



**Universidad Nacional Autónoma de México
Posgrado en Ciencia e Ingeniería de la Computación**

**MODELADO PARA LA PLANEACIÓN EN REDES INALÁMBRICAS
DE BANDA ANCHA TIPO MESH CON CALIDAD DE SERVICIO
BASADO EN UN ESQUEMA TDMA**

T E S I S

**Que para optar por el grado de:
DOCTORA EN INGENIERÍA (COMPUTACIÓN)**

PRESENTA:

M. I. Yasmine Macedo Reza

TUTOR:

**Dr. Víctor Rangel Licea
Facultad de Ingeniería**

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., Diciembre, 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicatoria

A mi familia y amigos:

A mis hijos Sara Yarezi y Ricardo Aarón, que desde su inocencia han apoyado y han sido el motor para que este trabajo haya llegado a su fin.

A mi esposo Efrén Arturo por ser mi compañero de vida, por ir evolucionando y creciendo juntos.

A mis papás que fueron el pilar en mi vida. A mi papá Damián Macedo por su todo el amor y apoyo por ser mi mejor maestro. A mi mamá Bernardina Reza por darme la fuerza, el amor y soporte, y que a pesar de que trascendieron en materia, siempre han sido y serán parte de mí.

A mis hermanas: Olivia, Belinda, Deyanira, Anita y Betzayda, porque han sido mi gran ejemplo de amistad y de incondicionalidad. A mis sobrinos por ser el corazón de la familia.

A mis amigos de hoy y siempre, los que lo fueron por un tiempo, los que siguen siendo les doy gracias infinitas por contar con ustedes.

A todos ellos, por alegrarme la existencia y ser parte de mi vida.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México por impulsar mi desarrollo profesional y humano.

Al Posgrado en Ciencia e Ingeniería de la Computación del Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas, a su personal por su apoyo.

Al Dr. Víctor Rangel por apoyarme a través de todo este tiempo.

A la Dirección General de Bibliotecas por el apoyo para que me brindó para concluir este trabajo.

Al CONACYT por la beca otorgada durante los estudios. Y el apoyo dentro del proyecto CONACYT 105279 "Diseño de técnicas de reservación de capacidad de redes BWA móviles".

A DGAPA por el apoyo recibido, por parte de los proyectos de investigación PAPIIT IN104907 "Diseño de técnicas de mejoramiento de capacidad en redes inalámbricas de banda ancha tipo Mesh" y IN108910 "Diseño de algoritmos de reservación de capa cruzada en redes móviles y mesh de banda ancha".

A mis sinodales de siempre, Dr. Javier Gómez, Dr. Héctor Benítez, Dr. Jorge Luis Ortega y Dra. Ma. Elena Lárraga, gracias por su tiempo y su apoyo.

Índice General

CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
1.3 HIPÓTESIS	7
1.4 OBJETIVOS.....	8
1.5 METODOLOGÍA.....	8
1.6 CONTRIBUCIÓN Y RELEVANCIA	9
1.7 ESTRUCTURA DE LA TESIS	10
CAPÍTULO 2.....	13
CONCEPTOS FUNDAMENTALES Y ESTADO DEL ARTE.....	13
2.1 INTRODUCCIÓN	13
2.2 CONCEPTOS FUNDAMENTALES.....	14
2.2.1 <i>Modulación digital</i>	14
2.2.2 <i>OFDM</i>	16
2.3 SISTEMAS DE BANDA ANCHA.....	17
2.4 SISTEMAS WIMAX	17
2.4.1 <i>Sistemas Pre-Wimax</i>	18
2.4.2 <i>Estándar IEEE 802.16 (WiMAX)</i>	18
2.5 TDMA.....	19
2.5.1 <i>Principios de Funcionamiento de TDMA</i>	20
2.6 QoS EN WIMAX.....	21
2.6.1 <i>UGS</i>	21
2.6.2 <i>rtPS</i>	22
2.6.3 <i>nrtPS</i>	22

2.6.4	BE.....	22
2.6.5	Extended rtPS.....	23
2.7	ESTADO DEL ARTE.....	23
2.7.1	Optimización de retardos, considerando el algoritmo de elección de tiempos.....	23
2.7.2	Planeación centralizada.....	24
2.7.3	Planeación distribuida.....	25
2.8	CONCLUSIONES.....	28
CAPÍTULO 3	29
SINCRONIZACIÓN Y PLANIFICACIÓN EN REDES DE BANDA ANCHA IEEE802.16 CON TOPOLOGÍA MESH.....		29
3.1	INTRODUCCIÓN.....	29
3.2	ESTRUCTURA DE LA CAPA MAC.....	30
3.2.1	Mensajes de control de red.....	31
3.2.2	Mensajes de control de planificación.....	32
3.3	INICIALIZACIÓN Y SINCRONIZACIÓN DE UNA RED MESH IEEE802.16.....	32
3.3.1	Algoritmo de elección de tiempos.....	35
3.4	PLANEACIÓN.....	37
3.4.1	Planeación centralizada.....	38
3.4.2	Planeación distribuida para redes mesh.....	38
3.4.3	Planeación distribuida coordinada.....	41
3.4.4	Planeación distribuida no coordinada.....	42
3.5	CONCLUSIONES.....	43
CAPÍTULO 4	45
DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN.....		45
4.1	INTRODUCCIÓN.....	45
4.2	MODELO DE SIMULACIÓN.....	46
4.3	CAPA FÍSICA.....	50
4.4	CAPA MAC.....	52
4.4.1	Modelado de la inicialización y registro.....	53
4.4.2	Integración al modelo de control para la planificación de envío de datos.....	58
4.5	MODELADO Y GENERACIÓN DE TRÁFICO.....	62
4.6	CONCLUSIONES.....	63
CAPÍTULO 5	65
INICIALIZACIÓN Y REGISTRO.....		65
5.1	INTRODUCCIÓN.....	65
5.2	SINCRONIZACIÓN.....	66
5.3	PROPUESTA PARA CONTROL DE PLANEACIÓN EN LA INICIALIZACIÓN.....	69
5.4	EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LA PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN EN LA INICIALIZACIÓN.....	75
5.5	CONCLUSIONES.....	79
CAPÍTULO 6	81

IMPLEMENTACIÓN DE PLANEACIÓN PARA SOPORTE DE VOIP	81
6.1 INTRODUCCIÓN.....	81
6.1.1 Topología	82
6.1.2 Establecimiento de vecindades extendidas.....	83
6.1.3 Características del canal	84
6.1.4 Modelado de tráfico	86
6.2 PLANEACIÓN DISTRIBUIDA COORDINADA	87
6.2.1 Reservación para envío de datos a 3- vías.....	88
6.2.2 Planeación distribuida coordinada con reservación de flujos.....	92
6.3 PROPUESTA PARA EL ESTABLECIMIENTO DE FLUJOS PARA VOIP BAJO DEMANDA, PARA LA CONSERVACIÓN DE QoS	96
6.3.1 Establecimiento de flujos	96
6.3.2 Administrador DSCH	98
6.3.3 Mecanismo de planeación de tiempos para establecimiento de flujos bajo demanda	99
6.4 ESTUDIO DE COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE VOIP EN REDES MESH	101
6.4.1 Evaluación de desempeño para la planificación utilizando el sistema distribuido de 3 vías	102
6.4.2 Evaluación de desempeño para el establecimiento de flujos bajo demanda	104
6.5 CONCLUSIONES.....	113
CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	115
PUBLICACIONES	119
BIBLIOGRAFÍA	121
LISTA DE ACRÓNIMOS.....	125

Índice de figuras

FIGURA 1.1 DESASTRES NATURALES.	5
FIGURA 1.2 COMUNICACIÓN UTILIZANDO TOPOLOGÍA MESH.	7
FIGURA 2.1 PRINCIPIO DE MODULACIÓN DIGITAL.	14
FIGURA 2.2 CONSTELACIÓN BPSK.	15
FIGURA 2.3 EJEMPLO DE CONSTELACIÓN PARA MODULACIONES QPSK Y 64- QAM.	16
FIGURA 3.1 ESTRUCTURA DE MULTIFRAME MESH.	30
FIGURA 3.2 FORMATO MENSAJES MSH-NENT.	32
FIGURA 3.3 FORMATO DE MENSAJES MSH-NCFG.	33
FIGURA 3.4 INTERCAMBIO DE MENSAJES DE INICIALIZACIÓN.	34
FIGURA 3.5 ESTRUCTURA DE TXOPS EN UN MULTIFRAME MESH.	37
FIGURA 3.6. ESTRUCTURA DE MULTIFRAME MESH PARA PLANEACIÓN DISTRIBUIDA.	38
FIGURA 3.7 PAQUETE DSCH.	40
FIGURA 3.8 MENSAJES DE SEÑALIZACIÓN PARA RESERVACIÓN DE TIEMPO DE TRANSMISIÓN.	42
FIGURA 4.1. MODELO DE SIMULACIÓN.	47
FIGURA 4.2 ESTADOS PROGRAMABLES DEL MODELO DE PROCESOS.	48
FIGURA 4.3 EJEMPLO DE TRANSICIÓN EN EL MODELO DE PROCESOS.	49
FIGURA 4.4 PIPELINE DEL <i>RADIO LINK</i>	50
FIGURA 4.5 COBERTURA ENTRE LOS NODOS.	52
FIGURA 4.6 MODELO DE PROCESOS DE ESTADOS FINITOS EN MBS.	53
FIGURA 4.7 MODELOS DE PROCESOS DE ESTADOS FINITOS EN MSS.	55
FIGURA 4.8 DIAGRAMA DEL MODELO DE RED.	57
FIGURA 4.9 DIAGRAMA DE PROCESOS PARA LA MBS PARA PLANEACIÓN DE 3 VÍAS.	58
FIGURA 4.10 DIAGRAMA DE ESTADOS DEFINIENDO EL COMPORTAMIENTO POR NODO.	59
FIGURA 4.11 DIAGRAMA DE PROCESOS PARA LA MSS.	61
FIGURA 4.12 MODELO DE RED.	61
FIGURA 4.13 GENERACIÓN DE TRÁFICO.	62
FIGURA 5.1 ENVÍO DE SEÑALIZACIÓN EN EL PROCESO DE INICIALIZACIÓN.	68
FIGURA 5.2 ESTRUCTURA DE LA TRAMA PARA EL ENVÍO DE MENSAJES MSH-NENT.	71

FIGURA 5.3 RETARDO DE RECUPERACIÓN DE LA RED, UTILIZANDO PROGRAMA C++ Y MODELO DE SIMULACIÓN CON NENT TXOPS =4, XHE = 0.	75
FIGURA 5.4 RETARDO DE RECUPERACIÓN UTILIZANDO EL MODELO DE SIMULACIÓN CON EL MECANISMO POR DEFAULT Y LA ESTRUCTURA DE FRAMES PROPUESTA CON XHE = 0.	76
FIGURA 5.5 RETARDO ENTRE TIEMPO DE ENVÍO PARA MENSAJES NCFG, CON NENT TXOPS = 4, L=10.	78
FIGURA 5.6 RETARDO DE RECUPERACIÓN UTILIZANDO EL MODELO DE SIMULACIÓN CON LA ESTRUCTURA DE FRAMES PROPUESTA.	79
FIGURA 6.1 TOPOLOGÍA UTILIZADA DE 5X5.	82
FIGURA 6.2. VECINDAD EXTENDIDA Y ESTABLECIMIENTOS DE VENTANAS DE ELECCIÓN.	83
FIGURA 6.3. DIVISIÓN DEL CANAL POR SÍMBOLOS OFDM.	86
FIGURA 6.4 ENCAPSULAMIENTO DEL MENSAJE VOIP DESDE LA CAPA DE APLICACIÓN HASTA LA CAPA FÍSICA.	87
FIGURA 6.5 RUTAS PARA EL ENVÍO DE DIFERENTE TIPO DE TRÁFICO, CON RESERVACIÓN DE 3-VÍAS.	89
FIGURA 6.6 PROGRAMACIÓN DE TIEMPO PARA EL ENVÍO DEL PAQUETE DSCH:REQUEST.	89
FIGURA 6.7 ENVÍO DE DSCH:GRANT MÚLTIPLE EN EL NODO 1006.	90
FIGURA 6.8 RECEPCIÓN DEL DSCH:REQUEST.	91
FIGURA 6.9 ALGORITMO DE SELECCIÓN Y ENVÍO DE PAQUETE DSCH: GRANT.	91
FIGURA 6.10 RECIBIENDO Y REDIRECCIONANDO DATOS.	92
FIGURA 6.11 CRECIMIENTO DE VECINDAD EXTENDIDA.	93
FIGURA 6.12 INTEGRACIÓN DEL MENSAJE DE TRES VÍAS CON LA PLANIFICACIÓN	94
FIGURA 6.13 EJEMPLO DE RUTAS ALEATORIAS.	95
FIGURA 6.14 MUESTRA DE ALGUNOS MAPAS RESULTANTES.	96
FIGURA 6.15 ENVÍO DE SEÑALIZACIÓN PARA LA RESERVACIÓN/ CONCESIÓN DE SLOTS.	97
FIGURA 6.16 ESTABLECIMIENTO DE UN FLUJO BAJO DEMANDA.	100
FIGURA 6.17 OBTENCIÓN DE TIEMPOS Y ENVÍO DE DATOS EN CADA FLUJO.	101
FIGURA 6.18 RETARDO E2E PARA MECANISMO DE 3 VÍAS SIN ESTABLECIMIENTO DE FLUJO.	102
FIGURA 6.19 THROUGHPUT PARA EL ESCENARIO DE 3 VÍAS, CON 6 RUTAS.	103
FIGURA 6.20 UTILIZACIÓN POR NODO PARA CANALES SATURADOS.	106
FIGURA 6.21 PORCENTAJES DE UTILIZACIÓN DIRECTA.	109
FIGURA 6.22 PORCENTAJE UTILIZADO PARA TRANSMISIONES DIRECTAS, RETRANSMISIONES Y TOTAL.	109
FIGURA 6.23 RETARDO E2E DURANTE LA SATURACIÓN DEL CANAL, EN RUTAS DE 1 SALTO.	110
FIGURA 6.24 RETARDO E2E DURANTE LA SATURACIÓN DEL CANAL.	111
FIGURA 6.25 THROUGHPUT PARA LLAMADAS BIDIRECCIONALES DE 1 SALTO.	112
FIGURA 6.26 THROUGHPUT VS UTILIZACIÓN PARA LLAMADAS DE 4 SALTOS.	112

Índice de tablas

TABLA 2.1 POSIBLES VALORES DE FASE PARA LA MODULACIÓN QPSK.....	15
TABLA 3.1 ALGORITMO DE ELECCIÓN DE TIEMPOS.	36
TABLA 4.1 DEFINICIÓN DE TRANSICIONES EN EL <i>HEADER</i> DEL MODELO DE PROCESOS.....	49
TABLA 4.2 PARÁMETROS <i>ERCEG</i> DEL MODELO DE PROPAGACIÓN.	51
TABLA 4.3 PARÁMETROS DE SIMULACIÓN.....	52
TABLA 4.4 FUNCIONALIDAD DE CADA PROCESO EN LA MBS PARA LA INICIALIZACIÓN.....	55
TABLA 4.5 FUNCIONALIDAD IMPLEMENTADA EN MSSS.	57
TABLA 4.6 FUNCIONALIDAD PARA EL MANEJO DE MENSAJES DSCH EN MBS.	59
TABLA 4.7 FUNCIONALIDAD PARA EL MANEJO DE MENSAJES DSCH EN MBS.	60
TABLA 4.8 FUNCIONALIDAD PARA EL MANEJO DE ENVÍO DE DATOS.	61
TABLA 4.9 GENERACIÓN DE TRÁFICO PARA 3-VÍAS.....	62
TABLA 5.1. PARÁMETROS DE CONTROL DE SEÑALIZACIÓN PARA LA INICIALIZACIÓN.....	70
TABLA 5.2. UTILIZACIÓN DEL CANAL “I” PARA MENSAJES NENT.	72
TABLA 5.3 FACTOR DE MUESTREO “N” POR BW.	72
TABLA 5.4 CODIFICACIÓN DEL CANAL POR MODULACIÓN.	73
TABLA 6.1 VALORES UTILIZADOS EN LA CONFIGURACIÓN DEL CANAL.	84
TABLA 6.2 OPERACIONES PARA EL CÁLCULO DE LA INFORMACIÓN DE LOS SÍMBOLOS.....	85
TABLA 6.3 CANTIDAD DE <i>DATARATE</i> DESTINADO PARA CONTROL Y PARA ENVÍO DE TRÁFICO.	85
TABLA 6.4 ESTADOS <i>SLOTS</i>	93
TABLA 6.5 PAQUETES DSCH.....	98
TABLA 6.6 EJEMPLO DE ESTABLECIMIENTO DE FLUJO, RANGO DE SLOTS RESERVADOS POR NODO EN LA RUTA.	104

Resumen

Las redes inalámbricas de banda ancha han surgido como respuesta a la demanda cada vez más alta de recursos en la comunicación entre usuarios, debido al gran auge de Internet y en general de las comunicaciones digitales.

WiMAX es considerada la primera propuesta de tecnología de banda ancha para solucionar esta demanda, considerada como 4G. Esta tecnología funciona en dos modalidades, PMP y *mesh* o malla, en esta tesis doctoral se ha estudiado el modo *mesh*, ya que permite extender la comunicación de la red en grandes áreas de terreno.

En el estándar 802.16-2004, donde se define este funcionamiento no se propone mecanismo para repartir el medio, en esta tesis se propone una optimización de los tiempos de inicialización y un mecanismo de planeación para la conservación de calidad de servicio (QoS), bajo el esquema TDMA. Este esquema de división de tiempo, ha sido considerado para trabajar en 5G, en redes *mesh*, que es la tecnología emergente, ya que conserva las ventajas de cubrir un área de territorio extensa, al tener comunicación con todos los nodos de la red, a través de los nodos intermedios.

El objetivo principal es que la red sea funcional inmediatamente después, en caso de sufrir alguna interrupción del servicio, o de poner en práctica un plan de contingencia, haciendo

despliegue de los nodos a través de una superficie que ha sufrido un desastre natural, aumentando la resiliencia en las comunicaciones, ya que el tiempo para la señalización de inicio y la habilitación de la red para el envío de paquetes, se vuelve no significativo.

Aunado a lo anterior y para completar el plan de contingencia, se propone habilitar las llamadas de voz, por medio de la utilización de planeación distribuida bajo demanda para establecer llamadas bidireccionales para VoIP, utilizando el códec G723.1.

Con esta propuesta se garantiza QoS para este servicio de Voz y establece comunicación bajo demanda entre un considerable número de nodos, aun cuando están físicamente a kilómetros uno de otro. Este mecanismo no solo puede ser útil para redes WiMAX, sino para cualquier tipo de redes *mesh* que trabaje bajo el esquema TDMA.

Capítulo 1

Introducción

1.1 Antecedentes

Actualmente existe una creciente demanda del servicio de red por una cantidad enorme de usuarios, este fenómeno ha generado que una gran gama de tecnologías apoye el crecimiento y expansión del mundo de las telecomunicaciones. Al existir un crecimiento muy importante en el número de peticiones de servicio y tráfico de información, se requieren tecnologías que puedan cubrir dichos requerimientos eficientemente.

La principal motivación para basarse en los sistemas inalámbricos de banda ancha, es minimizar las desventajas de los sistemas actuales de comunicaciones, los principales son la infraestructura y el uso de proveedores de Internet.

Las redes inalámbricas *mesh* han emergido en la última década como una tecnología clave en el desarrollo de las redes inalámbricas, ya que entre sus principales características están

la auto-organización, el reuso espacial y tolerancia a fallos; además de proporcionar una forma rentable de interconectar puntos de acceso inalámbricos en una gran área geográfica hacia Internet o creando comunicaciones privadas y aisladas. Los puntos de acceso son utilizados por las terminales inalámbricas como su conexión con el exterior, llevando la comunicación a las siguientes terminales fuera del alcance del punto de acceso. Además de permitir que las terminales accedan a la red, cada estación suscriptora también actúa como un enrutador *mesh* y reenvía los paquetes de datos.

Para que esto sea posible es necesario contar con un protocolo de planeación y enrutamiento que permita transmitir la información hasta su destino, con el mínimo número de saltos o con una cantidad lo suficientemente pequeña de enlaces.

El estándar creado por la IEEE para los sistemas de banda ancha es el 802.16 [1], (conocido mundialmente como la tecnología *WiMAX-Worldwide Interoperability for Microwave Access*), ha sido considerado como una tecnología complementaria para el aprovisionamiento de los servicios digitales de la cuarta generación (4G), y su elemento con mejor resultados ha sido precisamente en su configuración *mesh*. No solamente en el hogar, sino también en las escuelas, hospitales, aeropuertos, gobierno, industrias, oficinas, centros de investigación, y sobre todo cuando existe la necesidad de trasladarse de un lugar a otro y disponer de una gran cobertura y alta capacidad de transmisión; sin importar la hora, el lugar, el tipo de movilidad, ni el tiempo de conexión. Aún más, para el Internet de las Cosas que permita hacer una comunicación local, para la administración de los dispositivos que formen esta red.

Este estándar IEEE802.16 está habilitado para funcionar de dos modos distintos: PMP (Punto multipunto, *Point to Multipoint*) y *mesh*. Las redes inalámbricas con topología *mesh* (*WMNs*, Redes inalámbricas con topología de malla, *Wireless Mesh Networks*), como se ha mencionado han tomado relevancia como arquitectura para futuras generaciones de los sistemas de comunicaciones. Sus aplicaciones son de alta relevancia ya que son la solución ideal para extensiones muy amplias de terreno. Por ejemplo, la afectación ocasionada por un desastre natural en una gran extensión geográfica, áreas rurales o despobladas en general, o en donde existe alguna necesidad de comunicación en grupo de manera privada como pueden

ser campamentos militares. También en aplicaciones donde sólo un punto sea el que distribuya el acceso a Internet, como pueden ser escuelas de educación básica o media básica que existen en comunidades no urbanizadas o el Internet de las cosas.

El modo *mesh* en IEEE802.16 únicamente soporta TDD (Duplexación por División de Tiempo, *Time Division Duplex*) para la transmisión. Las estaciones subscriptoras tienen que compartir y competir por el uso del canal de radio común, utilizando TDMA (Acceso Múltiple por División de Tiempo, *Time Division Multiple Access*).

En este trabajo se va a utilizar el protocolo de 4G IEEE802.16 para modelar el comportamiento del tráfico, ya existen propuestas de un planificador para *mesh*-TDMA para 5G pero aún se encuentra en debate las tecnologías que se van a utilizar, para esta nueva generación apenas emergente [2]. Y aunque está en proceso de desarrollo promete ser una tecnología que utilice MIMO (Múltiples Entradas Múltiples Salidas, *Multiple Input Multiple Output*) masivamente. El modo *mesh* soporta dos tipos de planeaciones:

- 1) Centralizada, donde un nodo trabaja como estación base y determina los tiempos de transmisión.
- 2) Distribuida, la cual se divide a su vez en dos, distribuida coordinada y no-coordinada; en la primera los *frames* de datos son asignados de acuerdo a un protocolo de negociación de tres vías *request-grant-confirm* entre los nodos, mientras que, en la segunda se aprovechan los espacios en la planificación local de cada nodo, pero existe el riesgo de colisión en los mensajes.

En la planeación coordinada, cada nodo compite por el acceso al canal utilizando el algoritmo de selección pseudo-aleatorio, el cual se basa en la información de los vecinos a dos saltos. Mientras que, la planeación no-coordinada, la planeación es realizada mediante peticiones y reservaciones directas entre dos nodos, los nodos responden a una petición, esperando un número suficiente de *minislots* indicados en el campo *Availabilities*, que forma parte del *frame*.

Para obtener una comunicación oportuna, el principal problema es respetar los diferentes tipos de QoS, (Calidad de Servicio, *Quality of Service*) con la finalidad de poder establecer comunicación efectiva, ya sea de voz sobre IP (Protocolo Internet, *Internet Protocol*), correo o vía HTTP (Protocolo de transferencia de hipertexto, *Hypertext Transfer Protocol*). Para lograr lo anterior se necesita un mecanismo para repartir los tiempos de transmisión, y de esta manera se cumplan las características que requiere cada servicio.

El estándar IEE802.16 define 5 tipos de QoS, para distintos tipos de aplicaciones:

- UGS (Servicio Garantizado sin Solicitud, *Unsolicited Grant Service*) soporta aplicaciones en tiempo real, como las líneas privadas T1/E1 y CBR (Tráfico de Tasa de Bits constante, *Constant Bit Rate*), se provee de recursos sin solicitarlo y de forma regular.
- rtPS (Servicio de Propuesta en Tiempo Real, *Real Time Polling Service*) soporta aplicaciones de tiempo real bajo el envío de una solicitud, en cuyo caso el planificador debe respetar ciertas restricciones de tiempo, para tráfico de VBR (Tasa de Bits Variable, *Variable Bit Rate*).
- nrtPS (Servicio de Propuesta no en Tiempo Real, *non-Real Time Polling Service*) es utilizada para aplicaciones que no son de tiempo real, pero que requieren recursos frecuentes asimétricos (Internet).
- BE (Mejor Esfuerzo, *Best Effort*) donde se transmite tráfico de Internet y que no necesita ningún tipo de garantía.
- *Extended rtPS* (*rtPS* Extendido) incluido en IEEE 802.16e, también se utiliza para tráfico en tiempo real, pero de longitud variable.

No es trivial soportar QoS en un sistema *mesh*, por lo que se han planteado varias propuestas, algunas utilizan el modo centralizado [3] y divide cada tipo de servicio en un nodo virtual para la planificación. En [4] se utiliza una planificación distribuida coordinada en donde la propuesta radica en dividir los *slots* de datos en: *slots* previamente reservados y *slots* para competir, sin embargo cuando hay más demanda de lo reservado, se rechaza el

establecimiento del flujo¹ de datos. En [5] y [6] los autores realizan una descripción completa para las WMNs bajo el estándar IEEE802.16 y proponen una diferenciación en la planeación para soportar QoS basada en los parámetros del algoritmo de selección, que se utiliza en la inicialización para asignar tiempos, específicamente en el exponente que permite variar el tamaño y la frecuencia en que ese nodo competirá por una ventana de recursos posibles. En [7] también utilizan el exponente para hacer una diferenciación del tráfico en diferentes colas y mejorar los retardos.

Existen otros trabajos orientados a la planeación, por ejemplo [8] que se basa en *Deficit Round Robin*, en donde se utiliza las rondas para asignar recursos al igual que un *Round Robin*, pero dan peso a cada nodo dependiendo del tipo de servicio que desee enviar. En este trabajo de tesis utilizamos el algoritmo de la ruta más corta, para establecer la comunicación entre los nodos.

1.2 Planteamiento del problema

Cuando se presenta un desastre natural (figura 1.1, *realizada por Evgenii Naumov*), el tiempo es un factor muy importante para organizar ayuda y/o rescate de personas que podrían ser localizadas con vida, incluso mascotas o fauna local; por lo que un mecanismo para habilitar las comunicaciones de manera rápida y precisa tendría un alto impacto en la re-organización de la población afectada.



Figura 1.1 Desastres Naturales.

¹ Reservación de recursos desde el nodo inicial y a través de recursos de los nodos intermedios de la red *mesh* para que un paquete llegue a su destino.

Lo anterior podría llevarse a cabo desplegando una arquitectura de emergencia que permitiera abarcar un área geográfica afectada de superficie variable, es decir, puede ser un área pequeña o un área extensa, habilitando las comunicaciones donde las antenas celulares y de red inalámbrica no trabajan por daño total o parcial de la infraestructura.

Las comunicaciones de banda ancha con topología *mesh* se adaptan perfectamente para solucionar el problema mencionado, y apoyar la resiliencia² de las comunicaciones; ya que es de bajo costo y se podrían desplegar estaciones suscriptoras por medio de helicóptero o utilizando drones, en este caso se debería tener una forma de comunicación específica entre los nodos para que pudieran comunicarse de diferentes lugares.

En el estándar IEEE802.16e [10] se emplean mecanismos para reducir el uso de consumo de energía, sin embargo, la inicialización como se encuentra actualmente definida consumiría gran parte de la misma; ya que el tiempo se incrementa considerablemente de acuerdo al número de nodos en la red. Por lo que se presenta un mecanismo nuevo en donde se reduce significativamente este tiempo en la planificación de la inicialización. La solución propuesta también es de utilidad en caso de que exista un corte de energía o interrupción del servicio, para habilitar la red sin que el tiempo de inicialización crezca exponencialmente.

Por otro lado, se propone que una vez inicializada la red se realice el cálculo de rutas para tener un sistema de llamadas predefinido con la finalidad de establecer la comunicación entre diferentes puntos de la topología en donde sea vital tener comunicación para atender la contingencia (Figura 1.2), por medio de VoIP (Voz sobre IP, *Voice over IP*) para poder establecer una comunicación.

En este trabajo de tesis doctoral, se optimiza el tiempo para inicializar una red *mesh*; ya que en el caso del estándar IEEE802.16 el tiempo de inicialización es muy elevado debido a que hay pocas oportunidades de transmisión para mensajes que en un inicio saturan la red, de acuerdo a como se plantea el estándar. También se propone un mecanismo de planificación

² Resiliencia: Capacidad de la red para proporcionar y mantener un nivel de servicio aceptable frente a múltiples fallas y desafíos para la operación normal. [9]

distribuido para mantener QoS en una red *mesh* de banda ancha para VoIP, por lo que se adapta a los parámetros definidos en el estándar para UGS. Para ello se realiza un estudio basado en el estándar IEEE802.16 del comportamiento de la comunicación, utilizando el simulador OPNET.

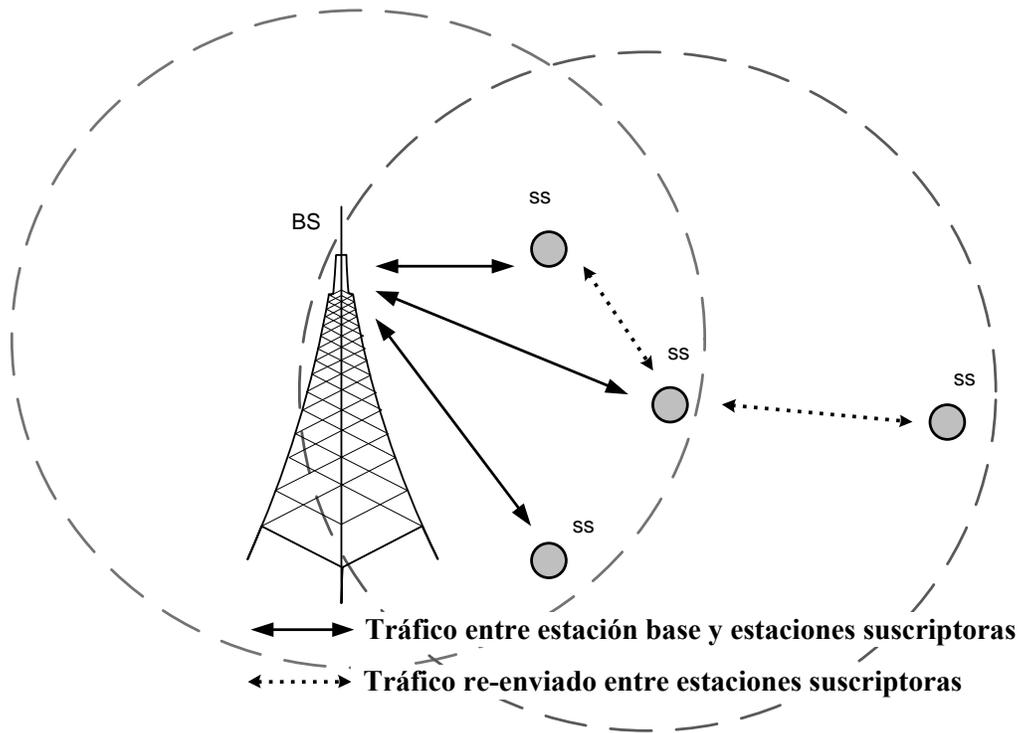


Figura 1.2 Comunicación utilizando topología mesh.

1.3 Hipótesis

Debido a que existen un número mínimo de oportunidades de transmisión para mensajes de entrada a la red, de acuerdo a como se plantea el estándar, el proceso de inicialización de la red *mesh* es costoso en tiempo. Por lo que, si se optimiza el envío de mensajes, el tiempo de respuesta para que la red este funcional decrece significativamente.

Por otro lado, si se utiliza una arquitectura de planeación con asignación de flujos bajo demanda que permita el establecimiento de los mismos para el envío de tráfico con prioridad alta para la red, está se mantiene resiliente. Entonces, es posible cumplir QoS para redes inalámbricas de banda ancha utilizando TDMA con topología *mesh*, y habilitar llamadas por medio de VoIP. Lo que nos da una red funcional y apta para la comunicación en un tiempo optimizado.

1.4 Objetivos

El presente trabajo tiene como objetivo principal proponer una optimización para la inicialización de la red y un mecanismo que soporte QoS para VoIP utilizando redes de banda ancha con topología *mesh*, basadas en TDMA.

Con el fin de alcanzar el objetivo planteado, las metas a alcanzar son las siguientes:

- Optimizar los tiempos de respuesta de la estación base hacia todos los nodos para hacer más eficiente la inicialización de la red.
- Proporcionar un mecanismo de planeación que permita utilizar el medio de forma eficiente y oportuna.
- Identificar el tráfico máximo que se soporta la red *mesh*, en los canales de transmisión de acuerdo a los parámetros modelados.

1.5 Metodología

Para estudiar el comportamiento de la propuesta a realizar, se utiliza el software de simulación OPNET; en el cuál se modela una red que tenga 25 nodos equidistantes y con una cobertura de 1 km cada uno. Para definir el comportamiento en la capa MAC (Control de Acceso al Medio, *Media Access Control*), se programan diferentes estados en PROTO-C para recibir y programar eventos discretos; tales como el envío y la recepción de paquetes, además del cálculo de los tiempos.

Para las posibles rutas, se utiliza el algoritmo de Dijkstra; ya que calcula las rutas más cortas de manera eficiente, utilizando rutas alternas en donde exista disponibilidad y considerando reuso de canales mientras no haya interferencia en la cobertura. Para lo anterior, se utiliza una matriz por nodo que identifica a los nodos en vecindad extendida, es decir, los nodos que podrían hacer interferencia.

Se crean rutas de diferente número de saltos, cada ruta representa una llamada bidireccional; cada nodo calcula las mismas rutas con la información de la vecindad extendida y los mismos parámetros, con la finalidad de validar que se cumplan los parámetros de UGS (QoS para VoIP). Se mide el retardo de la red, así como los paquetes perdidos, la utilización y desempeño. Finalmente, se saturará el canal para definir cuantas llamadas simultáneas soporta la red, y cuántas llamadas soporta que cumplan con los requerimientos.

1.6 Contribución y relevancia

En este trabajo de tesis se obtiene una solución integral para la utilización inmediata del medio en redes *mesh* en cualquier escenario, utilizando TDMA, optimizando el tiempo en que la red pueda estar en funcionamiento total.

En la primera parte del trabajo, se propone optimizar la inicialización de la red *mesh* con la finalidad de que cuando exista una interrupción en la red *mesh*, el tiempo en que se recobre el servicio sea más rápido y eficiente. Con lo que se obtiene una red resiliente, cuando se requiere un levantamiento de los servicios de manera rápida, como se necesitaría en caso de un desastre natural.

