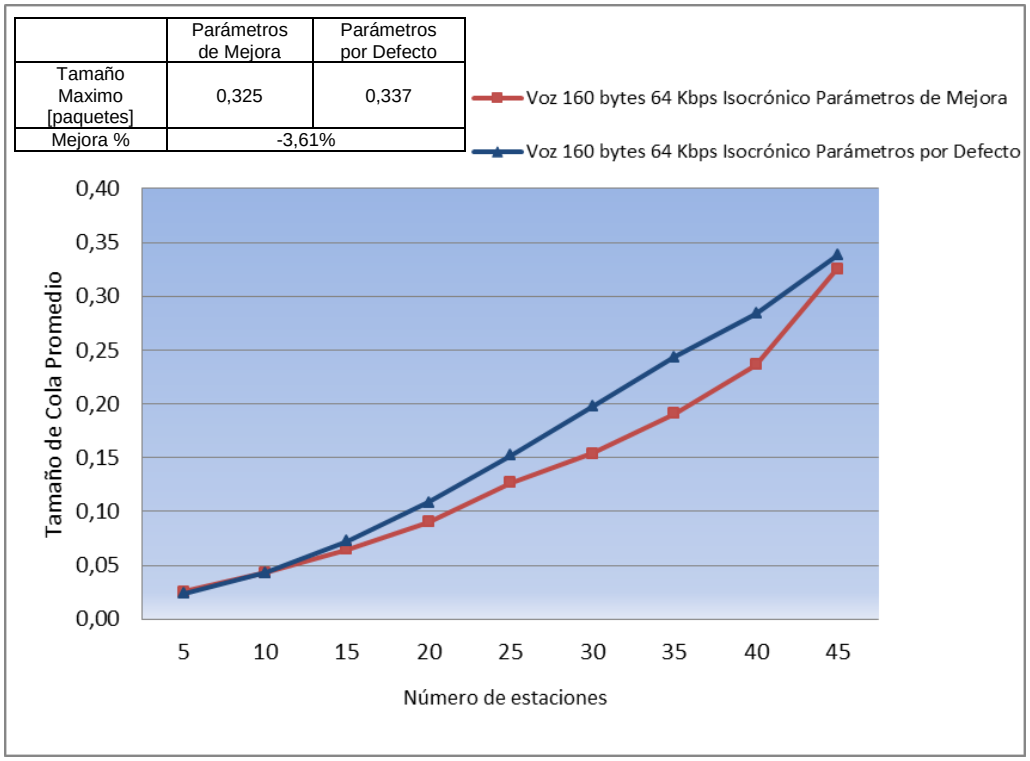


Figura C.35 Comparación del tamaño de cola del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.1

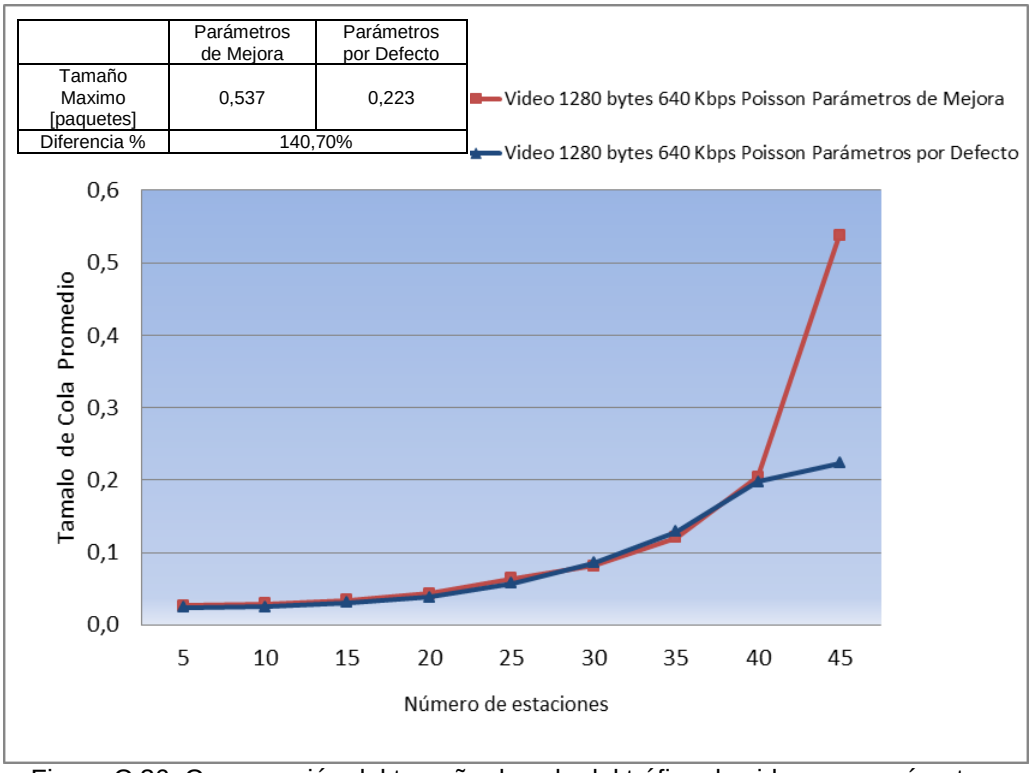


Figura C.36 Comparación del tamaño de cola del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.1

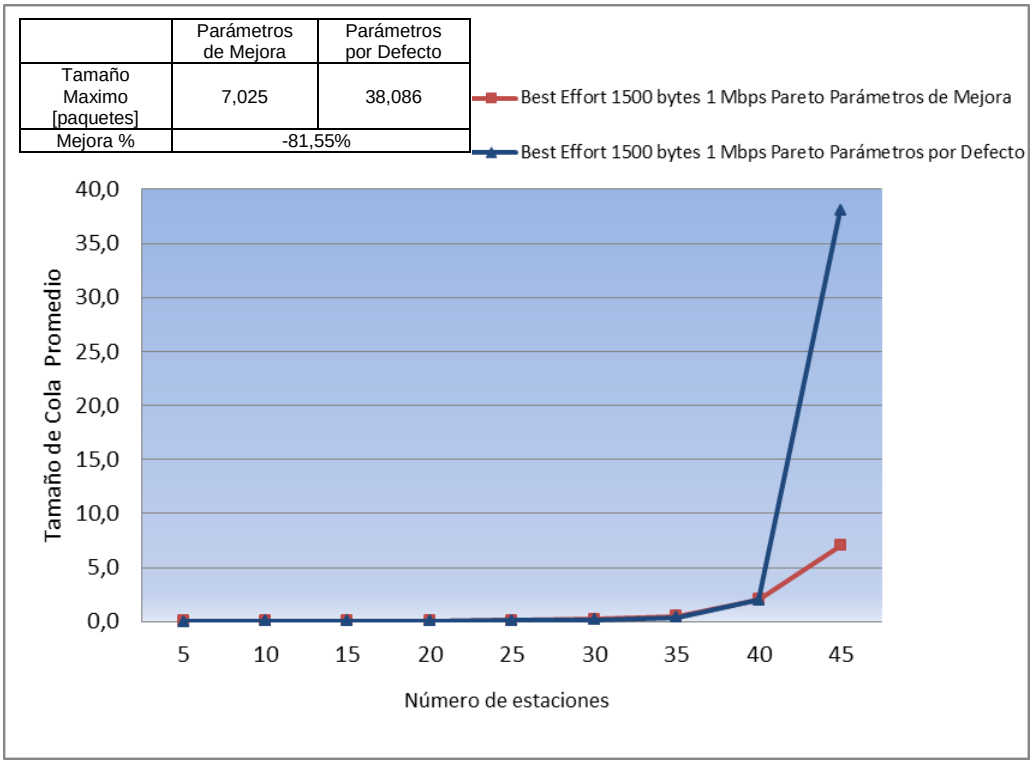


Figura C.37 Comparación del tamaño de cola del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.1

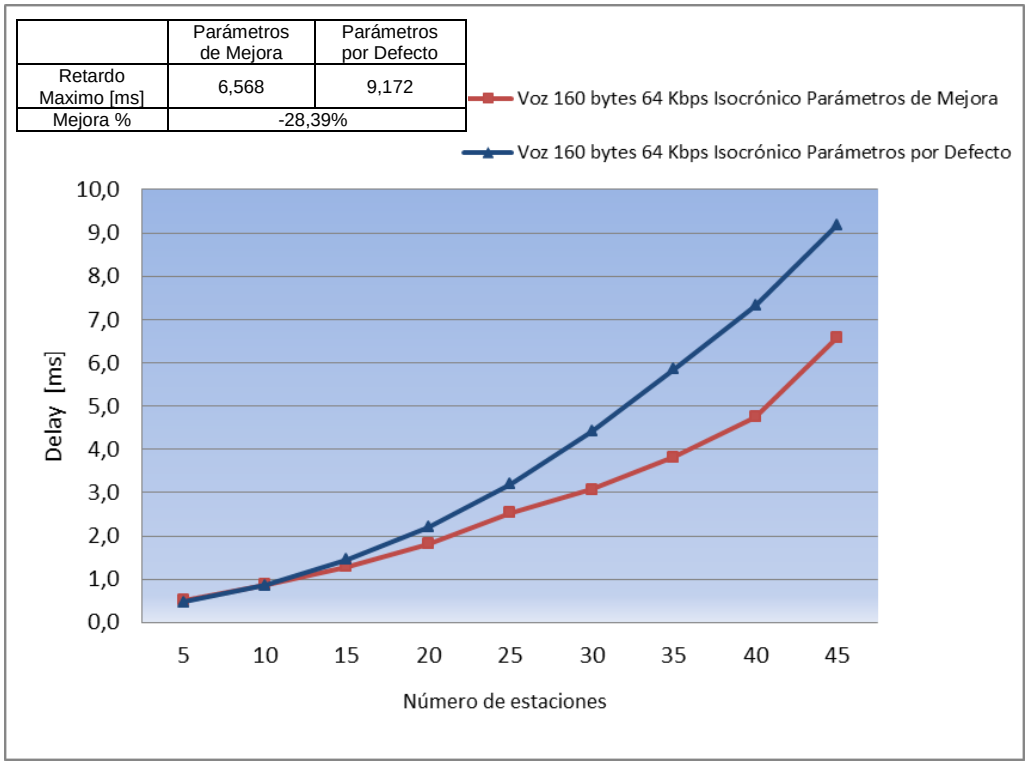


Figura C.38 Comparación de delays del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.1

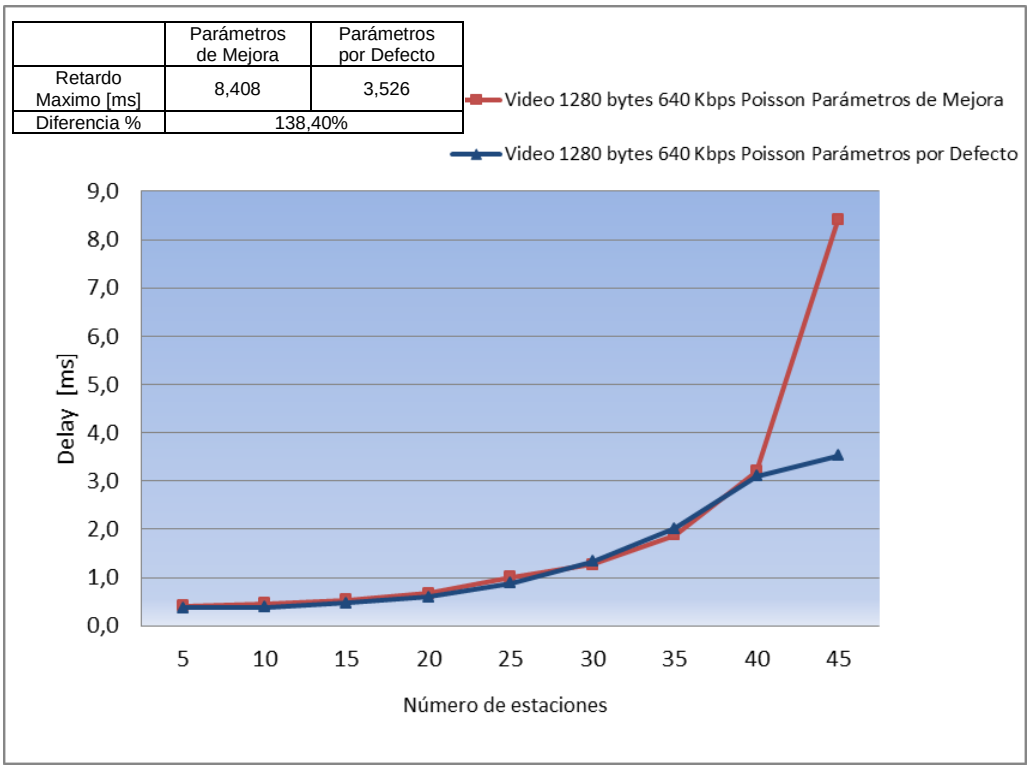


Figura C.39 Comparación de delays del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.1

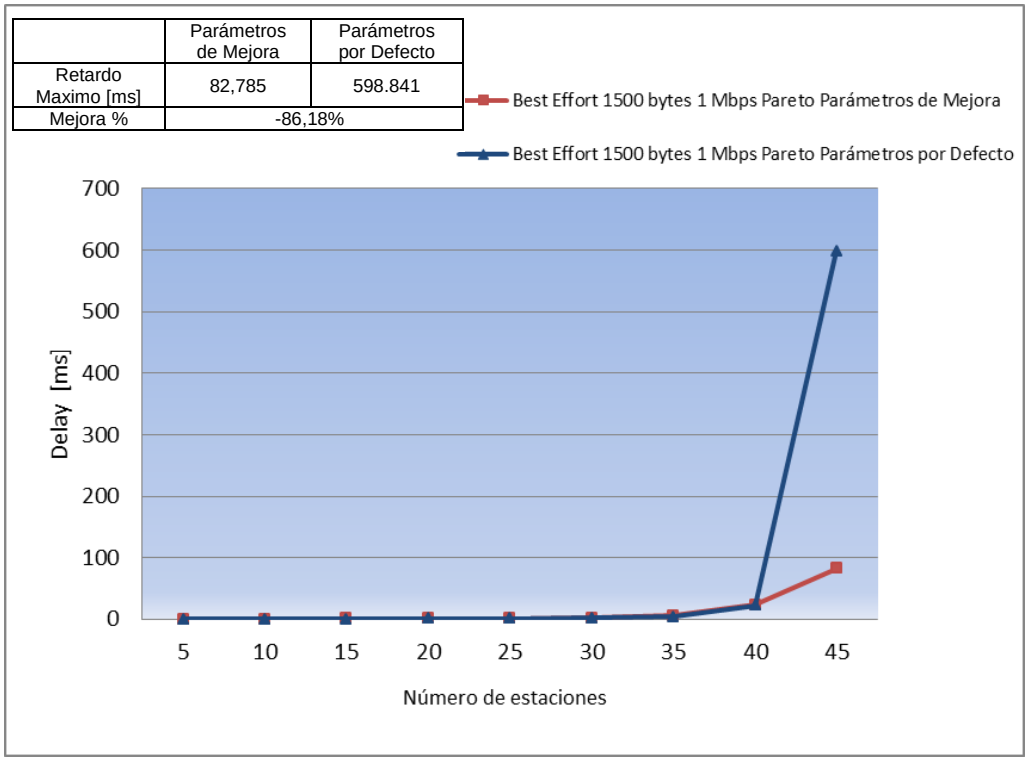


Figura C.40 Comparación de delays del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.1

C.2.2 20 % de estaciones de voz, 60 % de video y 20 % de mejor esfuerzo

Los valores promedios obtenidos para el tamaño de cola y retardo de paquete, variando la carga de 5 a 45 estaciones, se muestran en las Figuras C.41, C.42, C.43 y C.44. La Tabla C.10 resume las características más importantes para este caso.

