# ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

## DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

## CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES


## PROYECTO DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERÍA

# EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL ESTÁNDAR IEEE 802.16j MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE HERRAMIENTAS SOFTWARE DE SIMULACIÓN


## ANDRÉS RAMIRO MOSCOSO MANJARREZ



## SANGOLQUÍ - ECUADOR

**2010**

# Resumen

El presente proyecto contempla el análisis general del desempeño de la primera Enmienda al Estándar IEEE 802.16j, Interface aire para Sistemas de Acceso Inalámbrico de Difusión, Conmutación por Multisalto perteneciente a los estándares IEEE para redes de área local y metropolitana.

Esta enmienda especifica las mejoras y actualizaciones tanto de la capa de Control de Acceso al Medio (MAC) como de la Capa Física (PHY) del estándar IEEE 802.16 para bandas licenciadas, las cuales habilitan la operación de estaciones de conmutación, conocidas también como estaciones repetidoras, cuyo propósito es el de proporcionar un incremento en la cobertura y un mejor aprovechamiento del rendimiento de la red, es decir un aumento en la tasa de transmisión, con lo cual se puede también aumentar el número de usuarios a quienes se les provee nuevos servicios gracias al gran ancho de banda que se obtiene con la tecnología WiMAX.

Las mejoras especificadas en el estándar se analizan bajo un enfoque referente a los modos y esquemas de operación del estándar de las capas ya mencionadas, posteriormente se procede a utilizar herramientas software para el análisis práctico del desempeño de una red basada en el estándar IEEE 802.16j. NCTUns es un simulador y emulador de redes inalámbricas que permite evaluar y diagnosticar el desempeño de protocolos y aplicaciones de una red, para lo cual se necesita un tiempo determinado para el aprendizaje del manejo y configuración del software.

Finalmente contando con las herramientas software tanto para la simulación de una red basada en el estándar como con el software que procesará los datos obtenidos proporcionando figuras demostrativas, llamado Matlab, se procede a configurar los escenarios de simulación que corresponden a una zona urbana y utilizando el modo de conmutación transparente, el cual permite obtener un alto rendimiento en la tasa de transmisión de datos más no un aumento en la cobertura y el análisis se enfoca en el tráfico en el canal ascendente *(Uplink)*, donde luego del proceso de simulación, los resultados muestran que el rendimiento de la red es de 90%, lo cual refleja un buen desempeño y se comprueba la teoría de conmutación por multisaltos.

## DEDICATORIA

*A mis padres Juan y Lolita, los mejores*
*padres del mundo y mis mejores amigos,*
*a mis hermanos Juan Carlos y Alejandro,*
*quienes han sido más que hermanos,*
*amigos y mis segundos padres*

*Andrés Moscoso M.*

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme la vida, una familia maravillosa y por llenar mi vida de personas buenas que me ayudan a ser mejor.

Agradezco a mis padres por todo el apoyo que me han brindado en cada paso y decisión que he tomado, por ser los guías de mi vida personal y profesional, apoyándome con todo su amor y sabiduría, por ellos es que vale la pena todo esfuerzo y éxito alcanzado.

Agradezco a mis hermanos que siempre han estado junto a mí con sus consejos y cariño, por ser amigos, padres y hermanos.

Agradezco a todos mis amigos por creer en mí y llenarme de valor para continuar en mi camino. Agradezco también a mis compañeros de carrera los que han aportado inmensamente para alcanzar esta meta, a todos y cada uno, Gracias.

Extiendo mi más grande agradecimiento, a los ingenieros Román Lara y Gonzalo Olmedo, qienes además de ser mis maestros y guías en este proyecto, son personas muy honorables que aportan en la formación de los estudiantes enseñándo el valor del conocimiento y la moral.