En la segunda parte, se plantea como conservar QoS en el protocolo IEEE802.16 para topologías *mesh*, enfocándose en VoIP. Para lo anterior, se propone de un planificador con generación de flujos bajo demanda para repartir el medio. En esta fase también se determina el umbral de soporte de QoS para una red *mesh* de acuerdo al número de nodos, y a los saltos que tiene que realizar un flujo para establecer la comunicación.

La mayoría de estudios e investigaciones sobre planeación en WMNs se enfocan a tecnologías Wi-Fi (802.11), las cual dan una propuesta para soporte parcial de QoS [10]-[15]. El presente trabajo de tesis estudia el comportamiento de establecer QoS en una WMN de banda ancha, en este caso se realiza el estudio sobre tráfico en tiempo real, utilizando el protocolo IEEE802.16. Esta propuesta permite establecer llamadas bidireccionales e indica la planificación que se debe seguir para conservar los parámetros requeridos de acuerdo al tipo de tráfico, y más aún conocer cuál es la capacidad general de la red *mesh*; considerando que existen transmisiones simultáneas y retransmisiones de paquetes que se deben realizar para que cada paquete llegue a su destino.

Esta conservación de QoS es de vital importancia en situaciones de emergencia, en aplicaciones donde la comunicación entre grupos es fundamental y además da la posibilidad de que la comunicación sea privada sin tener que acceder a Internet y sin las limitaciones de PMP. Algunas otras aplicaciones para este tipo de comunicación pueden ser entre estaciones de pozos petroleros o campamentos militares y/o tropas que se desea establecer un circuito privado sin enlaces hacia el exterior, aviones que están dentro de la cobertura de un aeropuerto, escuelas rurales, para acceder a Internet. Además, en menor escala se puede reutilizar este tipo de planificación para establecer una comunicación aplicada a IoT (Internet de las Cosas, *Internet of Things*); ya que se requieren enlaces de mayor capacidad y una comunicación constante. IoT se prevé crecerá exponencialmente en los próximos años demandando una infraestructura robusta, capaz de soportar la gran demanda de tráfico móvil.

1.7 Estructura de la tesis

Para cumplir con los objetivos, el presente trabajo se estructura de la siguiente forma:

En el capítulo 2, se exponen los conceptos fundamentales en cuanto a QoS, modulaciones, una breve descripción del protocolo IEEE802.16 y el estado del arte de trabajos realizados en redes de banda ancha con topología *mesh*, estudios y propuestas que se han realizado para optimización de tiempos, mantener QoS, de planificación centralizada y distribuida.

En el capítulo 3, se describe un entorno general del estándar IEEE802.16 para redes *mesh* y los procesos de comunicación entre los diferentes tipos de nodos, incluyendo el proceso de

sincronización para la inicialización de la red, y para la comunicación para la reservación de recursos que permite llevar a cabo la planeación.

En el capítulo 4, se expone el modelo de simulación propuesto de las redes *mesh*, se realiza un análisis detallado de los módulos, procesos, estados y directivas que determinan el comportamiento de los nodos involucrados, así como el diseño e implementación para que el modelo funcione, el cual está implementando en Proto-C utilizando la herramienta de simulación OPNET, que actualmente lleva el nombre de Riverbed Modeler.

En el capítulo 5, se describen los modelos implementados para la inicialización de red y la sincronización de la utilizando planeación centralizada y la implementación para el envío de mensajes de sincronización para la inicialización. Finalmente, se muestran los resultados obtenidos.

En el capítulo 6, se describen los modelos y posteriormente se muestran los modelos donde se implementa el método de planeación centralizada, distribuida y bajo demanda con soporte de QoS para VoIP, así como la configuración y algoritmos utilizados para enviar los datos de voz, a través de la red *mesh*. Se exponen también en este capítulo, los resultados obtenidos para la planificación de envío de tráfico, se realizan el análisis de la utilización, evaluación del desempeño, así como los retardos *end to end*.

Finalmente, se revisan las conclusiones en donde se hace un breve recuento de los objetivos y de los resultados obtenidos, también se realiza una proyección en donde se puede ver los posibles trabajos a futuro para los mecanismos propuestos.

Capítulo 2

Conceptos fundamentales y estado del arte

2.1 Introducción

Las redes inalámbricas de banda ancha en su topología *mesh* han incrementado su importancia, debido a la demanda de altas tasas de transmisión que pueden proveer sobre una amplia área de cobertura, en la actualidad.

En este capítulo se describen algunos conceptos fundamentales, las tecnologías y sus aplicaciones que forman parte de este tipo de redes. Se hace énfasis en el funcionamiento del estándar IEEE 802.16 que es la tecnología en la que se basa este trabajo y finalmente se desarrolla el estado del arte, donde se muestran las investigaciones relacionadas con la planificación de recursos para redes WiMAX *mesh*.

2.2 Conceptos Fundamentales

Las redes de datos han tenido un crecimiento vertiginoso desde las décadas finales del siglo XX, debido a la utilización cada vez más común de red y de elementos que demandan cada vez más capacidad de la misma.

Voz y videoconferencia presentan un tráfico simétrico. Mientras la evolución de los servicios de Internet y el tráfico resultante es difícil de predecir, la demanda de las tasas de datos y la calidad de los servicios se incrementa dramáticamente.

WiMAX, tal como la mayoría de las tecnologías actuales, utilizan modulación digital. Las modulaciones que son soportadas por el estándar IEEE 802.16, son cuatro: BPSK (Modulación por Desplazamiento de Fase Binario, *Binary Phase Shift Keying*), QPSK (Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura, *Quadrature Phase Shift Keying*), 16-QAM (Modulación de Amplitud en Cuadratura, *Quadrature Amplitud Modulation*) y 64-QAM.

2.2.1 Modulación digital

En los sistemas de telecomunicaciones muchos tipos de modulaciones digitales pueden ser utilizadas, las variantes son obtenidas por ajustar las características físicas de una portadora sinusoidal, ya sea la frecuencia, fase o amplitud, o la combinación de las anteriores[16]. En la figura 2.1 se muestra el principio de modular la señal de digital a analógica con el propósito de transportar la secuencia digital sobre un medio: fibra, radio, etc.



Figura 2.1 Principio de modulación digital.

BPSK es la modulación binaria, es decir un símbolo de modulación es un bit, que proporciona alta inmunidad contra el ruido y la interferencia y una modulación muy robusta. La modulación de fase digital, en este caso BPSK, usa variación de fase para codificar los bits: cada símbolo de modulación es equivalente a una fase, la fase de la señal modulada de BPSK es π o $-\pi$ de acuerdo al valor del bit. La figura 2.2 muestra la constelación BPSK, los valores que la señal de la fase puede tomar en 0 o π .

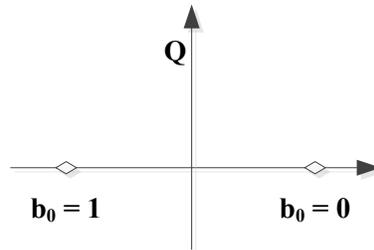


Figura 2.2 Constelación BPSK.

QPSK se utiliza cuando una modulación espectral más alta es requerida, ya que considera 2 bits de modulación. En la tabla 2.1 se muestran los posibles valores como una función para símbolos de modulación.

Bits impares	Bits pares	Símbolo de modulación	φ_k
0	0	00	$\pi/4$
1	0	01	$3\pi/4$
1	1	11	$5\pi/4$
0	1	10	$7\pi/4$

Tabla 2.1 Posibles valores de fase para la modulación QPSK.

QAM: 16-QAM y 64-QAM, QAM utiliza las amplitudes de dos portadoras sinusoidales, dependiendo de la secuencia digital que deba ser transmitida, las dos portadoras comienzan fuera de la fase en $+\pi/2$, esta amplitud modulada es conocida como cuadratura. Con cuatro niveles de este tipo pueden obtenerse hasta un total de 16 estados de modulación (o símbolos para datos), lo que hace posible una modulación 16-QAM (4 bits/símbolo modulado). Del

mismo modo, con ocho niveles se pueden obtener 64 estados de modulación, 64-QAM (6 bits/símbolo modulado). En la figura 2.3 se muestra las constelaciones para QPSK (a) y para 64-QAM, así como los símbolos utilizados, respectivamente.

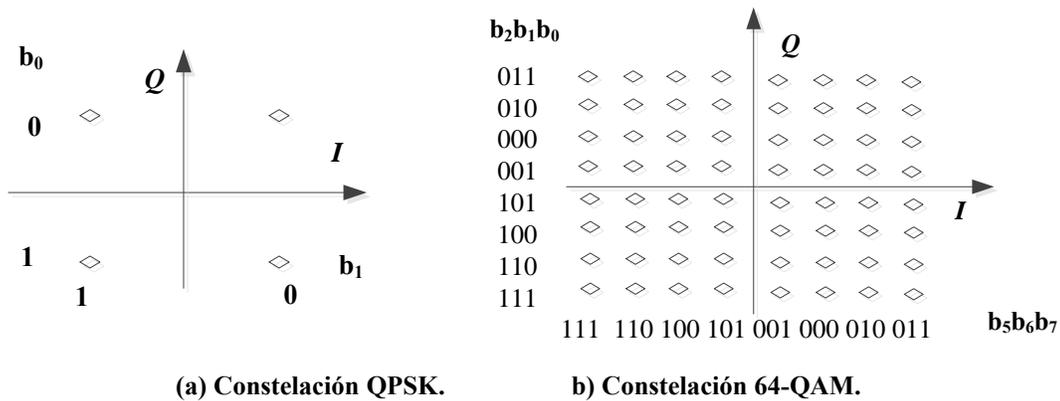


Figura 2.3 Ejemplo de constelación para modulaciones QPSK y 64-QAM

2.2.2 OFDM

OFDM (Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) es una técnica de transmisión de datos muy importante, debido a su robustez, que permite minimizar la interferencia simbólica, utilizada ampliamente en sistemas inalámbricos (IEEE802.16, IEEE802.11, 4G, y posiblemente 5G, LTE entre otros). Está basada en el principio de transmisiones simultáneas, consiste en la multiplexación de un conjunto de sub portadoras de diferentes frecuencias, donde cada una transporta información, la cual puede estar modulada en QAM, BPSK o QPSK.

Estas ondas portadoras de distintas frecuencias, son generadas por la división de una onda portadora central. Estas frecuencias son ortogonales entre sí, lo que en teoría elimina la interferencia entre canales. OFDM es a menudo presentado como la mejor técnica de transmisión usada para sistemas inalámbricos.

2.3 Sistemas de banda ancha

Los sistemas inalámbricos han ido evolucionando a través del tiempo, ya que se han creado diferentes tecnologías que van cubriendo las necesidades del ser humano. Una tecnología es GSM (Sistema Global para las Comunicaciones Móviles, *Global System for Mobile Communications*) (2G), ya que principalmente es utilizada para la transmisión de voz, que también cuenta con una transmisión de datos a baja velocidad tal como SMS (Servicio de Mensajes Cortos, *Short Message Service*). Por otro lado, las tecnologías UMTS (Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles, *Universal Mobile Telecommunication System*) y CDMA 2000 (Acceso Múltiple por División de Código, *Code Division Multiple Access*), son consideradas como sistemas de tercera Generación (3G) [17]. Posteriormente con la creación de la 4ta generación, tecnologías tales como WiMAX y LTE emergieron.

Existen grupos de trabajo en su mayoría de IEEE que se encargan de estudiar las características y el funcionamiento de los sistemas de banda ancha, así como de generar los estándares para las mismas. A continuación, se presentan algunos, dejando pendiente a IEEE 802.16 (WiMAX), ya que se describe a detalle más adelante:

- IEEE 802.20, MBWA (Acceso Inalámbrico de Banda Ancha, *Mobile Broadband Wireless Access*). El objetivo de este grupo es definir una tecnología para una interfaz aérea basada en servicios sobre IP.
- IEEE 802.21, MIH (Transpaso Independiente de Medios, *Media Independent Handover*). Es un nuevo estándar y su objetivo es que se pueda realizar la transferencia de datos entre dos tecnologías inalámbricas diferentes.

2.4 Sistemas WiMAX

La primera versión del estándar IEEE 802.16 apareció en el 2001 y la versión completa es publicada hasta 2004. A continuación, se describe la evolución de estos sistemas.

2.4.1 Sistemas Pre-Wimax

Antes de la primera versión del estándar IEEE802.16 ya existían compañías que fabricaban con su propia tecnología productos de banda ancha. Con la llegada del estándar 802.16 muchos de estos productos aseguraban basarse en el estándar, sin embargo, esto no sirvió como prueba para verificar la interoperabilidad entre ellos. Esos productos se conocían entonces como productos pre-WiMAX. Una lista de fabricantes de equipos pre-WiMAX son: Airspan, Alvarion, Aperto, Motorola, Navini, NexNet, Proxim, Redline y SR Telecom. Intel y Sequans son proveedores de componentes [17]

2.4.2 Estándar IEEE 802.16 (WiMAX)

WiMAX es un sistema de comunicación inalámbrica que permite conectarse a redes de datos de alta velocidad como el Internet, utilizando ondas de radio como medio de transmisión a velocidades que pueden exceder los 120 Mbps para cada canal de radio y está definido en IEEE 802.16. WiMAX es un sistema que es utilizado en redes inalámbricas de área metropolitana WMAN. Éstas son utilizadas en todo el mundo y sus aplicaciones incluyen servicios de Internet de banda ancha inalámbrico al consumidor, líneas interconectadas y el servicio de televisión digital. WiMAX puede competir con DSL, cable modem y conexiones ópticas de banda ancha.

También existe el Foro WiMAX que es una industria o corporación no lucrativa, formada para promover y certificar la compatibilidad e interoperabilidad de los productos inalámbricos de banda ancha 802.16. Los primeros productos que utilizaron esta tecnología están basados en la versión del estándar 2004 llamada 802.16-2004.

El comité de estándar IEEE 802 LAN/MAN desarrolló los estándares para redes cableadas y para redes inalámbricas. En este trabajo nos enfocamos en el estándar IEEE 802.16 que es un estándar para WMAN (Redes Inalámbricas de Área Metropolitana, Wireless Metropolitan Area Network) y que es mejor conocido como WiMAX. La primera versión de esta tecnología fue desarrollada para el acceso de banda ancha inalámbrica fija, que trabaja en las bandas de 10-66 GHz con línea de vista. La siguiente generación se llamó IEEE 802.16a, la

cual ya se comunicaba sin línea de vista en las bandas de 2-11 GHz. Las investigaciones más recientes se encuentran en el estándar 802.16e y 802.16m, están basadas en WiMAX Móvil.

El estándar IEEE especifica la capa física (PHY) y la capa MAC. El estándar 802.16 define cuatro capas físicas diferentes, de las cuales sólo dos están certificadas por el Foro WiMAX y son:

- OFDM: Basado en un FFT (Transformada Rápida de Fourier, *Fast Fourier Transform*) de tamaño de 256 y dirigido a redes fijas.
- OFDM (escalable): Basado en un FFT desde 128 hasta 2048, para redes móviles basadas en 802.16e y 802.16m.

También la capa física puede trabajar con las siguientes características:

- Operación TDD, FDD (Duplexación por División de Frecuencias, *Frequency Division Duplex*) y FDD half-duplex (H-FDD).
- Acceso TDM (Multiplexación por División de Tiempo, *Time Division Multiplexing*) con el tamaño del *frame* variable (2-20 ms). Donde el rango de ancho de banda soportado es muy amplio (1.25-28 MHz).
- Modulación múltiple y esquemas de codificación: QPSK, 16-QAM, y 64-QAM.
- AAS (Sistema de Antena Adaptiva, *Active Antenna System*) y MIMO.

De acuerdo al estudio sobre WMNs [18] son consideradas generalmente como redes ad-hoc, aunque tiene sutiles diferencias como que las redes *mesh* son redes con infraestructura, aunado a esto las redes MANET dan la movilidad a las redes ad hoc.

2.5 TDMA

TDMA, el Acceso Múltiple por División de Tiempo, como su nombre lo indica, es una técnica que utiliza un canal común para comunicaciones entre múltiples usuarios que asignar a cada uno de ellos una ranura de tiempo diferente para las transmisiones.

El estándar internacional original de TDMA es el IS-54, el cual introducía a los sistemas celulares características como autenticación, número de llamada o ID, MWI (Indicador de

Espera de Mensaje, *Message-Waiting Indicator*) y privacidad de voz. El IS-54B es suplantado en los 90's, por el estándar IS-136 (el cual adicionaba un DCCH (Canal de Control Digital, *Digital Control Channel*), así como características técnicas avanzadas.

2.5.1 Principios de Funcionamiento de TDMA

TDMA es básicamente un sistema analógico FDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia, *Frequency Division Multiple Access*) con componentes de tiempo compartido construidos dentro del sistema. FDMA asigna un canal simple para cada usuario en el tiempo.

Y en caso que el canal de comunicación se deteriore el controlador del sistema cambia a otro canal automáticamente. FDMA, aunque es simple de implementar conlleva a un ineficiente aprovechamiento del ancho de banda, debido a que el canal se asigna a una conversación sin importar que el usuario este o no hablando. Además de esto, FDMA no puede transmitir otra información (datos) diferentes a los de voz.

El primer factor influyente de TDMA es el hecho que cuenta con una digitalización de la señal de audio, esto es dividir a la señal en paquetes de longitud muy pequeña (milisegundos). Este sistema, asigna un canal simple de frecuencia por un corto periodo de tiempo y luego cambia a otro canal, por lo que requiere métodos de sincronismo eficaces.

Las muestras digitales de un transmisor simple (resultado de la digitalización de los datos) ocupan diferentes *timeslots* o espacios de tiempo en muchas bandas al mismo tiempo.

Cabe destacar que una de las características más llamativas de esta tecnología, es que un teléfono individual solamente necesita o utiliza dos *timeslots* disponibles para enviar o recibir audio.

En los sistemas modernos celulares y digitales, TDMA implica el uso de técnicas de compresión de voz digitales, que permite a múltiples usuarios compartir un canal común utilizando un orden temporal. La codificación de voz moderna, reduce mucho el tiempo que se lleva en transmitir mensajes de voz, eliminando la mayoría de la redundancia y periodos

de silencio en las comunicaciones de voz. Otros usuarios pueden compartir el mismo canal durante los periodos en que este no se utiliza. Los usuarios comparten un canal físico en un sistema TDMA, donde están asignados unos *timeslots*. A todos los usuarios que comparten la misma frecuencia se les asigna un *timeslot*, que se repite dentro de un grupo de espacios (*slots*) que se llama *frame* o trama.

2.6 QoS en WiMAX

En cuanto a la implementación propia de QoS en WiMAX, a nivel MAC, se asocia cada transmisión a un flujo de servicio. Así, se obtiene un nivel de acceso a red orientado a conexión. Los 5 servicios definidos en el estándar son: UGS, rtPS, nrtPS, BE y *Extended* rtPS, que son explicados brevemente a continuación.

2.6.1 UGS

Está diseñado para soportar flujos en tiempo real, consistiendo en paquetes de datos con tamaño fijo emitidos en intervalos periódicos, tales como T1/E1 sobre IP sin supresión de silencio.

El servicio ofrece reservaciones de tamaño fijo en tiempo real y periódico, el cual elimina *overhead* y latencia de las peticiones de las SS asegurando que las reservaciones estén disponibles para recibir las necesidades en tiempo real del flujo. El tamaño de estas reservaciones debe ser suficiente para tener asociados datos de tamaño fijo con el flujo del servicio, pero puede ser más grande a discreción de planeación en BS. El propósito de este servicio para trabajar correctamente es en la política de petición/transmisión debe ser tal que la SS tenga prohibido usar cualquier oportunidad de contención para petición. Es ideal para servicios de prioridad alta tales como VoIP.

2.6.2 rtPS

El servicio rtPS está diseñado para soportar flujos de datos en tiempo real, que consiste en paquetes de datos de tamaño variable generados en intervalos periódicos de tiempo, tales como vídeo y otras aplicaciones.

El servicio ofrece oportunidades de petición *unicast*, en tiempo real y periódico, la cual mantiene las necesidades del tiempo real del flujo y permite a la BS especificar el tamaño deseado de la reservación. Este servicio requiere más *overhead* que UGS, pero soporta tamaños de reservación variable para una eficiencia óptima en el transporte de datos.

2.6.3 nrtPS

El nrtPS está diseñado para soportar flujo de datos tolerantes a retardos que consiste en el envío de paquetes de datos de tamaño variable los cuales requieren una mínima tasa de datos, tales como FTP (Protocolo de Transferencia de Archivos, *File Transfer Protocol*).

nrtPS ofrece emisiones *unicast* en una base regular, el cual asegura el flujo de servicio, se reciben oportunidades de peticiones durante la congestión de red. La BS típicamente emite conexiones nrtPS en un intervalo en el orden de un segundo o menos.

2.6.4 BE

El servicio BE está diseñado para soportar flujos de datos para los cuales un nivel mínimo de servicio es requerido y además puede ser manejado a base de espacios disponibles.

Para que este servicio trabaje correctamente, la política de Petición/Transmisión debe ser de modo que las SS permitan utilizar oportunidades de petición para contención para uso del medio. Todos los otros bits de la política de Petición/Transmisión son irrelevantes para la operación fundamental de este servicio de planeación y deben ser puestos de acuerdo a la política de red.

2.6.5 *Extended rtPS*

Extended rtPS es un mecanismo de planeación el cual combina la eficiencia de UGS y rtPS. La BS provee reservaciones *unicast* en una manera parecida a UGS. Sin embargo, mientras que las asignaciones en UGS son de tamaño fijo, las asignaciones *rtPS* son dinámicas. El tipo de servicio *extended rtPS* está diseñado para soportar flujos de servicio en tiempo real que genera paquetes de datos de tamaño fijo en tiempo periódico.

2.7 Estado del Arte

En el estándar no se plantea un mecanismo para la planeación de paquetes para la topología *mesh*, el criterio para compartir el medio de los nodos activos, ni el soporte de QoS, debido a lo anterior se han realizado varios artículos con propuestas de diferente índole, considerando las diferentes características de las redes *mesh* y del protocolo IEEE802.16 en sí. A continuación, se presentan los trabajos realizados, agrupando por el problema que deciden resolver, relacionado con QoS.

2.7.1 Optimización de retardos, considerando el algoritmo de elección de tiempos

En este conjunto de artículos se consideran mecanismos para optimizar los tiempos en el envío de los datos, estos mecanismos están basados en la manipulación dinámica del valor del exponente *HoldOffExponent*, que permite establecer los intervalos en que los nodos compiten para el envío de mensajes de control, es decir, los tiempos en que se realizan peticiones y se recibe la concesión de recursos. En [18] este valor cambia de acuerdo a la cantidad de nodos vecinos con los que tiene que competir el nodo en una oportunidad de transmisión dada, es decir, el número de veces que el nodo colisiona con otros nodos y no gana se ve reflejado en su prioridad, que se incrementa y se asigna un valor menor del exponente, lo que da un intervalo más pequeño de espera para habilitar la siguiente oportunidad de transmisión. En [19] la prioridad sobre el exponente del algoritmo de elección, que permite variar la frecuencia y el tamaño de la ventana donde el nodo puede competir para enviar peticiones y concesiones de recursos, se basa en pesos, que se calculan

de acuerdo al número de enlaces por los que se envía tráfico. Se basa en el estado del nodo, es decir si un nodo está activo, su exponente se incrementa y se decrementa durante el tiempo que se encuentra inactivo. Existen dos problemas principales en este tipo de solución, el primero es que de cualquier manera no se puede garantizar un retardo en cubrir toda la ruta y el segundo, el tiempo para la actualización de los valores de los exponentes dentro de la vecindad extendida donde se compete, para sincronizar el algoritmo de elección. Las propuestas basadas en los retardos, minimizan los tiempos para que se envíen los datos, pero de ninguna manera garantizan QoS.

2.7.2 Planeación centralizada.

Para la planeación centralizada hay un gran número de soluciones, ya que la topología tiene similitud a las topologías PMP, solo que considerando que las rutas son multisalto, por tanto, ya se definen mecanismos para conservar la QoS. El algoritmo SAQoS (*Service Adaptive QoS*) es propuesto en [6] y consiste en emular en un solo nodo 5 nodos virtuales, uno por cada tipo de servicio. Cada nodo virtual hace sus peticiones de recurso independientes utilizando los mensajes CSCH que son los mensajes de control para planeación centralizada. En este mismo artículo los autores proponen el algoritmo FABS (*Fair Adaptive Base Station Scheduler*), que consta de otorgar prioridad a las estaciones suscriptoras que tienen una reservación de menor tamaño, asegurando QoS en una topología con un número reducido de nodos, sin embargo, mencionan el problema que hay de escalabilidad al implementar el algoritmo.

Las principales desventajas de utilizar planeación centralizada es por un lado que la señalización se incrementa rápidamente de acuerdo al número de nodos y saltos existentes en la topología. Por otro lado, se tienen que retransmitir una gran cantidad de mensajes de control por cada nodo, de tal forma que la red tenga su mapa actualizado, por tanto, la saturación de la red es inminente.

2.7.3 Planeación distribuida

Existen varias propuestas, utilizando planeación distribuida que han sido publicadas para optimizar el tiempo de retardo, establecimiento de prioridades y mantenimiento de QoS. Algunas trabajan en las características propias del estándar, otras en planeación para redes *mesh* utilizando: parámetros de configuración, algoritmo de elección para establecer los tiempos en que cada nodo compite para envío de sus mensajes de control y un número de reducido propone cómo mantener QoS.

2.7.3.1 Configuración del parámetro *XmtHoldoffExponent*

Un mecanismo para diferenciar los tipos de servicio es propuesto en [7] y [8], los autores basan su mecanismo en el tiempo de espera *XmtHoldoffTime*, que es el tiempo del nodo en espera después de una transmisión. El intervalo de tiempo se calcula utilizando el *XmtHoldOffExponent*, para calcular el intervalo de tiempo en que el nodo está disponible para competir por la transmisión. Estos parámetros se representan en una tupla de 4, de acuerdo a la eficiencia/prioridad que da como resultado la combinación de estos parámetros se determinan las prioridades. Es decir, si se requieren 5 niveles de servicio diferente, se utilizan 5 grupos diferentes de los parámetros señalados para que soporten cada nivel de servicio.

En el estándar se realiza una extensión a los problemas de escalabilidad, transmisión cooperativa y justicia para la planificación propuesta, pero se aborda como trabajo futuro el establecimiento del planificador, además de no tomar en cuenta los parámetros de QoS existente y de utilizar topología de no más de 10 nodos. En [21] se propone un algoritmo basado en prioridades para garantizar la QoS, utilizando el mecanismo de 3-vías, se establece un umbral de acuerdo a la ocupación de la red, para determinar si es posible otorgar o no el servicio pretendido. Este algoritmo verifica cada uno de los *minislots* disponibles para verificar si se puede o no atender la petición, el cuál presenta problemas de escalabilidad. Ya que, al realizar pruebas con 6 nodos, con tráfico nrtPS ya no se pudo garantizar QoS, debido al crecimiento exponencial del tiempo en las reservaciones de 3-vías.

2.7.3.2 Algoritmos de planeación

En [21] se propone un mecanismo que toma como base los mensajes de 3 vías utilizados en la reserva de servicios dinámicos de PMP. Se define el establecimiento de flujos considerando la topología *mesh*, que consiste en encapsular los mensajes de servicios dentro de los mensajes de control (DSx en DSCH). Además, propone extender el mensaje MSH-DSCH (Planificador Distribuido *Mesh*, *Mesh Distributed Scheduler*), con dos nuevos parámetros, el primero que indique el tipo de servicio y el segundo que indique el tipo de mensaje DSx que es enviado para establecer el flujo de servicio. Finalmente, propone dividir el *subframe* en los diferentes niveles de servicio de acuerdo a la prioridad de cada uno.

En [23] los autores proponen utilizar el *XmtHoldoffExponent* junto a una variable α para dar flexibilidad y tener un esquema de prioridades en el planificador distribuido, haciendo un estudio teórico del comportamiento, sin embargo no se garantiza QoS. En [24] se utiliza DDR (*Deficit Round Robin*) para el establecimiento de prioridades y la diferenciación en el tipo de servicio, el planificador propuesto es solo para diferenciar tráfico a nivel paquetes, pero no utiliza control de admisión. En [25] al igual que en los trabajos anteriores los autores proponen utilizar dinámicamente el exponente, pero con un factor de justicia, es decir se utiliza como criterio el número de paquetes que ha enviado cada nodo. En [26] se realiza un estudio más detallado del estado de la red, en donde la propuesta utiliza el concepto de zonas cuello de botella, a partir de los enlaces que tienen menor capacidad de transmisión en la red. Basados en el concepto anterior, los autores proponen una optimización en el retardo al modelar la interferencia y así evitar retrasos en el envío de la información, los artículos anteriores presentan de igual forma problema de escalabilidad, ya que se realizan los escenarios con la cantidad mínima de nodos.

2.7.3.3 Control de Admisión y QoS

En los trabajos mencionados anteriormente no se considera control de admisión o solamente de forma básica, es importante el control de admisión porque permite asegurar que la información llega a su destino y que se está repartiendo el medio de acuerdo a las necesidades que tiene la red en un momento dado.

En [27] se propone un algoritmo de control de admisión dejando pasar primero al tráfico con mayor prioridad, el criterio anterior lo aplica el nodo que va a conceder recurso, es decir por salto, lo que no asegura que se cumpla el retardo deseado origen a destino. En [28] se propone una diferenciación de tráfico utilizando el CID, el mecanismo de control de acceso está basado en un umbral de tráfico, básicamente lo que el medio soporte, en [29] se describe un algoritmo de control de admisión en modo punto a multipunto, cada tipo de tráfico tiene un área pre-reservada, desde el nodo que funge como MBS, haciendo un mecanismo centralizado.

En [30] la idea de los autores se basa en el RFP (*Race Free Bandwidth Reservation Protocol*) en donde para evitar el problema de la terminal oculta se plantea un estado de pre-reservación de slots. RFP resuelve el problema de reservaciones simultáneas. Esta propuesta se utiliza como parte del presente trabajo de tesis.

Otra propuesta basada en el algoritmo DRR es [31], en la cual se utiliza este algoritmo para repartir el medio y se propone utilizar *Self/Clocked Fair Queueing* como planificador de paquetes, basando los tiempos que se dedican a cada flujo en su prioridad, y se contempla un criterio de control de admisión únicamente basado en la capacidad del medio.

Finalmente, en [32] se propone una modificación del EDF (*Earliest Deadlines First*) como algoritmo planificador de paquetes, calculando los plazos (*deadlines*) en base a la prioridad del tipo de servicio, el tamaño del paquete y el tiempo de espera en la cola, con lo que se garantiza que se cumplan los tiempos en cada salto. Esta propuesta se basa en tratar de enviar el mensaje en el tiempo establecido, pero debido a que se tiene que hacer una nueva reservación en el siguiente salto, no se puede asegurar que el tiempo para envío va a vencer antes de que le sean otorgados recursos al nodo además de no contar con un control de admisión.

2.7.3.4 TDMA

Se prevé que los sistemas híbridos (celular y en la nube) y semi-distribuidos sean propuestos y que cubran las expectativas para 5G, por tanto, TDMA es una opción para mantener la comunicación libre de colisiones, como propone [2]. En el artículo citado se expone un

planificador sobre TDMA libre de colisiones, calculando en una gráfica pesos para cada arista y eligiendo las rutas de acuerdo a lo anterior, pero no aborda QoS.

2.8 Conclusiones

Las comunicaciones han ido evolucionando desde que apareció el primer teléfono analógico que nos permita contactar con personas que se encontraban físicamente lejos de nosotros, pero que necesitaba una infraestructura fija y muy puntual para poder establecer una conversación. El día de hoy gracias a las redes inalámbricas, sus tecnologías y mecanismos, se puede establecer una vía de comunicación, desde donde y hacia donde se requiera, ahora el gran problema que enfrentan estas tecnologías precisamente es la alta demanda de usuarios y servicios. Existe una amplia variedad de artículos y propuestas enfocados en la planeación, algunos basados en el estándar IEEE 802.16 pero la mayoría tomando en cuenta la naturaleza distribuida de las redes *mesh*.

Capítulo 3

Sincronización y planificación en redes de banda ancha IEEE802.16 con topología *mesh*

3.1 Introducción

En este capítulo, se describe el funcionamiento de la capa MAC, en el modo *mesh* para el estándar. Se describe la configuración de la misma con la finalidad de exponer tanto el proceso de inicialización, como el de planeación y posteriormente el envío de datos. Se describe detalladamente la estructura de los *frames* en la capa MAC, conformado por la parte de control (inicialización o planeación) y la parte de envío de datos. También se explica el funcionamiento del algoritmo de elección que permite que los nodos compitan por enviar su información dentro del segmento asignado para mensajes de control.

3.2 Estructura de la capa MAC

El modo *mesh* en IEEE802.16 soporta únicamente operación TDD para la transmisión, por lo que los nodos tienen que compartir y competir por el canal de radio común en TDMA [1].

El canal de radio está dividido en *frames*, cada uno de los cuales se dividen en *slots* de tiempo que pueden ser asignados a la MBS (Estación Base *Mesh*, *Mesh Base Station*) o a las MSS (Estaciones Suscriptoras *Mesh*, *Mesh Subscriber Station*), éstas últimas también se conocen como nodos. En la figura 3.1 se muestra la estructura de un *multiframe* perteneciente a la capa MAC *mesh*, la que como su nombre lo indica está conformado por *n* frames. Cada *frame* está compuesto por una sección de control y una de datos, conocidos como *subframes*. El primer *subframe* de control del *multiframe* está destinado a mensajes de control de la red, en dónde se configuran parámetros para el establecimiento y sincronización de la red. A partir del segundo *frame* y hasta el número *n*, el área de control está destinada a la planificación para el envío de tráfico.

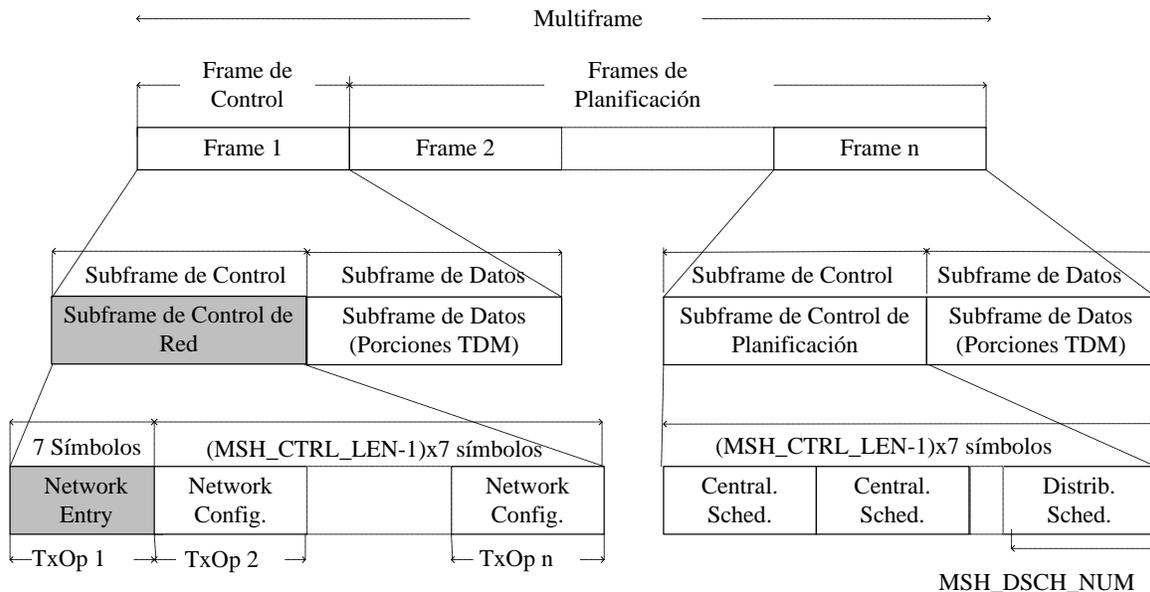


Figura 3.1 Estructura de multiframe mesh.