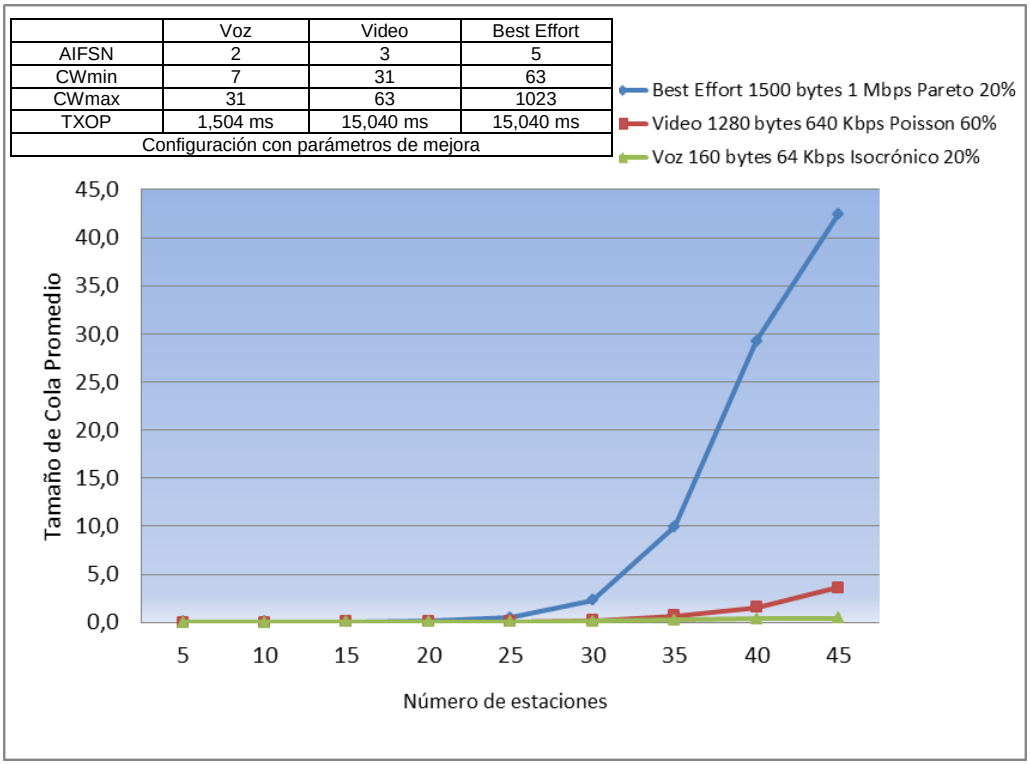


Figura C.41 Tamaño de Cola de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.2

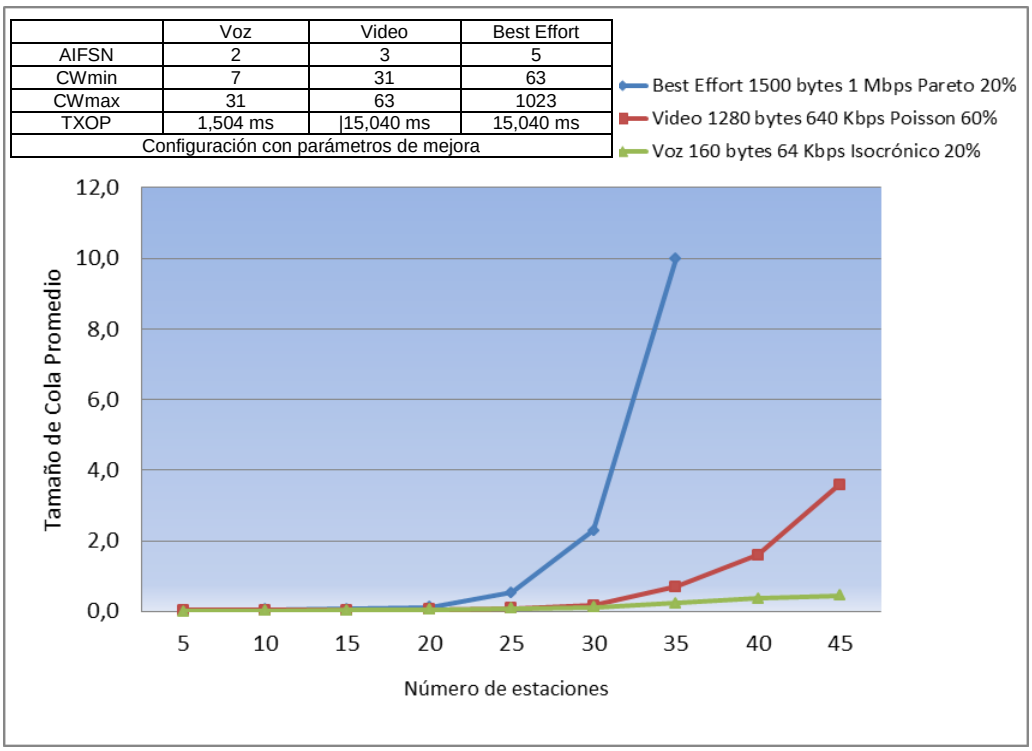


Figura C.42 Tamaño de Cola de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.2

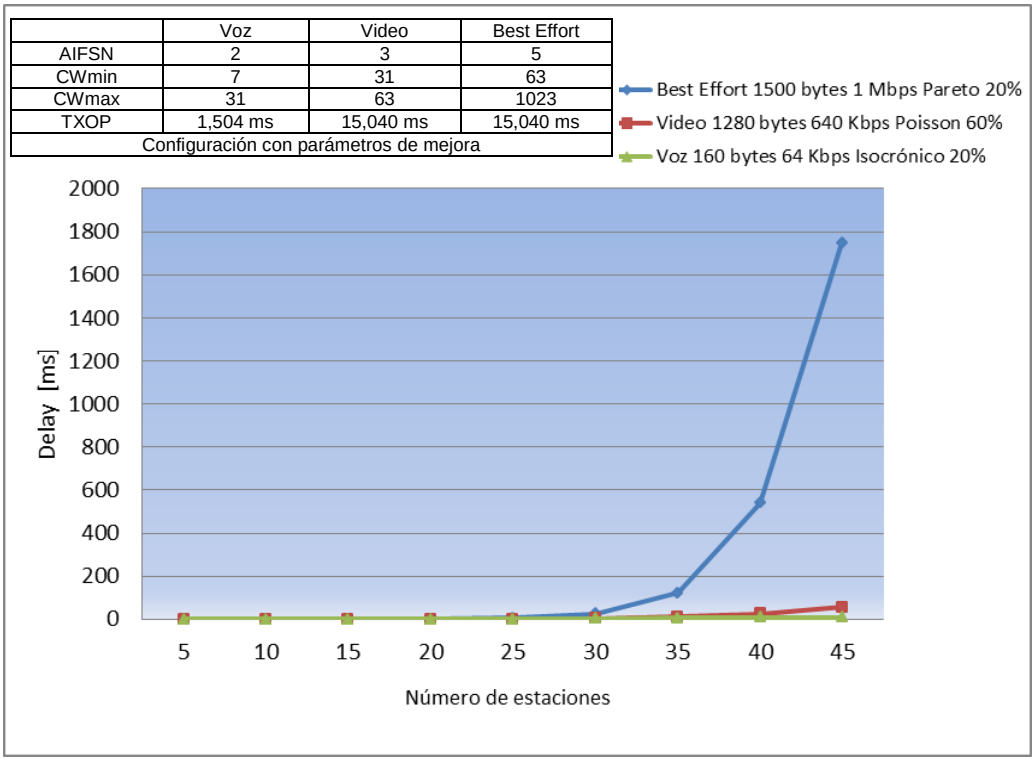


Figura C.43 Delays de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.2

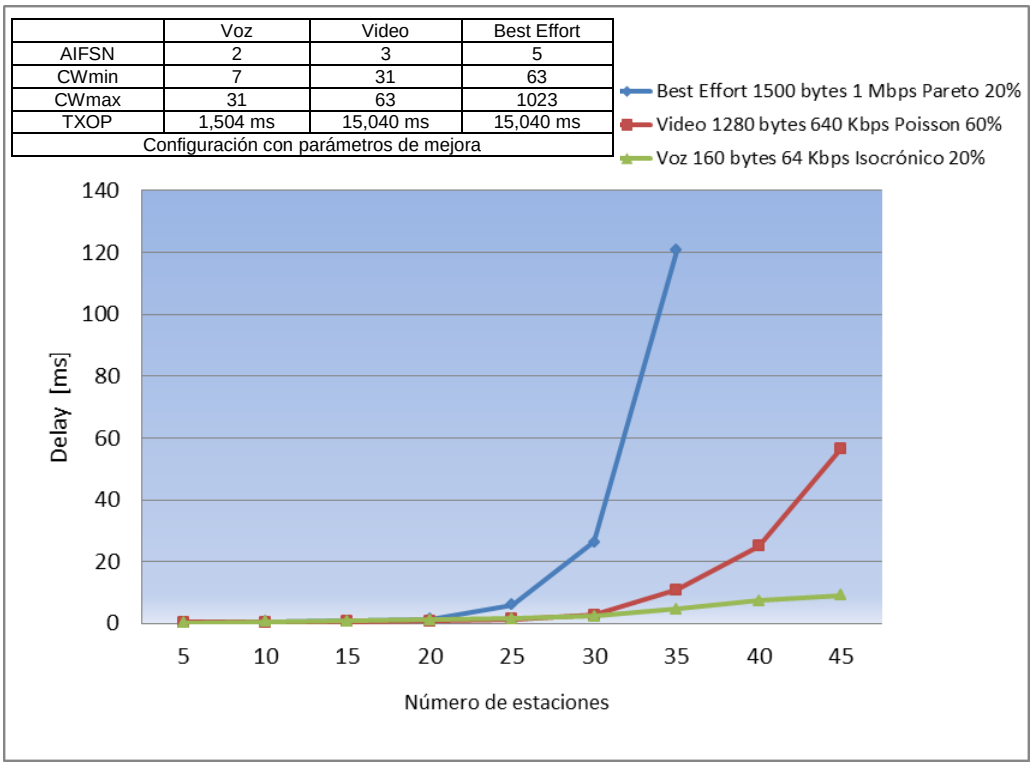


Figura C.44 Delays de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.2

	Voz	Video	Best Effort
Rendimiento Máximo [Mbps]	0,573	17,608	6949
Pérdida 1% Rendimiento	-	-	6° estación
Pérdida 5 % Rendimiento	-	-	7° estación
Pérdida 10 % Rendimiento	-	-	8° estación
Retardo de Cola en Rendimiento Máximo [ms]	9,134	56,429	120,779
Retardo de Cola para 5x estaciones [ms]	1,550	1,342	6,023
Retardo de Cola Máximo 9x estaciones [ms]	9,134	56,429	1747,910
Tamaño de Cola para 5x estaciones [paquetes]	0,077	0,085	0,526
Tamaño de Cola para 9x estaciones [paquetes]	0,454	3,588	42,398

Tabla C.10 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 2.2

En las Figuras C.45 a C.50 se observan las comparaciones de los tamaños de cola y retardos de los flujos de voz, video y de mejor esfuerzo, configurados con los parámetros de mejora y con los parámetros por defecto.

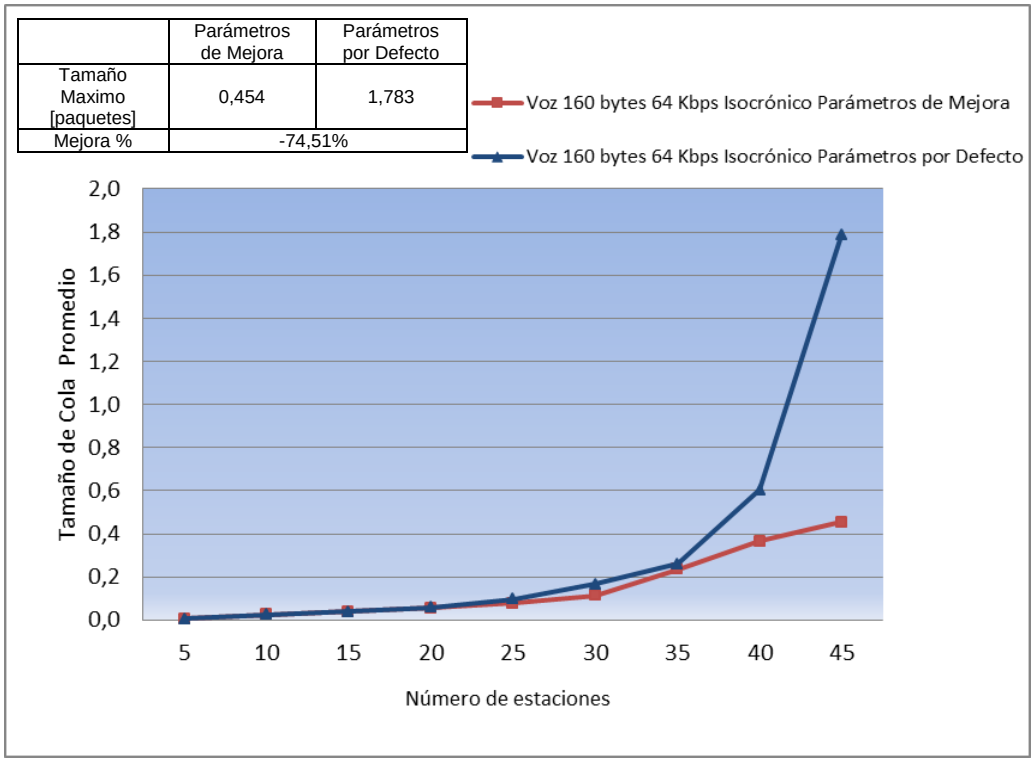


Figura C.45 Comparación del tamaño de cola del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.2