*Andrés Moscoso M.*

# Índice


**1 TECNOLOGÍA WiMAX** **1**
1.1 INTRODUCCIÓN . . . . . 1
1.2 WiMAX . . . . . 2
1.2.1 Wimax Forum . . . . . 2
1.2.2 IEEE 802.16-2004 . . . . . 3
1.2.3 IEEE 802.16e-2005 . . . . . 4
1.2.4 Desarrollo del Análisis . . . . . 4
1.3 OBJETIVOS . . . . . 4

**2 ANÁLISIS DEL ESTÁNDAR IEEE 802.16j** **6**
2.1 ANTECEDENTES . . . . . 6
2.1.1 WiMAX MÓVIL . . . . . 6
2.1.2 OFDM . . . . . 6
2.1.3 Multitrayecto . . . . . 7
2.1.4 OFDMA . . . . . 7
2.1.5 OFDMA Escalable . . . . . 8
2.2 ESTÁNDAR IEEE 802.16-2009 . . . . . 8
2.2.1 Capa de Acceso al Medio MAC Subcapa de Convergencia (CS) . 11
2.2.2 Capa de Acceso al Medio MAC Subcapa de Parte Común (CPS) 11
2.2.3 Subcapa de Seguridad . . . . . 12
2.2.4 Capa Física PHY WirelessMAN-SC$^{TM}$ . . . . . 18
2.2.5 Capa Física PHY WirelessMAN-OFDM PHY . . . . . 19
2.2.6 Capa Física PHY WirelessMAN-OFDMA PHY . . . . . 19
2.2.7 Capa Física PHY WirelessHUMAN . . . . . 19
2.2.8 Calidad de Servicio (QoS) . . . . . 20
2.3 ESTÁNDAR IEEE 802.16j . . . . . 22
2.3.1 Métodos . . . . . 22
2.3.2 Modos de Conmutación . . . . . 23
2.3.3 Modo Transparente . . . . . 23
2.3.4 Modo No-transparente . . . . . 23
2.4 CAPA DE ACCESO AL MEDIO MAC . . . . . 24
2.4.1 Esquema de Transmisión . . . . . 24
2.4.2 Administración de Enrutamiento y Trayecto . . . . . 25
2.4.3 Alcance (*Ranging*) y Entrada de Red . . . . . 25
2.5 CAPA FÍSICA PHY . . . . . 27

2.5.1 WirelessMAN-OFDMA PHY . . . . . 27
2.5.2 Estructura de Trama en modo de conmutación transparente . . 27
2.5.3 Estructura de Trama en modo de conmutación no-transparente 27
2.6 TRABAJOS RELACIONADOS . . . . . 29

**3 MATERIALES Y MÉTODOS 31**
3.1 SELECCIÓN DEL SOFTWARE DE SIMULACIÓN . . . . . 31
3.2 SOFTWARE NCTUns 6.0 . . . . . 31
3.2.1 Metodología de Simulación . . . . . 31
3.2.2 Soporte para Redes, Equipos y Protocolos . . . . . 32
3.2.3 Arquitectura de NCTUns . . . . . 32
3.3 Configuración de una red inalámbrica WiMAX . . . . . 36

**4 DISEÑO Y SIMULACIÓN DE LA RED INALÁMBRICA WiMAX IEEE 802.16j 40**
4.1 MÓDULOS Y PARÁMETROS . . . . . 40
4.1.1 Pilas de Protocolos del Estándar para redes en modo Transparente en NCTUns . . . . . 41
4.1.2 Nodo IEEE 802.16j TMR-BS . . . . . 41
4.1.3 Nodo IEEE 802.16j T-RS . . . . . 42
4.1.4 Nodo IEEE 802.16j T-MS . . . . . 43
4.2 MÓDULOS PARA IEEE 802.16j EN MODO TRANSPARENTE . . . 43
4.2.1 Módulo Capa MAC . . . . . 43
4.2.2 Módulo Capa PHY . . . . . 43
4.3 PARÁMETROS DE SIMULACIÓN . . . . . 44
4.3.1 Modelo del Canal . . . . . 44
4.4 ESCENARIOS DE SIMULACIÓN . . . . . 46
4.4.1 Throughput en función del Número de Estaciones Suscriptoras por Estación de Comutación . . . . . 46
4.4.2 Throughput en función del Número de Estaciones de Conmutación 48
4.4.3 Throuhput en función del Número de Estaciones de Conmutación por cada Estación Base . . . . . 49
4.4.4 Throughput en función de la distancia entre la Estación Base y las Estaciones de Conmutación . . . . . 51
4.4.5 Throughput en función de la distancia entre la Estación Base y la Estación Móvil . . . . . 53