Cada *frame*, a su vez está dividido en 256 *minislots* para transmisión de datos del usuario y mensajes de control. El *subframe* de control se encuentra formado de segmentos de tiempo llamadas TxOps (Oportunidades de Transmisión, *Transmission Opportunities*), cada una

puede constar de uno o más *minislots*. Las TxOps son utilizadas para enviar mensajes de configuración de la red o del planificador de transmisión de datos.

3.2.1 Mensajes de control de red

El *subframe* de control se compone de dos partes como se muestra en la figura 3.1 las TxOps de control de red, se dividen en una TxOp para envío de mensajes para la entrada a la red, en donde se pueden enviar mensajes tipo MSH-NENT (Mensaje *Mesh* de Entrada a la Red, *Mesh Network Entry*) y las restantes para mensajes de configuración de red conocidos como MSH-NCFG (Mensaje *Mesh* de Configuración de Red, *Mesh Network Configuration*), dónde:

- **MSH-NENT** es un mensaje de administración que proporciona los medios para que un nuevo nodo obtenga la sincronización y la entrada inicial a la red *mesh*.
- **MSH-NCFG** es un mensaje de administración que proporciona un nivel básico de comunicación entre nodos de diferentes redes; este contiene parámetros del canal como la modulación, esquemas de codificación, etc.

La longitud del *subframe* de control es fija, y se indica su valor en el parámetro: MSH-CTRL-LEN multiplicado por 7 símbolos OFDM, indicado en la figura 3.1. El parámetro MSH-CTRL-LEN tiene 4 bits y su valor es publicado en la estructura *MSH-NCFG:Network Descriptor*.

El *subframe* de control de red ocurre periódicamente en el tiempo indicado en la estructura *MSH-NCFG:Network Descriptor*. Existe un campo definido en la estructura llamado *scheduling frame* que define el número de *frames* que tienen control de planeación entre dos *frames* con control de red, este número debe ser especificado en múltiplos de cuatro, ya que así lo establece el estándar, este número repercute en el tamaño que tiene el *multiframe*. Por ejemplo:

scheduling frame = 2 y

núm. de *subframes* de planeación = $(2*4) = 8$.

Entonces, dentro del *subframe* de control de red, la primera TxOp es para un mensaje MSH-NENT. El resto MSH-CTRL-LEN-1 son oportunidades de transmisión para MSH-NCFG.

3.2.2 Mensajes de control de planificación

Las TxOps para planificación están destinadas a tres tipos de mensajes de control para la planeación: MSH-CSCF (*Mesh Centralised Schedule Configuration*) y MSH-CSCH (*Mesh Centralised Scheduler*) para la centralizada; MSH-DSCH para la distribuida.

En la estructura MSH-NCFG: *Network Descriptor* en el parámetro MSH-DSCH-NUM se indica el número de TxOps para mensajes MSH-DSCH. Esto implica que las primeras (MSH-CTRL-LEN – MSH-DSCH-NUM) son reservadas para transmitir mensajes MSH-CSCH y MSH-CSCF de la planeación centralizada.

3.3 Inicialización y sincronización de una red *mesh* IEEE802.16

Los mensajes tipo MSH-NCFG y MSH-NENT generan una comunicación básica entre nodos. En la figura 3.2 se muestra el formato para mensajes MSH-NENT, que pueden ser de tipo: *0x1 NetEntryAck*, *0x2 NetEntryRequest* o *0x3 NetEntryClose*.

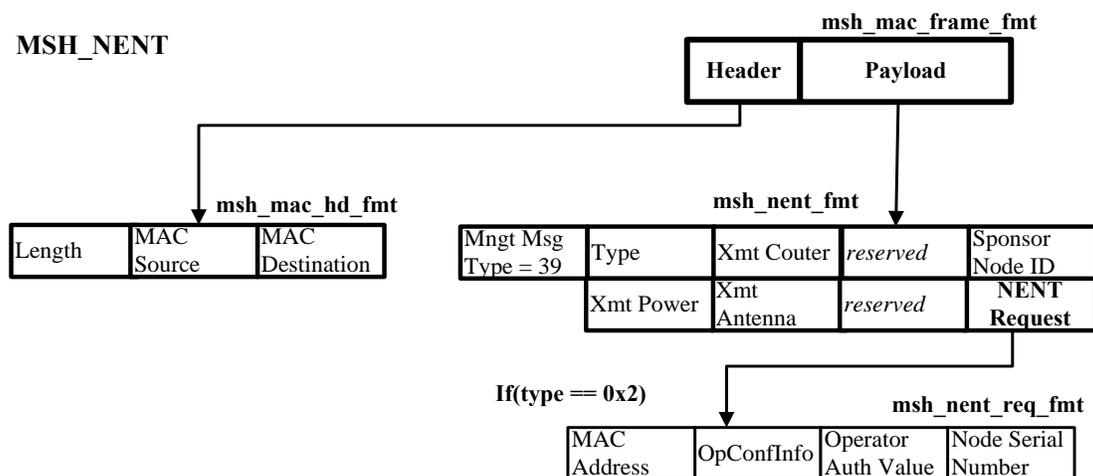


Figura 3.2 Formato mensajes MSH-NENT.

El formato del mensaje MSH-NCFG se muestra en la figura 3.3, en donde se pueden apreciar los diferentes tipos de mensajes de configuración: *0x1 Network Descriptor*, *0x2 Network Entry Open*, *0x3 Network Entry Reject*, *0x4 Network Entry Ack (Embedded data IE () = NULL)* y *0x5 Neighbor Link Establishment Protocol*.

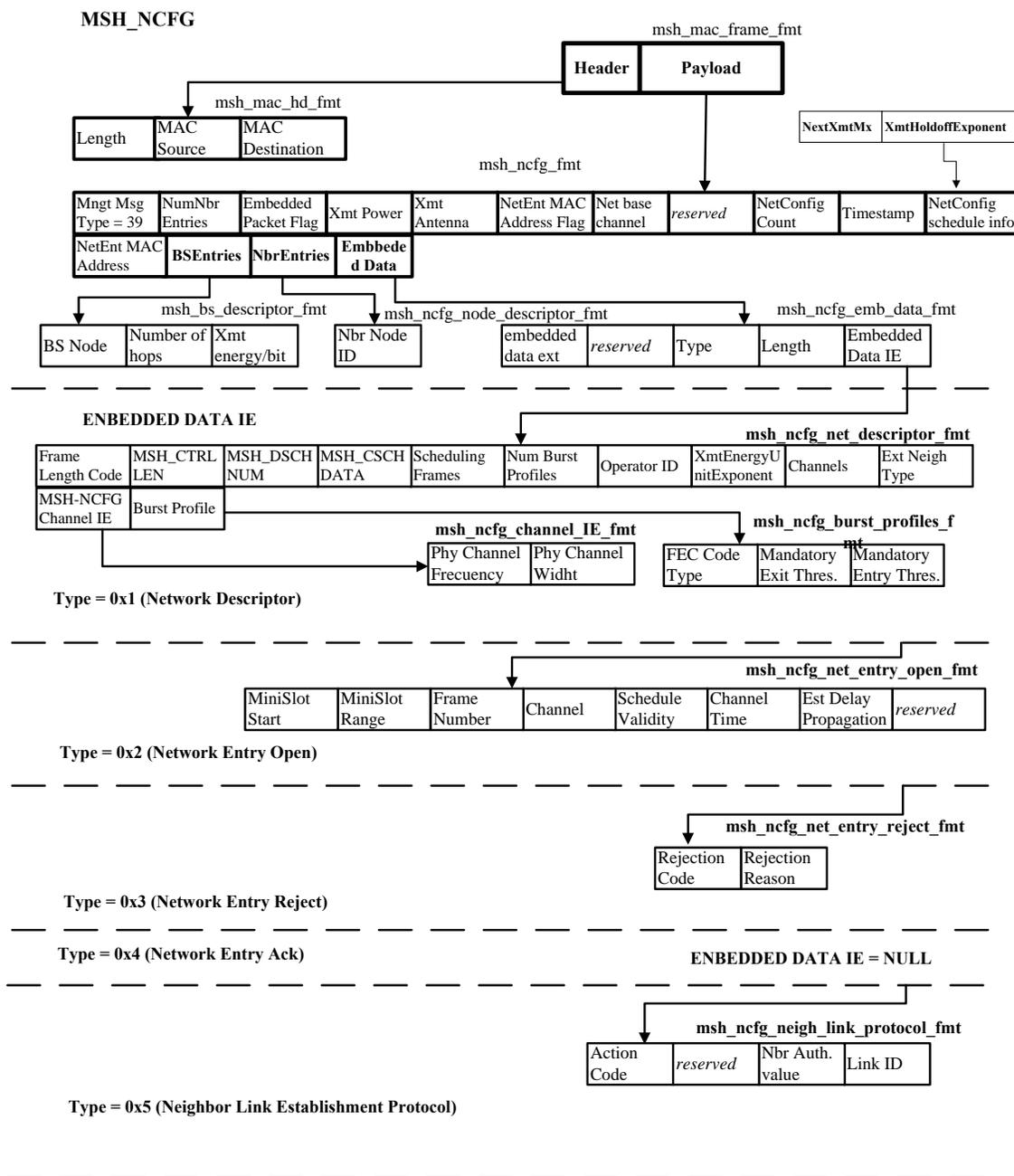


Figura 3.3 Formato de mensajes MSH-NCFG.

El cuerpo del mensaje cambia dentro de la estructura *ENBEDDED_DATA* de acuerdo a la fase de inicialización requerida por el nodo. Es importante resaltar el envío de los parámetros de configuración *NextXmtMx* y *XmtHoldoffExponent* ya que son utilizados para calcular el tiempo de envío para los mensajes de control, y se explicaran a detalle posteriormente.

En la figura 3.4, se visualiza el proceso de sincronización de un nodo para ingresar a la red, es decir, el intercambio de mensajes de control. Un nodo es el punto de inicio de la comunicación, el cuál puede ser una MBS o una MSS que funge como estación base (conocido también como nodo patrocinador o promotor), el intercambio de estos mensajes se realiza de forma centralizada.

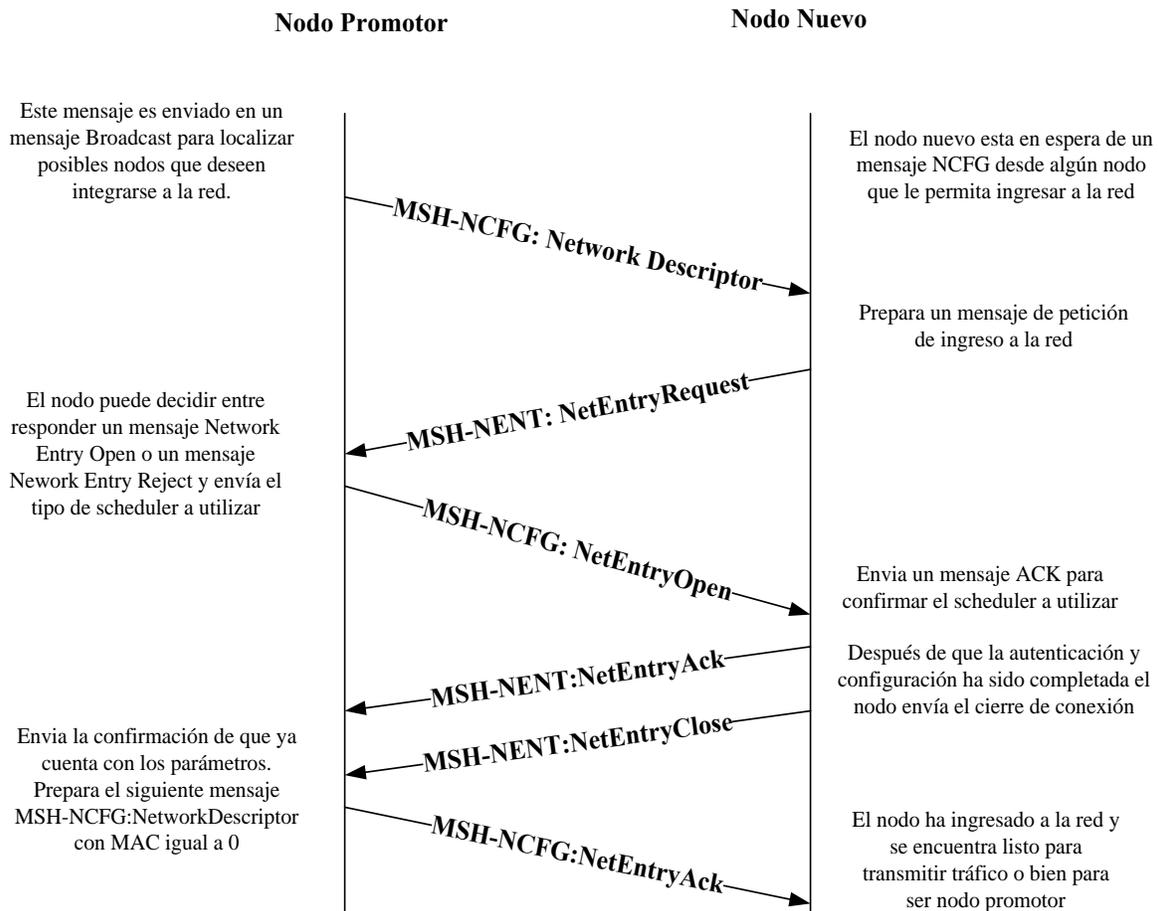


Figura 3.4 Intercambio de mensajes de inicialización.

En esta fase, los nodos que se encuentran dentro de la cobertura del nodo inicial son candidatos para ingresar a la red, pero debe realizarse un intercambio de parámetros con la finalidad de que estos nodos puedan sincronizarse a la red. La MBS (o nodo promotor) envía un mensaje *broadcast* periódicamente de tipo *MSH-NCFG:Network Descriptor* para iniciar la comunicación.

Los nodos que están dentro de la cobertura de la MBS o del nodo promotor y que aún no pertenecen a la red contestan mediante un mensaje *MSH-NENT:NetEntryRequest* para solicitar una petición para ingreso a la red. En caso de que el nuevo nodo no se encuentre dentro de la cobertura de la MBS, el mensaje debe ser reenviado hasta llegar por medio de su nodo promotor y así sucesivamente hasta llegar a la MBS. Una vez que es recibida la petición se transmite un mensaje *MSH-NCFG:NetEntryOpen* donde son enviados los parámetros y la configuración de red. Finalizando el proceso de 3-vías con el cierre de la conexión.

El siguiente mensaje *MSH-NCFG:Network Descriptor* contiene la actualización de la topología de la red, que hasta ese momento está sincronizada con los nodos que pudieron darse de alta, los cuales retransmiten a su vez el mensaje *broadcast* para detectar posibles candidatos de ingreso a la red. El envío y recepción de mensajes está determinado por el algoritmo de elección de tiempos definido en el estándar, que se explica a continuación.

3.3.1 Algoritmo de elección de tiempos

Los parámetros *Xmt Holdoff Exponent (XHE)*, y *NextXmtMx* mencionados anteriormente, indican el tiempo en que un nodo se encuentra en su ventana de transmisión para así poder competir dentro del algoritmo de selección mostrado en la tabla 3.1. El intervalo definido por el parámetro *NextXmtMx* es conocido como *Next Xmt Time* e indica el rango de TxOps que el nodo puede elegir para el siguiente envío de un mensaje de control. Este intervalo de tiempo está dado en la ecuación (1). Donde se muestra que el tamaño de esta ventana de tiempo crece exponencialmente en función del parámetro XHE.

$$2^{XHE} \cdot Next\ Xmt\ Mx < NextXmtTime \leq 2^{XHE} \cdot (NextXmtMx + 1) \quad \dots\dots\dots (1)$$

Ordena tabla de vecinos por **Next Xmt Time**.

Para cada entrada de la tabla de vecinos, agrega el **Next Xmt Time** a el **Xmt Holdoff Time** del nodo correspondiente junto a su **Earliest Subsequent Xmt Time**.

Iguala **TempXmtTime** a **Xmt Holdoff Time** más el tiempo actual: **Xmt Time**.
success igual a *false*.

While *success* sea igual a *false* **do**:

Determina cuales son los nodos que compiten, cual es el conjunto de todos los nodos en la lista de vecinos con un intervalo **Next Xmt Time** elegible que incluya **TempXmtTime** o con un **Earliest Subsequent Xmt Time** igual o menos que **TempXmtTime**.

Envía a *Mesh Election* el conjunto de nodos elegibles y el nodo local utilizando **TempXmtTime** y la lista de IDs de los nodos que compiten elegidos como entrada.

MeshElection (*TempXmtTime*, *MyNodeID*, *CompetingNodeIDsList* [])

If (Este nodo no ganó)

 Igualar **TempXmtTime** al siguiente tiempo MSH-NCFG.

Else: Iguala *success* a *true*

 Iguala **Next Xmt Time** a **TempXmtTime**.

Tabla 3.1 Algoritmo de elección de tiempos.

En los siguientes ejemplos se muestra el comportamiento del intervalo de tiempo *Next Xmt Time*, de acuerdo a los parámetros *Next XmtMx* y *Xmt HoldoffExponent*, los cuales oscilan entre sus diferentes rangos permitidos:

- Si $XmtHoldoffExponent = 0$; $NextXmtMx = 4$, entonces
 $4 < NextXmtTime < 5$
- Si $XmtHoldoffExponent = 7$; $NextXmtMx = 4$, entonces
 $2^7 * 4 = 512 < NextXmtTime < 640$
- Si $XmtHoldoffExponent = 15$; $NextXmtMx = 1$, entonces
 $2^{15} * 1 = 32768 < NextXmtTime < 65536$

Por otro lado, *Xmt Holdoff Time* es el número de oportunidades de transmisión de control después del *Next Xmt Time* en que este nodo no es elegible para transmitir paquetes, se calcula como se muestra en ecuación (2). Esta es la ventana en el que nodo no tiene permitido competir por TxOps.

$$Xmt\ Holdoff\ Time \leq 2^{XHE+4} \dots\dots\dots (2)$$

Por ejemplo,

- $XmtHoldoffExponent = 0; XmtHoldoffTime = 2^4 = 16.$
- $XmtHoldoffExponent = 1; XmtHoldoffTime = 2^{1+4} = 2^5 = 32.$
- $XmtHoldoffExponent = 2; XmtHoldoffTime = 2^{2+4} = 2^6 = 64.$

En la figura 3.5 se muestra en línea de tiempo las ecuaciones (1) y (2) que permiten calcular los intervalos entre las TxOps del algoritmo de elección para el envío de mensajes de control de red dentro del *multiframe*.



Figura 3.5 Estructura de TxOps en un multiframe mesh.

3.4 Planeación

Como se mencionó anteriormente existen dos tipos de métodos de planificación en el modo *mesh*: centralizado y distribuida, los cuales tienen un *subframe* compuesto por TxOp que permiten el envío de sus mensajes de control. En la figura 3.6 se puede apreciar que al inicio de cada *frame* se encuentra el área de control y la división para cada TxOp, en donde se pueden enviar los mensajes de señalización para la planeación.

Como se mencionó anteriormente, en el primer *frame* se utiliza el área de mensajes de control para inicialización de la red y a partir del segundo hasta el *n-frame* para mensajes de control de planificación, que pueden ser mensajes de tipo CSCH, CSCF o DSCH, para centralizado o distribuido, respectivamente. El presente trabajo de tesis se enfoca al uso del planificador distribuido.

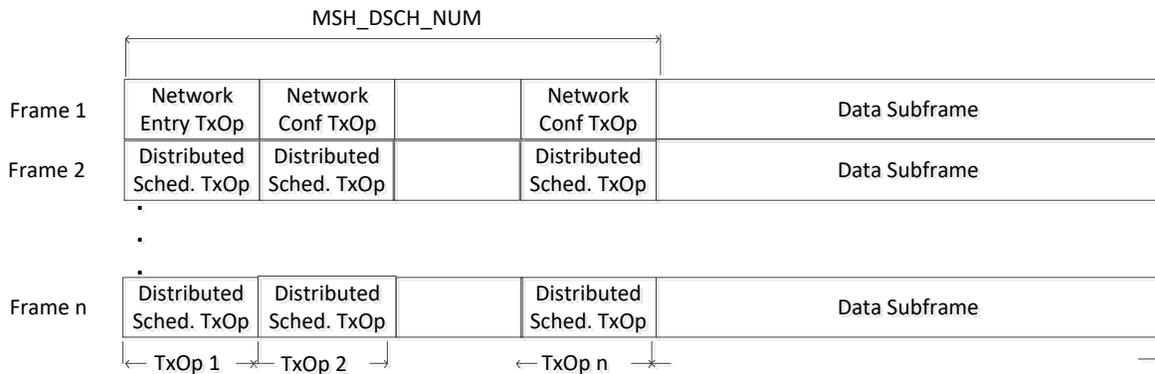


Figura 3.6. Estructura de multiframe mesh para planeación distribuida.

3.4.1 Planeación centralizada

El método centralizado es similar al modo PMP, ya que el tráfico tiene que pasar por la MBS o por un nodo que funge como tal. Cada nodo envía sus peticiones y reenvía las peticiones de sus hijos a la MBS, a través de mensajes MSH-CSCH. La MBS genera un paquete de reservación de acuerdo a las peticiones y lo envía a las MSSs que están dentro de su cobertura. Las MSSs reciben los paquetes de reservación, los retransmiten a sus hijos y así sucesivamente. Esta forma de operar es muy similar a la que se realiza en la inicialización de la red, en donde se intercambian mensajes MSH-NCFG y MSCH-NENT en el *subframe* de control de red.

3.4.2 Planeación distribuida para redes *mesh*

El objetivo del mecanismo de planeación es otorgar soluciones de funcionamiento para redes inalámbricas de banda ancha tipo *mesh* con planificadores bajo esquema distribuido,

respetando QoS y utilizando diferentes algoritmos de calendarización para el manejo de colas, dando así una solución a la movilidad dentro de áreas rurales.

En el estándar IEEE802.16-2004 se establece que, en el mecanismo distribuido coordinado, cada transmisión de paquete necesita realizar una competencia de nodos, incluyendo las oportunidades de transmisión del *subframe* de control y la competición en recursos *minislots*.

En modo *mesh* del estándar original no está orientado a conexión y es incapaz de proveer una garantía QoS para flujo de servicio. La transmisión de paquetes de datos está basada en diferentes prioridades para implementar esquemas tales como UGS, rtPS, nrtPS y BE. De acuerdo a las características de cada tipo de servicio, el *frame* MAC puede ser dividido dentro de *minislots*, los cuales pueden ser reservados o de competencia.

Los mensajes tipo MSH-DSCH de *Request* y *Grant*, son transmitidos en modo *mesh*, cuando se utiliza planeación distribuida. En planeación distribuida coordinada, todos los nodos deben transmitir un MSH-DSCH en un intervalo regular para informar a todos sus vecinos de la calendarización de la estación transmisora. Este tiempo de transmisión está determinado por el mismo algoritmo utilizado para los mensajes MSH-NCFG.

A continuación, se realiza una breve descripción de cada uno de los tipos de paquetes MSH-DSCH:

- **MSH-DSCH:Request** Se realiza solo con la estructura *MSH-DSCH:Availabilities*, en dónde se indican los *slots* potenciales para responder y de la planeación actual.
- **MSH-DSCH:Grant** se envía en respuesta para indicar un subconjunto de la disponibilidad sugerida que se podría ajustar, si es posible, a la petición. Los vecinos de este nodo no se involucran en esta planeación, se asume que la transmisión toma lugar como es reservada.
- **MSH-DSCH:ACK** es enviado por el nodo original que realiza la petición y que contiene una copia de la reservación, para confirmar la planeación. Los vecinos de este nodo no se involucran en esta planeación, se asume que la transmisión toma lugar como es reservada.

En ambas, planeación coordinada y no-coordinada, los mensajes MSH-DSCH se utilizan para hacer llegar las peticiones y reservaciones de recursos a sus vecinos. Este mensaje también se utiliza, para que los vecinos sepan qué recursos están libres y podrían ser concedidos a ellos. Este mensaje no debe ser fragmentado.

En la figura 3.7 se muestra la estructura del paquete DSCH, y los diferentes subpaquetes *IEs* (Elementos de Información, Information Element) que puede contener.

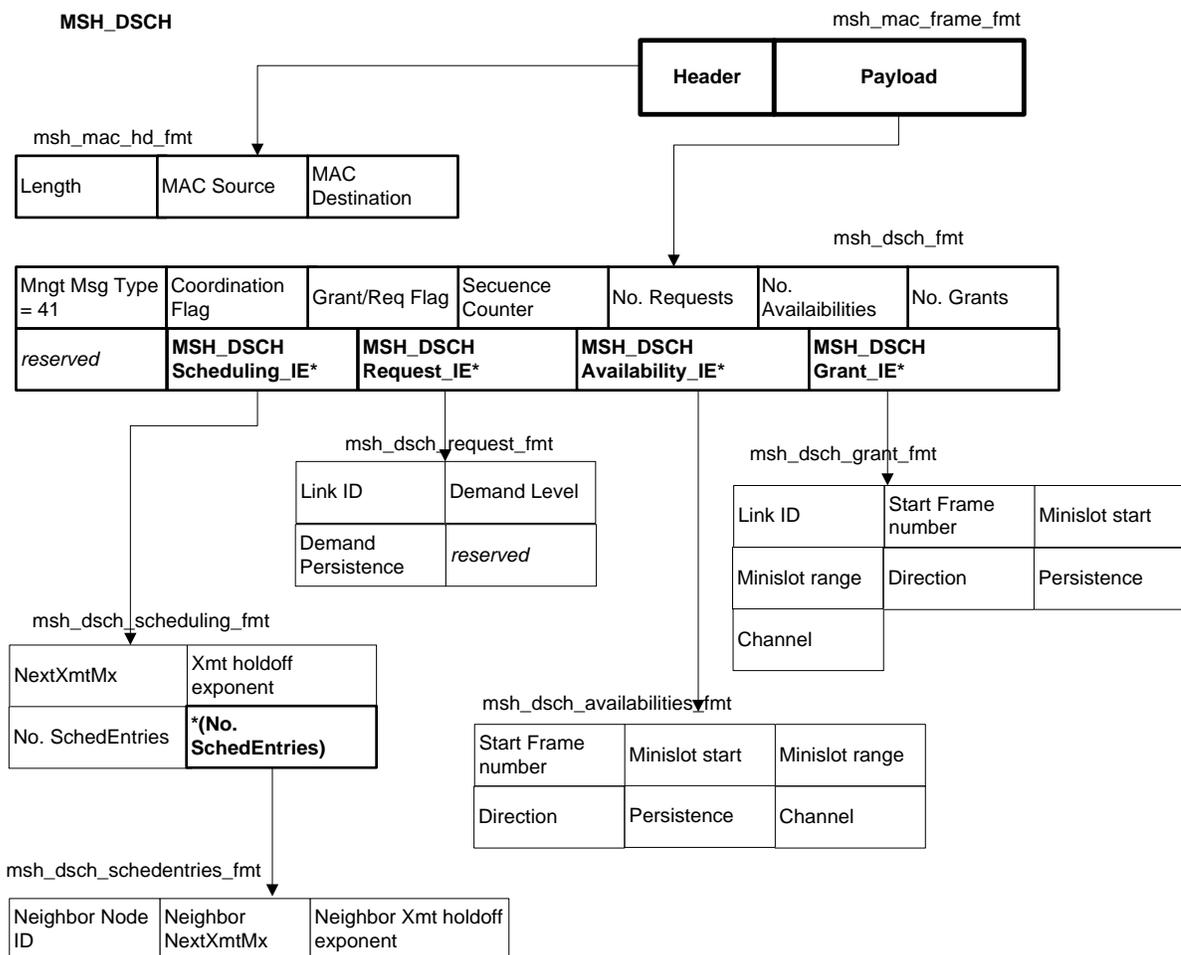


Figura 3.7 Paquete DSCH.

A continuación, se explica brevemente cada tipo de IE:

- **Availabilities IE.** Indica el número de *frame* inicial, el *minislot* inicial con el *frame*, y el número de *minislots* disponibles para otorgar las reservaciones de transmisión.
- **Scheduling IE.** Muestra el siguiente tiempo de transmisión MSH-DSCH, los parámetros *NextXmtTime*, *XmtHoldOffExponent* del nodo y de sus vecinos a dos saltos.
- **Request IE.** Indica la demanda de recurso del nodo.
- **Grants IE.** Representa el número de *frame* inicial, el número de *minislot* sin el *frame*, y el rango de *minislots* para la reservación.

3.4.3 Planeación distribuida coordinada.

En el método de planeación distribuida, los nodos utilizan un esquema de negociación a 3-vías para calendarizar el tráfico. Cada nodo transmite su tabla de planeación actual y los cambios propuestos de los vecinos a dos saltos de distancia, se debe enviar un mensaje de difusión a estos vecinos (recursos disponibles, peticiones y reservaciones).

Si el nodo destino concede una petición, responde al nodo fuente en uno de los slots de control del *subframe*, lo cual también es descrito en el mensaje de petición. Finalmente, la fuente retransmite el mensaje de reservación al destino para confirmación, como se muestra en la figura 3.8.

La diferencia entre los dos tipos de planeación distribuida, es el uso del *subframe* control para los mensajes de control. En la planeación distribuida coordinada, los mensajes de planeación son enviados libres de colisiones, mientras que los mensajes pueden colisionar en la planificación distribuida no coordinada, ya que se envían en la sección de datos.

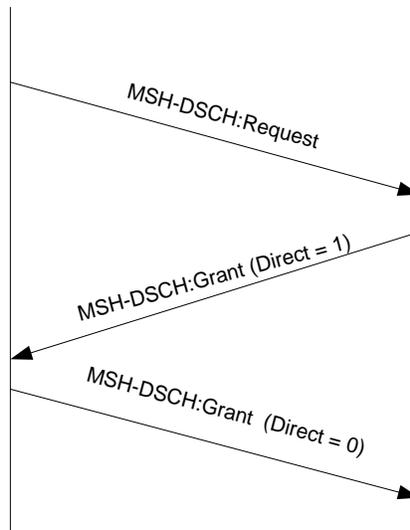


Figura 3.8 Mensajes de señalización para reservación de tiempo de transmisión.

Las estaciones que tienen enlaces directos son llamados vecinos. Los vecinos del nodo son considerados a “un salto” de distancia. Una vecindad extendida a dos saltos contiene, todos los vecinos de la vecindad a un salto. En el modo coordinado de la planificación distribuida todas las estaciones MBS y MSSs coordinan sus transmisiones en su vecindad extendida a dos saltos. El modo coordinado en planeación distribuida utiliza una porción entera de control de cada *frame* para regular transmisiones de su propia planeación y cambios en la planeación propuesta en una base PMP a todos sus vecinos.

Toda la red utiliza el mismo canal para transmitir información en un formato específico para petición y reservación de recursos.

La planificación distribuida coordinada asegura que las transmisiones sean calendarizadas de manera que no dependa en operación de la MBS, y que no necesariamente este dirigida de o hacia la MBS.

3.4.4 Planeación distribuida no coordinada

Sin las limitantes de los planificadores coordinados (distribuido o centralizado), la planificación distribuida no coordinada puede ser utilizada para inicialización ad-hoc rápida basada en enlace-por-enlace.

La planeación distribuida no coordinada, está establecida para peticiones y reservaciones directas entre dos nodos. Este tipo de planeación debe asegurar que las transmisiones de datos que resultan (y los paquetes de petición y reservación en sí mismos) no causen colisiones con los datos, ni con el tráfico de control de los métodos de planificación centralizada y distribuida coordinada.

En el caso coordinado, los mensajes MSH-DSCH están planificados en el *subframe* de control, libres de colisiones, mientras que, en el caso no coordinado, los mensajes MSH-DSCH pueden colisionar.

Los nodos responden a una petición, en el caso del no coordinado, espera un número suficiente de minislots de los indicados en el campo compuesto *AvailabilitiesIE* antes de responder con una reservación, tal que los nodos listados en el *DSCH:Request* tengan una oportunidad para responder. La confirmación del *DSCH:Grant* es enviada en los *minislots* inmediatamente seguida de la primera recepción exitosa del paquete *DSCH:Grant* asociado.

3.5 Conclusiones

A pesar de que la tecnología WiMAX no recibió la atención que se esperaba, está diseñada para dar servicios de banda ancha en zonas donde el despliegue de cable o fibra por baja densidad no sea posible, por falta de infraestructura. Este sistema tiene una cobertura de hasta 30 km con línea de vista y una velocidad máxima de 75Mbps.

Sin embargo, la topología *mesh* sigue siendo vigente y sigue siendo una opción para redes redundantes, en caso de requerir un sistema resiliente, como es en caso de los desastres naturales. Este tipo de redes utilizando TDMA pueden también utilizarse en redes con gran demanda de recursos y que requieran comunicación entre nodos, tales como es en IoT.

Finalmente, hay que señalar que las redes inalámbricas proveedoras de comunicaciones siguen en constante desarrollo, para obtener mayores velocidades de transmisión, mejorar la disponibilidad, la fiabilidad, la seguridad y resolver problemas de ruidos e interferencias.

Capítulo 4

Descripción del Modelo de Simulación

4.1 Introducción

Para entender el funcionamiento de una red y sus algoritmos se necesita realizar un estudio de su comportamiento, por lo que se ha implementado un modelo de simulación detallado de la capa MAC para redes *mesh* del protocolo IEEE 802.16 con la herramienta de simulación OPNET v. 14.5. Este software provee un conjunto de editores para especificar diferentes niveles de análisis y diseño, tales como el funcionamiento de la capa física, donde se configura y se adapta el funcionamiento de todo el *pipeline*³ desde la recepción de la señal, realizando el análisis del BER (Tasa de Error de Bits, *Bit Error Rate*) para la aceptación de

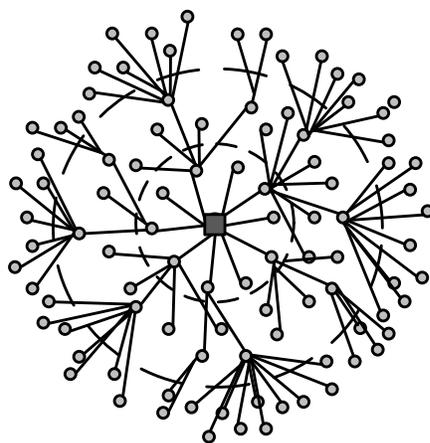
³ Conjunto de pasos en la capa física, que comienza con la transmisión y termina con la validación de la recepción.

paquetes. Así como también la capa MAC. en donde se estableció el mecanismo de planeación. Además, se modelaron la capa de red y la generación de tráfico generado desde la capa de aplicación.