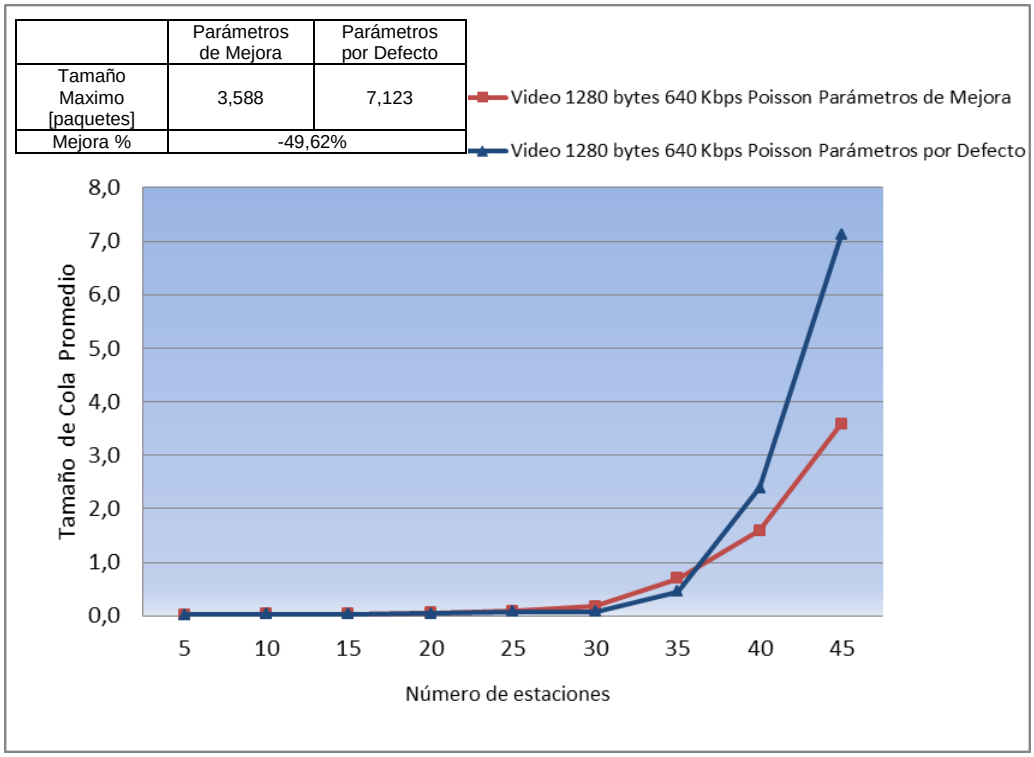


Figura C.46 Comparación del tamaño de cola del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.2

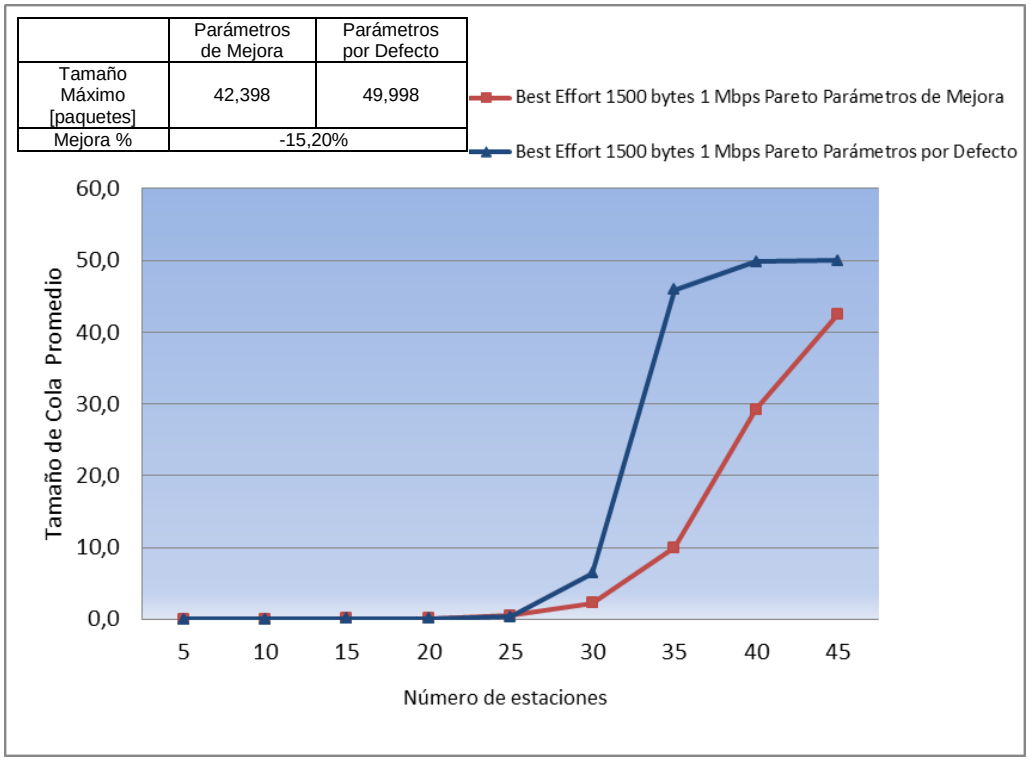


Figura C.47 Comparación del tamaño de cola del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.2

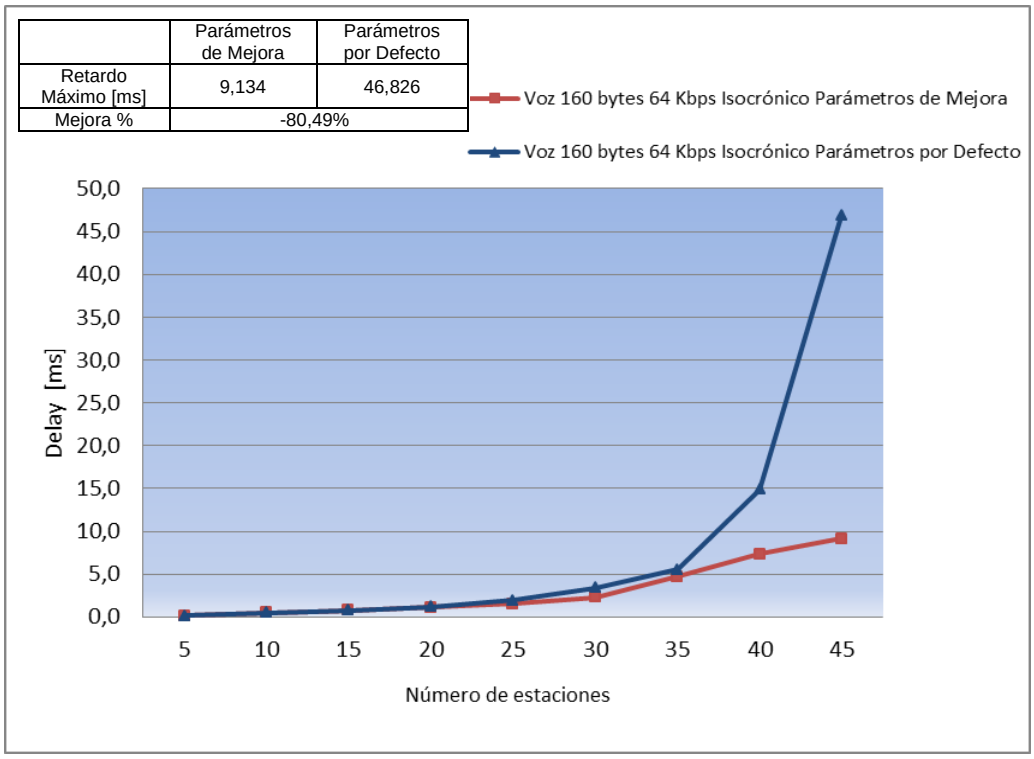


Figura C.48 Comparación de delays de cola del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.2

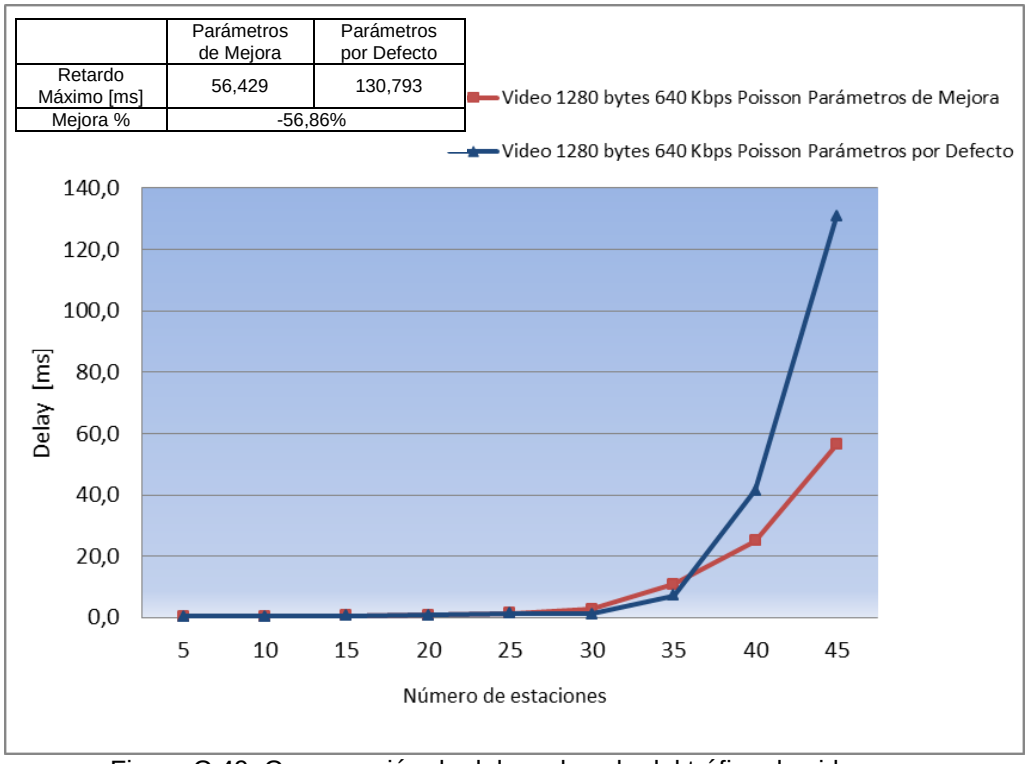


Figura C.49 Comparación de delays de cola del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.2

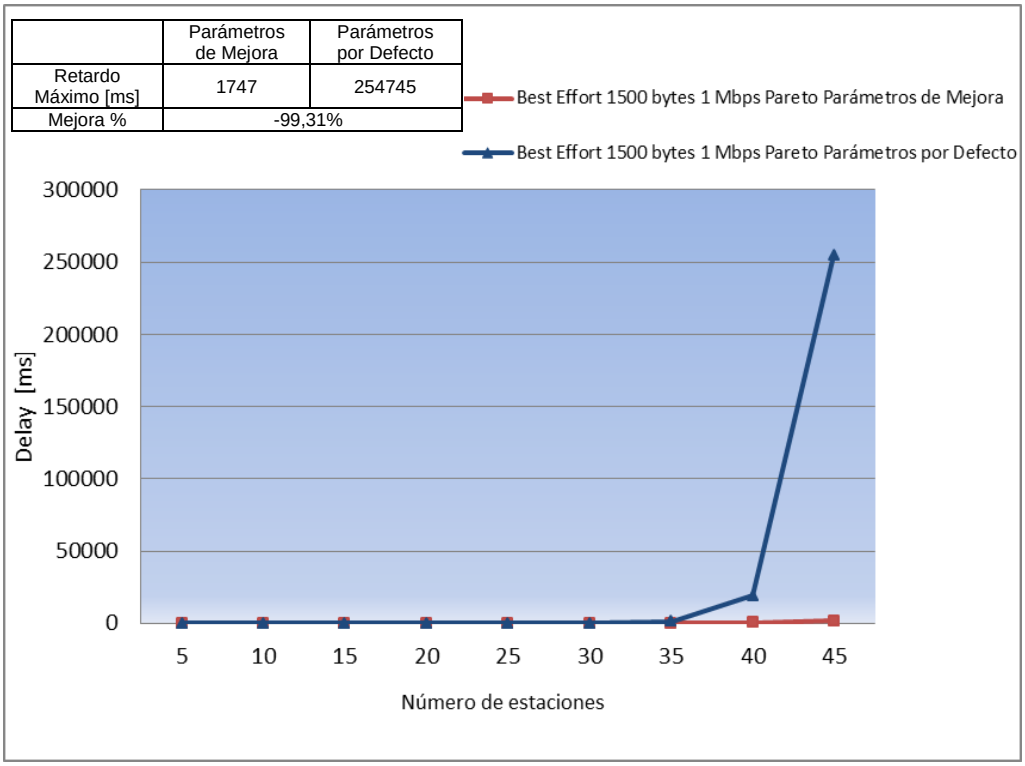


Figura C.50 Comparación de delays de cola del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.2

C.2.3 20 % de estaciones de voz, 20 % de video y 60 % de mejor esfuerzo.

Los valores promedios obtenidos para el tamaño de cola y retardo de paquete, variando la carga de 5 a 45 estaciones, se muestran en las Figuras C.51, C.52, C.53 y C.54. La Tabla C.11 resume las características más importantes para este caso.