**5 ANÁLISIS DE RESULTADOS 54**
5.1 ANÁLISIS DE THROUGHPUT . . . . . 54
5.1.1 Throughput en función del Número de Estaciones Suscriptoras por Estación de Comutación . . . . . 54
5.1.2 Throughput en función del número de Estaciones de Conmutación 56
5.1.3 Throughput en función del número de Estaciones de Conmutación por cada Estación Base . . . . . 57

5.1.4 Throughput en función de la distancia entre la Estación Base y las Estaciones de Conmutación . . . . . 58
5.1.5 Basado en la distancia entre la Estación de Base y la Estación Móvil . . . . . 60

**6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 63**
6.1 CONCLUSIONES . . . . . 63
6.2 RECOMENDACIONES . . . . . 65

**A ANEXOS 68**

# Índice de Tablas


2.1 Nomenclaturas para las variantes de la interface aire . . . . . 9
2.2 Categorías de Servicios y Aplicaciones . . . . . 21
2.3 Comparación del Estándar IEEE802.16e-2005 e IEEE802.16j . . . . . 30

4.1 Altura de las Antenas . . . . . 46
4.2 Parámetros de Capa Física . . . . . 46
4.3 Variación del Número de SS y RS . . . . . 47
4.4 Variación del Número de SS y RS . . . . . 48
4.5 Altura de las Antenas . . . . . 49
4.6 Parámetros de Capa Física . . . . . 49

5.1 Potencia de Recepción vs Distancia . . . . . 59

# Índice de Figuras


2.1 Subportadoras OFDM . . . . . 7
2.2 Estructura de subportadoras OFDMA. . . . . 8
2.3 Modelo Referencial de Protocolo IEEE802.16. . . . . 10
2.4 Pila de Protocolos PDU y SDU. . . . . 11
2.5 Topología PMP Punto-Multipunto . . . . . 12
2.6 Formatos MAC PDU . . . . . 14
2.7 Entrada a Red . . . . . 17
2.8 Soporte QoS. . . . . 20
2.9 Estructura de trama modo transparente, a) vista en la BS, b) vista en la RS . . . . . 28
2.10 Estructura de trama modo no-transparente, a) vista en la BS, b) vista en la RS . . . . . 29

3.1 NCTUns 6.0 . . . . . 34
3.2 Editor de Topología . . . . . 35
3.3 Ventana de Diálogo de Atributos . . . . . 35
3.4 Red IEEE 802.16e . . . . . 37
3.5 Nodos IEEE 802.16e . . . . . 37
3.6 icono *Form Sunet* . . . . . 37
3.7 Provisión de QoS para Estaciones Móviles . . . . . 38
3.8 Ventana de Provisión de QoS para Estaciones Móviles . . . . . 38
3.9 Ventana de Atributos . . . . . 39
3.10 Ventana de Pila de Protocolos . . . . . 39
3.11 Ventana de Configuración de Parámetros . . . . . 39

4.1 Topología en NCTUns de IEEE 802.16j en modo transparente . . . . . 41
4.2 Pilas de Protocolos en NCTUns para IEEE 802.16j en modo transparente 42
4.3 Throughput basado en el número de SS . . . . . 47
4.4 Throughput basado en el número de RS . . . . . 48
4.5 Throughput en función del número de RS por cada BS . . . . . 50
4.6 Incremento del Throughput en porcentaje en función del número de RS 50
4.7 Distancia óptima entre la BS y las RS . . . . . 51
4.8 Distancia óptima entre la BS y las RS . . . . . 52
4.9 Distancia entre la RS y la MS . . . . . 53

5.1 Throughput en función del número de SS . . . . . 54
5.2 Incremento de Throughput en función del número de SS . . . . . 55

5.3 Throughput en función del número de RS . . . . . 56
5.4 Incremento de Throughput 15 SS vs 20 SS . . . . . 57
5.5 Throughput en función del número de RS por cada BS . . . . . 58
5.6 Incremento del Throughput en porcentaje en función del número de Estaciones de Conmutación . . . . . 58
5.7 Distancia óptima entre la BS y las RS . . . . . 59
5.8 Throughput basado en la distancia de la MS hacia la BS sin RS . . . . 60
5.9 Throughput basado en la distancia de la MS hacia la BS con RS . . . 61
5.10 Comparación del Throughput vs Distancia con y sin RS . . . . . 61
5.11 Throughput vs Distancia con y sin RS . . . . . 62