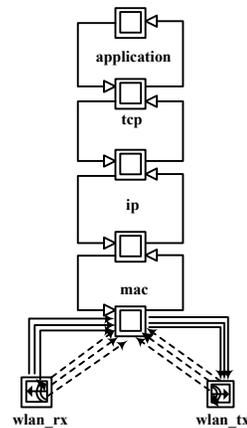
El modelado para la simulación de la capa MAC es desarrollado en diferentes etapas; la primera es el diseño para la inicialización y sincronización de cada uno de los nodos dentro de la red *mesh*, para lo que se utilizaron los paquetes de señalización mencionados en el capítulo anterior. La segunda es la planeación a 3-vías con envío de diferentes tipos de tráfico y la tercera, la planeación bajo demanda específicamente para VoIP.

4.2 Modelo de Simulación

Un diseño jerárquico de tres niveles es implementado, tanto para la inicialización como para la planeación como se muestra en la figura 4.1. En el nivel superior se muestra la topología de red que se utiliza para la inicialización junto con la conectividad generada en la figura 4.1.(a), donde se muestra el árbol generado por la comunicación centralizada a la MBS.



(a) Modelo de Red



(b) Modelo de Nodos

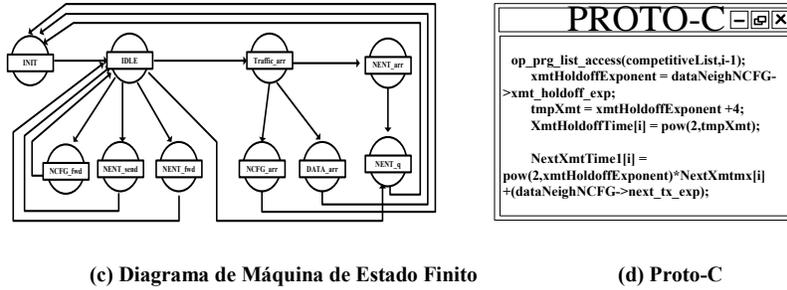


Figura 4.1. Modelo de Simulación.

El siguiente nivel, es el Modelo de Nodos donde se define la funcionalidad de una MSS en términos de componentes tales como módulos de transmisión y recepción, interfaces MAC, la capa de red, de transporte y la capa de aplicación para generación de tráfico, como se muestra en la figura 4.1(b). La operación de cada componente se define por una máquina de estado finito como se muestra en la figura 4.1(c), la cual define cada una de las acciones que se lleva a cabo dentro de los nodos. Las acciones de un componente en un estado particular se definen en código Proto-C, como se muestra en la figura 4.1(d) Este enfoque permite modificaciones que deben aplicarse a la operación del protocolo IEEE 802.16 y probar diferentes optimizaciones y mejoras.

A continuación, se describen los diferentes modelos que provee la herramienta, y los cuáles se implementan en este trabajo de tesis:

- **Modelo de Red.** Se construye la topología de la red a alto nivel, en el caso del modelado para la inicialización consta de una topología con una estación base y 100 estaciones suscriptoras con configuración idéntica y con tres niveles de cobertura. En el caso del modelado para planificación se diseñó una malla de 5 x 5 nodos, cada uno con cobertura de 1 km aproximadamente.
- **Modelo de Nodos.** Se describe el comportamiento de los diferentes módulos que desempeñan papeles específicos, como pueden ser las diferentes capas por la que pasan los datos en la pila de protocolos. En este trabajo de tesis se implementa un nuevo modelo para el funcionamiento de la capa MAC.

-
- **Modelo de Procesos.** Se define el comportamiento de cada nodo, basada en una estructura de máquina de estados finito, que son definidas en lenguaje Proto-C, emulan el comportamiento y funcionalidad de sistemas reales, en este caso de estudio se modelan 3 procesos, MBS, MSS y el generador de tráfico, estos modelos evolucionaron como era de esperarse a partir de la fase de inicialización hasta la fase del modelado de la planeación, en donde diferentes tipos de tráfico pueden ser enviados, identificado los tiempos de envío.

A continuación, se explica más detalladamente cómo funciona el Modelo de procesos, ya que es fundamental para entender el modelo desarrollado. Cada estado o proceso cuenta con dos conjuntos de instrucciones a ejecutarse, el primero cuando se entra al estado y el segundo cuando se sale de él. Existen diferentes tipos de estados: inicial, obligatorio (*forced*) u optativo (*unforced*), como se describe en la figura 4.2.



Figura 4.2 Estados programables del Modelo de Procesos.

El estado inicial se muestra en color verde en la figura 4.2(a), pero generalmente se utiliza como obligatorio en las variables que se utilizan durante la simulación, es identificado con una flecha de inicio. En la figura 4.2(b), se muestra el tipo de estado *unforced*, que permite realizar una pausa después de ejecutar las instrucciones del bloque *Enter Exec*, quedar en esperar, y posteriormente ejecutar el bloque *Exit Exec*. Por ejemplo, para utilizar en un estado *idle*, que permite pausar la ejecución hasta recibir una interrupción como es el caso del arribo de un paquete o que se cumplan las condiciones de tiempo para el envío de un paquete. Y

por último en 4.2(c) se muestra el estado *forced*, no permite este tipo de pausas, ejecuta el código hasta terminar probablemente con el envío de alguna interrupción o un cambio en las variables para que se cumpla una transición.

Las transiciones también son importantes para saber que ya se concluyó un proceso y se enviará al siguiente. Además de programar interrupciones para poder lanzar un estado en específico o esperar un evento. Existe un archivo de encabezados, al estilo del lenguaje de programación C (Proto-C), en donde se definen las macros y es en donde se evalúa que los valores de la transición se cumplen. En la tabla 4.1 en conjunto con la imagen 4.3 se muestra el ejemplo de la definición de una transición NCFG_SEND, suponiendo que se acaba de recibir un paquete de tipo MSH-NENT (detectado en el estado IDLE), se prepara para contestar enviando un mensaje MSH- NCFG.

```

/***** Includes *****/
#include "mesh_support.h"
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>

/***** State transition macros *****/
#define NCFG_CODE 10
#define NENT_CODE 20

#define NCFG_SEND (intrpt_type == OPC_INTRPT_SELF && intrpt_code == NCFG_CODE
&& ncfg_send == 1 )
#define NENT_ARRIVAL (intrpt_type == OPC_INTRPT_STRM && nent_arrival == 1)
#define CTRL_ARRIVAL (intrpt_type == OPC_INTRPT_STRM && ctrl_arrival == 1)

```

Tabla 4.1 Definición de transiciones en el *HEADER* del Modelo de Procesos.

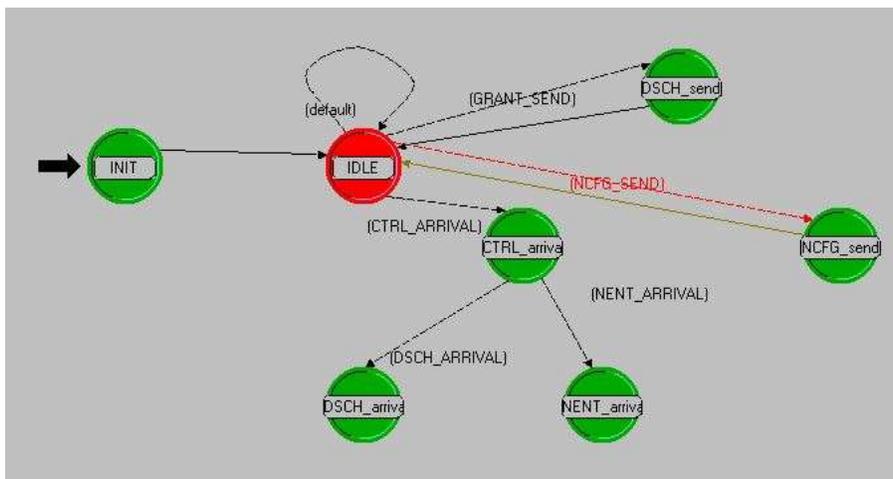


Figura 4.3 Ejemplo de transición en el Modelo de Procesos.

4.3 Capa física

Para el sustento de la capa física, OPNET maneja un procedimiento conocido como *pipeline*, definido para *bwa*⁴, que es una serie de pasos que se realiza en el *radio link* para la transmisión/recepción de un paquete. En la figura 4.4 se muestra este proceso.

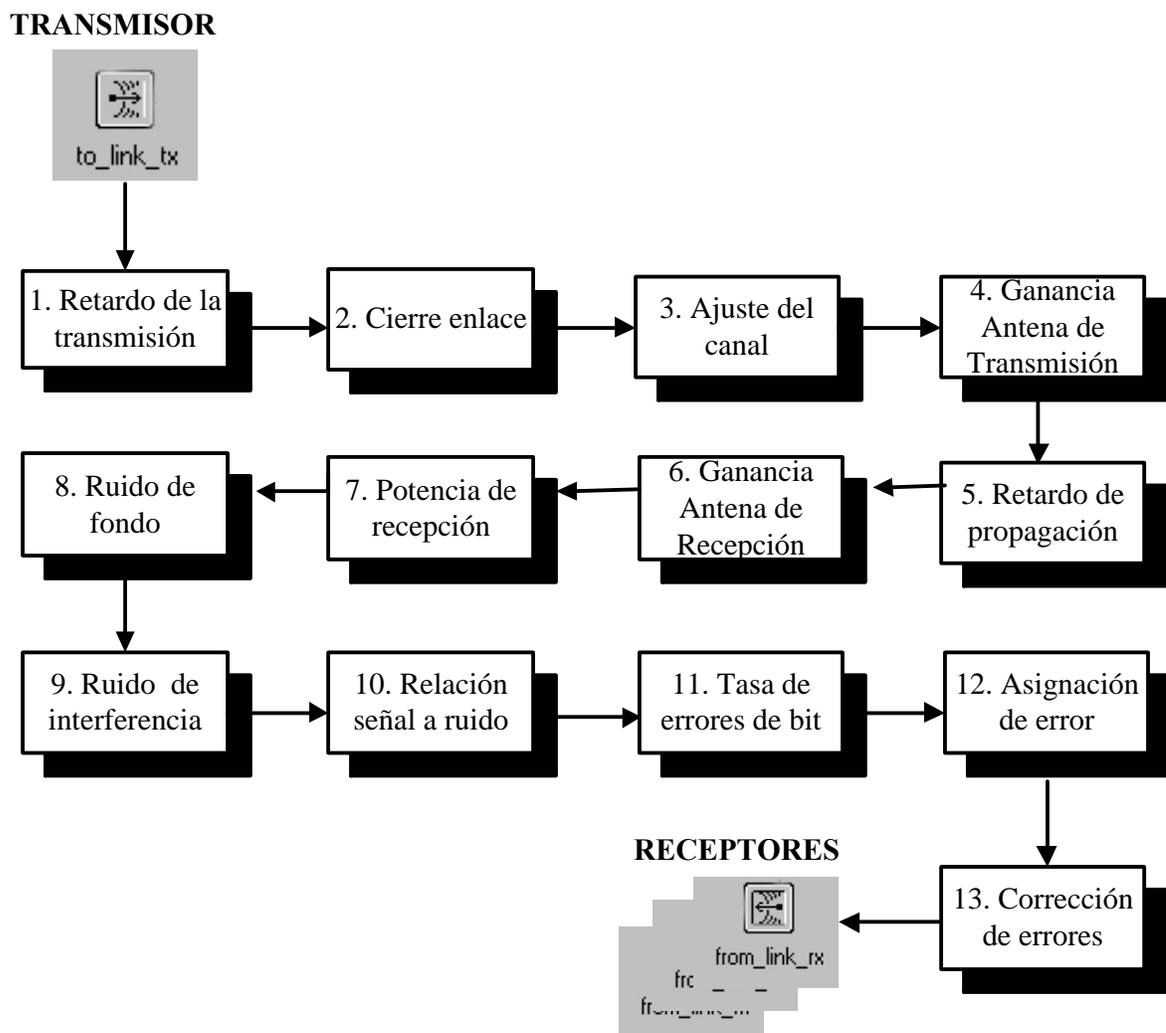


Figura 4.4 Pipeline del radio link.

⁴ *bwa* hace referencia al modelo inalámbrico de banda ancha, que implementaba la tecnología WiMAX

Cada uno de los puntos se analiza basándose en el conjunto de programas de Proto-C, que la herramienta OPNET provee, los cuales se modifican y adaptan a los parámetros para simular el funcionamiento y comportamiento de una red *mesh*.

El modelo de propagación implementado se basó en el modelo de Erceg [33][32], este artículo presenta un estudio de propagación en zonas suburbanas, y clasifica en 3 categorías los diferentes tipos de terrenos dependiendo de la densidad de árboles y de si el terreno es plano o accidentado, los cuáles se muestran en la tabla 4.2. Este modelo es recomendado por el grupo de trabajo de la IEEE 802.16.

Parámetros	Categoría de Terreno		
	A Accidentado/ Densidad de árboles moderada a alta	B Accidentado/Densidad de árboles ligera o Plano/Densidad de árboles alta.	C Plano/ Densidad de árboles ligera.
A	4.6	4.0	3.6
B	.0075	.0065	.0050
C	12.6	17.1	20.0
σ_γ	0.57	0.75	0.59
μ_σ	10.6	9.6	8.2
σ_σ	2.3	3.0	1.6

Tabla 4.2 Parámetros *Erceg* del modelo de propagación.

Para esta investigación se considera un terreno con parámetros de Categoría A, debido a que en un contexto rural o en terrenos con algunos edificios las redes *mesh* de banda ancha aportan beneficios en la comunicación entre viviendas distantes, en donde sería funcional tener una antena WiMAX o alguna otra tecnología que soporte redes *mesh*, atendiendo a situaciones donde la resiliencia es crucial, como en caso de desastres naturales.

El modelo elaborado se desarrolló sobre un modelo de propagación ya existente, como se ha mencionado anteriormente, en el cuál se ajustan los parámetros tanto para el envío y recepción. Para definir el comportamiento de la capa física, se utilizan los parámetros de simulación mostrados en la tabla 4.3.

Se ocupa una potencia de 0.3 W, con la finalidad de que la cobertura de cada nodo no sobrepasara 1 km como se muestra en la figura 4.5, además de poder utilizar una modulación menos propensa a errores, como es QPSK.

Parámetros	Valores
Duración de Frame T_F	10 ms
No. de símbolos OFDM / <i>frame</i>	1024
No. de símbolos OFDM / <i>slot</i>	4
Tiempo por oportunidad de transmisión / <i>slot</i>	68.359 μ s
No. slots / <i>frame</i>	256
No. de bytes / Símbolo OFDM	72
Ancho de Banda	25MHz
Potencia de nodos	0.3 W
Tasa de transferencia de datos	59 Mbps
Modulación	QPSK
Número de portadoras (NFFT)	256

Tabla 4.3 Parámetros de simulación.

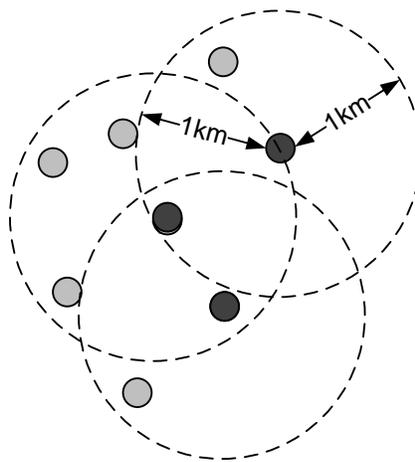


Figura 4.5 Cobertura entre los nodos.

4.4 Capa MAC

A continuación, se muestran los diagramas de estados finitos que son programados como base al modelo de simulación, para el funcionamiento de la capa MAC con redes *mesh*. Para la MBS, se crean estados que manejan los mensajes de control diferenciándolos entre sí,

procesándolos y retransmitiéndolos cuando es necesario. Para las MSSs, se realiza un solo modelo de estados finitos, en el cuál se definió la generación, envío, recepción, y el reenvío de paquetes, tanto para los paquetes de control de planificación, como para los paquetes de datos del tráfico generado.

4.4.1 Modelado de la inicialización y registro

Lo primero que se realiza es la creación de los mensajes definidos en el estándar para la inicialización y registro. El mensaje MSH-NENT permite a un nodo candidato mostrar su interés de ingreso a la red una vez recibido el mensaje de configuración MSH-NCFG, el cuál envía la información de configuración de la red.

En la figura 4.6 se muestra el diagrama de procesos que se implementa para el funcionamiento de la MBS. Se modela el comportamiento para el intercambio de mensajes de señalización durante la inicialización.

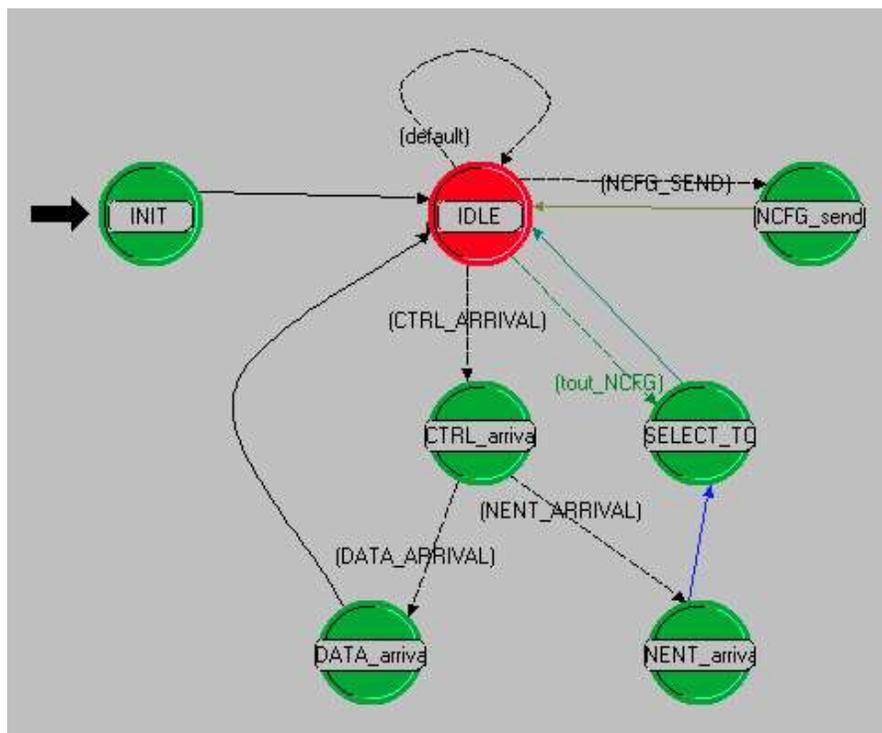


Figura 4.6 Modelo de Procesos de Estados Finitos en MBS.

El estado inicial (INIT) de la estación suscriptora denota el arranque de la simulación, cuando se envía un mensaje *NCFG:Network Descriptor* de tipo *broadcast* y se inicializan las estructuras que son utilizadas a lo largo de toda la simulación. Posteriormente, el estado IDLE toma el control para filtrar las interrupciones que llegan a la estación base, dependiendo de la interrupción, se habilita el valor para activar la transición correspondiente para enviar al estado finito y hacer el manejo de la interrupción.

En el estado de *NCFG_send* se realiza, como su nombre lo indica, el envío de todos los mensajes *NCFG*, el empaquetamiento de toda la información requerida de acuerdo al tipo de mensaje que se tenga que enviar y/o contestar. *CTRL_Arrival* controla todo el tráfico entrante, y permite discernir el tipo de mensaje que debe ser enviado. Si el paquete es de datos se canaliza al estado *DATA_Arrival*, en este diagrama no hace más que descartar el paquete.

En el caso de ser un paquete de tipo *MSH-NCFG:NetworkEntry* se delega al estado *NENT_Arrival*, y debido a la cantidad de paquetes que pueden llegar simultáneamente, se utiliza el estado auxiliar *SELECT_TO* para encolar estos paquetes, programarlos y decidir en qué orden se van contestando. Así mismo, se va guardando los nuevos nodos integrantes de la topología en una estructura general de nodos, que posteriormente se utilizan para encontrar todas las vecindades extendidas y las rutas entre nodos. En la tabla 4.4 se explica brevemente la funcionalidad de cada estado.

Por otro lado, en la figura 4.7 se muestra el diagrama de procesos que se implementa para el funcionamiento de las MSSs. Algunos estados tienen funcionalidad análoga a los estados definidos en la estación base, pero se agregan otros para el manejo de reenvío de paquetes, utilizados específicamente cuando el nodo es intermediario para que un nuevo nodo ingrese a la red. En este caso es necesario calcular la ruta que debe seguir el mensaje para llegar a su destino e ir guardando la ruta de acceso para los mensajes posteriores de respuesta.

Como se puede observar en este diagrama de estados finitos no hay un encolamiento de mensajes tipo MSH-NENT ya que estos se procesan directamente en la estación base al ser un modelo centralizado. En la tabla 4.5 se resume la funcionalidad de cada estado.

Estado	Funcionalidad
INIT	Inicializa la simulación, obtiene parámetros fijos de red, determina las coordenadas de la MSS.
IDLE	Controla las interrupciones de acuerdo al tipo de mensaje entrante y delega al siguiente estado correspondiente para que éste sea procesado.
TRAFFIC_Arrived	Verifica el tipo de mensaje entrante y lo envía al estado correspondiente para que sea atendido.
DATA_Arrival	Si llegan paquetes de datos en este modelo en específico son desechados, únicamente se obtiene el retardo en el envío de la información.
NCFG_Arrival	Verifica el tipo de mensaje NCFG entrante, y la dirección MAC origen, es diferente cuando está en proceso de inicialización y cuando funge como promotor para que otros nodos ingresen a la red. Se calcula la siguiente TxOp ya sea para contestar con un mensaje NENT o para reenvío del mensaje.
NENT_Arrival	Este estado es utilizado cuando el nodo ya está en la red y está sirviendo de puente al ingreso de otro nodo. Envía el mensaje a la cola para ser procesado.
NENT_squeue	Maneja la entrada y salida de la cola de los mensajes MSH-NENT. Obtiene el tiempo para la siguiente TxOp de mensaje NENT y programa el mensaje que le toca salir de la cola para su envío.
NCFG_Fwd	Ejecuta el algoritmo de elección para verificar si el nodo gana en la TxOp actual, de ser así reenvía el mensaje a los nodos candidatos, que están dentro de su cobertura.
NENT_Send	Genera un paquete de respuesta MSH-NENT de acuerdo al criterio del MSH-NCFG entrante y lo envía.

NENT_Fwd	Invoca al algoritmo de elección para determinar el tiempo de envío del mensaje y programa la interrupción para la generación y envío del mismo.
-----------------	---

Tabla 4.5 Funcionalidad implementada en MSSs.

En la figura 4.8, se muestra el diagrama del modelo de la red utilizado para la realización de la simulación, y el árbol de ruteo generado utilizando la optimización de tiempo.

El estándar define que se utilice una TxOp para mensajes MSH-NENT para que los nodos compitan por su uso, a diferencia de este trabajo de tesis en donde se proponen 3 TxOps, con la finalidad de optimizar el tiempo en que la red se encuentra completamente habilitada para su funcionamiento.

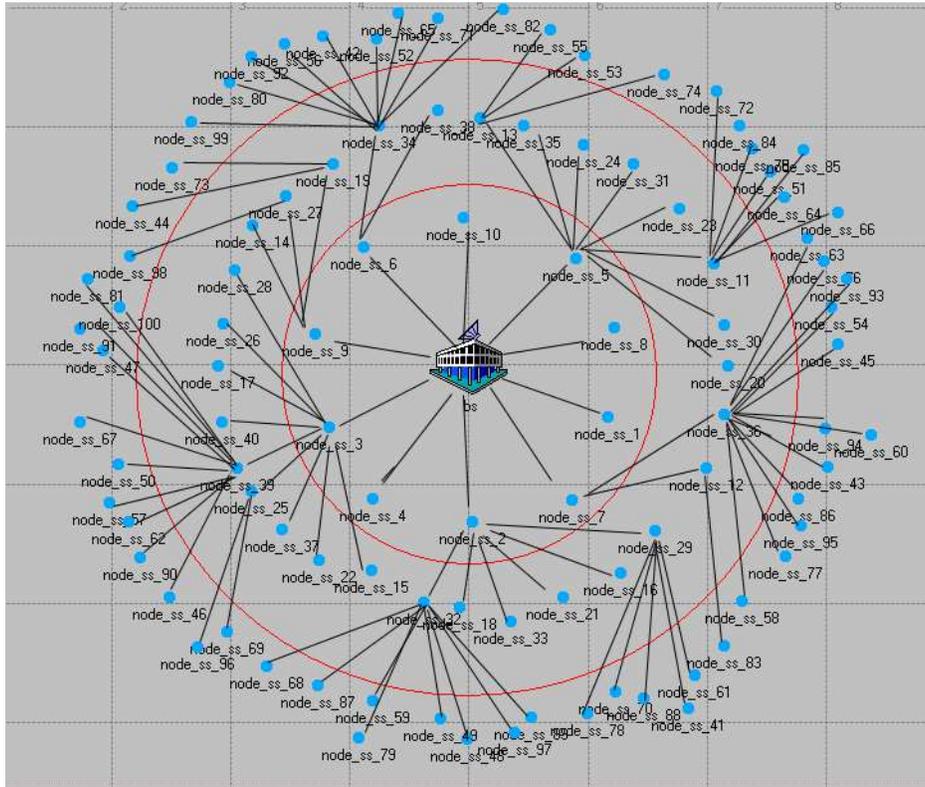


Figura 4.8 Diagrama del Modelo de Red.

4.4.2 Integración al modelo de control para la planificación de envío de datos

La implementación de planificación para el envío de datos se realiza en dos etapas:

- **Distribuida coordinada.** Se programó el envío de paquetes DSCH para la reservación de tiempos de transmisión, mediante 3 vías. *Request-Grant-ACK*.
- **Distribuida** bajo demanda. Se realiza el establecimiento de flujos dedicados sobre VoIP.

4.4.2.1 Planificación distribuida coordinada

En la figura 4.9, se muestra la evolución del diagrama de la estación base, asociado al nodo que coordina la planificación para el reconocimiento de los paquetes DSCH. En tabla 4.6 se describen los estados adicionales a partir del diagrama de diseño implementado para la inicialización.

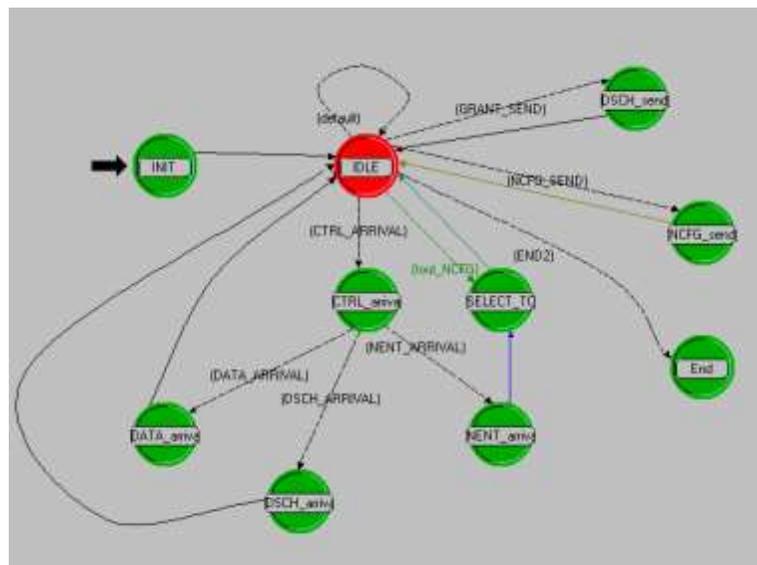


Figura 4.9 Diagrama de procesos para la MBS para planeación de 3 vías.

Estado	Funcionalidad
DSCH_arrival	Llegan todos los paquetes DSCH filtrados por el proceso IDLE, se verifica si el mensaje es para el nodo actual. Sí el mensaje es DSCH:Request se guarda la solicitud para ser procesada, ya que pueden llegar varias peticiones casi al mismo tiempo, se guarda la información

También se agregan los estados para recibir tráfico de datos desde la capa de aplicación. En tabla 4.7, se describen los estados adicionales para el nodo que funge como MBS, a partir del diagrama de diseño implementado para la inicialización.

Estado	Funcionalidad
DATA_SEND	Reenvía el tráfico en caso de ser necesario, adecuando el encabezado de mensajes al siguiente salto de la ruta, los paquetes de datos tienen asociado un índice que permite saber cuál es el tiempo para ser enviado.
DSCH_send	En este estado se compite por una TxOp tipo DSCH y si gana, prepara y envía un paquete DSCH: <i>Grant</i> proveniente de una o más peticiones de recursos en orden de llegada. Se calcula el tiempo exacto de respuesta para los nodos que realizan la petición. Finalmente, se comparan los tiempos en la sección de <i>Availabilities</i> de los nodos involucrados y verifica que no existan colisiones.
DSCH_Arrival	Llegan todos los paquetes DSCH filtrados por el proceso IDLE, se verifica si el mensaje es para el nodo actual, si el mensaje es de solicitud de datos DSCH: <i>Request</i> se guarda la solicitud para ser procesada ya que pueden llegar varias casi al mismo tiempo. Si el mensaje es de concesión DSCH: <i>Grant</i> se verifica si hay que retransmitirlo o si es para el nodo actual y se programa la respuesta como un mensaje DSCH: <i>ACK</i>
ACK_DSCH	Envía el mensaje de confirmación en la TxOp ganadora y prepara los paquetes de datos para ser enviados en los <i>slots</i> concedidos por el nodo inmediatamente siguiente en la ruta.
REQ_DSCH_SEND	Se genera un paquete de solicitud de recursos, se calcula el número de <i>slots</i> para poder enviar el tipo de tráfico que se desea, y se envía el mensaje de petición de recursos DSCH: <i>Request</i> en la TxOP actual, si es que ganó en el algoritmo de elección.

Tabla 4.7 Funcionalidad para el manejo de mensajes DSCH en MBS.

4.4.2.2 Planificación bajo demanda

En esta última etapa, se adapta el modelo para establecer flujos de datos y programar el tiempo de envío de tráfico para VoIP. En la figura 4.11, se muestra el grupo de los 16 estados finales, para el funcionamiento de la red *mesh*. En la tabla 4.8, se describe el último estado agregado, que permite enviar el tráfico a través del flujo previamente determinado.

4.5 Modelado y generación de tráfico

En el proceso de apertura de conexión por medio del control de 3-vías Se programan tres generadores de tráfico, cada uno con un tipo de QoS, como se muestra en la tabla 4.9.

TIPO DE TRÁFICO	FTP	VoIP	BE
NODOS QUE GENERAN Y RECIBEN EL TRÁFICO	1004, 1005 Y 1006	1001,1004 Y 1006	1001, 1002, 1003, 1004, 1005 y 1006
TAMAÑO DE PAQUETE	1400 bytes	84 bytes	64,128,256,512,1024 y 1518 bytes
TIEMPO ENTRE PAQUETES	0.05 seg.	0.03 seg.	
OFF PERIOD	1 seg	1 seg	
ON PERIOD	1 seg.	0.06 seg.	
DISTRIBUCION [34]	constante	constante	64b_pk_dist: 0.6 128b_pk_dist: 0.66 256b_pk_dist: 0.7 512b_pk_dist: 0.72 1024b_pk_dist: 0.97 1518b_pk_dist: 1.0

Tabla 4.9 Generación de tráfico para 3-vías.

En la figura 4.13, se muestra el diagrama de estados utilizado para el envío de tráfico. Este diagrama es el que se invoca en ambas pruebas, lo que se configura es la definición y parámetros para el tipo de QoS. Para la propuesta VoIP se utiliza el estándar G723.1[33]. Se crea el paquete y se envía periódicamente cada 30 ms como establece el estándar, además de activar solo los nodos que han solicitado transmitir, es decir que tienen una reservación para el envío de los datos de toda la ruta, en un flujo bidireccional de origen-destino.

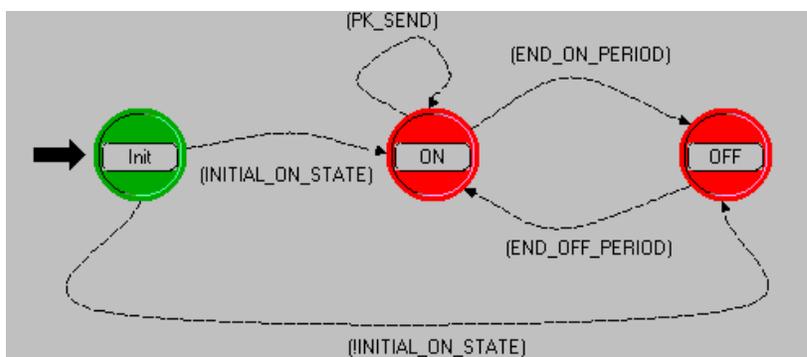


Figura 4.13 Generación de tráfico.

4.6 Conclusiones

Se modelan y programan las diferentes capas de una red inalámbrica de banda ancha, con topología *mesh*, con la finalidad de comprobar el funcionamiento y el comportamiento dinámico. Se definió la inicialización y la planeación para envío de datos en varias etapas de implementación del modelo. En la capa física se configuraron los parámetros para el funcionamiento de la red *mesh*, en la capa MAC se implementaron los mensajes de control y envío de datos. Finalmente, en la capa de aplicación se realiza un modelado para la generación de tráfico con distintos tipos de QoS. Finalmente se modela el envío de VoIP con reservaciones bajo demanda.

Capítulo 5

Inicialización y registro

5.1 Introducción

La primera etapa de este trabajo consta de una propuesta para optimizar los tiempos de inicialización y sincronización de la red después de una interrupción del servicio, como por ejemplo una falla eléctrica, provocada por un desastre natural o ventana de mantenimiento. En este capítulo se describe la propuesta para optimizar el comportamiento dinámico de la inicialización de la red *mesh*.

Se analiza a detalle el estándar para generar el modelo de una red *mesh* que inicializa cada uno de sus nodos. Enfocando principalmente la atención en la sincronización de tiempos entre mensajes de inicialización, para llevar a cabo un mejor rendimiento de oportunidades de transmisión de cada uno de los mensajes.

5.2 Sincronización

Los procedimientos de inicialización de los nodos y de entrada en la red en modo *mesh* son diferentes de los del modo PMP definidos en el estándar IEEE 802.16-2004. Un nodo para entrar en la red *mesh* debe llevar a cabo los siguientes pasos:

- 1) Analizar la red en busca de actividad para establecer la sincronización de red.
- 2) Obtener los parámetros de red (por medio de mensajes MSH-NCFG).
- 3) Abrir un canal *Channel Sponsor*.
- 4) Recibir la autorización del nodo adyacente.
- 5) Realizar registro.
- 6) Establecer conectividad IP.
- 7) Establecer hora del día.
- 8) Transferir parámetros operacionales.

En la inicialización, después de la pérdida de la señal o una interrupción de energía, se realiza una búsqueda de nodos por medio de una inundación de mensajes MSH-NCFG para establecer sincronización con la red *mesh*. Al recibir un mensaje MSH-NCFG, el nodo adquiere la hora de la red desde el campo *timestamp*. Un nodo que puede guardar la información de sincronización puede utilizar estos parámetros para intentar establecer la comunicación nuevamente. Si esto falla, los nodos comienzan a explorar continuamente posibles canales hasta que se encuentra un enlace válido. El nodo permanece en sincronización desde que recibe mensajes MSH-NCFG desde el mismo nodo dos veces y hasta que haya recibido un mensaje MSH-NCFG:*NetworkDescriptor* con un descriptor de ID de la red a la que pertenezca. Paralelamente, el nuevo nodo construye una lista de vecinos de la información adquirida.