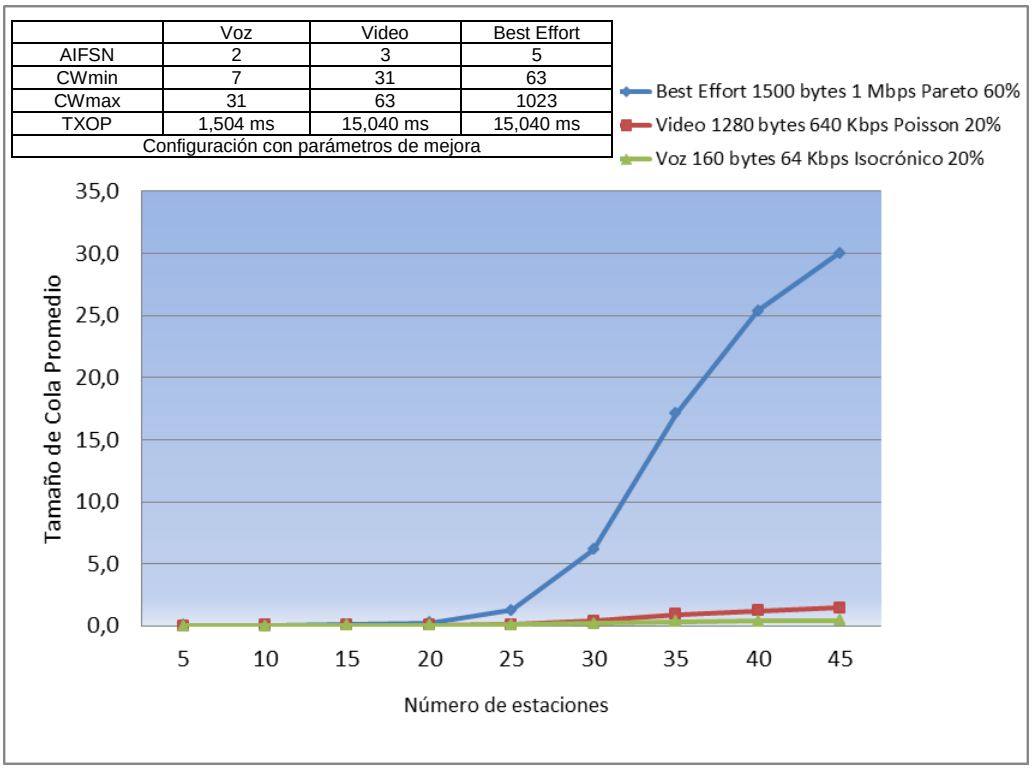


Figura C.51 Tamaño de Cola de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.3

	Voz	Video	Best Effort
AIFSN	2	3	5
CWmin	7	31	63
CWmax	31	63	1023
TXOP	1,504 ms	15,040 ms	15,040 ms
Configuración con parámetros de mejora			

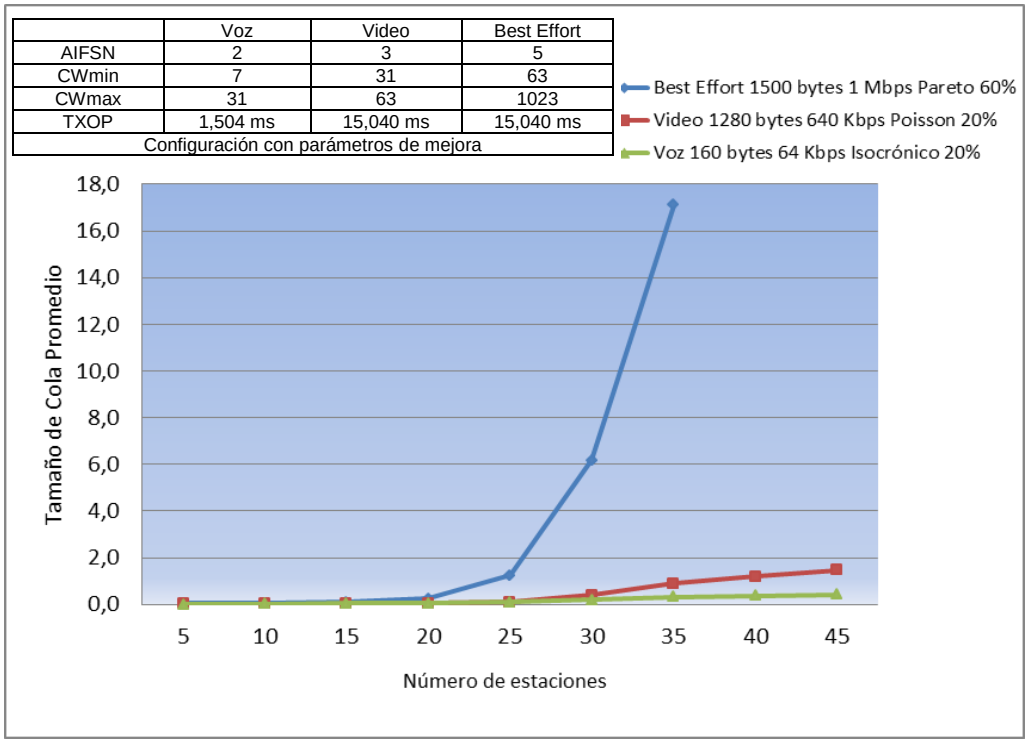


Figura C.52 Tamaño de Cola de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.3

	Voz	Video	Best Effort
AIFSN	2	3	5
CWmin	7	31	63
CWmax	31	63	1023
TXOP	1,504 ms	15,040 ms	15,040 ms
Configuración con parámetros de mejora			

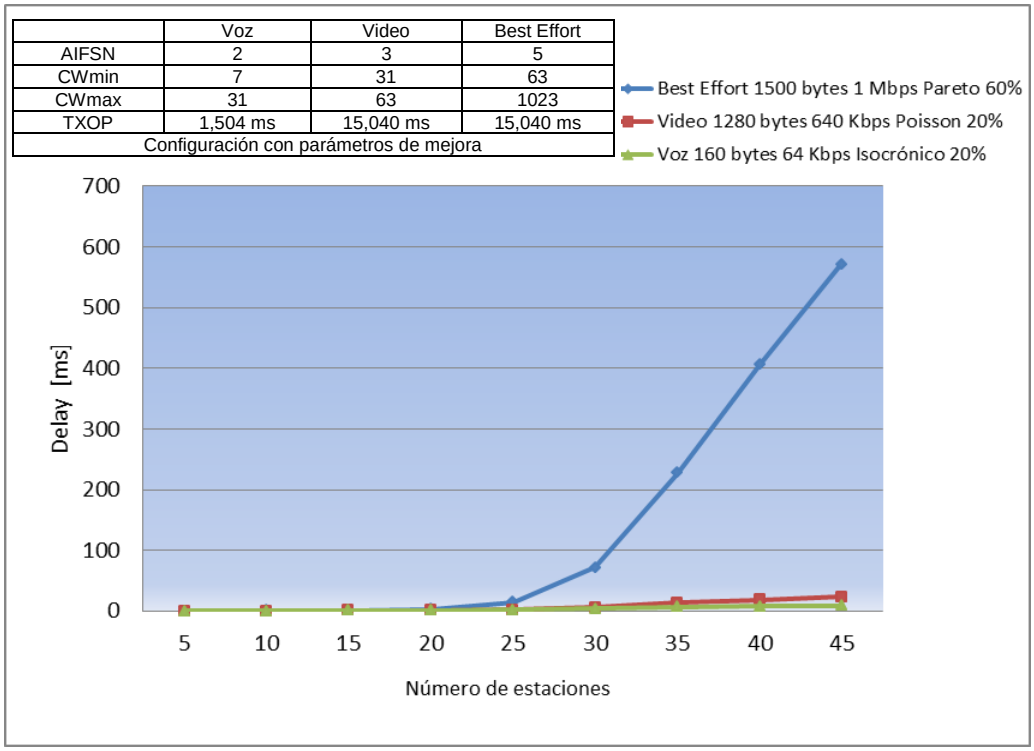


Figura C.53 Delays de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.3

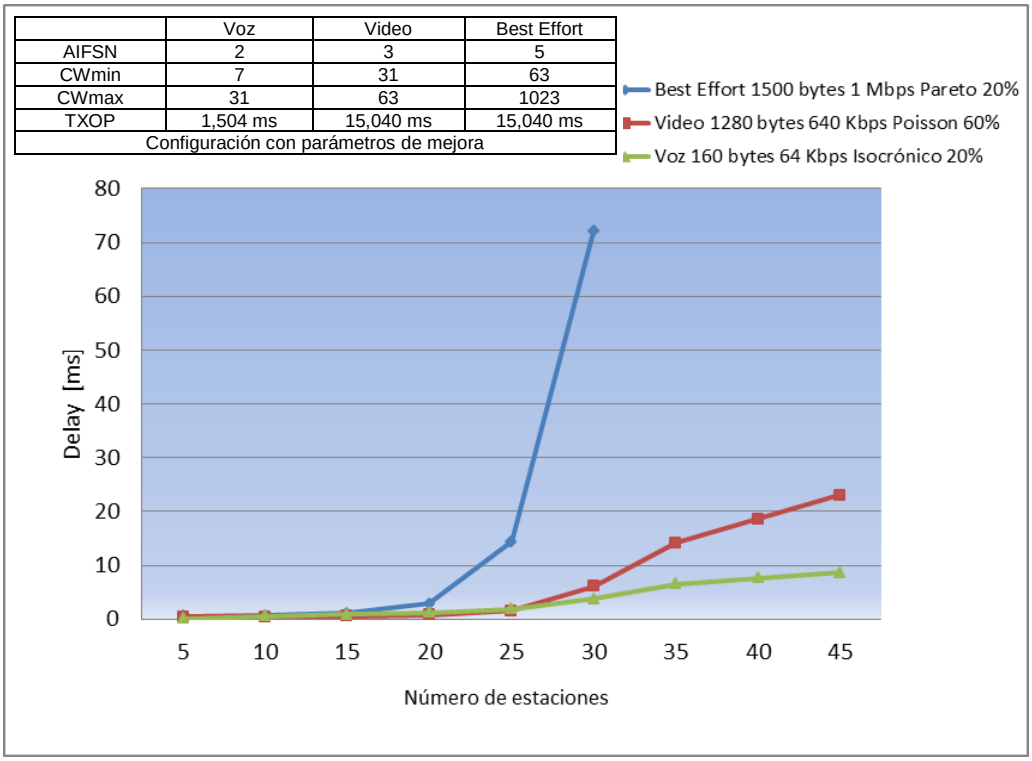


Figura C.54 Delays de los tráficos de voz, video y mejor esfuerzo Escenario 2.3

	Voz	Video	Best Effort
Rendimiento Máximo [Mbps]	0,575	5,894	18,859
Perdida 1% Rendimiento	-	-	18° estación
Perdida 5 % Rendimiento	-	-	21° estación
Perdida 10 % Rendimiento	-	-	21° estación
Retardo de Cola en Rendimiento Máximo [ms]	8,698	23,015	72,050
Retardo de Cola para 25 estaciones [ms]	1,842	1,582	14,381
Retardo de Cola Máximo 45 estaciones [ms]	8,698	23,015	571,975
Tamaño de Cola para 25 estaciones	0,092	0,101	1,254
Tamaño de Cola para 45 estaciones	0,434	1,472	30,031

Tabla C.11 Resumen de los resultados de las métricas en los puntos críticos Escenario 2.3

En las Figuras C.55 a C.59 se observan las comparaciones de los tamaños de cola y retardos de los flujos de voz, video y de mejor

esfuerzo, configurados con los parámetros de mejora y con los parámetros por defecto.

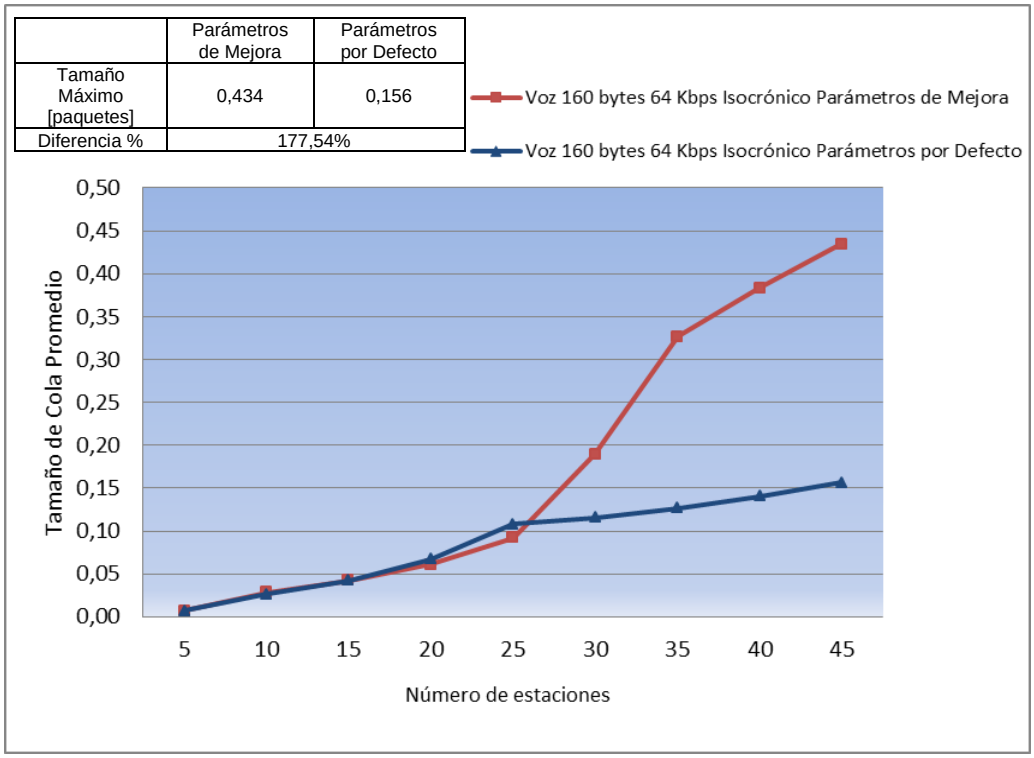


Figura C.55 Comparación del tamaño de cola del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.3

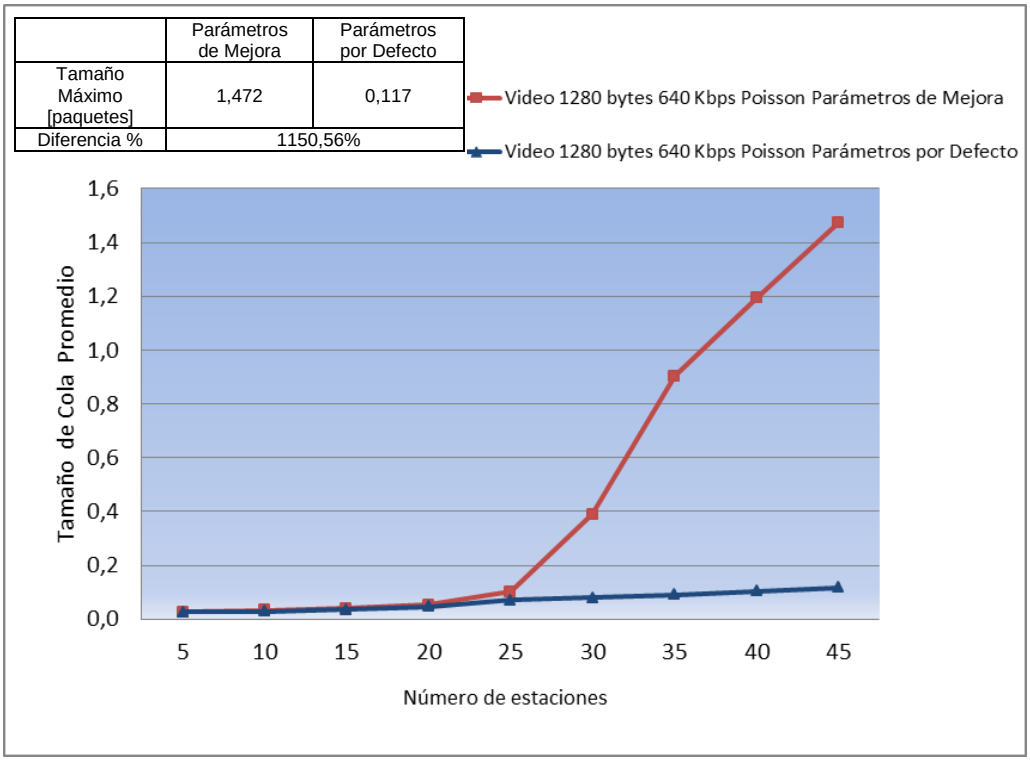


Figura C.56 Comparación del tamaño de cola del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.3