A.1 Fedora 11 . . . . . 68
A.2 GUI de Usuario Normal . . . . . 69
A.3 Directorio de archivo gdm . . . . . 69
A.4 Edición del archivo gdm . . . . . 70
A.5 Edición del archivo gdm-password . . . . . 70
A.6 Edición del archivo gdm-password . . . . . 70
A.7 Ingreso en modo root con GUI . . . . . 71
A.8 Mensaje de error . . . . . 72
A.9 Corrección de error . . . . . 72
A.10 Menú Grub . . . . . 73
A.11 Configuracion iptables . . . . . 73
A.12 Directorio SELinux . . . . . 74
A.13 Edición de SELinux . . . . . 74
A.14 Directorio Bashrc . . . . . 75
A.15 Variable bashrc . . . . . 75
A.16 Directorio Cshrc . . . . . 75
A.17 Variable cshrc . . . . . 76
A.18 Dispatcher . . . . . 76
A.19 Coordinator . . . . . 76
A.20 Nctunsclient . . . . . 77

## GLOSARIO

| | |
|---|---|
| 3GPP | Proyecto de Tercera Genración |
| 4G | Cuarta Generación |
| ATM | Modo de Transferencia Asíncrona |
| BE | Servicio al mejor esfuerzo |
| BS | Estación Base |
| CID | Identificador de Conexión |
| DL | Canal Descendente |
| FCH | Cabecera de Control de la Trama |
| FDD | Transmisión Bidireccional por División en Frecuencia |
| FFT | Transformada Rápida de Fourier |
| HARQ | Requerimiento de Repetición híbrida Automática |
| IEEE | Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos |
| IP | Protocolo de Internet |
| ISI | Interferencia Entre Símbolos |
| LOS | Línea de Vista |
| LTE | Long Term Evolution |
| NLOS | Sin Línea de Vista |
| nrtPS | Servicio de registro (no en tiempo real |
| MAC | Control de Acceso al Medio |
| MAP | Protocolo de Acceso al Medio |
| MS | Estación Móvil |
| OFDM | Multiplexación por División Ortogonal de Frecuencia |
| OFDMA | Múltiple Acceso por División Ortogonal de Frecuencia |
| PHY | Capa Física |
| QAM | Modulación en Amplitud por Cuadratura |
| QoS | Calidad de Servicio |
| RS | Estación de Conmutación |
| rtPS | Servicio de registro en tiempo real |
| SOFDMA | OFDMA Escalable |
| SS | Estación Suscriptora |
| TDD | Time Division Duplex |
| TIC | Tecnologías de la información y Comunicación |
| UGS | Servicio Garantizado No Solicitado |
| UL | Canal Ascendente |
| VoIP | Voz sobre IP |
| WiMAX | Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas |
| WWRF | Foro de Investigación Inalámbrica Mundial |

# Capítulo 1

# TECNOLOGÍA WiMAX

## 1.1 INTRODUCCIÓN

Las redes y sistemas de nueva generación permiten ofrecer servicios innovadores, mejorar la atención al cliente y adaptarse rápidamente a las nuevas Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) teniendo como referencia la movilidad de las redes inalámbricas, la seguridad de las líneas privadas y la flexibilidad de IP y de MPLS para la integración de servicios de datos, voz y vídeo.

El WWRF *(Wireless World Research Forum)* define a la tecnología de cuarta generación (4G) como la unión de tecnologías y protocolos para permitir el máximo rendimiento de procesamiento de una red inalámbrica, que funciona con tecnología IP, algunos de los estándares fundamentales para 4G son WiMAX, WiBro, y 3GPP LTE *(Long Term Evolution)*. Para poder hacer realidad esta red 4G es necesario no sólo integrar las tecnologías existentes, también es necesario hacer uso de nuevos esquemas de modulación o sistemas de antenas que permitan la convergencia de los sistemas inalámbricos.

El desarrollo del estándar inalámbrico IEEE 802.16 bajo la denominación comercial de WiMAX (Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas), propone llegar a un mayor número de usuarios, además de introducir nuevas aplicaciones y servicios que requieren mayor ancho de banda, seguridad y calidad en la comunicación, ha contribuido en el despliegue de redes de primer nivel en países como Australia, Estados Unidos y la India.