El proceso de inicialización comienza con un nodo candidato, que transmite un mensaje tipo MSH-NENT:*NetEntryRequest* a un nodo promotor⁵, que puede ser el MBS o un nodo

⁵ Como se había es el nodo que apoya como nodo intermedio al ingreso a la red para los nodos que no están en la cobertura de la MBS.

intermedio. A la recepción del mensaje MSH-NENT: *NetEntryRequest* con el ID de nodo promotor igual al ID de nodo de su propia red, el nodo patrocinador evalúa la solicitud y, abre el canal o rechaza la solicitud.

La respuesta se da en un mensaje MSH-NCFG con datos embebidos. Si el nodo patrocinador no hace publicidad de la dirección MAC del nodo candidato en la siguiente transmisión MSH-NCFG del patrocinador, entonces el procedimiento se repite MSH_SPONSOR_ATTEMPTS veces utilizando un intervalo de retardo de envío al azar entre los intentos. Si no se logra, entonces se selecciona un nodo patrocinador diferente y se repite el procedimiento. Si el nodo patrocinador seleccionado hace publicidad de la dirección MAC del nodo candidato, sigue anunciando esta dirección MAC en todos sus mensajes MSH-NCFG hasta que se termina el patrocinio.

Una vez que el nodo candidato ha recibido una respuesta positiva (un mensaje MSH-NCFG: *NetEntryOpen*) desde el nodo patrocinador, debe confirmar dicha solicitud, mediante la transmisión de un mensaje MSH-NENT: *NetEntryAck* al nodo promotor en la siguiente entrada de la red TxOp. Entonces, el nodo candidato y el nodo promotor utilizan la programación indicada en el mensaje MSH-NCFG: *NetEntryOpen* para llevar a cabo el intercambio de mensajes. Este canal es temporal y se llama canal patrocinador, donde todos los mensajes relacionados al nodo, tales como parámetros de configuración son transmitidos. Después de que se completa esta configuración, el nodo candidato termina el proceso de entrada mediante el envío de un mensaje MSH-NENT: *NetEntryClose* al nodo promotor en la transmisión entrada de la red inmediatamente después de una transmisión MSH-NCFG desde el nodo promotor. Al recibir este mensaje, el nodo promotor envía un ACK al confirmar el final del proceso de inicialización enviando un mensaje MSH-NCFG: *NetEntryAck* para el nodo candidato.

En la figura 5.1, se muestra el intercambio de mensajes para la inicialización de la programación centralizada y distribuida. En el esquema centralizado, el nodo X y el nodo MBS actúan como el nodo candidato y el nodo promotor, respectivamente.

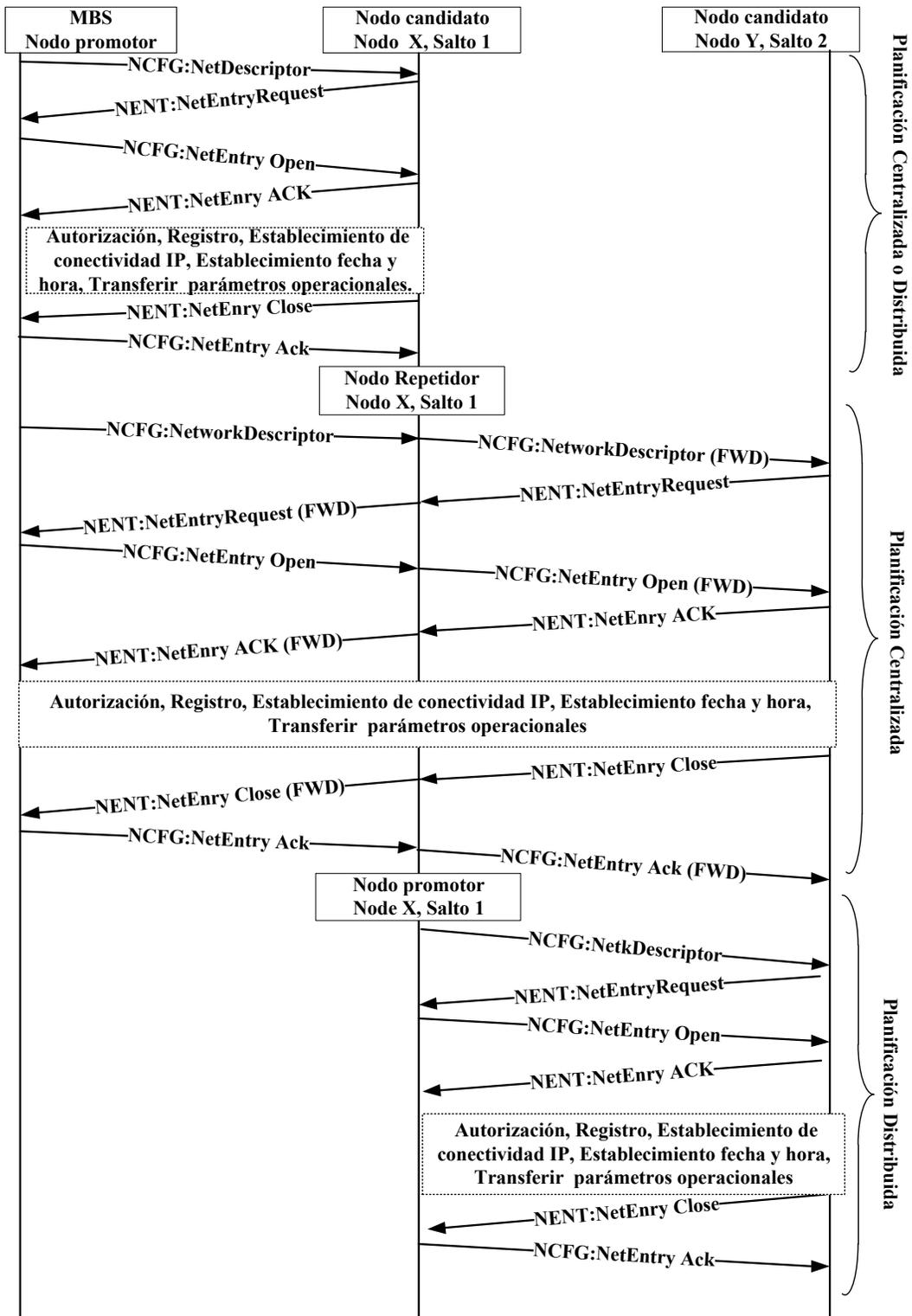


Figura 5.1 Envío de señalización en el proceso de inicialización.

Una vez que se configura el nodo X, se convierte en un nodo de transmisión de manera que otros nodos, como el nodo Y, se pueden configurar mediante el proceso de inicialización anterior. En este caso particular, la MBS todavía permanece como el nodo promotor y el nodo Y, se convierte en el nuevo nodo candidato.

En el esquema distribuido, cuando se configura el nodo X, se convierte en un nodo promotor, que puede configurar directamente otros nodos, como el nodo Y. En las secciones siguientes nos centramos en el rendimiento de inicialización del sistema centralizado.

5.3 Propuesta para control de planeación en la inicialización

En caso de un corte en el servicio, para la inicialización de la red cada nodo candidato primero se tiene que sincronizar con la red *mesh*, como se describe en la sección anterior. Entonces, cada vez que el nodo candidato recibe un mensaje MSH-NCFG con dirección MAC = 0x000000000000, el nodo candidato debe transmitir su primer mensaje (MSH-NENT: *NetEntryRequest*) al nodo promotor o los MBS que utilicen el acceso basado en contención, en la siguiente TxOp para el mensaje MSH-NENT.

Los otros mensajes (MSH-NENT: *NetEntryAck*, y MSH-NENT: *NetEntryClose*) deberían transmitirse inmediatamente usando el siguiente MSH-NENT TxOp, después de que el nodo candidato recibe sus mensajes MSH-NCFG asociados, como se describe anteriormente. Por lo tanto, el verdadero problema es que, en un corte de servicio, decenas de nodos compiten por las TxOps para los mensajes MSH-NENT, resultando en un rendimiento del sistema durante inicialización muy deficiente, debido a un gran número de colisiones. El rendimiento en la inicialización es todavía menor si los parámetros de configuración no están optimizados para la transmisión de mensajes MSH-NENT.

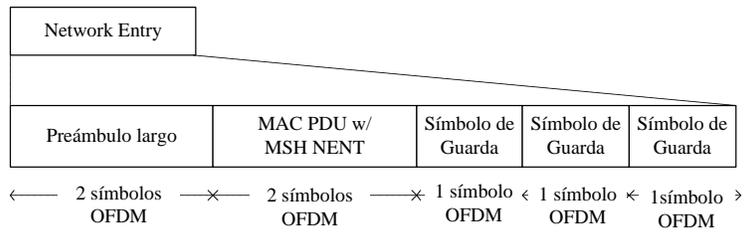
Estos parámetros se muestran en la tabla 5.1, y se describe brevemente la funcionalidad que tienen dentro de la planeación de señalización en la inicialización.

Parámetro	Descripción
Duración <i>Frame</i> (F_D)	Define la duración del <i>frame</i> que contienen los <i>subframe</i> de control y datos.
XmtHoldoffExponent (XHE)	Este parámetro de configuración es utilizado para calcular XmtHoldoffTime. [0-7].
XmtHoldoffTime (XHT)	Indica el número de MSH-NCFG TxOps que un nodo necesita esperar antes del tiempo NextXmtTime.
NextXmtMx (NXM)	Parámetro de configuración utilizado para calcular el intervalo NextXmtTime. [0-31]
NextXmtTimeInterval (NXTI)	Indica el siguiente intervalo en el cual el nodo es considerado elegible para la siguiente transmisión del mensaje MSH-NCFG.
NextXmtTime (NXT)	Indica el tiempo de la TxOP para transmitir el siguiente MSH-NCFG.
EarliestSubsequent-XmTime (ESXT)	Define la TxOp más cercana en la que el nodo es elegible para transmitir un mensaje MSH-NCFG después de NextXmtTime
TempXmtTime (TXT)	Define el siguiente intervalo de TxOp que un nodo utiliza para competir con otros vecinos contendientes basado en el algoritmo <i>Mesh Election</i> .
Scheduling Frames(S_F)	Indica cuantos frames de planeación debe de haber entre dos frames de control.
MSH-CTRL-LEN (L)	Indica el número de TxOp por subframe de control.

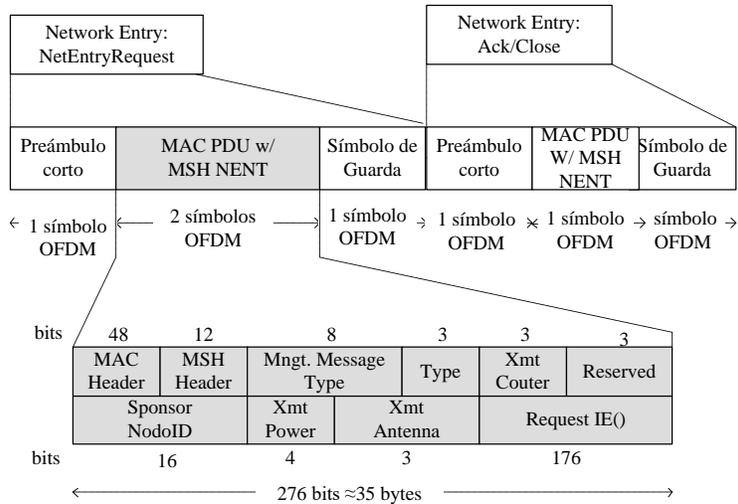
Tabla 5.1. Parámetros de Control de señalización para la inicialización.

Debido a que el estándar [1] define una única MSH-NENT TxOp de 7 símbolos OFDM en cada *frame* S_f , como se ilustra en la figura 5.2(a).

Se propone la estructura de trama como se muestra en la figura 5.2(b) para optimizar esta región, en nuestro esquema de *frames*, después de un corte de energía, por ejemplo, nos proponemos a utilizar preámbulos cortos para la transmisión de mensajes MSH_NENT. Esto puede ser posible, simplemente activando una bandera de preámbulo corto en la estructura *Nbr Logical IE Information* incluido en el mensaje MSH-NCFG (con *sponsored MAC address* = 0x000000000000), como se indica en [1], sección 8.3.3.6.



(a) Estructura de MSH-NENT:Network Entry definida en el estándar.



(b) Estructura para la trama del mensaje Network Entry propuesta.

Figura 5.2 Estructura de la trama para el envío de mensajes MSH-NENT.

También proponemos utilizar un solo símbolo de guarda. Esto es posible debido a que el estándar define que la brecha de transición para todos los perfiles de sistemas WirelessMAN-OFDM debe ser $\leq 100 \mu\text{s}$ (sección 12.3, [1]). En la tabla 5.2, se muestra que para todos los anchos de banda de canal compatibles en el modo *mesh*.

La duración del símbolo OFDM (T_s) es menor de $100\mu\text{s}$. Este retardo es calculado a través de las siguientes ecuaciones:

$$T_s = \left(\frac{1}{\Delta f}\right) (1 + G) = \left(\frac{N_{FFT}}{nBW}\right) (1 + G), \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\Delta f = \left(\frac{f_s}{N_{FFT}}\right), \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$f_s = nBW, \quad \dots\dots\dots (5)$$

		NENT TxOps	1	2	4	1	2	4	1	2	4
BW	T _s	S _f	10	10	10	8	8	8	4	4	4
[MHz]	[μs]	No.OFDM symbol/frame]	γ [%]								
3	84	119	0.6	1.2	2.4	0.7	1.5	2.9	1.5	2.9	5.9
3.5	72	138	0.5	1.0	2.0	0.6	1.3	2.5	1.3	2.5	5.1
5.5	46	219	0.3	0.6	1.3	0.4	0.8	1.6	0.8	1.6	3.2
7	36	277	0.3	0.5	1.0	0.3	0.6	1.3	0.6	1.3	2.5
10	25	400	0.2	0.4	0.7	0.2	0.4	0.9	0.4	0.9	1.8
25.6	10	1024	0.1	0.1	0.3	0.1	0.2	0.3	0.2	0.3	0.7

Tabla 5.2. Utilización del canal “γ” para mensajes NENT.

donde Δf es el ancho de banda de frecuencia ortogonal, G es un factor que compensa el prefijo cíclico ($G = 1/8$), f_s es la frecuencia de muestreo, N_{FFT} es el número total de subportadoras (es decir $N_{FFT} = 256$), y n es el factor de muestreo que depende del canal de ancho de banda (BW) dada por la tabla 5.3.

BW (MHz)	Factor de Muestreo(n)
1.75(múltiplos de)	8/7
1.5(múltiplos de)	86/75
1.25(múltiplos de)	144/125
2.75(múltiplos de)	316/275
2(múltiplos de)	57/50
25.6	144/125

Tabla 5.3 Factor de muestreo “n” por BW.

Se establece como garantía, que la utilización máxima consumida por los mensajes de entrada de la red está por debajo de 2.5% de la capacidad del canal para los casos más prácticos, cuando el ancho de banda del canal está entre 7 y 25.6 MHz, como se muestra en la tabla 5.2. La utilización del canal se denota por γ para diferentes configuraciones de BW, el número de MSH-NENT, TxOps y *frames* de planeación (S_f). Este parámetro se calcula a partir de F_D que es la duración de *frame* establecida en 10 ms, y S_f que indica el número de *frames* de

planeación. Sólo en casos especiales, cuando el ancho de banda del canal es de 3.5 MHz o inferior, el máximo aprovechamiento del canal podría ser de hasta el 5.9% de la capacidad del canal.

Además, los *frames* en el modo de *mesh* (es decir de configuración centralizada, y de planeación centralizada y distribuida) utilizan un símbolo de la guarda. Por lo tanto, el uso de un símbolo para este espacio de transición está dentro de los valores operativos.

Mediante el uso de preámbulos cortos y considerando un símbolo de guarda, se logra transmitir dos mensajes MSH-NENT en una TxOp como se ilustra en la figura 5.2(b). En los primeros 4 símbolos OFDM podemos transmitir un mensaje MSH-NENT con *Type=0x02: NetEntryRequest*. Sin embargo, en los últimos 3 OFDM símbolos solamente se puede transmitir, ya sea un mensaje MSH-NENT con *Type = 0x01: NetEntryAck* o un mensaje MSH-NENT con *Type =0x03: NetEntryClose*. Por lo tanto, basta comprobar que la MAC PDU con mensajes tipo NENT cabe en dos símbolos OFDM para la opción *NetEntryRequest* y en un símbolo para las opciones *NetEntryClose/NetEntryAck*.

En la tabla 5.4, se muestra la codificación de canal por modulación utilizando la configuración del modo *mesh*. Sin embargo, la transmisión de *subframes* de control (como MSH-NENT y MSH-NCFG) debe enviarse usando el esquema de codificación obligatorio: QPSK con velocidad de codificación general $CR = 1/2$, y $m = 2$ bits por símbolo. El tamaño de *frame* no codificado en *bytes* que puede ser transmitido en un símbolo OFDM está dado por la ecuación (6).

$$\beta = N_{used}mCR/8 \quad \dots\dots\dots (6)$$

Modulación	Bits por símbolo (m)	Tamaño de bloque sin codificar [bytes]	Tamaño de bloque codificado	Tasa total de codificación (CR)
QPSK	2	24	48	1/2
QPSK	2	36	48	3/4
16-QAM	4	48	96	1/2
16-QAM	4	72	96	3/4
64-QAM	6	96	144	2/3
64-QAM	6	108	144	3/4

Tabla 5.4 Codificación del canal por modulación.

Además, mejoramos aún más el sistema de *frames* propuesto mediante el uso de 3 bits de la reserva presentada en el formato del mensaje MSH-NCFG. Con estos 3 bits se propone añadir los siguientes parámetros:

- *NetEntry Power Outage Flag*, "NetPwrOut", (1 bit).

0: Indica el funcionamiento normal.

1: Indica los nodos de entrada de la red después de un corte de energía.

- *NetEntry Transmisión de Oportunidades*, "NENT" (2 bits):

00: 1 TxOp es necesario cuando $NetPwrOut = 0$.

01: Se requiere 2 TxOps cuando $NetPwrOut = 1$.

10: 3 TxOp son requeridas cuando $NetPwrOut = 1$.

11: 4 TxOp son requeridas cuando $NetPwrOut = 1$.

Cuando la bandera *NetPwrOut* se establece en 1, se indica también que nuestra estructura de *frames* propuesto, como se describe en la figura 5.2(b), se debe emplear en el proceso de inicialización después de un corte de energía.

Mediante el uso de la estructura propuesta de *frames* y los nuevos parámetros, el rendimiento del sistema, durante el proceso de inicialización, se mejora considerablemente, cómo se muestra en la sección de resultados. Sólo tenemos que explicar cómo se lleva a cabo la programación de los mensajes de control. Con el fin de transmitir los mensajes NCFG, es estándar [1] define que después de la transmisión de un mensaje NCFG en el NXT TxOp, como se muestra en la figura 3.5, un nodo "X" debe aplazar su transmisión por un período de $ESXT = 2^{XHE} + 4 \text{ TxOp}$, antes de contender de nuevo. Una vez transcurrido el período EXST de un nodo X, tal nodo debe contenido en cada TxOp durante el intervalo $2^{XHE}NXM <NXTI \leq 2^{XHE} (NXM + 1)$, utilizando el algoritmo de elección.

En el capítulo anterior se describe la simulación realizada que se llevó a cabo el proceso de inicialización de nodos candidatos como se muestra en la figura 3.4, el uso de acceso de

contención para los mensajes NENT, y utilizando el algoritmo de elección (como se define en [1], p. 345) para los mensajes NCFG. Además, hemos empleado la temporización de transmisión de mensajes de control como se sugiere en [9]. Para validar los resultados, también implementamos un programa en C++ que tanto el NENT y mensajes NCFG se envían utilizando el algoritmo de elección se define en IEEE 802.16-2004.

5.4 Evaluación del desempeño de la propuesta de optimización en la inicialización

Para el análisis de rendimiento se empleó una red *mesh* con 100 nodos, donde 10 de estos nodos (nodo 1 al nodo 10) están a un 1 salto de la MBS, 30 nodos (nodo 11 al nodo 40) a 2 saltos de la MBS y 60 nodos (nodo 41 al nodo 100) están a 3 saltos procedentes de la MBS como se representa en la figura 4.6.

En la gráfica mostrada en la figura 5.3, se presenta el plazo máximo que se tarda la red *mesh* para recuperarse después de un corte de energía, se utilizan 4 oportunidades de transmisión (TxOp) por subtrama de control ($NetPwrOut = 1$, $NENT = 0 \times 3$). Ambos modelos (programa de simulación y C++) presentan casi los mismos retrasos de recuperación para los nodos que están hasta 2 saltos de la MBS (nodo 1 al nodo 40).

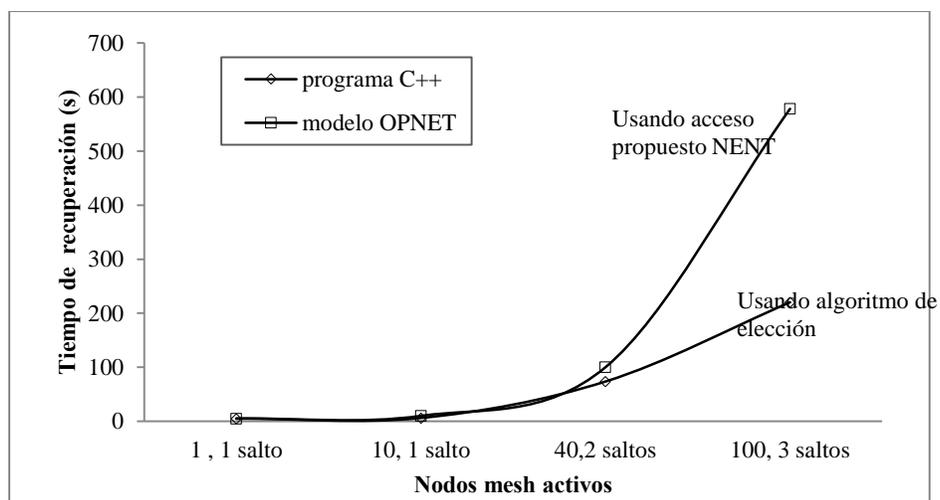


Figura 5.3 Retardo de recuperación de la red, utilizando programa C++ y modelo de simulación con NENT TxOps =4, XHE = 0.

Este comportamiento es de esperar ya que el número de colisiones reportados en el modelo de simulación es marginal y no afecta a la demora de recuperación. Sin embargo, los nodos que están a 3 saltos procedentes de la MBS desencadenan un mayor número de colisiones, ya que cada mensaje enviado por los nodos en el segundo salto (41 a 100) debe ser enviada dos veces para llegar a la MBS. Lo cual provoca un aumento del número de colisiones en la región NENT cuando el modelo de simulación es utilizado. En comparación con el programa C++, el retardo de recuperación propuesto por el modelo de simulación podría reducirse de 580 a 220 segundos cuando un algoritmo de elección también se utiliza para la transmisión de mensajes NENT.

En la figura 5.4 se presenta el plazo de recuperación utilizando el modelo de simulación. Comparamos este retraso con el mecanismo definido por defecto en el estándar con nuestra estructura de *frame* propuesto.

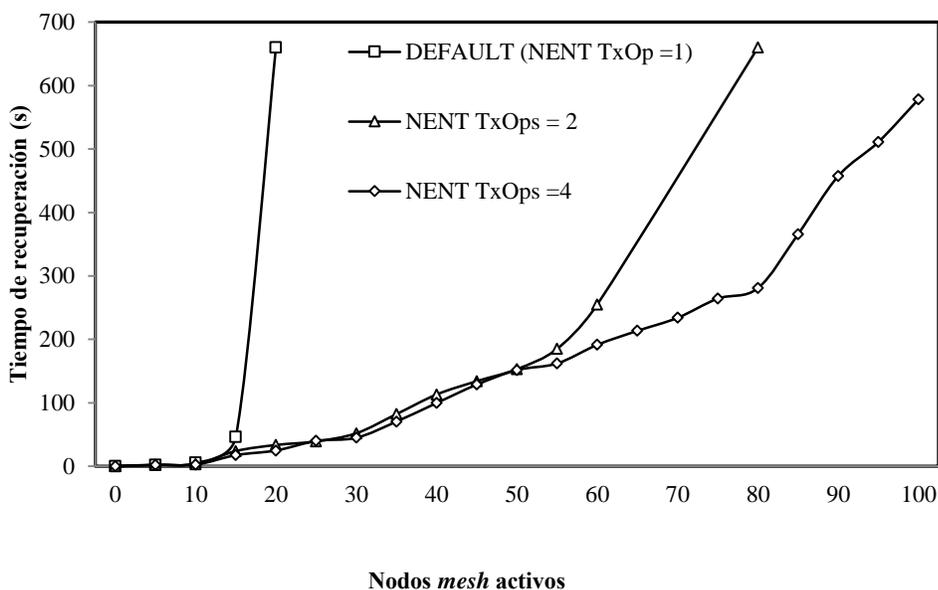


Figura 5.4 Retardo de recuperación utilizando el modelo de simulación con el mecanismo por default y la estructura de frames propuesta con $XHE = 0$.

El mecanismo por defecto, presenta un gran retardo de la recuperación, debido a un excesivo número de colisiones de mensajes NENT, ya que sólo una NENT TxOp se asigna cada Sf^*

$Td = 100$ ms. Por ejemplo, usando un tamaño de red de 20 nodos, el retardo de la recuperación reportada por el modelo de simulación era 660s. Mediante el uso de nuestra estructura de *frames* propuesto, con 2 y 4 TxOp tipo NENT por *subframe* de control de red podemos reducir considerablemente el tiempo de recuperación de la red a 33 y 13 segundos, respectivamente. Esto resulta en una reducción máxima de tiempo de recuperación hasta el 98% ($\approx [1-13 / 660] * 100$).

Sin embargo, tener más TxOp para NENT en el *subframe* de control de red aumenta la sobrecarga de señalización. En la tabla 5.2 mostramos esta sobrecarga para diferentes anchos de banda de canal aconsejados por el estándar [1] para el protocolo en tipo *mesh*. Por ejemplo, para un ancho de banda de canal de 25.6 MHz como se usa en el modelo de simulación, los resultados generales NENT representan aproximadamente el 0.3% ($\approx 100 * \text{NENT TxOp} * 7/1024 * Sf$) de la utilización del canal cuando NENT TxOp = 4. Esta sobrecarga, en el peor de los casos, se convierte en el 5.9% de la utilización del canal cuando $Sf = 4$, $BW = 3$ MHz y NENT TxOp = 4.

Con el fin mejorar el tiempo de recuperación, también es necesario optimizar el período de elección para la transmisión de mensajes NCFG, dada por $\text{NXTI} [2^{\text{XHE}}\text{NXM} + 1, 2^{\text{XHE}}(\text{NXM} + 1)]$. A partir de los dos parámetros de configuración: XHE y NXM, el primero es el que puede modificar el intervalo en que un nodo puede competir. Por ejemplo, tener $\text{XHE} = 2$, da como resultado un tamaño de la ventana de elección ($2^{\text{XHE}} = 4$) NCFG TxOp, en comparación con 127 NCFG TxOp cuando $\text{XHE} = 7$.

Al aumentar la ventana de elección, sin embargo, también aumenta considerablemente el subsiguiente tiempo de transmisión (ESTX, *Earliest Subsequent Transmission Time*). Así, el tiempo medio de espera para la transmisión de cada mensaje NCFG está dado por $\text{ESTX} + (\text{NXTI}_{\text{Min}} + \text{NXTI}_{\text{Max}}) / 2$, como se muestra en la figura 5.5. Por lo tanto, para $\text{XHE} = 2$ y 7, el promedio tiempos de espera para los mensajes NCFG son de 0.5 y 14.8 segundos, respectivamente, cuando NENT TxOP = 4 y $L = 10$, donde L es el valor del parámetro MSH-CTRL-LEN.

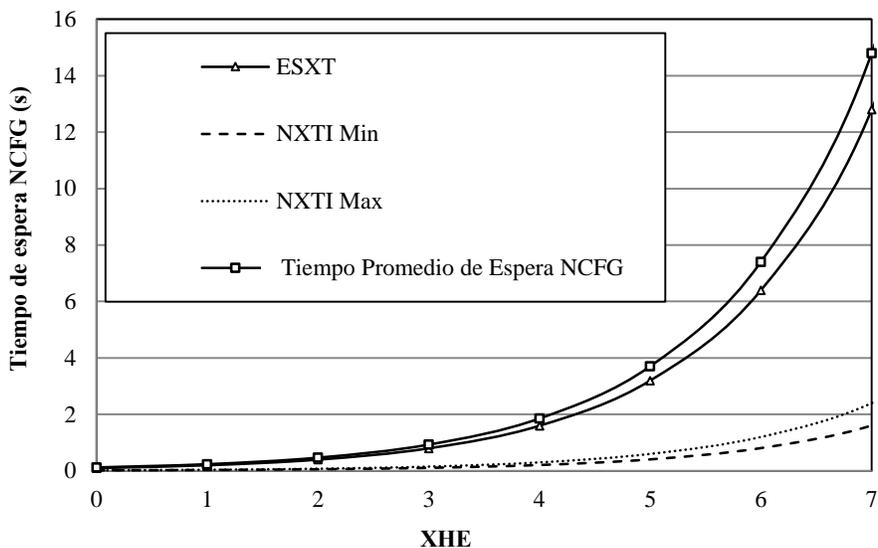


Figura 5.5 Retardo entre tiempo de envío para mensajes NCFG, con NENT TxOps = 4, L=10.

Finalmente, en la figura 5.6 se muestra cómo el tiempo de recuperación se ve afectado por XHE. Observamos que, para las redes grandes, el retardo mínimo de recuperación se obtiene con XHE = 3. El retardo de recuperación se reduce de 580s obtenidos con XHE = 0, a 322s cuando XHE = 3, y hay 100 nodos activos en la red. Para las redes de tamaño medio (entre 20 y 75 nodos), sin embargo, el rendimiento óptimo se obtuvo con XHE = 2. Esto es de esperar, ya que el tiempo medio de espera entre los mensajes NCFG se reduce a la mitad.

Por ejemplo, con XHE = 2, el número medio de nodos contendientes por ventana de elección es entre $(2^{XHE} * N / 2^{(XHE+4)}) = 1.25$ y 4.6, estos usuarios comparten las mismas ventanas de elección = 4 NCFG TxOp cuando el tamaño de la red (N) oscila desde 20 hasta 75 nodos, respectivamente. Por el contrario, cuando XHE = 3, el mismo número de usuarios contendientes por ventana de elección (01.25 a 04.06) comparten de 8 NCFG TxOp cada 128 TxOp, en comparación con 64 TxOp cuando XHE = 2.

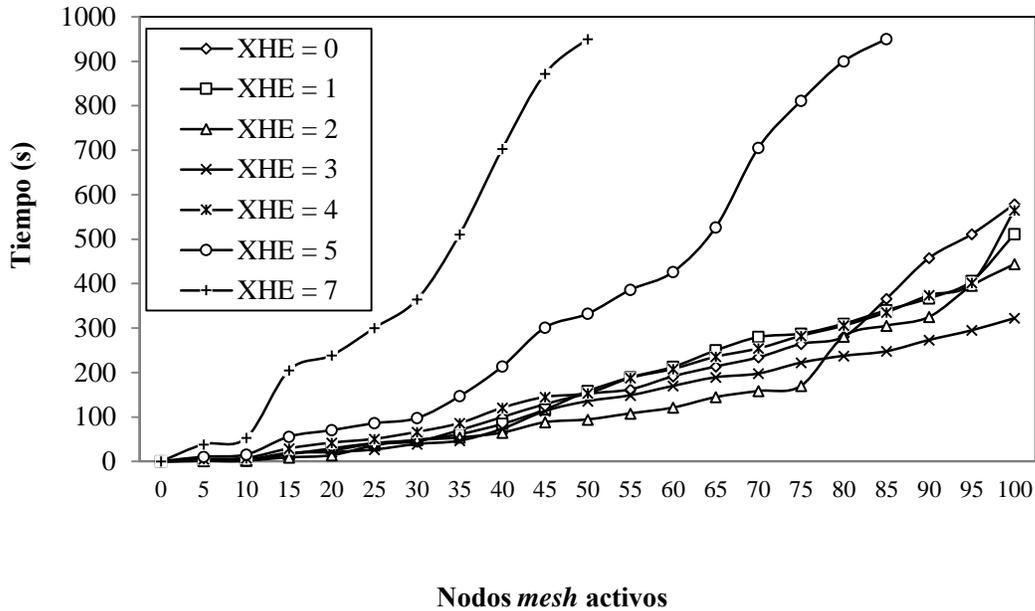


Figura 5.6 Retardo de recuperación utilizando el modelo de simulación con la estructura de *frames* propuesta.

5.5 Conclusiones

Como resultado de este trabajo de investigación, se logra hacer más eficiente el inicio de la red, cuando existan interrupciones abruptas del servicio. Esto se puede al implementar un esquema de optimización de los parámetros de configuración de los *frames* de señalización o control de red y mediante el comportamiento dinámico se mejora la recuperación de la red, reduciendo los retardos de espera para los mensajes NCFG. Estos resultados son base de un artículo de revista: “Enhanced Network Control for the Entry Process of IEEE 802.16 Mesh Networks”, DOI: <http://dx.doi.org/10.5755/j01.eee.117.1.1051> en la revista *Elektronika Ir Elektrotechnika*, factor impacto: 1.088 y uno de congreso: “Performance optimization of the initialization process of IEEE 802.16 mesh networks en “IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering 2010”, como se muestran en los anexos.

Capítulo 6

Implementación de Planeación para soporte de VoIP

6.1 Introducción

La aparición de aplicaciones multimedia y la cada vez más utilizada VoIP demandan requerimientos más estrictos en cuanto a conservar una adecuada QoS, uno de los puntos más importantes a garantizar es el retardo de llegada de los paquetes a su destino, debido a que repercuten directamente en la calidad de la voz o vídeo. Para ello y aunado a la planeación bajo demanda se ha decidido crear un mecanismo para el establecimiento de llamadas IP que permitan generar flujos de información en una red *mesh*.

La planeación es un tema de gran relevancia y complejidad debido a la naturaleza multiusuario de las redes contemporáneas, es importante mantener el uso del canal optimizado y con la mínima probabilidad de errores sustanciales.

En este trabajo se utiliza el códec G.723⁶ para el envío de VoIP. Se implementa en primer lugar, planeación distribuida de 3 vías y posteriormente un esquema para la creación de flujos, que permite conservar los parámetros establecidos para conservar la QoS.

6.1.1 Topología

Para realizar el estudio del comportamiento dinámico con los mecanismos diferentes de planeación se propuso el uso de la topología mostrada en la figura 6.1, una malla de 5X5.