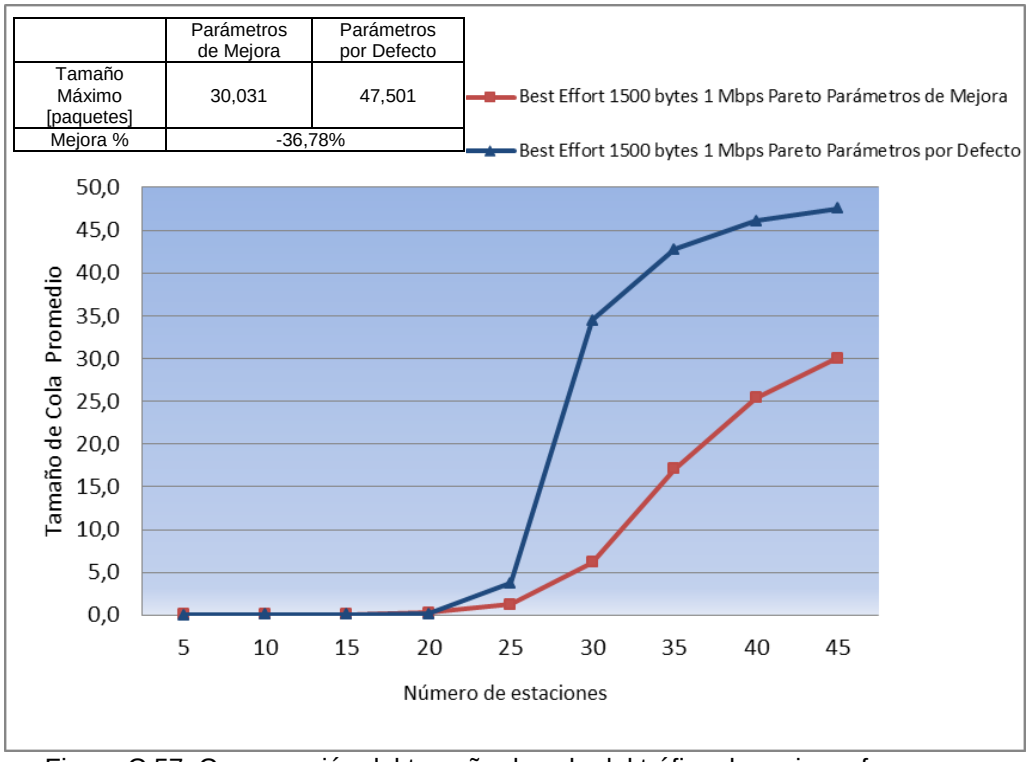


Figura C.57 Comparación del tamaño de cola del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.3

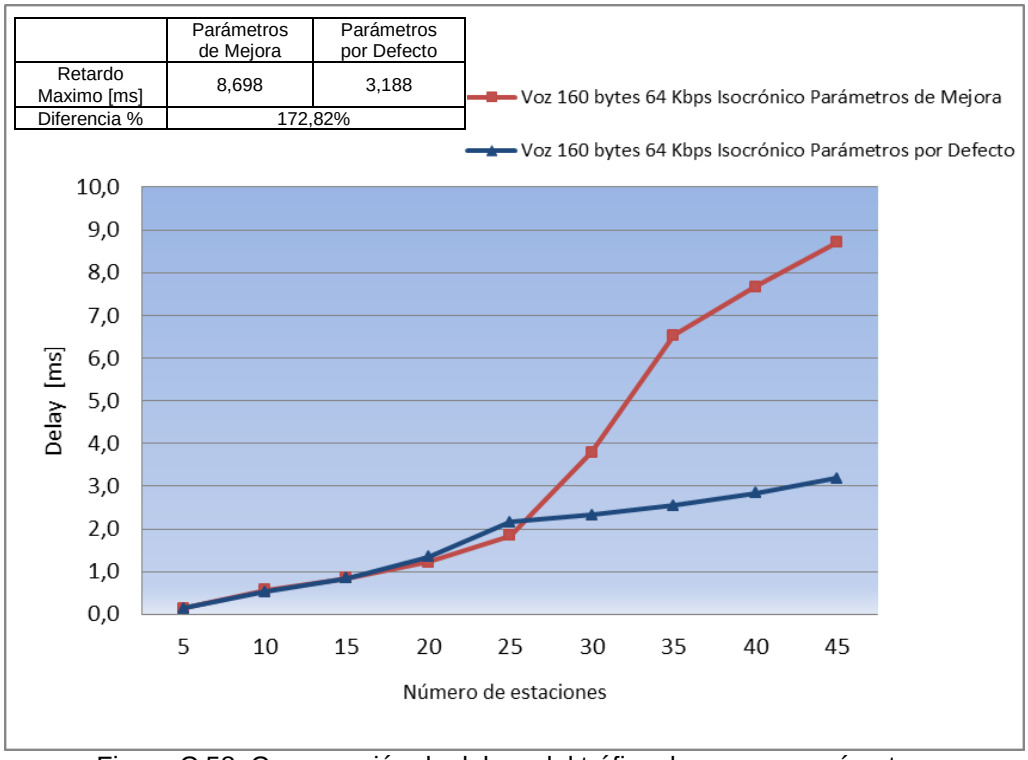


Figura C.58 Comparación de delays del tráfico de voz con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.3

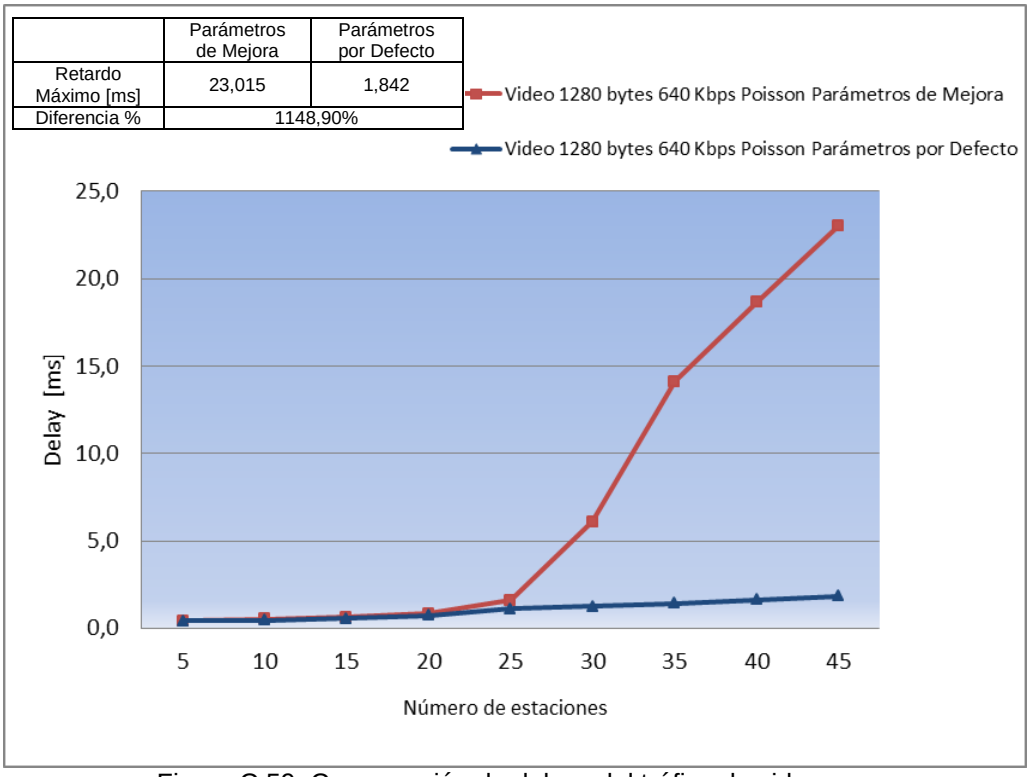


Figura C.59 Comparación de delays del tráfico de video con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.3

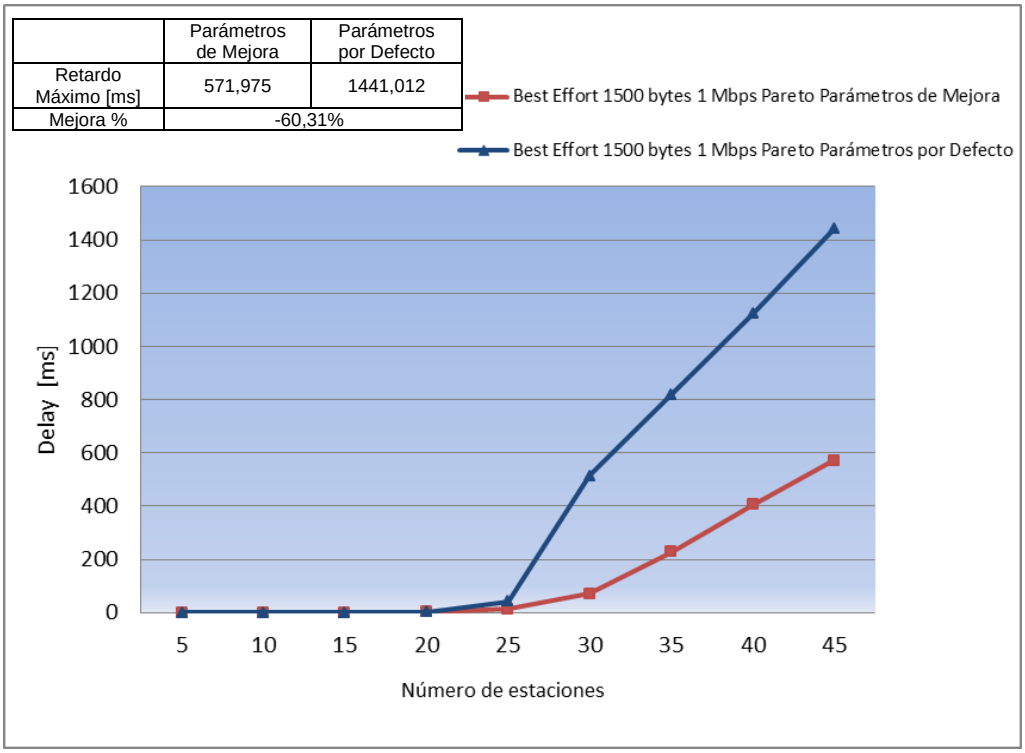


Figura C.60 Comparación de delays del tráfico de mejor esfuerzo con parámetros de mejora y por defecto, en función del número de estaciones Escenario 2.3

APENDICE D

PUBLICACIONES NACIONALES E INTERNACIONALES

D.1)
AINA 2013 - 27th IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED INFORMATION NETWORKING AND APPLICATIONS
HWISE-2013 - NINETH INTERNATIONAL WORKSHOP ON HETEROGENEOUS WIRELESS NETWORKS
Barcelona – España - marzo/2013
Tema:
"EDCA 802.11E PERFORMANCE UNDER DIFFERENT SCENARIOS"
Santiago Pérez – Javier Campos – Higinio Facchini – Luis Bisaro

EDCA 802.11e performance under different scenarios

Quantitative analysis

Santiago Perez, Higinio Facchini,
Gustavo Mercado, Luis Bisaro
Center of Research and Development GRID TICs
National Technological University
Mendoza, Argentine
santiagocp@frm.utn.edu.ar, higiniofac@frm.utn.edu.ar,
gmercado@frm.utn.edu.ar, lbisaro@frm.utn.edu.ar

Javier Campos*
Department of Informatics and Systems Engineering
Zaragoza University
Zaragoza, Spain
jcampos@unizar.es

***Abstract*—The global throughput of an 802.11e WLAN is determined by EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) parameters, among other aspects, that are usually configured with predetermined and static values. This study carefully evaluates the Quality of Service (QoS) of Wi-Fi with EDCA in several realistic scenarios with noise and a blend of wireless traffic (e.g., voice, video, and best effort, with Pareto distribution). The metrics of the benefits obtained in each case are compared, and the differentiated impact of network dynamics on each case is quantified. This study proposes a new experimental scenario based on the relative proportion of traffic present in the network. Stations have been implemented using HSANs (Hierarchical Stochastic Activity Networks) and simulated using the Möbius tool.**

Keywords QoS; WLAN; EDCA; MAC Parameters; Analysis

I. INTRODUCTION

Providing Quality of Service (QoS) in Wi-Fi networks is a considerable challenge for data networks, due to the high levels of burst-like packet loss, latency, and jitter. Several ways to characterise QoS through strict requirements expressed using quantitative values include data velocity, throughput loss thresholds, packet loss rates, and maximum limits on delay and jitter.

The family of IEEE 802.11 protocols is the most promising framework for Wireless LAN (WLAN) networks; there is also hope that it can become the standard in industrial and personal environments [1]. The protocol includes the 802.11e standard that proposes a new function for the MAC layer, known as the Hybrid Coordination Function (HCF). This function uses a channel access method based on EDCA contention. EDCA is designed to provide prioritised QoS and improve the Distributed Coordination Function (DCF) belonging to the original 802.11 standard.

This paper presents a detailed analysis that verifies the success of priority-based traffic differentiation and eventually QoS specifications in Wi-Fi network communications. Specifically, the principal focus is analysing the quantitative behaviour of the EDCA IEEE 802.11e protocol in supporting QoS while in a shared communications setting with diverse traffic used by wireless networks.

The results may be compared to and complement those obtained by studies, as in the literature relating to Wi-Fi network behaviour. These studies propose creating a behavioural model for nodes in particular and the network in general based on the analysed or simulated trace collection. Trace collection is a necessary first step in creating realistic models crucial to designing, simulating, and evaluating network protocols [2-4]. Unfortunately, a portion of authors tend to define a model as interpreting trace collections, although only conclusions can be drawn from traces while searching for the behavioural characteristics of the traffic in question.

The other method of analysing the performance of IEEE 802.11communication networks has been to develop evaluation models based on two different perspectives: analytical and simulation. Analytical models [5] have the advantage of providing expressions/formalisms that help analyse the influence of different parameters. To develop realistic scenarios like those anticipated in this study, we assume that using analytical models would not be an adequate approximation for the following reasons: a) simplifications usually used in these models cannot appropriately capture important aspects to evaluate, including various metrics obtained through simulation, b) most models assume Poisson traffic sources, thus making exactly modelling other traffics difficult, c) greater flexibility in configuring and comparing different evaluation scenarios is possible with appropriate simulators.
For more realistic scenarios, several simulation analyses have been made using tools like Network Simulator (NS-2) [6], OPNET [7], or IP TRAFFIC [8]. All of these tools are especially appropriate for analysing the performance of communication networks. However, in some of them it is not practical for use in the sort of tests that are intended to make, and difficult to implement any type of light modification to protocols or the network's timing characteristics.

Few papers are available in the literature or research studies that use Stochastic Petri Nets (SPNs) [9] as a modelling formalism for analysing IEEE 802.11

* The work of J. Campos has been supported by the project TIN2011-24932 of the Spanish Ministry of Economy and Competitivity.