Esto sumado a la tecnología IP, hacen de WiMAX el responsable de impulsar la telefonía móvil 4G. Por otro lado, los proveedores de Telecom en Europa, junto con Verizon, prefieren el camino de la migración a 4G que propone LTE. WiMAX, se adelanta a LTE en el sentido de que es la primera tecnología que utiliza OFDM y es una red IP de lado a lado (end-to-end).

## 1.2 WiMAX

WiMAX (Interoperabilidad Mundial para el Acceso por Microondas)es una tecnología desarrollada para ofrecer el acceso de última milla a redes de comunicaciones de banda ancha, esta tecnología se plantea como una alternativa a las tecnologías de acceso como DSL y cable. La tecnología inalámbrica WiMAX puede proveer acceso tanto a equipos fijos como móviles, sin la necesidad de tener línea de vista (LOS) entre el equipo terminal y la estación transmisora, basada en el estándar IEEE 802.16, el mismo que ha ido evolucionando constantemente desde sus inicios en donde alcanzaba velocidades de transmisión de más de 100 Mbps en un canal con ancho de banda de 28 MHz, en la banda de 10 a 66 GHz, pero requería torres que tengan LOS; luego consiguió llegar a los 70 Mbps, operando en un rango de frecuencias de 2 a 11 GHz, teniendo como ventaja, torres sin línea de vista (NLOS) siendo capaz de conseguir alcances de hasta 50 Km, gracias a la utilización de Capas Físicas basadas en OFDM la cual divide a la portadora en 128 y 256 subportadoras; finalmente estableció velocidades de transmisión de 15 Mbps, y operando en frecuencias de 2 a 6 GHz, torres NLOS, con la gran ventaja de ofrecer movilidad a sus usuarios gracias a OFDMA con subportadoras que pueden ir de 256 a 2048, pero a la vez su alcance se redujo a 5 Km.

Las dos últimas versiones anteriormente descritas, poseen tamaños de canal flexibles que son dependientes de la banda de funcionamiento; modulación adaptativa con esquemas BPSK, QPSK, 16 QAM y 64 QAM y tipos de duplexación TDD y FDD.

WiMAX se destaca por su capacidad de ser una tecnología sobre la que se puede transportar IP, TDM, E1, ATM, Frame Relay, lo que la hace perfectamente adecuada para cualquier entorno empresarial y corporativo, así como para operadores de telecomunicaciones, los cuales son los proveedores de servicios como voz y datos.[2]

### 1.2.1 Wimax Forum

El Foro WiMAX fue creado en el año 2001, es una organización formada por más de 350 compañías lideres en el campo de las Telecomunicaciones. Su objetivo es promover y certificar la compatibilidad e interoperabilidad entre los dispositivos de los distintos fabricantes en concordancia con los estándares de la IEEE. Los estándares establecidos por la IEEE describen la capa Física y MAC (Medium Access Control - Control de Acceso al Medio), pero con esto no se asegura la interoperabilidad, las restricciones de radio frecuencia o los niveles mínimos de rendimiento.

El WiMAX Forum fue creado en el año 2001 por Nokia Corp., Ensemble Communications Inc. y el Orthogonal Frequency Division Multiplexing Forum.

Nació a raíz de los avances alcanzados por el IEEE 802.16 y concretamente al grado de madurez experimentado por el estándar IEEE 802.16-2001, lo que propició la mayor participación de fabricantes, a la vez que se vieron expuestas las necesidades del mercado en disponer de equipamientos estándar a menor costo y a los avances regulatorios en materia de Espectro Radioeléctrico en diferentes partes del mundo.

Basándose en los lineamientos definidos por el IEEE 802.16, el WiMAX Forum se enfoca en promover la interoperabilidad entre diferentes marcas para soluciones de última milla.

El WiMAX Forum integra hoy en día a más de 100 miembros entre los cuales se tienen fabricantes de chips, fabricantes de equipos y prestadores de servicios. Actualmente, está trabajando en la elaboración de notas técnicas que definan y aclaren algunos de los conceptos que han sido mal interpretados recientemente entorno a ciertos aspectos como la operación LOS, el rango de cobertura de los equipos e incluso la misma interoperabilidad.