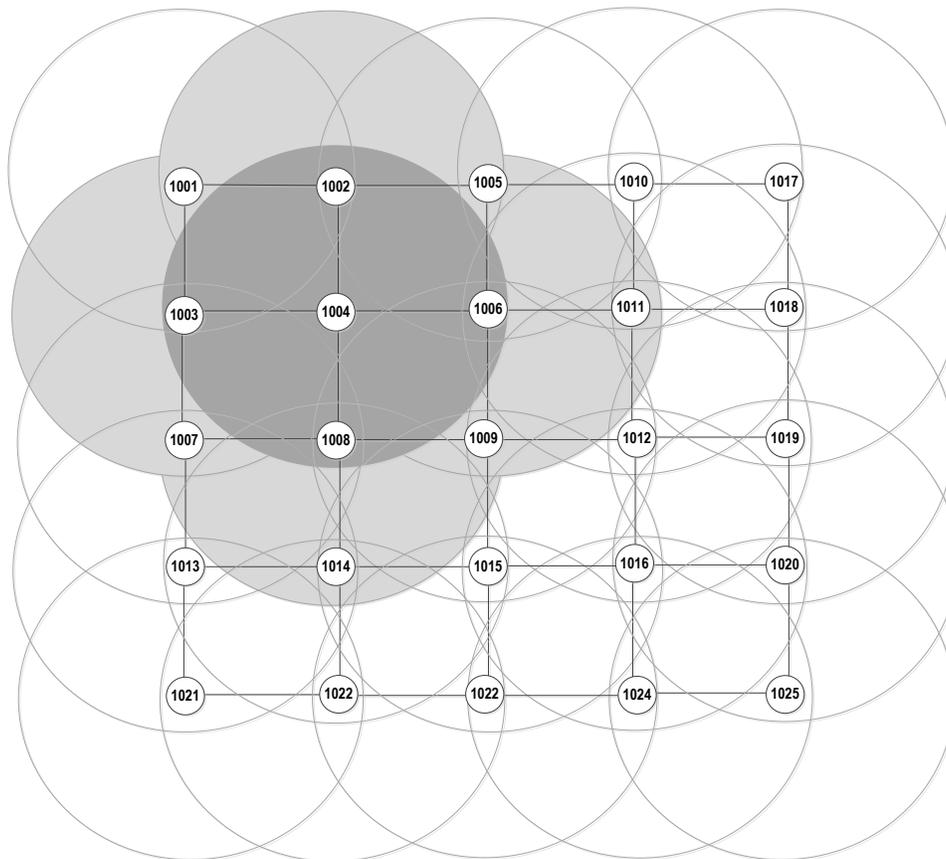


Figura 6.1 Topología utilizada de 5x5.

En la cual se representa la vecindad directa (gris) de acuerdo a la cobertura del nodo 1004 dada por los nodos: 1002, 1003, 1006 y 1008, la vecindad extendida (gris claro), como se había mencionado, son aquellos nodos que se encuentran dentro de la cobertura de los

⁶ G.723 es considerado el stream de voz más adecuado para ser enviado por Internet con una calidad media que depende de la carga de red, y puede tolerar retardos end-to-end de hasta 150 ms.

vecinos del nodo en cuestión, es decir son vecinos a 2 saltos de distancia, en este ejemplo está formada por los nodos de vecindad directa, más 1001, 1005, 1009, 1007, 1011 y 1014.

Esta topología es representativa para los problemas que pueden llegar a darse en una topología *mesh*, como son terminales ocultas y cuellos de botella. Se está suponiendo que la topología es fija y que no tiene errores de ruteo.

6.1.2 Establecimiento de vecindades extendidas

En la fase posterior a la inicialización se realiza el *Link Establishment*, donde se crean los *LinkIDs* de cada nodo con sus vecinos. Para el enrutamiento y la identificación de la vecindad extendida se utiliza el algoritmo de *Dijkstra*, que permite calcular la ruta más corta, y el camino de un nodo a otro, y así conocer el siguiente salto dentro de la ruta, con la finalidad de que este nodo se prepare para el reenvío de la información.

En la tabla que se forma en la figura 6.2, se muestra un ejemplo de la generación de la vecindad extendida para el nodo 1004, los nodos que conforman esta vecindad representan el conjunto de nodos que pueden colisionar con las transmisiones del nodo.

NodeID	x_h_e	x_h_t	mx	n1	n2	hops
1001	1	32	1	0	0	2
1002	2	64	2	8	12	1
1003	0	16	3	3	4	1
1005	2	64	5	20	24	2
1006	0	16	6	6	7	1
1007	1	32	0	0	2	2
1008	2	64	1	4	8	1
1009	0	16	2	2	3	2
1011	2	64	4	16	20	2
1014	2	64	0	0	4	2

Figura 6.2. Vecindad extendida y establecimientos de ventanas de elección.

Además, se muestran los parámetros *XmtHoldoffExponent*, *Next XmtMx*, el tiempo calculado *XmtHoldoffTime*, y el intervalo *Next Xmt Time (n1,n2)*, calculado utilizando la ecuación 1 (sección 3.3.1).

En particular, para el caso de planeación distribuida coordinada la vecindad extendida representa los nodos con que se tiene que competir durante el algoritmo de elección para ganar la oportunidad de transmitir un mensaje DSCH, ya sea para hacer una petición o una concesión para transmitir en el *frame* de datos. Este funcionamiento es similar al que se implementa en la inicialización, pero ahora el número de TxOps es 16 ya que todo el *frame* de control es utilizado para el envío de los mensajes de planeación. Se envían 9 *frames* con TxOps de planeación por 1 *frame* de TxOps de control de red para inicialización como se muestra en la figura 3.1 de la estructura del *multiframe mesh*.

6.1.3 Características del canal

Para la configuración del canal se utilizan los valores que se indican en la tabla 6.1, se utiliza un ancho de banda de 25 MHz. Para el estudio del comportamiento dinámico de la red *mesh*, es necesario calcular el *DataRate*, así como el número de *minislots* y símbolos que ocuparan el *subframe* de control y el *subframe* de datos, respectivamente.

Nombre	Valor	Descripción
<i>BW</i>	25 MHz	Ancho de banda nominal
<i>NFFT</i>	256	Número de portadoras
<i>Fd</i>	10 ms	Tiempo de duración del <i>frame</i>
<i>n</i>	$\frac{8}{7}$	Factor de muestreo
<i>G</i>	1/8	Tiempo de Guarda
<i>NFFT_D</i>	192	Número de portadoras disponibles para transmitir datos
<i>m</i>	2	Modulación, se utiliza QPSK
<i>cc</i>	$\frac{1}{2}$	Tasa de codificación convolucional utilizada

Tabla 6.1 Valores utilizados en la configuración del canal.

En la tabla 6.2 se muestran los cálculos realizados con la finalidad de obtener el número de símbolos OFDM y el tiempo por símbolo, para posteriormente calcular el *DataRate* máximo que se puede lograr en el canal para la transferencia de datos.

Ecuación	Valor	Descripción
$F_s = n * BW \dots\dots\dots (7)$	$F_s = \frac{8}{7} * 25 [MHz] = 28.571429 [MHz]$	Frecuencia de muestreo
$\Delta_f = \frac{F_s}{NFFT} \dots\dots\dots (8)$	$\Delta_f = \frac{28.571429 [MHz]}{256} = 111607.143 [Hz]$	Espacio entre subportadoras
$T_b = \frac{1}{\Delta_f} \dots\dots\dots (9)$	$T_b = \frac{1}{111607.143 [Hz]} = 8.96 [\mu s]$	Tiempo útil de símbolo
$T_{S-1/8} = T_b + \left(\frac{1}{8} * T_b\right) \dots\dots\dots (10)$	$T_{S-1/8} = 8.96 [\mu s] + \left(\frac{1}{8} * 8.96 [\mu s]\right) = 10.08 [\mu s]$	Tiempo de símbolo OFDM, considerando tiempo de guarda
$S_{OFDM} = \frac{F_d}{T_{S-1/8}} \dots\dots (11)$	$S_{OFDM} = \frac{10 [ms]}{10.08 [\mu s]} = 992.0635 \text{ símbolos}$	Número de símbolos OFDM
$NFFT_D * m * cc \dots\dots (12)$	$Db_{OFDM} = 192 * 2 * \frac{1}{2} = 192 [bits]$	Número de bits decodificados por símbolo OFDM

Tabla 6.2 Operaciones para el cálculo de la información de los símbolos.

En la ecuación 13, se muestra finalmente el cálculo del *DataRate*, para el canal modelado, en la tabla 6.3 se muestran los porcentajes de esta tasa de datos para el envío de mensaje de control y de tráfico de datos:

$$DataRate = \frac{Db_{OFDM}}{T_{S-1/8}} = \frac{192 * 2 * \frac{1}{2}}{10.08 [\mu s]} = 19.047619 [Mbps]. \dots\dots\dots (13)$$

Símbolos por frame	Porcentaje	DataRate	Descripción
992	100%	19.04761 [Mbps]	Sistema
112	11.29%	2.15053 [Mbps]	Subframe de Control
880	88.71%	16.89708 [Mbps]	Subframe de Datos

Tabla 6.3 Cantidad de *DataRate* destinado para control y para envío de tráfico.

El *frame* tiene 992 símbolos. Se consideran 16 TxOps para el *subframe* de control de planificación, y cada oportunidad de transmisión consta de 7 símbolos OFDM, por lo tanto, tenemos que: $16 TxOps = 16 * 7 \text{ símbolos} = 112 \text{ símbolos}$.

El *frame* queda dividido como se muestra en la figura 6.3, quedando los 880 símbolos restantes para el envío de datos de tráfico generado.

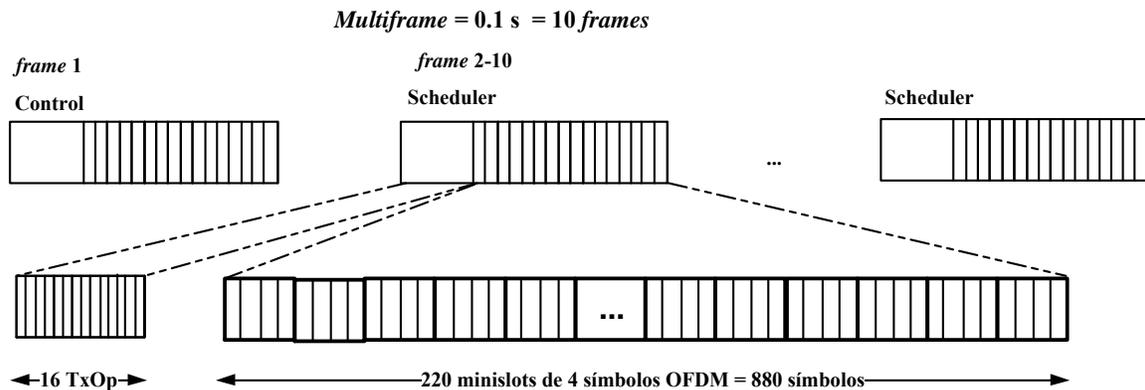


Figura 6.3. División del canal por símbolos OFDM.

6.1.4 Modelado de tráfico

Como se mencionó con anterioridad, para el modelado de tráfico se utiliza el códec G723.1. Para este servicio de voz se emplean los parámetros de QoS definidos para UGS, el cual ofrece un servicio orientado a conexión en tiempo real que generan paquetes de longitud fijas en intervalos periódicos de tiempo. Por ejemplo, para el soporte de enlaces T1/E1⁷ o VoIP. En este caso la estación suscriptora no tiene que mandar ninguna solicitud de ancho de banda ya que previamente está contemplado cuántos recursos va a utilizar. Tiene el tráfico tolerado máximo, latencia máxima y jitter tolerado.

El estándar G723.1 tiene las siguientes características, que se modelan, se envían paquetes de 20 bytes desde la capa de aplicación cada 30 ms, es decir 33 paquetes por segundo, que generan una tasa de 5.3 Kbps. El límite de tiempo para que se conserve QoS es que no rebase el tiempo máximo de 150ms promedio en la llegada de los paquetes.

⁷ Una conexión T1 es un sistema compuesto por 24 canales de multiplexado por división de tiempo (TDM) de 64 kbps. Esto crea un ancho de banda total de 1.5 Mbps. En Europa y en otras partes del mundo, se utiliza E1 es un sistema compuesto por 32 canales de 64 kbps, dando un total de 2.048 Mbps.

En la figura 6.4 se muestra el encapsulamiento a través de las capas con sus respectivos encabezados dando un total de 84 bytes por paquete a transmitir en la capa física, se muestran las 2 tramas creadas con $cc = \frac{1}{2}$. Dados los 192 bits, tenemos 24 bytes por símbolo, por tanto, necesitamos 4 símbolos OFDM o un *slot* para poder enviar el mensaje, por lo que vamos a tener un total de 220 *slots* que se van a poder reservar para envío de tráfico de voz, como se muestra en la figura 6.3.

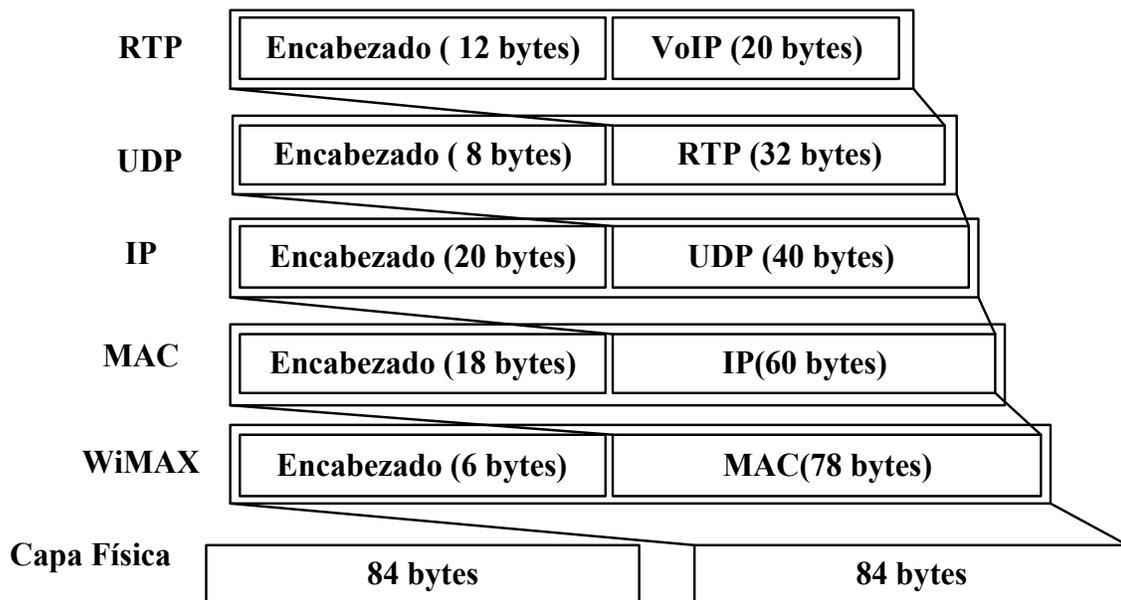


Figura 6.4 Encapsulamiento del mensaje VoIP desde la capa de aplicación hasta la capa física.

6.2 Planeación distribuida coordinada

En este tipo de planeación se analizan dos escenarios del mecanismo de 3 vías y el envío de planeación distribuida coordinada, para la reservación de recursos.

6.2.1 Reservación para envío de datos a 3- vías

En esta sección se describe la implementación de la planeación utilizando el modelo de 3 vías en el simulador OPNET, para el cual se utiliza un modelo teórico del planificador de paquetes en código C, antes de integrarlo al modelo en OPNET. Se utiliza modulación QPSK, por ser la de mayor cobertura y un ancho de banda de 25 MHz, para garantizar el establecimiento de comunicación en un área de 5 Km^2 .

Cuando la red ha terminado la fase de inicialización y de *Link Establishment*, los nodos que han ingresado en ella son totalmente funcionales, por lo que pueden enviar tráfico de datos. El formato de los mensajes de control para la reservación de datos se realiza con el mecanismo de tres vías por medio de los mensajes como se muestra en la figura 3.8 (Mensajes de señalización para reservación de tiempo de transmisión, sección 3.4.3), DSCH:*Request*, DSCH:*Grant* y DSCH:*ACK* respectivamente. El algoritmo de selección de tiempo no permite colisiones (tabla 2.1), por lo tanto, cada nodo transmite cuando resulta ganador dentro del algoritmo de elección, utilizando los mensajes DSCH.

Cada nodo transmite su tabla de planeación actual y los cambios propuestos de los nodos vecinos a uno y dos saltos de distancia. Se debe enviar un mensaje de difusión a estos nodos vecinos el cual contiene recursos disponibles, peticiones y reservaciones.

Si el nodo destino concede una petición, responde al nodo fuente en uno de los *slots* de control del *subframe*, lo cual también es descrito en el mensaje de petición. Finalmente, la fuente retransmite el mensaje de reservación al destino para confirmación.

Como base para el modelo de simulación se utiliza el trabajo previamente construido para la inicialización de la red *mesh*, por lo que se utilizan nuevamente los valores de configuración descritos en la tabla 4.2 (Parámetros *Erceg* del modelo de propagación) y la tabla 4.3 (Parámetros de simulación), en la sección 4.1.

Para este escenario se utilizan 6 nodos, como se muestra en la figura 6.5, se ejemplifica las rutas generadas, que como se explicó en el capítulo 4, se envían diferentes tipos de tráfico VoIP, FTP y BE (o tráfico general de Internet).

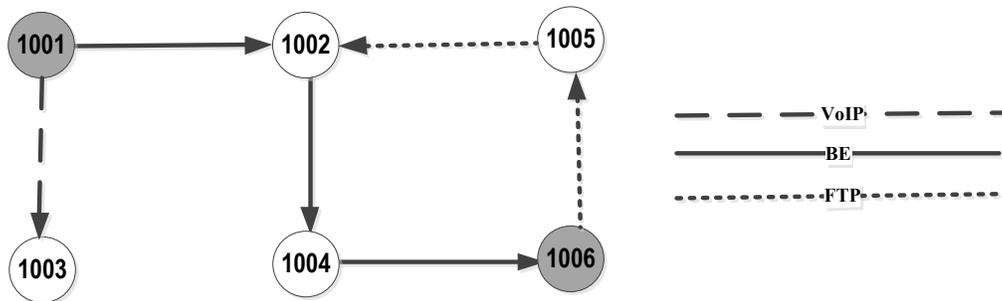


Figura 6.5 Rutas para el envío de diferente tipo de tráfico, con reservación de 3-vías.

En la figura 6.6 se muestra el envío de *DSCH:Request*, primero se verifica que el nodo ganó, representado por un valor booleano de 1 o 0, para transmitir en esa TxOp y posteriormente se encapsula la información de los paquetes que se encuentran en la cola del nodo. Se puede apreciar como el nodo gana la TxOp hasta la tercera vez que compete.

```

Selecccionar C:\ARCHIV-1\OPNET\8.1.A\sys\pc_intel_win32\bin\op_runsim.exe
Compite 1004, xmttime 18845!
***no gana 1002
El nodo gana: 0
GANO en Request?? 0,
El dato se encuentra en el frame: 1178, slot: 14
La Oportunidad de Tx esta en el frame:1178, en el slot=14 y su tiempo de tx es: 13,000952
MSS 1002 El valor de time request dsch se ha reprogramado para: 13,000952Compite 1004, xmttime 18846!
***no gana 1002
El nodo gana: 0
GANO en Request?? 0,
El dato se encuentra en el frame: 1178, slot: 16
La Oportunidad de Tx esta en el frame:1178, en el slot=16 y su tiempo de tx es: 13,001088
MSS 1002 El valor de time request dsch se ha reprogramado para: 13,001088Este nodo gana 1002!
El nodo gana: 1
GANO en Request?? 1,

```

Figura 6.6 Programación de tiempo para el envío del paquete *DSCH:Request*.


```

C:\ARCHIV-1\OPNET\8.1.A\sys\pc_intel_win32\bin\op_runsim.exe
Numero de paquetes en la lista de prioridades: 1
mac_path_source:1002
numero de pkts en request es 1
MSS 1002 *****EL paquete DSCH-Request programado //////////////////////////////////
*****Enviando DSCH-Request
REQ_DSCH_SEND Valor de handshake_lock: 1
nodo 1005, Recibiendo REQUEST de 1002,
.....la direccion destino es: 0, la dir mac de este nodo es: 1005
y la mac fuente es: 1002pk: 0, linkID: 2, level: 16, persistence: 5, priority 2
DSCH_ARRIVAL_REQ .. VALOR de pk_req_index: 1
El dato se encuentra en el frame: 1178, slot: 0
La Oportunidad de Tx esta en el frame:1179, en el slot=9 y su tiempo de tx es: 13,090612
*****el nodo con mac :1005, va a enviar el GRANT a 1002 *****

```

Figura 6.8 Recepción del DSCH:Request.

Posteriormente, en la figura 6.9, se muestra la ejecución para que el nodo gané nuevamente en el algoritmo de elección, como se explicó en la sección 3.3.1 los nodos compiten por obtener una TxOp en el intervalo de XmtTime, hasta que el nodo resulta ganador. Después de recibir el DSCH:Grant se programó el envío del ACK, y posteriormente el envío de paquetes de datos.

```

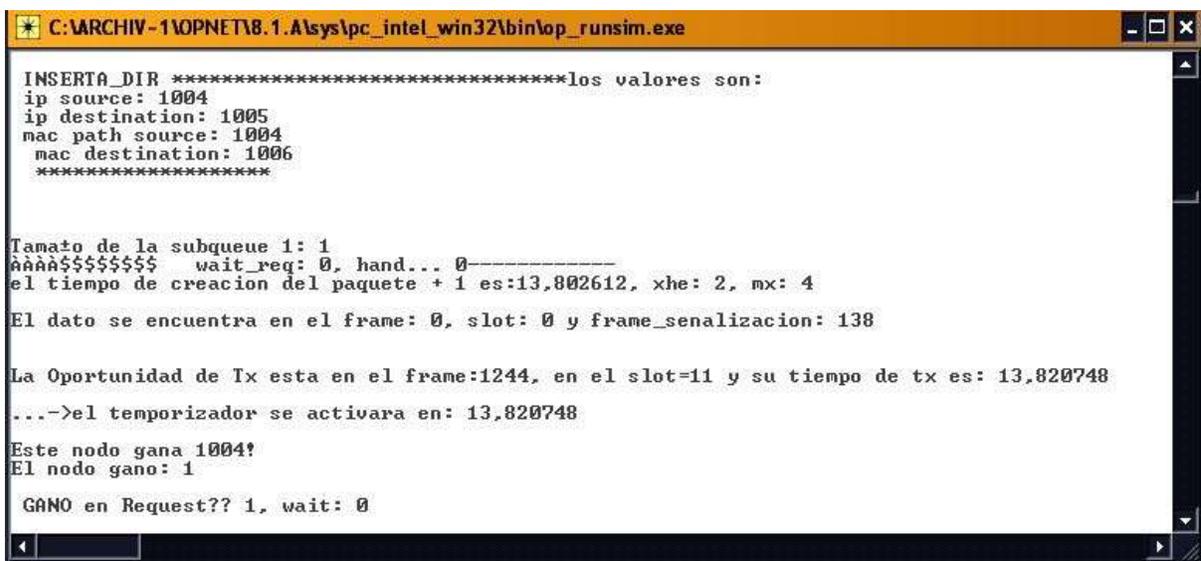
C:\ARCHIV-1\OPNET\8.1.A\sys\pc_intel_win32\bin\op_runsim.exe
GANO en Grant?? 0, wait: 0
DSCH_SEND .... VALOR DE wtx_dsch:0,
El dato se encuentra en el frame: 1179, slot: 14
La Oportunidad de Tx esta en el frame:1180, en el slot=13 y su tiempo de tx es: 13,110884
MSS 1006 El valor de time request dsch se ha reprogramado para: 13,110884
***** get state Master List with 5 users
Compite 1010, xmttime 18877?
Este nodo gana 1006!
El nodo gana: 1
GANO en Grant?? 1, wait: 0
DSCH_SEND .... VALOR DE nodo: 5
DSCH_SEND .... VALOR DE wtx_dsch:1,
MSS: ya entramos en el estado de envío de GRANT en el tiempo: 13,110884
MSS: el valor de time GRANT dsch es: 13,110884
Tamano de la lista antes de encapsular: 1
Entrando a función encapsulado de GRANT
(<)<(<)<MSS 1006: Tam del paquetes en el mensaje REQUEST recibido es:1
mac_source: 1009
Valor de numframe: 1179,
Valor de start_frame: 0, y minislot_start 1

```

Figura 6.9 Algoritmo de selección y envío de paquete DSCH: Grant.

Los paquetes se van enviando uno a uno desde la cola y cuando se termina el tiempo concedido por el DSCH:*Grant* se eliminan los paquetes enviados de la cola, pero probablemente ya haya nuevos paquetes dentro de la cola listos para ser enviados. Por lo tanto, se envía un nuevo DSCH:*Request* después de que ha pasado el tiempo de espera calculado por el algoritmo de elección a través del parámetro *XmtHoldOffTime*.

Finalmente, como se muestra en la figura 6.10 se reciben los datos, y en caso de ser necesario se redireccionan y se insertan en la cola de paquetes local en espera de ser enviados, para lo que se tiene que iniciar de nuevo el proceso de tres vías.



```
C:\ARCHIV-1\OPNET\8.1.A\sys\pc_intel_win32\bin\op_runsim.exe
INSERTA_DIR *****los valores son:
ip source: 1004
ip destination: 1005
mac path source: 1004
mac destination: 1006
*****

Tamato de la subqueue 1: 1
aaaa$$$$$$$$ wait_req: 0, hand... 0-----
el tiempo de creacion del paquete + 1 es:13,802612, xhe: 2, mx: 4
El dato se encuentra en el frame: 0, slot: 0 y frame_senalizacion: 138

La Oportunidad de Tx esta en el frame:1244, en el slot=11 y su tiempo de tx es: 13,820748
...->el temporizador se activara en: 13,820748
Este nodo gana 1004?
El nodo gana: 1
GANO en Request?? 1, wait: 0
```

Figura 6.10 Recibiendo y redireccionando datos.

6.2.2 Planeación distribuida coordinada con reservación de flujos

Se modificó la estructura para el manejo del mapa de *slots* y de reservaciones, actualizando los diferentes estados en que puede estar cada *slot*, considerando el intercambio de información en la reservación de los nodos vecinos (figura 6.11). Se acota el tiempo de reserva a 3 *frames*, de tal manera que sea periódico el envío de tráfico cada 30 *ms* y cada *frame* cuenta con 220 *slots*, como se calculó en la sección 6.1.4.

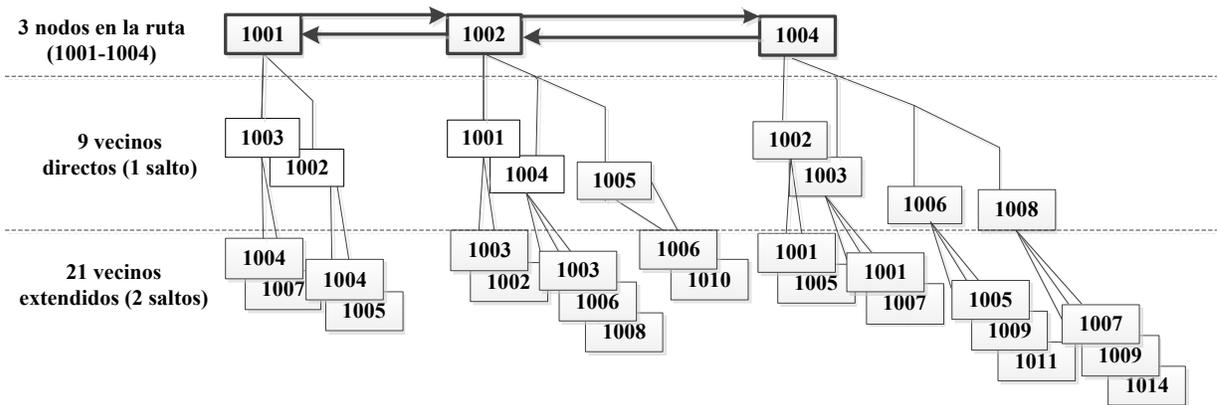


Figura 6.11 Crecimiento de vecindad extendida.

Se muestra el árbol de mensajes para la actualización de mapas, este intercambio de mensajes de control se tiene que realizar tanto para las pre-reservaciones como para el mecanismo de 3-vías. De tal forma que la vecindad extendida esté informada y pueda actualizar su mapa.

En la tabla 6.4, se muestran los posibles estados en los que se puede utilizar un slot. Cada slot se va marcando conforme se van realizando las reservaciones sobre el mapa. Los estados 4 y 5, son estados intermedios que esperan una confirmación para pasar al estado 1 y 2 respectivamente, además en el estado 5 cuando se recibe la confirmación un nodo que se encuentra en la vecindad extendida es marcado como 3, todos los nodos son inicializados en 0, ya que se encuentran disponibles.

ID	Estado	Acciones permitidas en slot
0	disponible	1,2,3,4 o 5
1	transmite nodo	Transmitir
2	transmite vecino	Inhabilitado para transmitir o recibir
3	transmite vecino extendido	Inhabilitado para transmitir, habilitado para recibir
4	pre-reservado	Espera el <i>grant</i> para reservar un tiempo y convertirlo en 1, si no lo libera
5	Pre-reservado vecino	Espera la confirmación para liberar o para pasar a 2 y 3

Tabla 6.4 Estados *slots*.

En la figura 6.12, se muestra el diagrama que se implementa en los diferentes estados del modelado de procesos para la parte de los mensajes DSCH, para envío de petición, concesión de recursos y confirmación.

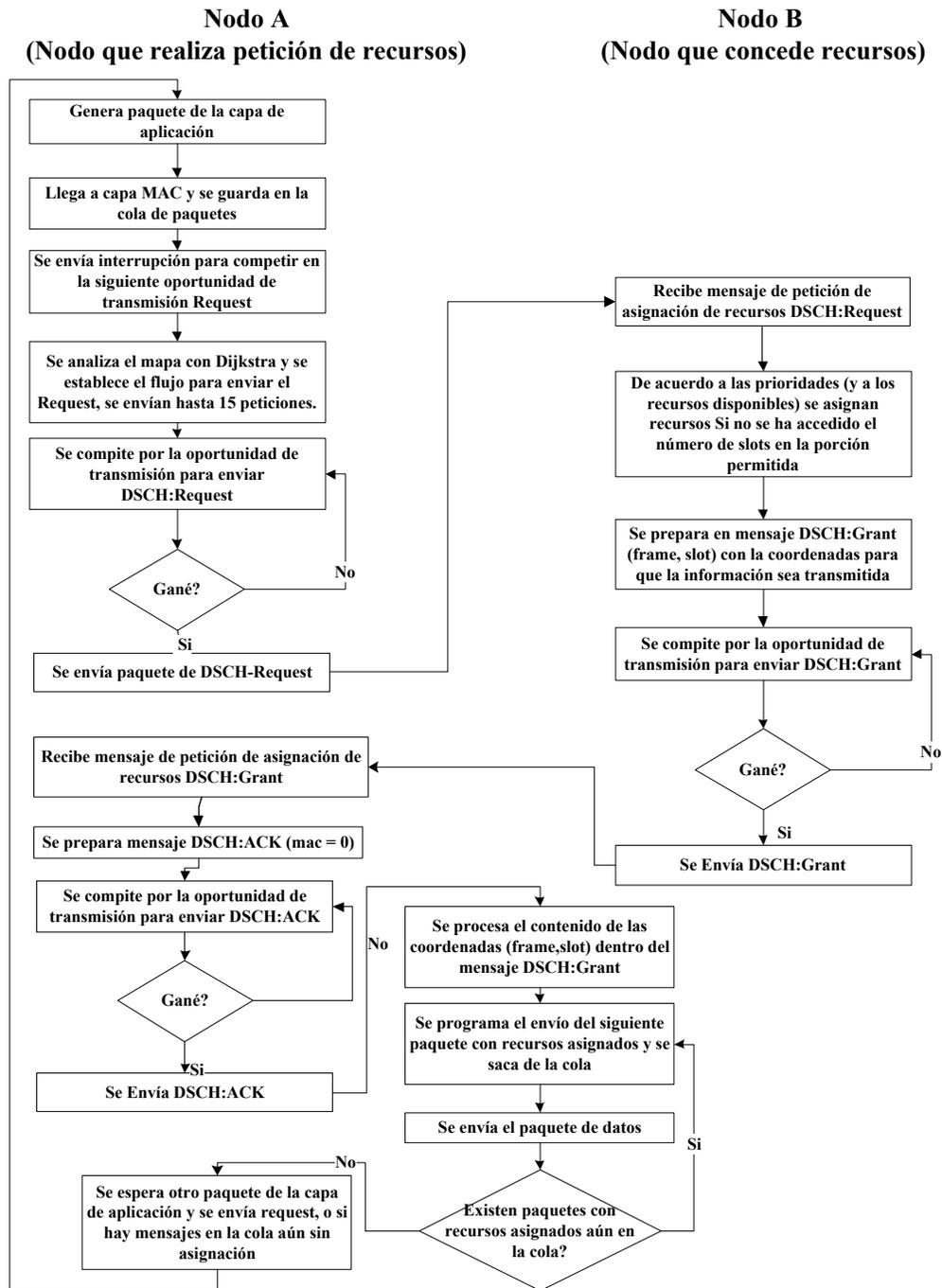


Figura 6.12 Integración del mensaje de tres vías con la planificación.

En la figura 6.13, se muestra un ejemplo de 3 rutas aleatorias, se elaborando eligiendo un destino aleatorio y buscando la ruta más corta hacia ese nodo, sin importar el número de saltos, para el planificador en este escenario, se generan 18 rutas aleatorias.

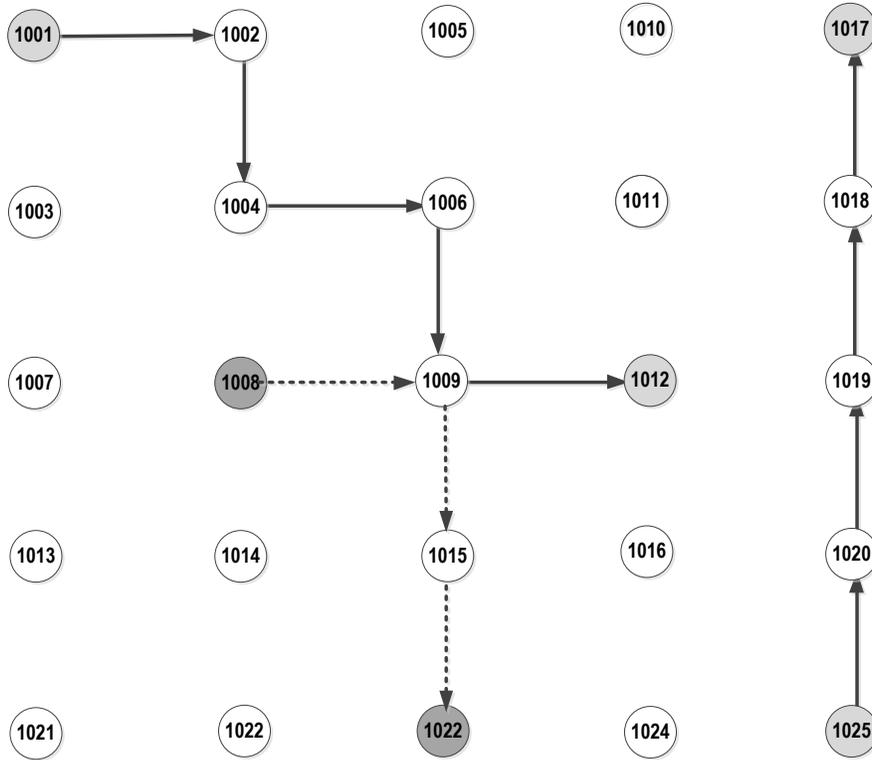
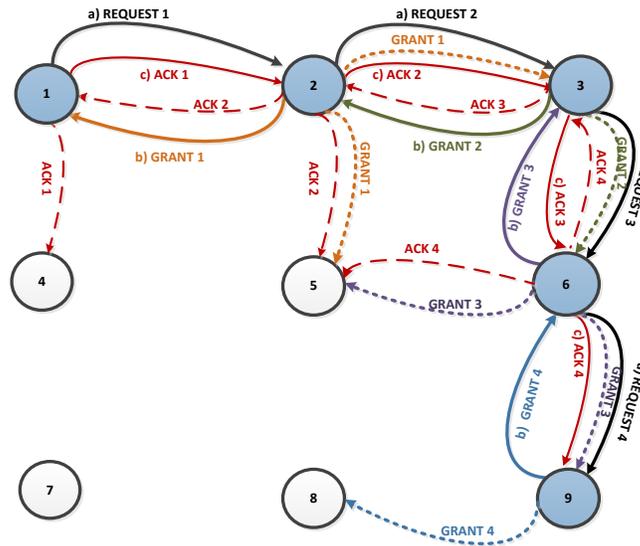


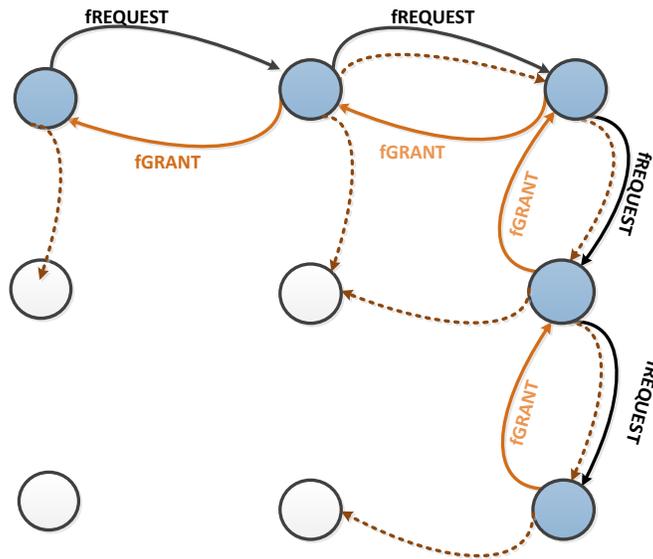
Figura 6.13 Ejemplo de rutas aleatorias.