Tuning Mechanism For IEEE 802.11e EDCA Optimization

S. Pérez, J. Campos, H. Facchini and L. Bisaro

Abstract— **The overall performance of a WLAN 802.11e is determined, among other things, by the Enhanced Distributed Channel Access (EDCA) parameters, typically configured with default and static values. The same does not vary according to the dynamic requirements of Quality of Service (QoS) of the network. To achieve significant improvements in the performance of the network, and simultaneously comply with the specifications of QoS, a new algorithm of tuning is proposed to make the adjustment of these parameters dynamically, which we call Algorithm for the Differentiation of Traffic Multiple (MTDA). The algorithm has been evaluated in realistic scenarios with noise, reaching a initialization effective, rapid convergence, and the differentiation of effective multiple wireless traffic (voice, video and best effort with Pareto distribution). It adopted a model of wireless station implemented in Hierarchical Stochastic Activities Networks (HSANs), which runs on the simulator Möbius.**

Keywords— **Tuning, EDCA parameters, Modeling, Simulation, WLAN 802.11e**

I. Introducción

En este documento se presentan soluciones novedosas que permiten mejores prestaciones, y además, el cumplimiento de las especificaciones de QoS en las comunicaciones de redes Wi-Fi. Específicamente, el foco principal ha sido el análisis de alternativas complementarias a aplicar sobre el protocolo EDCA IEEE 802.11e, para soportar QoS en un ambiente de comunicaciones compartido con tráfico diverso.

La provisión de QoS en redes Wi-Fi es uno de los más grandes desafíos en las redes de datos, debido a los altos niveles de ráfagas de pérdidas de tramas, de latencia y de jitter. Hay algunas formas de caracterizar la QoS a través de requerimientos estrictos que se expresan en términos de valores cuantitativos, tales como velocidad de datos, umbrales de pérdida de rendimiento, tasas de pérdidas de tramas, y límites máximos de retardos y de jitter. Y dentro de la familia de protocolos 802.11, con el estándar 802.11e se propuso una nueva función de capa MAC llamada Hybrid Coordination Function (HCF) que usa el método de acceso al canal basado en la contención EDCA [1]. EDCA se diseñó para proveer QoS priorizada mejorando la Distributed Coordination Function (DCF) del estándar 802.11 original.

Los resultados de este trabajo permiten comparar y complementar los obtenidos por los trabajos presentados en la literatura sobre la conducta de las redes Wi-Fi, y de EDCA en particular. Estos trabajos plantean cómo hacer un análisis de la conducta de los nodos en particular, y de la red en general, desde la colección de trazas, analiticamente o por simulación.

El análisis de trazas es un primer paso necesario para hacer modelos realistas que son cruciales para el diseño, simulación y evaluación de protocolos de red [2-10]. Lamentablemente, algunos autores suelen llamar modelo a la interpretación de la colección de trazas, cuando sólo se obtienen conclusiones desde las trazas, buscando características del comportamiento del tráfico.

La otra forma de efectuar el análisis de prestaciones de las redes de comunicaciones IEEE 802.11e ha sido desarrollando modelos de evaluación desde dos puntos de vista distintos: analíticos y simulación. Los modelos analíticos [11-28] tienen la ventaja de proveer expresiones/formalismos que ayudan a analizar la influencia de los diferentes parámetros. Además, usualmente proveen también resultados rápidos. Sin embargo, este tipo de solución típicamente obliga a la adopción de suposiciones de simplificación. Para el desarrollo de escenarios realistas, como los previstos en este trabajo, se consideró que el uso de modelos analíticos no era una aproximación adecuada por las siguientes razones: a) las simplificaciones usualmente empleadas sobre estos modelos no pueden capturar apropiadamente importantes aspectos que fueron objeto de nuestra evaluación, como las diversas métricas que se obtienen con simulación, b) la mayor parte de estos modelos asumen fuentes de tráfico Poisson, dificultando la modelación exacta de otros tipos de tráfico, c) con el uso de simuladores apropiados es posible una mayor flexibilidad para configurar y comparar diversos escenario de evaluación.

Para escenarios más realistas, algunos análisis de simulación han sido hechos usando las herramientas Network Simulator (NS-2) [29], OPNET [30] o IP TRAFFIC [31]. La herramienta NS-2 es un simulador de eventos discretos de fuente abierto, siendo la más usada de las tres. Mientras que la herramienta OPNET ha sido desarrollado por OPNET Technologies, Inc. También resultan útiles herramientas de generación de tráfico simulado, como IP Traffic desarrollada por ZTI Telecom. Todas son especialmente apropiadas para hacer análisis de prestaciones de las redes de comunicaciones. En el caso puntual de NS-2, algunos trabajos [32-33] muestran su uso en la simulación de la conducta de IEEE 802.11e, en comunicaciones de tiempo real. Sin embargo, en [32] han sido identificadas y explicadas algunas

S. Pérez, Universidad Tecnológica Nacional, Mendoza, Argentina, santiagocp@frm.utn.edu.ar
J. Campos, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España, jcampos@unizar.es
H. Facchini, Universidad Tecnológica Nacional, Mendoza, Argentina, higiniofac@frm.utn.edu.ar
L. Bisaro, Universidad Tecnológica Nacional, Mendoza, Argentina, lbisaro@frm.utn.edu.ar

D.3) IEEE CONIELECOMP 2015 - 25TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONICS, COMMUNICATIONS AND COMPUTERS,
Tema:
"AN EVALUATION OF QOS FOR INTENSIVE VIDEO TRAFFIC OVER 802.11E WLANS - QUANTITATIVE ANALYSIS" (Aprobado),
Puebla – México - febrero/2015
Santiago Pérez – Javier Campos – Higinio Facchini – Alejandro Dantiacq – Gastón Cangemi

An Evaluation of QoS for intensive video traffic over 802.11e WLANs

Quantitative analysis

Santiago Perez, Higinio Facchini,
Alejandro Dantiacq, Gastón Cangemi
Center of Research and Development GRID TICs
National Technological University
Mendoza, Argentine
santiagocp@frm.utn.edu.ar, higiniofac@frm.utn.edu.ar,
alejandrod@frm.utn.edu,ar, gncelectronic@gmail.comr

Javier Campos
Department of Informatics and Systems Engineering
Zaragoza University
Zaragoza, Spain
jcampos@unizar.es

Abstract— **With the continuing development of the wireless technologies (Wi-Fi, 3G, 4G, WiMax and Bluethooth), the study of wireless multimedia transmissions has gained lately more attention. For example, the expectations of the company leaders on the growth of Wi-Fi video traffic has updated the lines of research on the standard IEEE 802.11e introduced to provide QoS (Quality of Service) to WLAN (Wireless LAN) networks. A quantitative analysis has been performed by simulation. We use a node model EDCA 802.11e with the tool Möbius of the University of Illinois, which supports an extension of SPN (Stochastic Petri Networks), known as HSAN (Hierarchical Stochastic Activity Networks). This formalism favors the comparison of the results with those obtained from other tools, based mainly on simulation languages, for Wi-Fi stations with the capacity to transmit voice, video or best effort traffic in presence of error. This article introduces novel scenario that varies the load by increasing the number of active stations from 5 to 45 but maintaining their relative traffic proportion. The proportion of traffic injected by stations is 65% video, 2% voice, and 33% best effort. Measured performance metrics were absolute or direct performance, relative performance, average delay of queue, and average queue size.**

Keywords-tuning; EDCA parameters; modeling; simulation; WLAN 802.11e; throughput

I. INTRODUCTION

The services of wireless mobile data are on their way to meet the needs of many users on the network. The voice services with mobile devices are already considered as a necessity by most people. And the mobile devices for data services, video, and TV are rapidly becoming an essential part of the everyday life of consumers. The proliferation of handsets, laptops and tablets on mobile networks is a major traffic generator, because these devices offer the consumer content and applications not supported by previous generations of mobile devices. The projections for the next 5 years show a steady growth in the mobile video, despite macroeconomic conditions in many parts of the world. Because of that fact, the contents of mobile video have much higher bit rates than other types of mobile content, mobile video will generate much of the growth of future mobile traffic. It is expected for the 2018 that 65% of the total wireless traffic will be associated with video applications [1].

Up until a few years ago, the Wi-Fi traffic was more general, and included light flows of voice traffic. The greatest burden of the video traffic will be a test for the standard EDCA IEEE 802.11e and the algorithms of admission control, to sustain the QoS requested by the user.

The principal contributions of this article are i) to specify and experiment on a new scenario offering metrics evaluation while maintaining a video intensive proportion for network traffic in line with the expectations of the Wi-Fi traffic future, ii) to demonstrate that the standard EDCA IEEE 802.11e mechanism using default static parameters provides traffic differentiation enough in this context, and iii) the contributions and conclusions made using an EDCA model with either SPNs that complement, enrich, and facilitate comparison with precedents within Wi-Fi network knowledge obtained from pure trace collection or other types of analytical studies and modelling using mathematical tools for different real and hypothetical contexts.

Researchers and the industry could use these data for their proposals in the EDCA IEEE 802.11e devices.

The rest of this document is structured as follows. Section II provides a general view of the EDCA 802.11e standard. Section III presents the commercial deployment of the standard IEEE 802.11e EDCA. Section IV describes the Wi-Fi station model built with HSANs and the simulation scenario defined for experimental evaluation. Section V gives the absolut and relative performance, the queue size and the queue delay in the scenario. And section 7 summarizes the most significant conclusions.

II. BRIEF DESCRIPTION OF EDCA 802.11E

A. *DCF y PCF in 802.11*

The DCF (Distributed Coordination Function) 802.11 only provides the best-effort service [2]. As indicated previously, multimedia and real-time applications limited

D.4)
IEEE COMPUTER SOCIETY - IEEE COMPUTER SOCIETY DIGITAL LIBRARY (CSDL)
Tema:
"EDCA 802.11E PERFORMANCE UNDER DIFFERENT SCENARIOS – QUANTITATIVE ANALYSIS"
Santiago Pérez – Javier Campos – Higinio Facchini – Luis Bisaro

EDCA 802.11e performance under different scenarios

Quantitative analysis

Santiago Perez, Higinio Facchini,
Gustavo Mercado, Luis Bisaro
Center of Research and Development GRID TICs
National Technological University
Mendoza, Argentine
santiagocp@frm.utn.edu.ar, higiniofac@frm.utn.edu.ar,
gmercado@frm.utn.edu.ar, lbisaro@frm.utn.edu.ar

Javier Campos*
Department of Informatics and Systems Engineering
Zaragoza University
Zaragoza, Spain
jcampos@unizar.es

***Abstract*—The global throughput of an 802.11e WLAN is determined by EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) parameters, among other aspects, that are usually configured with predetermined and static values. This study carefully evaluates the Quality of Service (QoS) of Wi-Fi with EDCA in several realistic scenarios with noise and a blend of wireless traffic (e.g., voice, video, and best effort, with Pareto distribution). The metrics of the benefits obtained in each case are compared, and the differentiated impact of network dynamics on each case is quantified. This study proposes a new experimental scenario based on the relative proportion of traffic present in the network. Stations have been implemented using HSANs (Hierarchical Stochastic Activity Networks) and simulated using the Möbius tool.**

Keywords QoS; WLAN; EDCA; MAC Parameters; Analysis

I. INTRODUCTION

Providing Quality of Service (QoS) in Wi-Fi networks is a considerable challenge for data networks, due to the high levels of burst-like packet loss, latency, and jitter. Several ways to characterise QoS through strict requirements expressed using quantitative values include data velocity, throughput loss thresholds, packet loss rates, and maximum limits on delay and jitter.

The family of IEEE 802.11 protocols is the most promising framework for Wireless LAN (WLAN) networks; there is also hope that it can become the standard in industrial and personal environments [1]. The protocol includes the 802.11e standard that proposes a new function for the MAC layer, known as the Hybrid Coordination Function (HCF). This function uses a channel access method based on EDCA contention. EDCA is designed to provide prioritised QoS and improve the Distributed Coordination Function (DCF) belonging to the original 802.11 standard.

This paper presents a detailed analysis that verifies the success of priority-based traffic differentiation and eventually QoS specifications in Wi-Fi network communications. Specifically, the principal focus is analysing the quantitative behaviour of the EDCA IEEE 802.11e protocol in supporting QoS while in a shared communications setting with diverse traffic used by wireless networks.

The results may be compared to and complement those obtained by studies, as in the literature relating to Wi-Fi network behaviour. These studies propose creating a behavioural model for nodes in particular and the network in general based on the analysed or simulated trace collection. Trace collection is a necessary first step in creating realistic models crucial to designing, simulating, and evaluating network protocols [2-4]. Unfortunately, a portion of authors tend to define a model as interpreting trace collections, although only conclusions can be drawn from traces while searching for the behavioural characteristics of the traffic in question.

The other method of analysing the performance of IEEE 802.11communication networks has been to develop evaluation models based on two different perspectives: analytical and simulation. Analytical models [5] have the advantage of providing expressions/formalisms that help analyse the influence of different parameters. To develop realistic scenarios like those anticipated in this study, we assume that using analytical models would not be an adequate approximation for the following reasons: a) simplifications usually used in these models cannot appropriately capture important aspects to evaluate, including various metrics obtained through simulation, b) most models assume Poisson traffic sources, thus making exactly modelling other traffics difficult, c) greater flexibility in configuring and comparing different evaluation scenarios is possible with appropriate simulators.
For more realistic scenarios, several simulation analyses have been made using tools like Network Simulator (NS-2) [6], OPNET [7], or IP TRAFFIC [8]. All of these tools are especially appropriate for analysing the performance of communication networks. However, in some of them it is not practical for use in the sort of tests that are intended to make, and difficult to implement any type of light modification to protocols or the network's timing characteristics.

Few papers are available in the literature or research studies that use Stochastic Petri Nets (SPNs) [9] as a modelling formalism for analysing IEEE 802.11

* The work of J. Campos has been supported by the project TIN2011-24932 of the Spanish Ministry of Economy and Competitivity.

D.5)
REVISTA JOURNAL OF COMPUTER SCIENCE AND TECHNOLOGY (JCS&T)
Tema:
"THROUGHPUT QUANTITATIVE ANALYSIS OF EDCA 802.11E in DIFFERENT SCENARIOS"
Santiago Pérez – Javier Campos – Higinio Facchini – Luis Bisaro

Throughput Quantitative Analysis of EDCA 802.11e in Different Scenarios

Santiago Pérez, Higinio Facchini, Gustavo Mercado, Luis Bisaro
GRID TICs, National Technological University
Mendoza, 5500, Argentine
and
Javier Campos
Department of Informatics and Systems Engineering, Zaragoza University
Zaragoza, 50018, Spain

ABSTRACT

This document presents a quantitative analysis of the direct and relative throughput of IEEE 802.11e. The global throughput of an 802.11e WLAN is determined by EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) parameters, among other aspects, that are usually configured with predetermined and static values. This study carefully evaluates the Quality of Service (QoS) of Wi-Fi with EDCA in several realistic scenarios with noise and a blend of wireless traffic (e.g., voice, video, and best effort, with Pareto distribution). The metrics of the benefits obtained in each case are compared, and the differentiated impact of network dynamics on each case is quantified. The results obtained show that the default settings are not optimal, and that with an appropriate selection, can be achieved improvements of the order of 25 %, according to the type of traffic. In addition, it could be shown the quantitative impact of each parameter EDCA on the overall performance. This study proposes a new experimental scenario based on the relative proportion of traffic present in the network. Stations have been simulated using the Möbius tool, which supports an extension of SPN (Stochastic Petri Networks), known as HSAN (Hierarchical Stochastic Activity Networks).