En la figura 6.14 se muestra la reservación resultante en algunos mapas. Como se puede observar todos los mapas son distintos entre sí, ya que cada uno depende de la actividad en su vecindad extendida. Cada reservación para rutas diferentes es marcada con una letra, para las transmisiones de un vecino directo con la letra mayúscula y para vecino a 2 saltos con letra minúscula, para transmisiones directas se utiliza el número 1. Finalmente, para *slots* disponibles se utiliza 0. Con la finalidad de identificar en que se está utilizando los recursos y que el tiempo de envío de paquetes coincida con el tiempo establecido en la reservación.

de apertura del flujo que va marcando estados intermedios en los slots, para que cuando llegue al destino, devuelva un *fGrant* que haga la reservación definitiva en el mapa, se revisan estos tipos de mensajes en la integración de la propuesta en la sección de Administrador DSCH.



a) Actualización de información en nodos vecinos para la señalización de 3-vías mediante una reservación permanente bajo demanda.



b) Establecimiento de flujos con 3 vías extendidas.

Figura 6.15 Envío de señalización para la reservación/ concesión de slots.

6.3.2 Administrador DSCH

Dentro de las modificaciones que se han realizado al estándar, está la generación de flujos para el establecimiento de la comunicación VoIP. En la tabla 6.5 se muestra una descripción de los diferentes tipos DSCH que se han generado.

Mensaje	Tipo	3-vías	Flujo	Descripción	Tipo de tráfico
DSCH-Request	41	X		Solicita recursos en una o varias peticiones.	BE nrTPS
DSCH-Grant	41	X		Genera una reservación de recursos enviando notificación al nodo solicitante.	
DSCH-ACK	41	X		El nodo solicitante confirma que ha recibido la información donde puede transmitir.	
DSCH-fRequest	51		X	Envía una petición para la apertura de un flujo de tráfico VoIP, realiza una reservación temporal, si el nodo no es el destino retransmite el paquete al siguiente nodo de la ruta con el fin de que la reservación temporal llegue al nodo destino.[17][16]	UGS ertPS rtPS
DSCH-fGrant	51		X	Confirma la reservación temporal, de nodo en nodo hasta llegar al fuente.	
DSCH-fCancel	51		X	Se envía cuando no es posible el establecimiento del flujo o la continuación del mismo.	

Tabla 6.5 Paquetes DSCH.

Los tres primeros mensajes están definidos en el estándar, los siguientes están definidos en [17][16], estos mensajes son propuestos para el envío de tres vías extendido, en donde, se envía el DSCH-*request* para solicitar la apertura de un flujo. Esta petición es enviada al siguiente nodo en la ruta que en caso de no ser el nodo destino realiza una pre-reserva de

recursos cuando se recibe el mensaje, y se retransmite hasta llegar al nodo destino, haciendo pre-reservas en cada salto. Cuando el nodo destino es alcanzado contesta con un *fgnant* que se propaga hasta el nodo fuente, marcando los slots como reservados, como se muestra en la figura 6.15(b). En [16] además se considera una topología dinámica, en caso de que no se encuentre el destino se envía un mensaje de rechazo. En el presente trabajo se considera que la topología es estática.

La ecuación (15) es la utilizada para el cálculo del *deadline*, donde T_{max}^{class} [23] es el tiempo máximo permitido para que un tipo de tráfico conserve QoS, por salto, $T_{dequeue}$ es el tiempo de espera en la cola de paquetes, y T_{arribo} es el tiempo de llegada menos el tiempo de creación al nodo actual esto se divide en el tamaño del paquete y se propone multiplicarlo por el número de saltos restantes para llegar a su destino.

$$T_{arribo} = T_{llegada} - T_{creación} \dots\dots\dots (14)$$

$$D_i = \frac{T_{max}^{class} - (T_{dequeue} - T_{arribo})}{\text{tamaño paquete} * \text{num_saltos}} \dots\dots\dots (15)$$

6.3.3 Mecanismo de planeación de tiempos para establecimiento de flujos bajo demanda

Utilizando la idea anterior, pero realizando los flujos bajo demanda, es decir un nodo que desea transmitir indica el nodo destino, y se realiza una reserva en toda la ruta, suponiendo que el mapa inicialmente está disponible. La topología de la red es enviada a cada nodo al hacerse la petición y conceder los recursos. Se propone la utilización de TxOps continuas, hasta terminar el establecimiento del flujo, es decir, cuando un nodo solicita transmitir, se realiza una reserva en toda la ruta, una tras otra, utilizando las TxOps inmediatamente, y enviando las peticiones para envío de otro tipo de tráfico a competir nuevamente.

Se implementa un generador de tráfico sobre VoIP, considerando que es del tipo de QoS, el cual es utilizado entre nodos para establecer una llamada bidireccional. Además, se definen

los tiempos de reserva y transmisión de acuerdo a una búsqueda exhaustiva en la vecindad extendida de un espacio libre y donde se pueda transmitir la información libre de colisiones, en este caso el tiempo de retardo se realiza únicamente al establecer la llamada.

En la figura 6.16 se muestra el mecanismo implementando en donde el nodo intermedio B puede ser n números de nodos intermedios para que los datos generados en A lleguen a su destino en C.

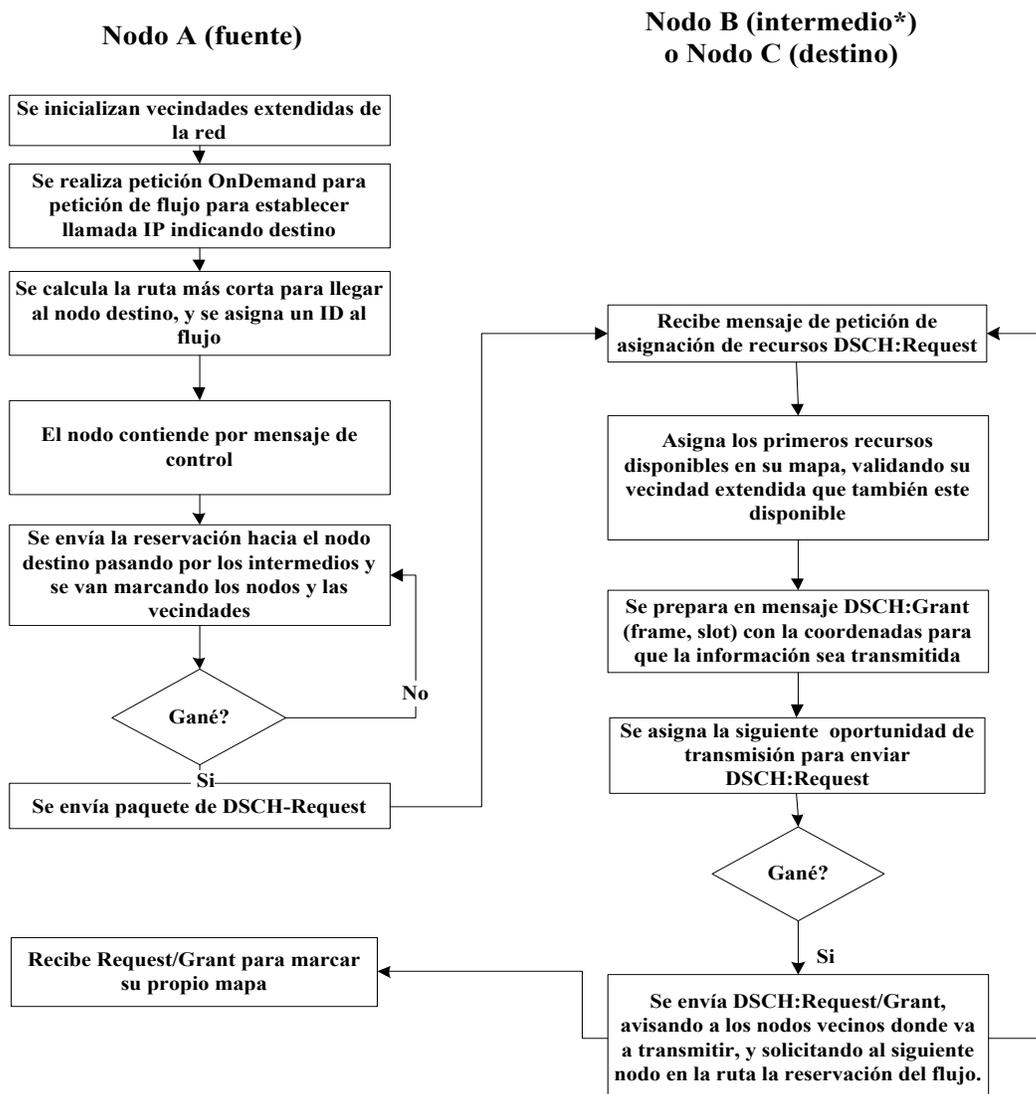


Figura 6.16 Establecimiento de un flujo bajo demanda.

En la figura 6.17, se muestra el envío de datos utilizando el flujo reservado, y se calcula el tiempo para el envío de datos, cuando se genera un paquete de datos se guarda en la cola de paquetes para esperar ser enviado, en el siguiente tiempo asignado para el envío de datos del flujo.

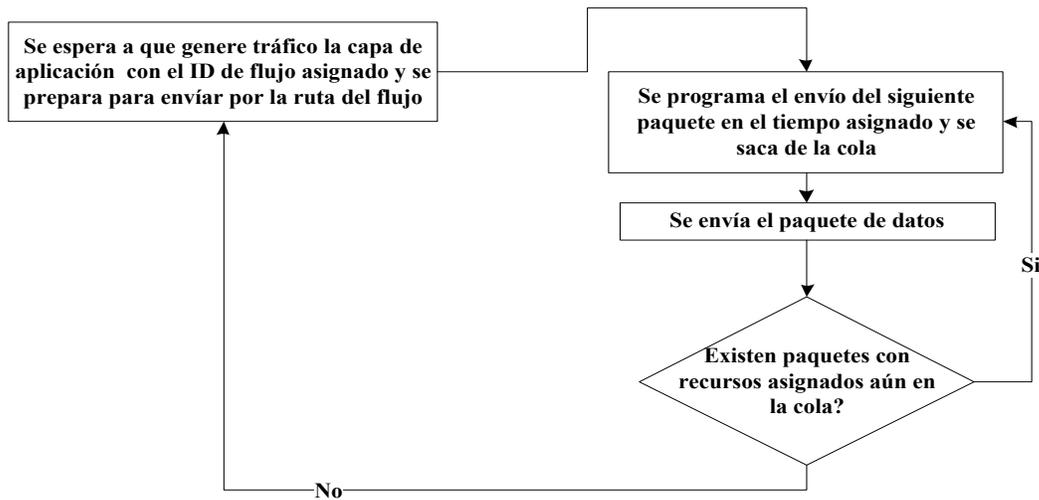


Figura 6.17 Obtención de tiempos y envío de datos en cada flujo.

6.4 Estudio de comportamiento dinámico de VoIP en redes *mesh*

Se realiza en primera instancia un modelo relativamente sencillo donde 6 nodos transmiten tráfico al mismo tiempo, estos nodos envían tráfico a lo más 3 saltos de distancia, cabe mencionar que este escenario se realiza para verificar que utilizando este tipo de señalización, no es posible conservar QoS.

Debido a que los tiempos obtenidos se incrementan considerablemente en cada salto debido a la señalización de planificación que se tiene que hacer para reservar y retransmitir los datos en cada salto, así como mantener actualizado el estado de los slots en la red. Por ello posteriormente se propone un mecanismo para crear flujos bajo demanda para VoIP, que permiten garantizar QoS para este tipo de tráfico.

6.4.1 Evaluación de desempeño para la planificación utilizando el algoritmo distribuido de 3 vías

La utilización general que se obtiene es del 88% con una carga de 2.5 Mbps en la capa física, generados por los 6 nodos que producen 12 flujos.

El retardo mínimo para distancia de un salto es de 39.8 ms con una carga de 256 kps, el retardo crece hasta 287ms con una carga de 2.2 Mbps incrementándose exponencialmente para 2.5 Mbps a 880ms.

En la figura 6.18 se muestra el retardo e2e logrado para el envío de datos VoIP utilizando el mecanismo de 3-vías, por ejemplo, para ocho saltos el retardo mínimo es de 128ms con carga de 1.5 Mbps y con un retardo máximo de hasta 585ms. Este retardo no cumple con los estándares para el códec G623.1

Para el cálculo del retardo se utiliza la ecuación (16), que se muestra a continuación:

$$D_{ete} = \frac{\sum_{i=1}^{num_pk} t_{llegada_dest[i]} - t_{creacion[i]}}{num_pk} \dots (16)$$

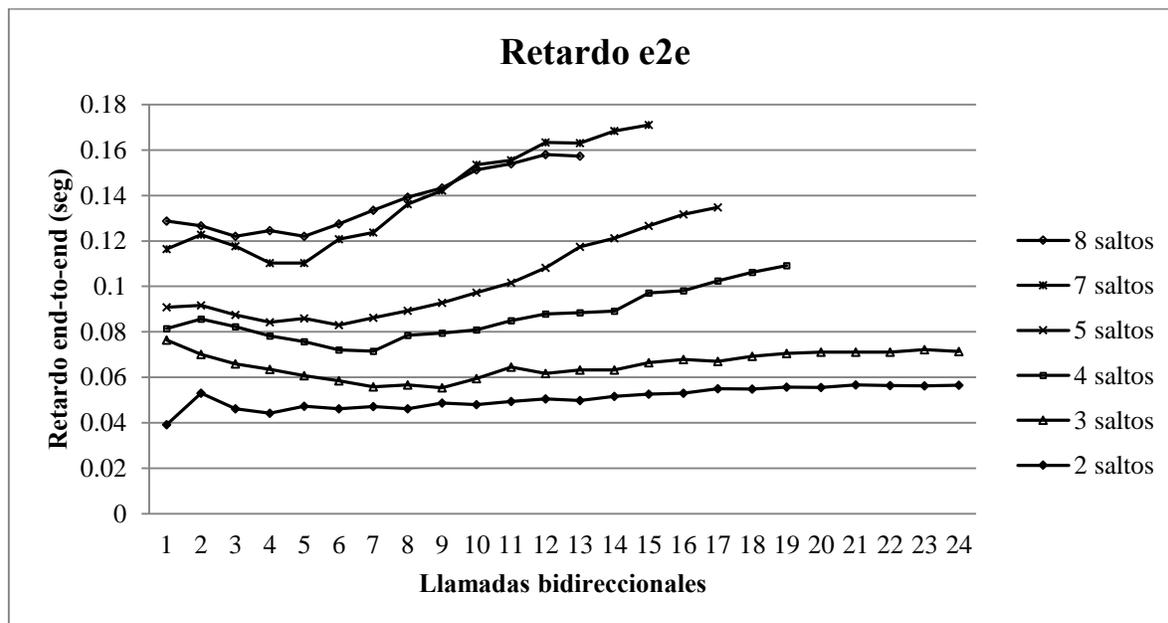


Figura 6.18 Retardo e2e para mecanismo de 3 vías sin establecimiento de flujo.

En la gráfica de la figura 6.19 se muestra *throughput* alcanzado para las rutas creadas de 1 salto, 2 saltos, 3 saltos y la suma que alcanza un máximo de 9.5 Mbps con transmisiones concurrentes, cuando cada usuario activo transmite 2Mbps. Aunque se puede apreciar que el *throughput* decae cuando se sobrepasa esta carga, por lo que se estima no pasar de los 1.5 Mbps por usuario. El valor del *throughput* se obtiene utilizando el número de paquetes recibidos en su destino, sobre la capacidad del canal para el envío de datos.

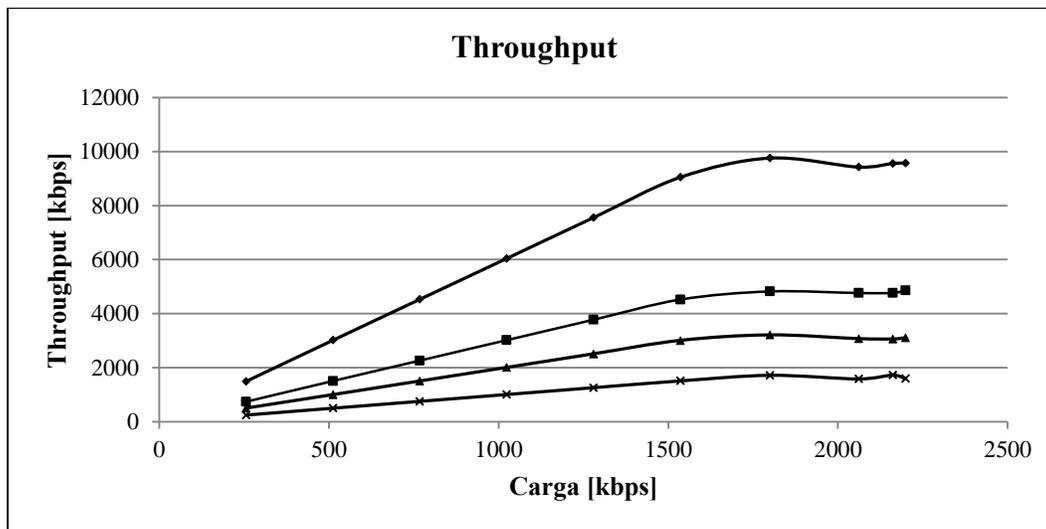


Figura 6.19 Throughput para el escenario de 3 vías, con 6 rutas.

De lo anterior, se concluye que la planificación a 3 vías no cumple con los requisitos para mantener QoS, aun teniendo el canal dedicado a transmisión UGS.

Una vez verificado el funcionamiento de las reservaciones de 3-vías, y al validar que no se cumplen con la expectativa de tiempos, se implementa la asignación de flujos, presuponiendo el establecimiento de los mismos al realizarse una llamada, en este caso, cuando se realiza una llamada se actualiza el mapa de todos los nodos participantes. Se analiza la máxima capacidad de la red para poder enviar VoIP con la propuesta de flujos bajo demanda, que se explica en la siguiente sección.

6.4.2 Evaluación de desempeño para el establecimiento de flujos bajo demanda

Cuando los flujos empiezan a establecerse, el retardo es el tiempo de transmisión del paquete, es decir, el tamaño del paquete más el retardo de propagación al siguiente salto, ya que los flujos se van reservando uno tras de otro para cada salto. Aunque este es el caso ideal, posteriormente se considera un tiempo en la reservación para cubrir la propagación, en contraparte cuando la red está saturada se generan los retardos debido a problemas de espacio. Como se mencionó con anterioridad las reservaciones se realizan cada $30ms$ (VoIP) que es el tiempo en generarse la siguiente muestra de tráfico, aunque este tiempo es configurable.

En la tabla 6.6 se muestra un ejemplo, al establecer el flujo número 20 que va de 1006 a 1013, se genera la ruta: 1006- 1009-1015-1014-1013 de 4 saltos, el tamaño del paquete enviado en el flujo es de 8 *slots*. Se puede observar la posición de las reservaciones en los mapas de cada nodo, señalado por el rango del número de slots, y en la primera columna se muestra el número de *frame* en el *multiframe*. Para el tercer y cuarto salto ya no es posible reservar en el *frame* 7 por lo que el retardo ya suma 10 *ms* más, en el *frame* 8, y al intentar reservar en el *frame* 10 ya no hay slots disponibles por lo que el paquete sería enviado hasta el *frame* 1 del siguiente *multiframe*. Por lo que se decidió trabajar con multiframe de 3, para que fuera periódica la reservación.

Número de <i>frame</i> en <i>multiframe</i>	Primer salto (1006 a 1009) Mapa 1006	Segundo salto (1009 a 1015) Mapa 1009	Tercer salto (1015 a 1014) Mapa 1015	Último salto (1014 a 1013) Mapa 1014	Retardo sin propagación
1	128-135	136-143	144-151	152-159	1.2ms
4	168-175	176-183	184-191	192-199	1.2ms
7	200-207	208-215	200-207	208-215	1.6ms
10	200-207	208-215	No disponibles	No disponibles	
1	128-135	136-143	144-151	152-159	0.8 ms
4	168-175	176-183	184-191	192-199	32.2ms

Tabla 6.6 Ejemplo de establecimiento de flujo, rango de slots reservados por nodo en la ruta.

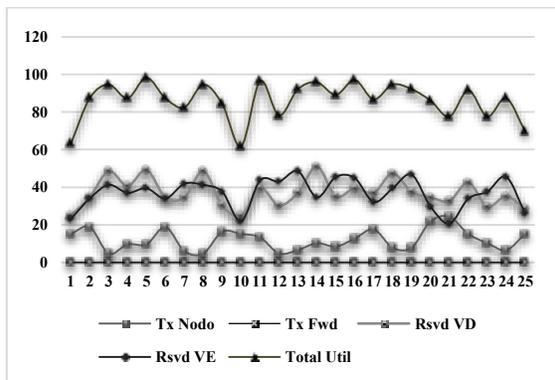
Por tanto, el tamaño del mapa se tomó un *multiframe* con 3 *frames* de 10ms cada uno y se crean n escenarios generando diferentes rutas de n número de saltos, donde n puede tomar el valor de 1 a 8 que es el máximo número de saltos posibles en la topología. Lo anterior, con la finalidad de medir el número máximo de flujos que se pueden establecer para cada valor de n para saturar el canal y la utilización del mismo.

Como se mencionó anteriormente para este trabajo se consideran 112 símbolos para el *subframe* de control y 880 símbolos para el *subframe* de datos, por lo tanto, el máximo *DataRate* es 19.04 Mbps del cual 2.15 Mbps son utilizados para control, utilizando el resto para datos, siendo un total de 16.89 Mbps.

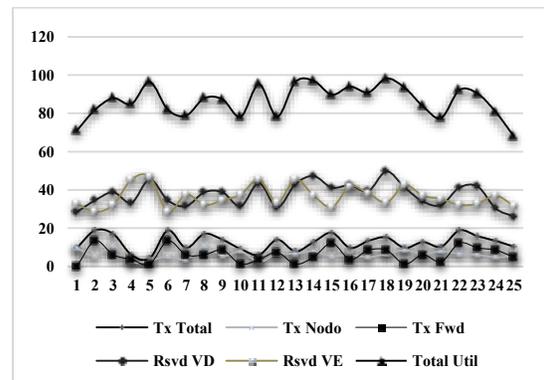
6.4.2.1 Utilización

En la figura 6.20 se muestran las gráficas de utilización y saturación del canal por nodo, quiere decir que hubo un punto en el cual ya no es posible reservar recursos por falta de medios en el *frame* o en los vecinos, cabe señalar que está utilización es por cada nodo.

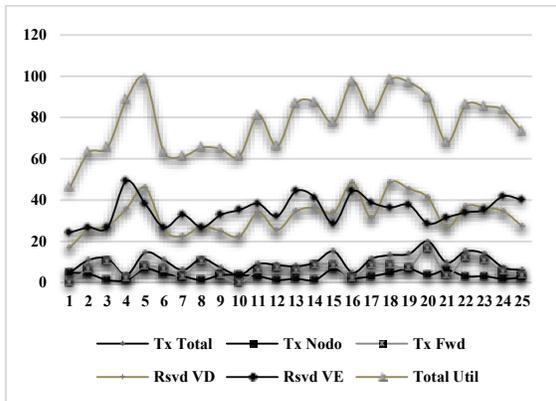
Se puede observar que, en la mayoría de los casos, los nodos alcanzan prácticamente el 100% de saturación lo cual impide seguir generando rutas, aunque para una ruta de 3 saltos o menos es posible generar más rutas concurrentes por lo que se logra una mejor utilización.



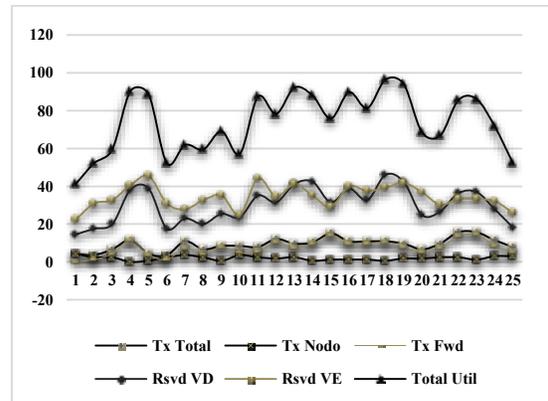
(a) Canal saturado con 250 llamadas de 1 salto.



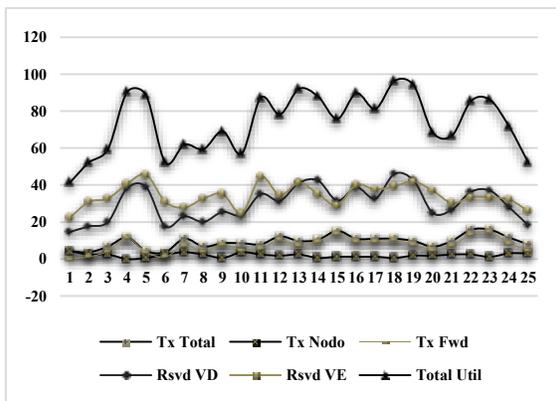
(b) Canal saturado con 125 llamadas de 2 saltos.



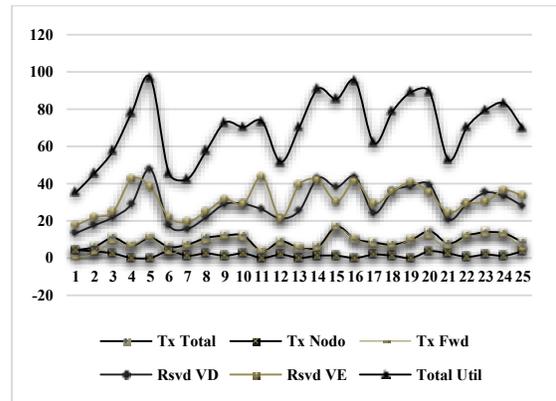
(c) Canal saturado con 71 llamadas de 3 saltos.



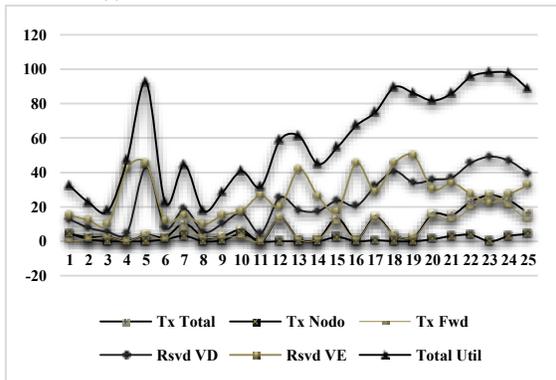
(d) Canal saturado con 49 llamadas de 4 saltos.



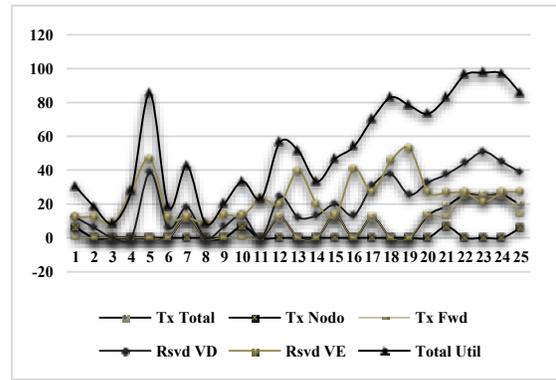
(e) Canal saturado con 40 llamadas de 5 saltos.



(f) Canal saturado con 33 llamadas de 6 saltos.



(g) Canal saturado con 26 llamadas de 6 saltos.



(h) Canal saturado con 20 llamadas de 8 saltos.

Figura 6.20 Utilización por nodo para canales saturados.

6.4.2.2 Eficiencia del canal

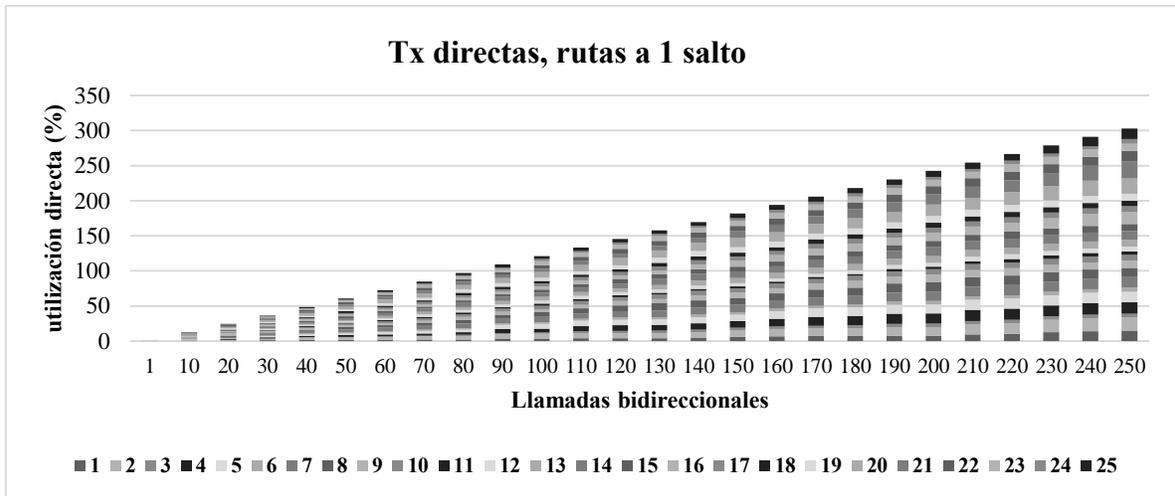
Como una primera aproximación al *throughput*, en el conjunto de gráficas de la figura 6.21, se muestran la eficiencia del canal por medio de las transmisiones directas que se efectúan desde cada el nodo, es decir, el tráfico enviado que es generado en el mismo nodo, y llegó a su destino. En la figura 6.21(a), muestra el número de transmisiones directas que se generan en todos los nodos al ir aumentando el número de flujos (o llamadas bidireccionales) cuando las llamadas de un salto. Se puede constatar que la utilización rebasa por mucho el 100%, ya que se logra alrededor de un 300% de utilización de la red, por las transmisiones concurrentes.

Para obtener este valor se utiliza la ecuación (17), donde la utilización directa se calcula como la sumatoria de todas las f llamadas con Tx_n (transmisiones directas, representadas por el número de nodo en la parte inferior de cada gráfica), multiplicado por 2 para establecer la llamada bidireccional, y P_{Tx} , que es el tiempo periódico de las transmisiones de acuerdo al tipo de tráfico que se desea enviar. En este caso se utiliza un tiempo de 30ms, que es el tiempo en que se generan los paquetes en el estándar G723.1.

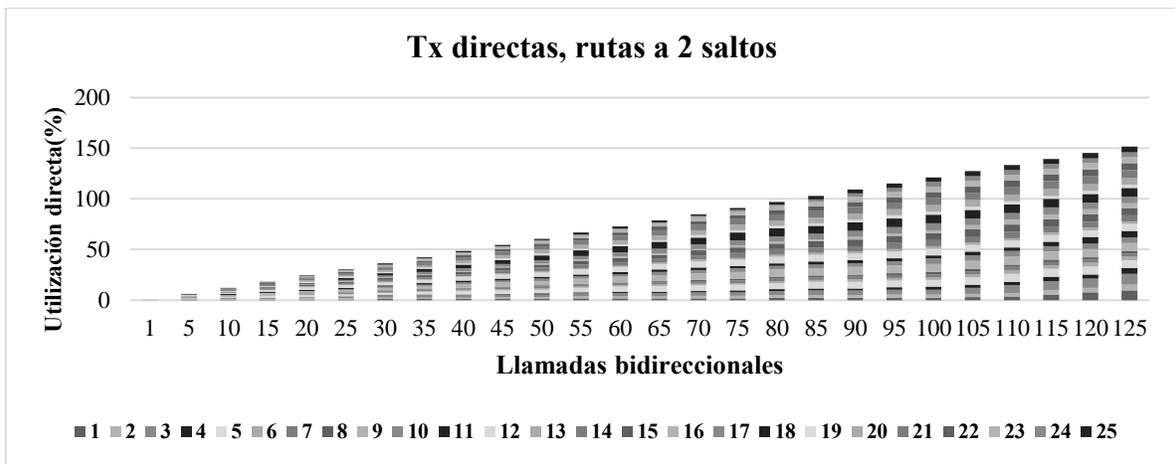
$$U_d = (\sum_1^f Tx_n * 2 * 100) / P_{Tx} \quad \dots(17)$$

En la figura 6.21(b), cuando el número de saltos de cada llamada se duplica la utilización directa se vuelve prácticamente de la mitad, debido a la retransmisión de paquetes, y se puede apreciar que sucede conforme se va saturando el canal, ya que con un número pequeño de llamadas la utilización directa es la misma, como se puede apreciar en 40 llamadas donde la utilización es del 50% en ambos casos.

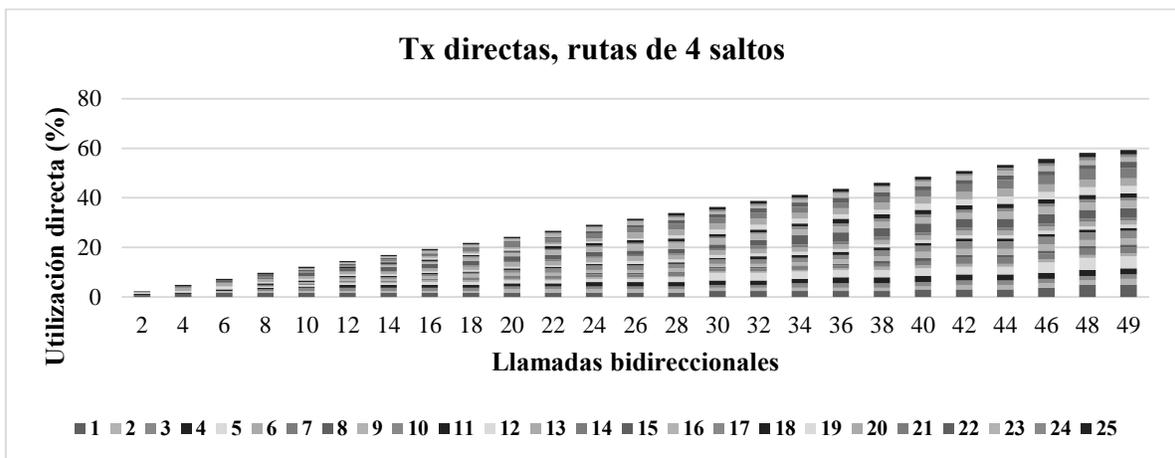
Como podemos ver en 6.21(c) rutas de 4 saltos el comportamiento es similar, la utilización del canal saturado decrece hasta 49%, lo cual es menor por mucho a la mitad del caso anterior, pero es debido a que ya no se pueden establecer las rutas completas, aunque existan *slots* disponibles en algunos nodos y para el caso de 8 saltos apenas se logra el 25% de utilización, debido a lo explicado con anterioridad.



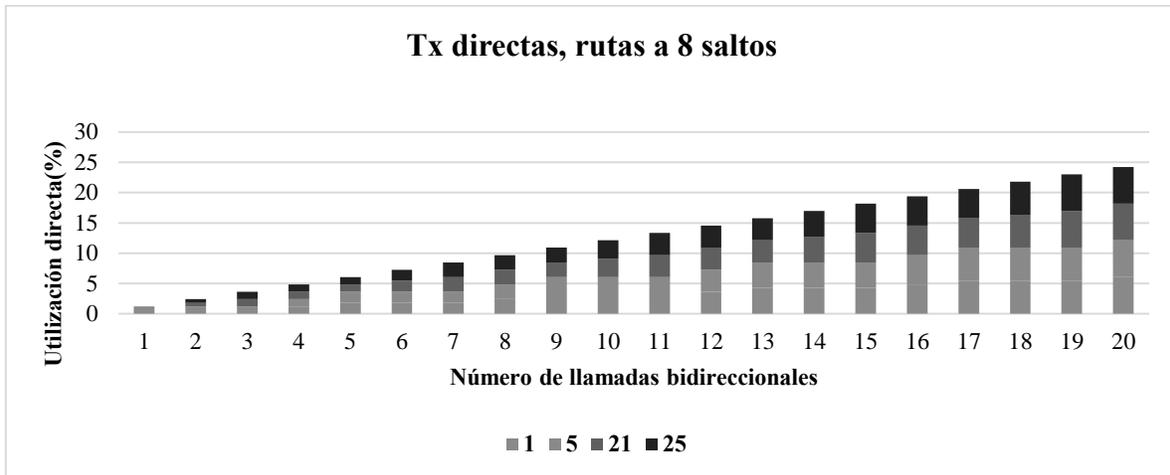
(a) Transmisiones de tráfico generado en el nodo, rutas de 1 salto, de 1 a 250 llamadas.



(b) Transmisiones de tráfico generado en el nodo, de 2 saltos, de 1 a 125 llamadas.



(c) Transmisiones de tráfico generado en el nodo, de 4 saltos, de 1 a 49 llamadas.



(d) Transmisiones de tráfico generado en el nodo, de 8 saltos, de 1 a 20 llamadas.

Figura 6.21 Porcentajes de utilización directa.

En la gráfica de la figura 6.22, se puede ver el resumen de la actividad en la red, cuando se satura el canal, y se aprecia un decrecimiento exponencial en el envío de tráfico, sobre todo en las transmisiones directas por cada nodo, debido a las retransmisiones que se requieren para que los paquetes lleguen a su destino.

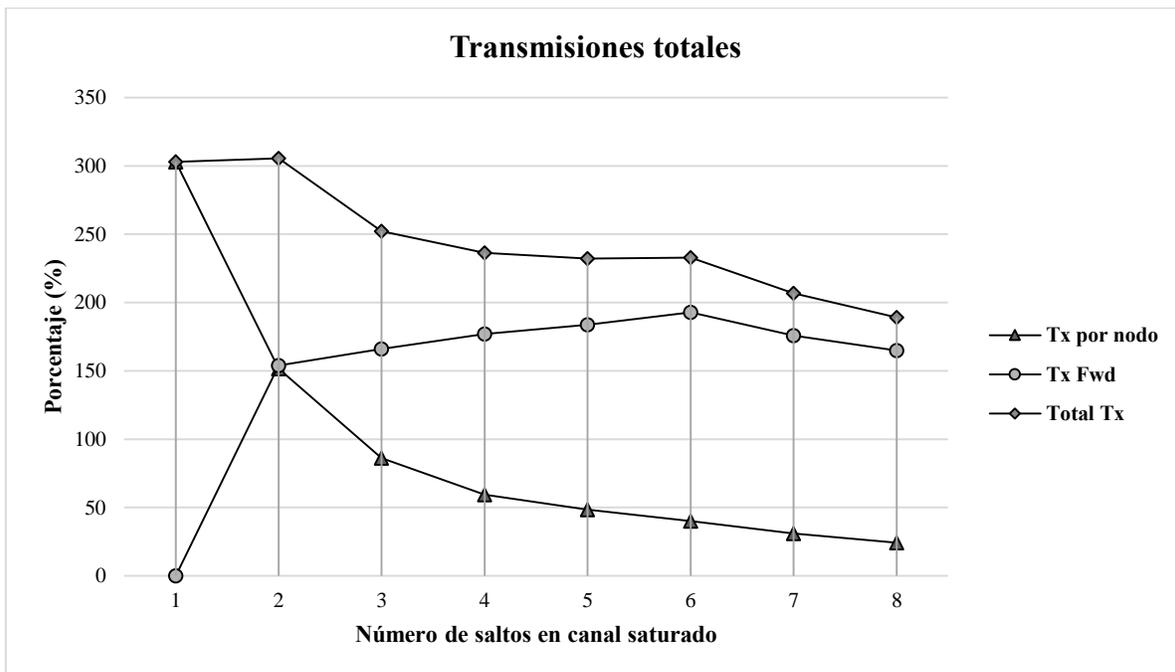


Figura 6.22 Porcentaje utilizado para transmisiones directas, retransmisiones y total.

Sin embargo, también se refleja el buen uso de transmisiones concurrentes cuando es posible. En 7 y 8 rutas disminuye la utilización general debido a la imposibilidad de generar más rutas porque los mapas de los nodos intermedios de la topología de la red están saturados.

6.4.2.3 Retardo e2e

Las simulaciones se realizan por 300 segundos, se genera el tráfico en los nodos de acuerdo a las rutas establecidas, se realiza la reserva del flujo utilizando un grupo periódico de 3 *frames*, con un retardo de control de 20ms para las rutas con más saltos. En la figura 6.23 se muestra el promedio del retardo *end-to-end*, se puede observar que conserva QoS, estos valores se obtienen en la simulación durante la saturación del canal, logrando hasta 250 llamadas en promedio de 1 salto, con retardos e2e por debajo de los 20ms.

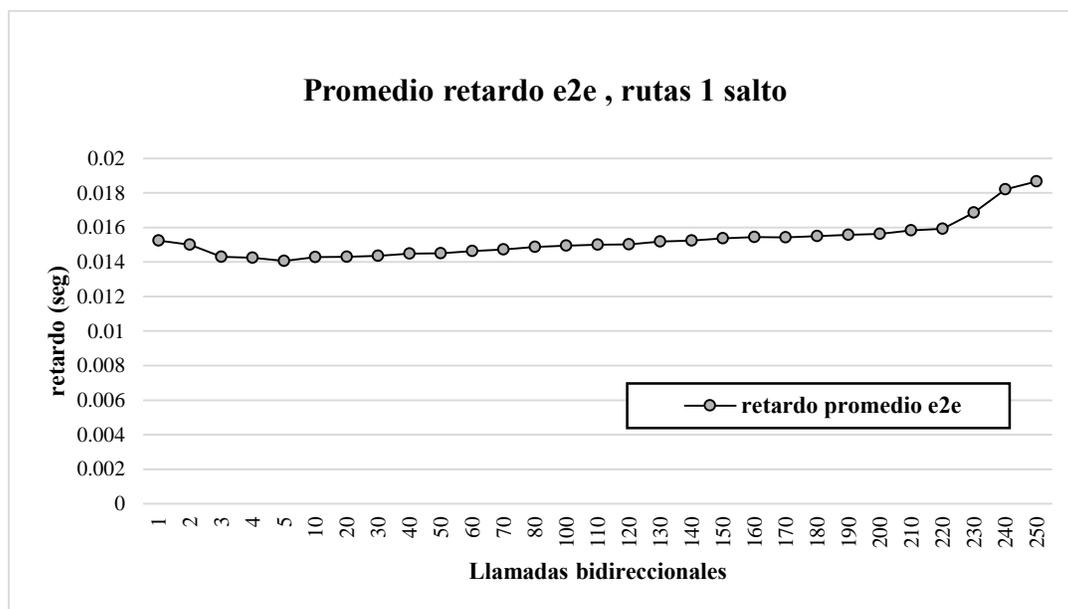


Figura 6.23 Retardo e2e durante la saturación del canal, en rutas de 1 salto.

En la figura 6.24, se muestra los resultados durante las primeras 20 simulaciones para rutas de 1 a 8 saltos, mostrando el incremento en el retardo promedio de llegada de los paquetes, a partir de 6 saltos se observa un incremento significativo en el tiempo de retardo, debido a que cada vez es más complejo encontrar una ruta que se adapte a los nodos que aún tienen disponibilidad. En general, se puede observar que se mantiene un orden en el tiempo,

dependiendo del número de saltos en la ruta y de las rutas existentes. Podemos observar que, para 8 saltos, con el canal saturado se llega a 130ms por lo que aún cumple con la *deadline* para la codificación, aunque se encuentra casi en el límite de los 150ms, para que la llamada de voz sea comprensible.

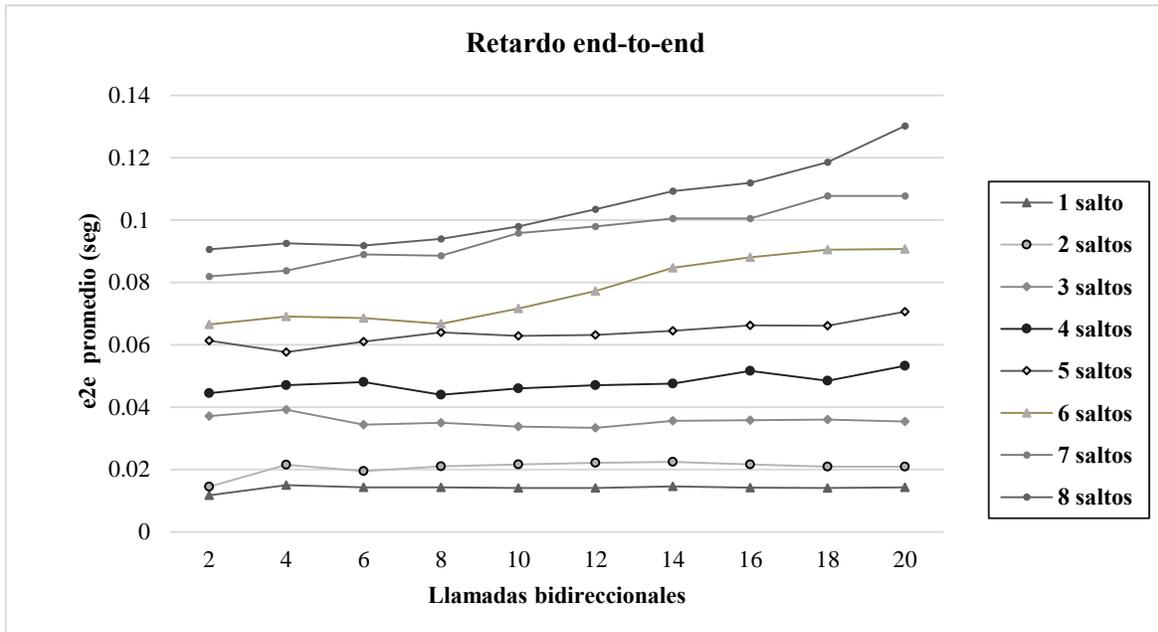


Figura 6.24 Retardo e2e durante la saturación del canal.

6.4.2.4 Throughput

En la figura 6.25, se muestra el *throughput* en las rutas de 1 salto, calculado a partir de los *bytes* que se generan en el nodo para transmitir sobre el *DataRate* de datos calculado en la sección 6.3.1. Primero se calcula el *throughput* como se muestra en la ecuación (18), donde pk_rcvd son los paquetes que llegan a su destino, multiplicado por el tamaño del paquete en bits, este valor se divide en el tiempo de simulación en segundos para obtener la carga útil. Finalmente, para obtener el porcentaje se divide entre el *DataRate* y se multiplica por 100.

$$Thr = \frac{(pk_rcvd * tam_{pk} * 8)}{T_{simulacion}(seg)} \dots(18)$$

En esta gráfica se muestra que se obtiene aproximadamente un 40% de uso del canal en carga de información útil, es decir no se toman en cuenta encabezados, tomado en cuenta los paquetes que llegan a su destino durante la simulación.

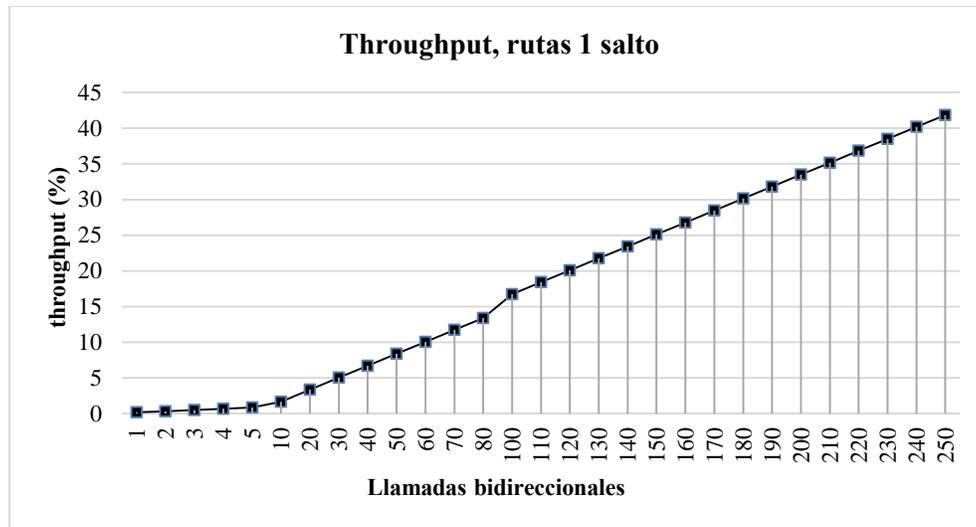


Figura 6.25 *Throughput* para llamadas bidireccionales de 1 salto.

Finalmente, en la figura 6.26, se muestra una comparación de la carga total del canal y el *throughput* en rutas de 4 saltos, que en con el canal saturado o al menos imposibilitado de crear nuevas rutas de 4 saltos, se generan hasta un total de 49 llamadas bidireccionales, es decir 98 flujos de comunicación de VoIP.

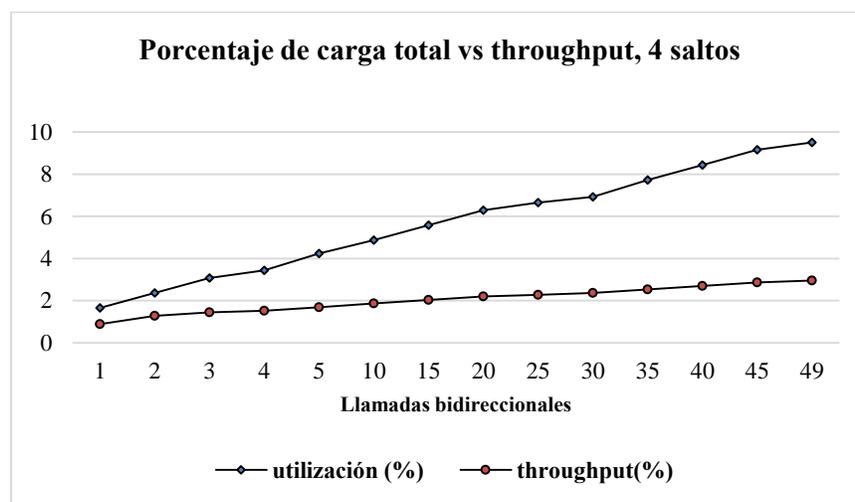


Figura 6.26 *Throughput* vs utilización para llamadas de 4 saltos.

Se puede apreciar también como el *throughput* decrece ya que se cuenta únicamente el tamaño de los paquetes recibidos exitosamente de tráfico VoIP, es decir, la información útil que llega a su destino. Sin embargo, esta información se va duplicando en cada salto, que se refleja en que la carga real se duplica constantemente. Se debe considerar también, que en la mayor parte del canal, los nodos deben estar silenciados mientras los nodos que integran la vecindad extendida transmite, como se muestra en el grupo de gráficas de la figura 6.20.

6.5 Conclusiones

Utilizando los flujos bajo demanda, se puede mantener QoS, para tráfico UGS, específicamente para VoIP. Se realizan tres escenarios para reducir los tiempos, el primero de ellos, es el mecanismo de tres vías, que tiene múltiples ventajas como ser libre de colisiones para el envío de mensajes de control. Sin embargo, los retardos son significativos porque en cada salto se tiene que esperar la respuesta para la concesión de recursos, lo cual genera que el retardo crezca de manera exponencial.

El segundo escenario es la creación de flujos para realizar transmisiones continuas de las peticiones de recursos para el establecimiento del flujo, crea una gran ventaja, ya que son libres de colisiones y además una manera casi inmediata de realizar la reservación que además es periódica.

Para optimizar los tiempos de retardo para el establecimiento de las llamadas, se creó un último escenario en donde con las rutas predefinidas, como debería de ser en un caso de contingencia, pudiera habilitar la comunicación de manera casi instantánea a puntos de apoyo para ayudar a la población.

Conclusiones y Trabajo

Futuro

Se identifican diferentes escenarios con la finalidad de encontrar un mecanismo para tener una buena resiliencia en redes *mesh* basada en el estándar IEEE 802.16-2004, después de una interrupción del servicio.

Se ha propuesto un nuevo mecanismo de planeación que optimiza la región de control para los mensajes de inicialización MSH-NENT y MSH-NCFG del *subframe*. Se propuso un esquema que trabaja en capa MAC y se obtuvo un 98% de reducción en el tiempo, al evitar una congestión de mensajes de entrada a la red; impidiendo la inicialización de todos los nodos, con lo que se demuestra que estas redes son capaces de proporcionar una recuperación oportuna después de un evento de interrupción del servicio. Se comprueba que el comportamiento dinámico era el adecuado, dentro de la simulación del modelo realizado en OPNET, al compararlo con los resultados obtenidos en el modelo teórico desarrollado en lenguaje C ++. De lo anterior derivaron 2 artículos, uno de conferencia [36] y otro de revista [37].

Aunado a las modificaciones realizadas en el protocolo de la capa MAC, se estudian los diferentes parámetros de planeación para optimizar el uso del canal y el envío de los mensajes de control.

Posteriormente, se analiza a profundidad el mecanismo de reservación y planeación distribuida de recursos, se realizan tres escenarios que permiten estudiar y contrastar los retardos end-to-end en cada caso, para identificar si era posible mantener QoS.

En el primer escenario se implementa el mecanismo de tres vías propuesto en el estándar IEEE 802.16, analizando los parámetros de configuración para minimizar los retardos, aunque no es posible debido a las múltiples reservaciones que se tienen que realizar para establecer el flujo de comunicación, así como la intervención de otros nodos al momento de la reserva.

En el segundo escenario, se produjo un efecto similar, a pesar de que la reservación del flujo (la reservación a través de los nodos, para que un paquete llegue a su destino) utiliza un mensaje especial para el establecimiento del flujo que deja pre-reservados los recursos; pero al intervenir otros nodos y sus reservaciones el tiempo podría recorrerse significativamente.

El tercer y último escenario son los flujos bajo demanda, en donde se reconfigura toda la red, de acuerdo a la ruta que se ha pedido, este flujo se implementa para tipo de tráfico UGS, en particular para VoIP con códec 723.1, utilizando oportunidades transmisión continuas, para informar y actualizar mapas en toda la vecindad extendida.

Utilizando lo anterior, se puede mantener QoS para VoIP, utilizando el esquema TDMA, en rutas de 1 hasta 8 saltos, en una topología de 5X5 nodos (MBSs), hasta un total de 20 flujos establecidos, en donde el retardo supera los 100ms. Sin embargo, está dentro de la tolerancia de 150ms, que es el máximo de tiempo para que la llamada de voz sea compresible.

Además, se identificaron puntos de saturación del canal y el comportamiento dinámico del mismo. Esta planificación complementa eficazmente la primera parte de optimización para la inicialización, en el caso de que se desee brindar un servicio controlado de VoIP.

Lo anterior conjuntó el funcionamiento ideal para una red de alta resiliencia que puede ser desplegada en caso de emergencia, poniendo la red en funcionamiento rápidamente para el establecimiento de llamadas realizadas a través de VoIP.

Como trabajo futuro está probar la convivencia de diferentes tipos de QoS, para utilizar la disponibilidad de los mapas que ya no puedan crear flujos. Y tener un Control de Admisión más estricto para los nodos, para que así puedan convivir diferentes tipos de tráfico manteniendo QoS, y a su vez generar y planificar tráfico pertinente, para lo que se tendrían generar colas de prioridades, y esto tendría sentido en una red con mayor actividad y necesidades heterogéneas, como puede ser en una red para IoT.

Publicaciones

Artículo de Conferencia

V.Rangel, Y. Macedo, J. Gomez, M.Lopez Guerrero, R.Aquino, A.Edwards, "Performance optimization of the initialization process of IEEE 802.16 mesh networks". Electrical and Computer Engineering (CCECE).2010 23rd Canadian Conference, May 2-5, 2010, ISBN: 978-1-4244-5376-4, pp.1-5

Artículos revista:

Y. Macedo, V. Rangel, J. Gómez, M. Lopez-Guerrero, R. Aquino, "Enhanced Network Control for the Entry Process of IEEE 802.16 Mesh Networks". Journal of Electronics and Electrical Engineering. January 2012, Vol.117, no.02.

http://www.ee.ktu.lt/journal/2012/01/09_ISSN_1392-1215_Enhanced_Network_Control_for_the_Entry_Process_of_IEEE_802_16_Mesh_Networks.pdf

V. Rangel , Y. Macedo, L. Ortiz, J. Gómez. "QoS Management for Broadband IEEE 802.16 Based Networks in FDD Mode" .Journal of Electronics and Electrical Engineering (Elektronika ir Elektrotechnika), Vol. 98, No.2, ISSN 1392-1215, February 2010, Indexed in SCI-E.

Bibliografía

- [1] IEEE 802.16-2004, "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems," Octubre 2004.
- [2] Z. Naghsh and S. Valaee, "Semi-distributed conflict-free multichannel TDMA link scheduling for 5G," *2017 51st Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*, Pacific Grove, CA, 2017, pp. 1407-1411. doi: 10.1109/ACSSC.2017.8335586
- [3] M.S. Kuran, B. Yilmaz, F. Alagoz, y T. Tugcu, "Quality of Service in Mesh Mode IEEE 802.16 Networks," *Software in Telecommunications and Computer Networks, 2006. SoftCOM 2006. International Conference on*, 2006, págs. 107-111.
- [4] Yong Zhang, Anfeng Mao, Guo Ping, Ning Hong, y Xu Guang, "Quality of Service Guarantee Mechanism in WiMAX Mesh Networks," *Pervasive Computing and Applications, 2008. ICPCA 2008. Third International Conference on*, 2008, págs. 882-886.
- [5] Y. Zhang, H. Hu, y H. Chen, "QoS Differentiation for IEEE 802.16 WiMAX Mesh Networking," *Mobile Networks and Applications*, vol. 13, Abr. 2008, págs. 19-37.
- [6] Honglin Hu, Yan Zhang, y Hsiao-Hwa Chen, "An Effective QoS Differentiation Scheme for Wireless Mesh Networks," *Network, IEEE*, vol. 22, 2008, págs. 66-73.
- [7] Loscri, V., "A queue based dynamic approach for the Coordinated distributed scheduler of the IEEE 802.16", *Computers and Communications*, 2008. ISCC 2008. IEEE Symposium on , 2008, págs. 423 - 428.
- [8] Shukaili, A.A.; Chilamkurti, N.; Zeadally, S.; , "Enabling Quality of Service in IEEE802.16 networks for distributed mesh topologies," *Telecommunication Networks and Applications Conference (ATNAC)*, 2010 Australasian , vol., no., pp.135-140, Oct. 31 2010-Nov. 3 2010
- [9] James P. G. Sterbenz, David Hutchison, Egemen K. Çetinkaya, Abdul Jabbar, Justin P. Rohrer, Marcus Schöller, and Paul Smith. 2010. "Resilience and survivability in communication networks: Strategies, principles, and survey of disciplines". *Comput. Netw.* 54, 8 (June 2010), 1245-1265. DOI=<http://dx.doi.org/10.1016/j.comnet.2010.03.005>
- [10] IEEE 802.16-2005, "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems for Mobile Users," Dec. 2005.

-
- [11] G. E. M. Zhioua and N. Tabbane, "A load and QoS aware scheduling algorithm for multi-channel multi-radio wireless mesh networks," 2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Shanghai, 2012, pp. 2043-2047. doi: 10.1109/WCNC.2012.6214126
- [12] Z. Zeng and L. Zhang, "Bandwidth Guaranteed Scheduling and Shortest Path Routing in Wireless Mesh Networks," 2007 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, Shanghai, 2007, pp. 1705-1708. doi: 10.1109/WICOM.2007.429
- [13] P. Deb, D. Podder, S. Deb and A. Majumder, "Study of fairness and delay of packet scheduling in IEEE 802.11 based Wireless Mesh Network," 2016 3rd International Conference on Recent Advances in Information Technology (RAIT), Dhanbad, 2016, pp. 101-106. doi: 10.1109/RAIT.2016.7507883
- [14] Y. Chen and S. Emeott, "Impact of scheduled mesh access on the capacity of wireless mesh links," 2009 IEEE Radio and Wireless Symposium, San Diego, CA, 2009, pp. 107-110. doi: 10.1109/RWS.2009.4957296
- [15] C. Lin, Shu-Hsien Lu and Y. Tseng, "A channel management protocol for multi-channel, single-radio 802.11-based wireless mesh networks," 2011 IEEE 16th International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD), Kyoto, 2011, pp. 26-30. doi: 10.1109/CAMAD.2011.5941111
- [16] Nuaymi Lout, WiMAX Technology for Broadband Wireless Access, ISBN: 978-0470028087, Wiley, 2007.
- [17] Sauter Martin, Communication Systems for the Mobile Information Society, Jonh Wiley & Sons Ltd. England. 2006
- [18] Ian F. Akyildiz, Xudong Wang, and Weilin Wang. 2005. Wireless mesh networks: a survey. Comput. Netw. ISDN Syst. 47, 4 (March 2005), 445-487.
- [19] Zhi-Xiong Liu; Fan Yang; Zheng-Bao Liu; Yu-Liang Tang; , "A dynamic holdoff scheme in IEEE 802.16 distributed scheduling mesh networks," Computer Science and Education (ICCSE), 2010
- [20] Bong Chan Kim; Dong Gu Kwak; Heecheol Song; Hwang Soo Lee; Joong Soo Ma; , "An adaptive holdoff algorithm based on node state for IEEE 802.16 mesh mode with coordinated distributed scheduling," Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2008.
- [21] Bayer, N.; Bangnan Xu; Rakocevic, V.; Habermann, J.; , "Improving the Performance of the Distributed Scheduler in IEEE 802.16 Mesh Networks," Vehicular Technology Conference, 2007
- [22] Yong Zhang, Anfeng Mao, Guo Ping, Ning Hong, y Xu Guang, "Quality of Service Guarantee Mechanism in WiMAX Mesh Networks," Pervasive Computing and Applications, 2008. ICPCA 2008. Third International Conference on, 2008, págs. 882-886.
- [23] Yan Zhang, Jun Zheng, y Wei Li, "A Simple and Effective QoS Differentiation Scheme in IEEE 802.16 WiMAX Mesh Networking," Wireless Communications and Networking Conference, 2007.WCNC 2007. IEEE, 2007, págs. 3216-3220.
- [24] Yajun Li, Yuhang Yang, Liang Zhou, Anne Wei, Chengyu Cao, "QoS-aware fair packet scheduling in IEEE 802.16 wireless mesh networks", International Journal of Communication Systems - Part 1: Next Generation Networks (NGNs), Volume 23 Issue 6;7, June 2010, John Wiley and Sons Ltd.
- [25] Loscri, V., "A queue based dynamic approach for the Coordinated distributed scheduler of the IEEE 802.16", Computers and Communications, 2008. ISCC 2008. IEEE Symposium on , 2008, págs. 423 - 428.
- [26] Yu Ge, Chen-Khong Tham, Peng-Yong Kong, Yew-Hock Ang, "Dynamic End-to-end Capacity in IEEE 802.16 Wireless Mesh Networks", Computer Networks 54, 2147-2165, February 2010.
-

-
- [27] De Rango, F.; Malfitano, A.; Marano, S.; , "A new call admission control algorithm for IEEE 802.16 distributed mesh networks," *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2009 IEEE 20th International Symposium on* , vol., no., pp.1123-1127, 13-16 Sept. 2009.
- [28] F. Liu, Z. Zeng, J. Tao, Q. Li, Z. Lin, "Achieving for IEEE 802.16 in Mesh Mode", 8th International Conference on Computer Science and Informatics, Salt Lake City, USA. Julio 2005.
- [29] F. Hou, P. H. Ho, X. Shen, "Performance Analysis of a Reservation Based Connection Admission Scheme in 802.16 networks", *GLOBECOM 2006*, San Francisco, CA.
- [30] Kapoor, A.; Ribeiro, V.J.; , "An end-to-end QoS aware greedy distributed scheduling framework for WiMAX mesh networks," *Communication Systems and Networks (COMSNETS), 2010 Second International Conference on* , vol., no., pp.1-8, 5-9 Jan. 2010.
- [31] Shukaili, A.A.; Chilamkurti, N.; Zeadally, S.; , "Enabling Quality of Service in IEEE802.16 networks for distributed mesh topologies," *Telecommunication Networks and Applications Conference (ATNAC), 2010 Australasian* , vol., no., pp.135-140, Oct. 31 2010-Nov. 3 2010.
- [32] Vidya Sagar, Debrabrata Das, "Modified EDF Algorithm and WIMAX Architecture to Ensure End-to-End Delay in Multi-hop Networks", *TENCON 2008- 2008 IEEE Region 10*
- [33] V. Erceg et al., "An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 17, no. 7, pp. 1205-1211, Jul 1999.
- [34] G723.1 Códex de voz de doble velocidad para la transmisión en comunicaciones multimedia a 5,3 y 6,3 kbit/s, Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la UIT..(05/2006).
- [35] V. Rangel ; R.M. Edwards ; P. Tzerefos ; K.-D. Schunke "Delivery of low rate isochronous streams over the digital video broadcasting/Digital Audio-Visual Council cable television protocol", *IEEE Transactions on Broadcasting*, Year: 2002 Volume: 48 , . Pages: 307 - 316.
- [36] V.Rangel, Y. Macedo, J. Gomez,M.Lopez-Guerrero,R.Aquino,A.Edwards,"Performance optimization of the initialization process of IEEE 802.16 mesh networks". *Electrical and Computer Engineering (CCECE) Sch. de Inglaterra., Nat. Univ.Autónoma. de México, Ciudad de México.2010 23rd Canadian Conference*, May 2-5, 2010, ISBN: 978-1-4244-5376-4,pp.1-5
- [37] Y. Macedo, V. Rangel, J. Gómez, M. Lopez-Guerrero, R. Aquino, "Enhanced Network Control for the Entry Process of IEEE 802.16 Mesh Networks". *Journal of Electronics and Electrical Engineering*. publication in January 2012, Vol.117, No.01. ISSN 1392 – 1215.

Lista de Acrónimos

BE - *Best Effort*-Mejor Esfuerzo.

BPSK - *Binary Phase Shift Keying* - Modulación por Desplazamiento de Fase Binario.

CBR - *Constant Bit Rate* - Tráfico de Tasa de Bits constante.

CDMA - *Code Division Multiple Access* - Acceso Múltiple por División de Código.

DSCH – Distributed Scheduler

Extended rtPS - *rtPS* Extendido.

ESTX - *Earliest Subsequent Transmission Time* – Próximo Tiempo de Transmisión Subsecuente.

FFT - *Fast Furier Transform* - Transformada Rápida de Fourier.

GSM - *Global System for Mobile Communications* - Sistema Global para las Comunicaciones Móviles.

HTTP - *Hypertext Transfer Protocol* - Protocolo de transferencia de hipertexto,

IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers*- Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.

IoT - *Internet of Things* - Internet de las Cosas.

IP - *Internet Protocol* - Protocolo de Internet.

LTE - *Long Term Evolution* - “Evolución a largo plazo”

MAC - *Medium Access Control* - Control de Acceso al Medio.

MBS - *Mesh Base Station*, - Estación Base en malla.

MBWA - *Mobile Broadband Wireless Access* - Acceso Inalámbrico de Banda Ancha.

MIH - *Media Independent Handover* - Transpaso Independiente de Medios.

MIMO - *Multiple Input Multiple Output* - Múltiples Entradas Múltiples Salidas.

MSS - *Mesh Suscriber Station* - Estación suscriptora tipo malla.

NCFG – DSCH:NCFG, DSCH:*Network Configuration* - Mensaje de configuración de Red

NENT – DSCH:NENT, DSCH:*Network Entry* - Mensaje de Entrada a la Red

nrtPS - *non-Real Time Polling Service* - Servicio de Propuesta no en Tiempo Real.

OFDM - *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* - Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales.

PMP - *Point to Multipoint* - Punto multipunto.

QAM - *Quadrature Amplitud Modulation* - Modulación de Amplitud en Cuadratura.

QoS - *Quality of Service* - Calidad de Servicio.

QPSK - *Quadrature Phase Shift Keying* - Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura.

rtPS - *Real Time Polling Service* - Servicio de Propuesta en Tiempo Real.

SMS – *Short Message Service* – Servicio de Mensajes Cortos.

TDD – *Time Division Duplex* - Duplexación por División de Tiempo.

TDM - *Time Division Multiplexing* - Multiplexación por División de Tiempo.

TDMA - *Time Division Multiple Access* - Acceso Múltiple por División de Tiempo.

TxOP - *-Transmission Opportunity* – Oportunidad de Trasmisión

UGS - *Unsolicited Grant Service* servicio Servicio Garantizado sin Solicitud.

UMTS - *Universal Mobile Telecommunication System* - Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles.

VBR - *Variable Bit Rate* - Tasa de Bits Variable.

VoIP - *Voice over IP* - Voz sobre IP.

WiMAX - *Worldwide Interoperability for Microwave Access* - Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas.

WMN – *Wireless Mesh Networks* - Redes Inálambricas con topología *Mesh*.

XHE - *Xmt Holdoff Exponent* – Exponente de Tiempo de espera para la transmisión.