Keywords: QoS, WLAN, EDCA 802.11e, MAC Parameters, Analysis of traffic

1. INTRODUCTION

Providing Quality of Service (QoS) in Wi-Fi networks is a considerable challenge for data networks, due to the high levels of burst-like packet loss, latency, and jitter. Several ways to characterise QoS through strict requirements expressed using quantitative values include data velocity, throughput loss thresholds, packet loss rates, and maximum limits on delay and jitter.

The family of IEEE 802.11 protocols is the most promising framework for Wireless LAN (WLAN) networks; there is also hope that it can become the standard in industrial and personal environments [1]. The protocol includes the 802.11e standard that proposes a new function for the MAC layer, known as the Hybrid Coordination Function (HCF). This function uses a channel access method based on EDCA contention. EDCA is designed to provide prioritised QoS and improve the Distributed Coordination Function (DCF) belonging to the original 802.11 standard.

This paper presents a detailed analysis that verifies the success of priority-based traffic differentiation and eventually QoS specifications in Wi-Fi network communications. Specifically, the principal focus is analysing the quantitative behaviour of the EDCA IEEE 802.11e protocol in supporting QoS while in a shared communications setting with diverse traffic used by wireless networks.

The results may be compared to and complement those obtained by studies, as in the literature relating to Wi-Fi network behaviour. These studies propose creating a behavioural model for nodes in particular and the network in general based on the analysed or simulated trace collection.

Trace collection is a necessary first step in creating realistic models crucial to designing, simulating, and evaluating network protocols [2-10]. Unfortunately, a portion of authors tend to define a model as interpreting trace collections, although only conclusions can be drawn from traces while searching for the behavioural characteristics of the traffic in question.

The other method of analysing the performance of IEEE 802.11communication networks has been to develop evaluation models based on two different perspectives: analytical and simulation. Analytical models [11-17] have the advantage of providing expressions/formalisms that help analyse the influence of different parameters. Moreover, these models also usually provide quick results. However, this type of solution typically requires adopting simplifying suppositions. To develop realistic scenarios like those anticipated in this study, we assume that using analytical models would not be an adequate approximation for the following reasons: a) simplifications usually used in these models cannot appropriately capture important aspects to evaluate, including various metrics obtained through simulation, b) most models assume Poisson traffic sources, thus making exactly modelling other traffics difficult, c) greater flexibility in configuring and comparing different evaluation scenarios is possible with appropriate simulators.

For more realistic scenarios, several simulation analyses have been made using tools like Network Simulator (NS-2) [18], OPNET [19], or IP TRAFFIC [20]. The NS-2 tool is an open-source simulator for discrete events, while OPNET Technologies, Inc. has developed the OPNET tool. Tools for generating simulated traffic are also useful, such as IP Traffic developed by ZTI Telecom. All of these tools are especially appropriate for analysing the performance of communication networks. Several studies [16, 21] show how NS-2 is used in real-time IEEE 802.11e behaviour simulations. However, several inconsistencies have been identified and explained [16], and the difficulty of implementing any type of light modification to protocols or the network's timing characteristics has been described.

Few papers are available in the literature or research studies that use Stochastic Petri Nets (SPNs) [22] as a modelling formalism for analysing IEEE 802.11 communication protocols. In [23], an SPN simulation model was proposed for evaluating the performance of the original IEEE 802.11. The simulation model has the necessary detail for describing the main characteristics of the protocol. The model assumes certain ideal channel

Mejorando el rendimiento y QoS en Wi-Fi con Sintonización de Parámetros EDCA 802.11e

Santiago Pérez, Higinio Facchini, G. Mercado, Carlos Taffernaberry, Luis Bisaro

Grupo de Investigación y Desarrollo en TICs (GRID TICs)
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza
(santiagocp,higiniofac,gmercado,carlos_taffe,lbisaro)@frm.utn.edu.ar

Resumen. Las WLAN basadas en IEEE 802.11 se han vuelto las más populares. Corrientemente, la mayor parte del tráfico transportado por estas redes está compuesto por servicios tradicionales como web browsing, e-mail o transferencia de archivos. Sin embargo, las llamadas de voz sobre Internet (VoIP), y otros servicios de streaming o interactivos como video o juegos en tiempo real, tendrán un importante rol en las redes wireless multiservicio del futuro. En orden a satisfacer estos requerimientos, la tecnología WLAN evoluciona en dos claras direcciones: i) experimentando maximizar la utilización del canal wireless con nuevas especificaciones PHY, y ii) mejorando los mecanismos de diferenciación de tráfico a nivel MAC. EDCA 802.11e provee diferenciación de tráfico, clasificándolos en diferentes Categorías de Acceso (ACs), donde cada una tiene sus propios parámetros MAC estáticos por defecto. Más recientemente, han surgido propuestas con el objeto de seleccionar dinámicamente los parámetros MAC óptimos, que permiten mejores resultados de rendimiento, y simultáneamente el cumplimiento de consignas de QoS. En el trabajo se propone un algoritmo de sintonización, que llamaremos MTDA (Algoritmo de Diferenciación de Tráfico Múltiple) y que introduce importantes mejoras a los antecedentes. Se experimentó su funcionamiento por simulación con Redes de Petri, en escenarios más realistas, verificando su inicialización efectiva, rápida convergencia, y la diferenciación eficiente de múltiples tráficos wireless. El presente trabajo desarrolla sucesivamente los siguientes apartados: 1) Introducción, 2) Modelo y Escenarios de Simulación, 3) Algoritmo de Sintonización MTDA, 4) Ensayo Experimental del Algoritmo MTDA y 5) Conclusiones y aportes.

Palabras claves: Sintonización, EDCA, Wireless 802.11,

1 Introducción

La provisión de QoS (Quality of Service) para las aplicaciones de capa superior es uno de los más grandes desafíos que una capa MAC wireless debería soportar. En particular, los enlaces wireless tienen características tales como altos niveles de pérdidas, ráfagas de pérdidas de tramas, alta latencia y jitter. Hay algunas formas de caracterizar la QoS a través de requerimientos estrictos que se expresan en términos

Estudio sobre la Distribución de Tráfico Autosimilar en Redes Wi-Fi

Santiago Pérez, Higinio Facchini, G. Mercado, Carlos Taffernaberry, Luis Bisaro

Grupo de Investigación y Desarrollo en TICs (GRID TICs)
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza
(santiagocp,higiniofac,gmercado,carlos_taffe,lbisaro)@frm.utn.edu.ar

Resumen. Los modelos exactos del tráfico Ethernet y Wireless 802.11 son importantes para modelar las aplicaciones de capa superior y los buffers de memoria de switchs, APs y bridges. Los análisis de cola realizados suponiendo la naturaleza Poisson del tráfico de datos difieren significativamente del rendimiento observado en la realidad. Diversos estudios han demostrado que para algunos entornos el patrón de tráfico es autosimilar, en lugar de Poisson. Desde principios de los años 90 se comenzaron a publicar documentos referidos a la autosimilitud del tráfico de Ethernet. En este documento se analiza la distribución intertrama de secuencias de tráfico Wireless 802.11 de contenido diverso. Usando capturas de tráfico Wireless 802.11 realizadas en distinto momento, se han analizado y determinado los valores de los parámetros usando la distribución Pareto como modelo. Además, se ha determinando la bondad de ajuste de las muestras con Pareto, y de las muestras entre sí. Finalmente, se ha fectuado un contraste con el comportamiento y el valor de los parámetros Pareto de tráfico Ethernet de un estudio anterior. El presente trabajo desarrolla sucesivamente los siguientes apartados: 1) Introducción, 2) Modelos de Tráfico de Red, 3) Tráfico de Datos Ethernet Automisilar con Distribución Pareto, 4) Caso de Estudio Experimental de Tráfico Wireless 802.11, 5) Modelación con Distribución Pareto, 6) Comparación de los parámetros y las curvas de Distribución Pareto Ethernet y Wireless 802.11, y 7) Conclusiones.

Palabras claves: tráfico, Wireless 802.11, Distribución Pareto, autosimilar

1 Introducción

La necesidad para que las redes de comunicaciones puedan proveer un espectro creciente de servicios requiere técnicas eficientes de análisis, monitoreo, evaluación y diseño de las mismas. El análisis es tradicionalmente encarado de forma incompleta, y siempre, con crecientes demandas de los usuarios e incertidumbre acerca de la evolución de los sistemas de red. Por ello, para cumplir los requerimientos de los usuarios y para proveer garantías sobre la confiabilidad y adaptabilidad, deben desarrollarse modelos de sistemas que puedan capturar las características de la carga

D.8)
ECEFI 2014
Tercer Congreso Internacional de Educación en Ciencia Empírica en Facultades de Ingeniería 2014
Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Mendoza – agosto/2014
Tema:
"ANÁLISIS POR SIMULACIÓN DEL IMPACTO DE LOS PARÁMETROS EDCA DE LA NORMA IEEE 802.11E RENDIMENTO WI-FI"
Santiago Pérez – Higinio Facchini - Alejandro Dantiacq – Gastón Cangemi

Análisis por Simulación del Impacto de los Parámetros EDCA de la norma IEEE 802.11e Rendimento Wi-Fi

Santiago Pérez; Higinio Facchini; Alejandro Dantiacq; Gastón Cangemi

Resumen: Las redes Wi-Fi se han vuelto las redes más populares en el acceso a los servicios de red y de banda ancha móvil/wireless a Internet. Y se espera que en los próximos años los servicios y aplicaciones de streaming o interactivos de video, alcancen hasta un 70% del tráfico total sobre dichas redes. En orden a satisfacer los requerimientos de QoS (Quality of Service – Calidad de Servicio) se introdujo la tecnología Wi-Fi EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) 802.11e. Se ha realizado un estudio detallado del impacto que tienen los parámetros de configuración de EDCA 802.11e de Wi-Fi sobre el rendimiento de cada tráfico en particular, y sobre la red en su conjunto. Para ello, se adoptó un modelo de simulación de estación Wi-Fi implementado en HSAN (Hierarchical Stochastic Activity Networks), una extensión de Redes de Petri, que se ejecuta sobre el simulador Möbius. Las simulaciones permitieron establecer que otros valores de los parámetros, a los que son usados habitualmente por defecto en los dispositivos Wi-Fi, logran mejores prestaciones. Los investigadores y la industria podrían usar estos datos para ajuste manual de los parámetros EDCA en los dispositivos Wi-Fi que tengan esta capacidad disponible. Efectivamente, algunos productos con certificación EDCA WMM (Wi-Fi MultiMedia) ya permiten cambiar los valores por defecto de los parámetros.

Palabras claves: Redes, Wi-Fi, QoS, EDCA 802-11e, WMM.

La provision de QoS (Quality of Service) para las aplicaciones Wi-Fi de capa superior es uno de los más grandes desafíos tecnológicos de la actualidad. En particular, si se tiene en cuenta que los enlaces wireless tienen características tales como altos niveles de pérdidas, ráfagas de pérdidas de tramas, alta latencia y jitter.

En las redes Wi-Fi originales (802.11 sin QoS) sólo se provee el servicio de mejor esfuerzo [1], es decir, no hay ningún tratamiento especial para los tráficos de las aplicaciones multimedia y de tiempo real, que al ser limitadas en tiempo

D.9)
Jornadas de Intercambio y Difusión de Doctorandos UTN en Ingeniería 2014,
Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Mendoza – nov/2014
Tema:
"MECANISMO DE SINTONIZACIÓN DE PARÁMETROS EDCA EN REDES WI-FI – ALGORITMO MTDA WICC 2012"
Santiago Pérez

Doctorando en Ingeniería: Mg. Ing. Santiago C. Pérez
santiagocp@frm.utn.edu.ar

Director de tesis: Dr. Javier Campos (Universidad de Zaragoza- España)

GRID TICs (Grupo de Investigación y Desarrollo en TICs)
UTN Regional Mendoza
Programa de Electrónica, Informática y Comunicaciones

Título: Mecanismo de Sintonización de Parámetros EDCA en Redes Wi-Fi: Algoritmo MTDA (Algoritmo de Diferenciación de Tráfico Múltiple)

Principales contribuciones:

1) La especificación de un nuevo algoritmo de sintonización que llamamos MTDA que selecciona los parámetros EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) IEEE 802.11e futuros dados los valores actuales y el estado corriente de Wi-Fi, con una inicialización efectiva, de rápida convergencia y diferenciación eficiente de múltiples tráficos wireless (voz, video y de mejor esfuerzo).
2) Las conclusiones experimentales obtenidas del algoritmo MTDA evaluado por simulación utilizando múltiples escenarios sobre la capa física IEEE 802.11a con una velocidad de datos de 36 Mbps, en presencia de ruido de 1.10-4 BER. Se establecen con precisión las mejoras en las métricas de prestaciones y el grado de convergencia del algoritmo para el cumplimiento de las consignas de QoS.
3) La especificación y experimentación de un nuevo tipo de escenario que plantea la evaluación de las métricas cuando se cambia la proporción relativa de los tipos de tráficos en la red. Dentro del escenario se plantearon diferentes situaciones, según la proporción del tipo de estaciones., a saber: - 60 % de estaciones de voz, 20 % de video y 20 % de mejor esfuerzo, - 20 % de estaciones de voz, 60 % de video y 20 % de mejor esfuerzo, - 20 % de estaciones de voz, 20 % de video y 60 % de mejor esfuerzo.
4) La especificación y experimentación de una nueva metodología de análisis cuantitativo para determinar el grado de impacto diferenciado de los parámetros EDCA (AIFSN, CWmin, CWmax y TXOP) para garantizar prioritariamente el rendimiento de voz, obteniendo los rendimientos de video y de mejor esfuerzo máximos posibles.
5) La determinación de los valores de los parámetros EDCA de mejora que aseguran mayores rendimientos y pueden utilizarse para la configuración manual de los mismos en los dispositivos Wi-Fi certificados WMM (Wi-Fi MultiMedia). La Alianza Wi-Fi definió en 2004 los requerimientos fundamentales de la QoS en Wi-Fi a través de su certificación EDCA/WMM, adoptando el estándar IEEE EDCA 802.11e.
6) La demostración de que las características de mecanismo estándar EDCA IEEE 802.11e combinado con un algoritmo de sintonización son apropiadas para soportar todo tipo de tráfico de datos multimedia, de tiempo real y control automático en los ambientes administrativos e industriales de próxima generación.
7) La implementación de variantes del modelo de simulación con HSANs (Hierarchical Stochastic Activity Networks) sobre el simulador Möbius que describe EDCA IEEE 802.11e. A mayor conocimiento del tesista, éste es el primer trabajo que utiliza esta técnica de modelación como herramienta matemática para las contribuciones enumeradas.

D.10)
WICC 2012
Workshop de Investigadores de Ciencias de la Computación 2012
Universidad Nacional de Misiones – Misiones – abril/2012
Tema:
"UN MECANISMO DE SINTONIZACIÓN DE PARÁMETROS EDCA 802.11E: ALGORITMO MTDA“

Santiago Pérez – Higinio Facchini - Luis Bisaro

Un mecanismo de Sintonización de Parámetros EDCA 802.11e: Algoritmo MTDA

Santiago Pérez, Higinio Facchini, Gustavo Mercado, Carlos Taffernaberry, Luis Bisaro
GRID TICs (Grupo UTN de Investigación y Desarrollo en TICs
Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional
Rodriguez 273, Mendoza, Argentina
0261-5244576
{santiagocp, higiniofac, gmercado, carlos_taffe, lbisaro}@frm.utn.edu.ar

Resumen

Las WLAN basadas en IEEE 802.11 se han vuelto las más populares en accesos de banda ancha móvil/wireless a Internet.
Corrientemente, la mayor parte del tráfico transportado por estas redes está compuesto por servicios de internet tradicionales como web browsing, e-mail o transferencia de archivos. Sin embargo, las llamadas se voz sobre Internet (VoIP) y otros servicios de streaming o interactivos como video o juegos en tiempo real, tendrán un importante rol en las redes wireless multiservicio heterogéneas del futuro.
En orden a satisfacer los requerimientos de mayor tráfico y el servicio de aplicaciones nuevas, la tecnología WLAN evoluciona en dos claras direcciones: i) experimentando maximizar la utilización del canal wireless con nuevas especificaciones PHY, usando OFDM, técnicas MIMO, entre otras y ii) mejorando los mecanismos de diferenciación de trafico a nivel MAC, en orden de gestionar apropiadamente los diferentes perfiles de tráfico.
Los Access Points (AP) y tarjetas wireless implementando la EDCA (802.11e Enhanced Distributed Channel Access) están ya comercialmente disponibles bajo la denominación de WMM (Wireless Multimedia). EDCA/WMM provee diferenciación de tráfico clasificando los flujos de tráfico en diferentes Categorías de Acceso (ACs), donde cada AC tiene sus propios parámetros MAC.
Más recientemente, han surgido propuestas con el objeto de seleccionar dinámicamente los parámetros MAC óptimos que permitan mejores resultados de performance.
Un algoritmo de sintonización de parámetros MAC es la función f(.) que selecciona los parámetros MAC futuros dados los valores actuales y el estado corriente de la WLAN.
El objeto del trabajo es proponer y experimentar por simulación un algoritmo de sintonización, que llamaremos MTDA (Algoritmo de Diferenciación de Tráfico Múltiple) que introduzca importantes mejoras a los antecedentes, como su funcionamiento en escenarios más realistas, una inicialización efectiva y de rápida convergencia, y la diferenciación eficiente de múltiples tráficos wireless (voz, video y de mejor esfuerzo con distribución Pareto).
Palabras claves: sintonización, EDCA, 802.11e, Pareto,

Contexto

La línea de investigación está inserta en el proyecto PID “Modelación del rendimiento de WLAN con diferentes tipos de nodos de nodos usando Redes de Petri”, en el ámbito del Grupo UTN GRID TICs (GRUPO UTN DE INVESTIGACION Y DESARROLLO EN TICs), del Departamento Ingeniería en Electrónica, de Facultad Regional Mendoza, de la Universidad Tecnológica Nacional, aprobado por el Consejo Directivo con resolución nº 898/2009, y bajo el número UTN1193 de la UTN, número 25/J070 del Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología para el programa de incentivos, y aprobado y financiado por resolución 71/2010 de la Secretaría de Ciencia y Técnica de

Estudio sobre la Distribución de Tráfico Autosimilar de Redes Wireless 802.11

Santiago Pérez, Higinio Facchini, Gustavo Mercado, Luis Bisaro
GRID TICs (Grupo UTN de Investigación y Desarrollo en TICs
Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional
Rodriguez 273, Mendoza, Argentina
0261-5244576
{santiagocp, higiniofac, gmercado, lbisaro}@frm.utn.edu.ar

Resumen

El análisis de colas ha sido y es de enorme utilidad para los diseñadores de redes y analistas de tráfico, a efectos de planificar las capacidades de los elementos de red y predecir su rendimiento. Además, los modelos exactos del tráfico Ethernet y Wireless 802.11 son importantes para modelar las aplicaciones de capa superior y los buffers de memoria de switchs. Estos análisis dependen de la naturaleza Poisson del tráfico de datos. Sin embargo, muchos resultados predichos a partir del análisis de colas difieren significativamente del rendimiento observado en la realidad. Diversos estudios han demostrado que para algunos entornos el patrón de tráfico es autosimilar, en lugar de Poisson. Este concepto está relacionado con otros más conocidos como son los fractales y la teoría del caos. Desde principio de los años 90 se comenzaron a publicar documentos referidos a la autosimilitud del tráfico de Ethernet.

En esta investigación se analizará la distribución intertrama de secuencias de tráfico Wireless 802.11 de contenido diverso. Usando capturas de tráfico Wireless 802.11 realizadas en distinto momento, se analizará la distribución Pareto como posible modelo, y comparará la bondad de ajuste de este posible modelo de distribución, y de las muestras entre sí usando el estadístico Kolmogorov-Smirnov.

Palabras claves: tráfico, autosimilitud, Ethernet, Wireless 802.11, Pareto, bondad de ajuste

Contexto

La línea de investigación está inserta en el proyecto PID "Modelación del rendimiento de WLAN con diferentes tipos de nodos usando Redes de Petri", en el ámbito del Grupo UTN GRID TICs (GRUPO UTN DE INVESTIGACION Y DESARROLLO EN TICs), del Departamento Ingeniería en Electrónica, de Facultad Regional Mendoza, de la Universidad Tecnológica Nacional, aprobado por el Consejo Directivo con resolución nº 898/2009, y bajo el número UTN1193 de la UTN, número 25/J070 del Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología para el programa de incentivos, y aprobado y financiado por resolución 71/2010 de la Secretaría de Ciencia y Técnica de Rectorado de la UTN, desde enero/2010 hasta la fecha.

Introducción

Para que las redes de comunicaciones puedan proveer un espectro creciente de servicios requiere técnicas eficientes de análisis, monitoreo, evaluación y diseño de las mismas. El análisis es tradicionalmente encarado de forma incompleta, y siempre, con crecientes demandas de los usuarios e incertidumbre acerca de la evolución de los sistemas de red. Por ello, para cumplir los requerimientos de los usuarios y para proveer garantías sobre la confiabilidad y adaptabilidad, deben desarrollarse modelos de sistemas que puedan capturar las características de la carga de red real y conducir a predicciones precisas de

APENDICE E

DIRECCIÓN DE PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN NACIONALES E INTERNACIONALES

D.1)
Director del Proyecto en red Internacional, n° 27-54-084/14, de la Subsecretaría de Gestión y Coordinación de Políticas Universitarias del Ministerio de Educación de la Nación, Resolución de la SPU n° 207/13, y la Resolución n° 144/2014 de la UTN
Tema:
"MECANISMOS DE MEJORA DEL RENDIMIENTO y QoS EN REDES WI-FI"

Subsecretaría de Gestión
y Coordinación de Políticas Universitarias

Proyecto "Mecanismos de Mejora del Rendimiento y Calidad de Servicio en Redes Wi-Fi"

Datos Básicos

Institución Convocante	UTN - Facultad Regional Mendoza
Línea	Fortalecimiento de Redes VII
Tema	Ciencias aplicadas, Ingeniería y Arquitectura
Número de Proyecto	27 - 54 - 084
Título del Proyecto	Mecanismos de Mejora del Rendimiento y Calidad de Servicio en Redes Wi-Fi

Datos del Director

Nombre	Perez, Santiago Cristobal
Tipo y Número de Documento	DNI 14.065.374
Código de Área (Tel.)	0261
Teléfono Institucional	5244576
Código de Área (Cel.)	0261
Celular	156540925
Correo Electrónico	santiagocp@frm.utn.edu.ar
Correo Personal	santiagocperez@yahoo.com.ar
Cargo / Máxima Categoría Docente	Profesor Asociado
¿En qué Universidad tiene dicho cargo?	UTN - Facultad Regional Mendoza

Instituciones Participantes

Tipo Institución	Institución Universitaria Argentina
Nombre Institución	Universidad de Mendoza
País	Argentina
Provincia (*)	Mendoza

Tipo Institución	Institución Universitaria Extranjera
Nombre Institución	Universidad de Zaragoza
País	España

Financiamientos

Universidad de Mendoza

Rubro	SPU	Contraparte	Subtotal	% Fondo SPU
Producción y Edición de Materiales	0,00	0,00	0,00	0,00 %
Otros	0,00	0,00	0,00	0,00 %
Movilidad.	20.000,00	4.000,00	24.000,00	100,00 %
Total	**20.000,00**	**4.000,00**	**24.000,00**	

UTN - Facultad Regional Mendoza

Rubro	SPU	Contraparte	Subtotal	% Fondo SPU
Movilidad.	20.000,00	4.000,00	24.000,00	100,00 %
Producción y Edición de Materiales	0,00	0,00	0,00	0,00 %
Otros	0,00	0,00	0,00	0,00 %
Total	**20.000,00**	**4.000,00**	**24.000,00**	

D.2)
Director del Proyecto en red Internacional, n° 35-83-038/15, de la Subsecretaría de Gestión y Coordinación de Políticas Universitarias del Ministerio de Educación de la Nación.
Tema:
"MECANISMOS DE MEJORA DEL RENDIMIENTO y QoS EN REDES WI-FI – FASE II"

Proyecto "Mecanismos de Mejora del Rendimiento y Calidad de Servicio en Redes Wi-Fi - Fase II"

Datos Básicos

Institución Convocante	UTN - Facultad Regional Mendoza
Línea	Fortalecimiento de Redes 8
Tema	Desarrollo y tecnología
Número de Proyecto	35 - 83 - 038
Título del Proyecto	Mecanismos de Mejora del Rendimiento y Calidad de Servicio en Redes Wi-Fi - Fase II

Datos del Director

Nombre	Perez, Santiago Cristobal
Tipo y Número de Documento	DNI 14.065.374
Código de Área (Tel.)	0261
Teléfono Institucional	5244576
Código de Área (Cel.)	0261
Celular	156540925
Correo Electrónico	santiagocp@frm.utn.edu.ar
Correo Personal	santiagocperez@gmail.com
Cargo / Máxima Categoría Docente	Docente Investigador - Profesor Asociado
¿En qué Universidad tiene dicho cargo?	UTN - Facultad Regional Mendoza

Instituciones Participantes

Tipo Institución	Institución Universitaria Extranjera
Nombre Institución	Universidad de Zaragoza
País	España

Tipo Institución	Institución Universitaria Argentina
Nombre Institución	Universidad Nacional de Chilecito
País	Argentina
Provincia (*)	La Rioja

Financiamientos

Universidad Nacional de Chilecito

Rubro	SPU	Contraparte	Subtotal	% Fondo SPU
Otros	0,00	0,00	0,00	0,00 %
Movilidad.	15.000,00	0,00	15.000,00	100,00 %
Producción y Edición de Materiales	0,00	3.000,00	3.000,00	0,00 %
Total	**15.000,00**	**3.000,00**	**18.000,00**	

UTN - Facultad Regional Mendoza

Rubro	SPU	Contraparte	Subtotal	% Fondo SPU
Otros	0,00	0,00	0,00	0,00 %
Movilidad.	40.000,00	0,00	40.000,00	100,00 %
Producción y Edición de Materiales	0,00	8.000,00	8.000,00	0,00 %
Total	**40.000,00**	**8.000,00**	**48.000,00**	

D.3)
Director del proyecto PID Consolidado identificado con el n° EIUTIME1755 de la UTN y n° 25/J089 del Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología, y aprobado por resolución n° 61/2013 de la Secretaría SECyT UTN, desde enero/2013 hasta dic/2014.
Tema:
"ALGORITMO DE SINTONIZACIÓN PARA LA OPTIMIZACIÓN DE RENDIMIENTO DEL ESTÁNDAR IEEE 802.11E EDCA EN REDES WI-FI – ALGORITMO MTDA"

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
Secretaría de Ciencia y Tecnología
Formulario PID – Versión 8.0

Consulte la Guía para la confección del formulario PID – Versión 8.0 para determinar el significado de los superíndices

1. IDENTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Código (reservado para la SeCyT)	

1.1 Datos generales del proyecto.

- Denominación (límite de 150 caracteres)[1]

Algoritmo de Sintonización para la Optimizacion de Rendimiento del Estándar IEEE 802.11e EDCA en redes WI-FI- Algoritmo MTDA

- Denominación abreviada. [2]

ALGO_SINTO-Algoritmo de Sintonizacion de Parametros EDCA

• Facultad Regional, Regional Académica u otra Institución del Director.	Facultad Regional Mendoza
• Facultades Regionales o Regionales Académicas u otras Instituciones de los restantes integrantes.	Facultad de Ingeniería
• Lugar/es de Trabajo. [3]	GRID TICs - Grupo UTN de Investigación y Desarrollo en TICs
• Tipo de Proyecto. [4]	UTN (PID UTN) C/INC. PROG. INCEN.

- Características del Proyecto.

Característica	Código	Descripción
Tipo de Actividad [5]		Investigación Aplicada
Especialidad [6]		1803 Comunicaciones 1899 Redes de Datos
Campo de Aplicación [7]		889 Redes de Datos y Comunicacione/
Programa [8]		Electrónica, Informática y Comunicaciones

- Palabras Clave. [9]

Algoritmo de Tuning	Análisis	WLAN 802.11e EDCA
Optimizacion Wi-Fi	Tráfico	

D.4)
Director del proyecto PID Consolidado identificado con el n° UTN1193 de la UTN y n° 25/J070 del Ministerio de Educación, Ciencia y Tecnología, y aprobado por resolución n° 71/2013 de la Secretaría SECyT UTN, desde enero/2010 hasta dic/2011.
Tema:
"MODELACIÓN DEL RENDIMIENTO DE WIRELESS LAN AD HOC CON DIFERENTES TIPOS DE NODOS USANDO REDES DE PETRI"

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL
Secretaría de Ciencia y Tecnología
Formulario PID – Versión 8.0

Consulte la Guía para la confección del formulario PID – Versión 8.0 para determinar el significado de los superíndices

1. IDENTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Código (reservado para la SeCyT)	

1.1 Datos generales del proyecto.

- Denominación (límite de 150 caracteres)[1]

Modelación del rendimiento de wireless LAN Ad Hoc con diferentes tipos de nodos usando Redes de Petri

- Denominación abreviada. [2]

Modelación de WLAN Ad Hoc con Redes de Petri

• Facultad Regional, Regional Académica u otra Institución del Director.	Regional Mendoza
• Facultades Regionales o Regionales Académicas u otras Instituciones de los restantes integrantes.	
• Lugar/es de Trabajo. [3]	GRID TICs - Grupo UTN de Investigación y Desarrollo en TICs
• Tipo de Proyecto. [4]	UTN (PID UTN) C/INC. PROG. INCEN.

- Características del Proyecto.

Característica	Código	Descripción
Tipo de Actividad [5]		Investigación Aplicada
Especialidad [6]		1803 Comunicaciones 1899 Redes de Datos
Campo de Aplicación [7]		889 Redes de Datos y Comunicacione/
Programa [8]		Electrónica, Informática y Comunicaciones

- Palabras Clave. [9]

Nodos wireless	Modelación	Redes de Petri
Performance	Simulación	WLAN