La industria inalámbrica está viviendo un momento importante, ya que este ente tiene en sus manos la capacidad de establecer grupos de trabajo que tengan la disponibilidad de certificar tecnología probada, lo que a su vez permitirá llevar el acceso multiservicios relativamente a cualquier entorno, convirtiéndose en una herramienta socioeconómico-cultural de gran relevancia en la globalización mundial.[2]

### 1.2.2 IEEE 802.16-2004

La primera interface aire inalámbrica WiMAX fue definida en el Estándar IEEE 802.16-2004 la cual se enfoca en sistemas de acceso inalámbrico fijo de banda ancha como una tecnología diseñada para competir contra las tecnologías cableadas (DSL y cable), también como una solución para áreas rurales donde no exista ninguna otra tecnología cableada y en donde instalar una red de cobre resulte muy costoso, así es también una solución para ofrecer acceso a las redes Wi-Fi.

IEEE 802.16-2004 adopta el mecanismo de Acceso Múltiple por División Ortogonal de Frecuencia (OFDMA) para comunicaciones sin línea de vista (NLOS) en las frecuencias por debajo de los 11 GHz

### 1.2.3 IEEE 802.16e-2005

El 7 de diciembre de 2005 se aprobó el IEEE 802.16e-2005, este nuevo estándar ofrece la característica de movilidad que no poseía el estándar 802.16-2004 y como consecuencia se especifica una baja en la tasa de datos de 15 Mbps por lo que requiere una nueva solución de hardware/software ya que no es compatible con el anterior 802.16-2004. Para el soporte de movilidad, IEEE 802.16-2005 usa S-OFDMA (*Scalable-OFDMA*) como esquema de modulación tanto en el enlace ascendente como en el descendente. S-OFDMA significa que el número de sub portadoras OFDM aumenta, o escala (de 128 subportadoras hasta 2.048 subportadoras), según los requerimientos del usuario y el ancho banda del canal, OFDM solo utiliza 256 subportadoras.

En cuanto a la capa MAC (Control de Acceso al Medio) para soportar movilidad se agregó un encabezado con información de control.

### 1.2.4 Desarrollo del Análisis

Posteriormente se aprueba la enmienda al Estándar IEEE 802.16-2005 con el IEEE 802.16-2009; con nuevas características en la capa MAC y PHY. Así con el lanzamiento del Estándar IEEE 802.16j, el cual tiene como propósito la mejora de rendimiento de la capa MAC. El análisis realizado en este proyecto, define parámetros tanto en UL(Canal Ascendente) como en DL(Canal Descendente), así como los modos de transmisión y de conexión con el fin de evaluar la eficiencia de las mejoras a nivel de capa MAC y PHY. Para llevar a cabo el análisis se utiliza un simulador basado en Linux que proporcionará los resultados necesarios que permitan evaluar el estándar, luego de ajustar previamente los parámetros y escenarios de simulación los cuales se detallan en el cuarto capítulo, estos resultados son procesados en un programa computacional para visualizar los datos obtenidos en las simulaciones de una mejor manera, presentados en el quinto capítulo.

## 1.3 OBJETIVOS

1. Evaluar el desempeño de una red inalámbrica basada en el estándar IEEE 802.16j mediante la utilización de herramientas software de simulación.

2. Analizar el estado del arte del estándar IEEE802.16-2009.

3. Realizar una revisión *(Overview)* del Estándar IEEE802.16j

4. Determinar las mejoras técnicas realizadas en el Estándar IEEE 802.16j a nivel de Capa Física y Capa de Control de Acceso.

5. Analizar el manejo básico del Simulador NCTUns para la simulación de una red WiMAX.

6. Realizar una serie de simulaciones de redes inalámbricas aplicando el estándar IEEE 802.16j.

7. Analizar los resultados obtenidos de las simulaciones en un software de computo, de alta ejecución numérica como es Matlab.

# Capítulo 2

# ANÁLISIS DEL ESTÁNDAR IEEE 802.16j

## 2.1 ANTECEDENTES

### 2.1.1 WiMAX MÓVIL

Para permitir la movilidad de los usuarios conectados a la red, se llevaron a cabo ciertas modificaciones y mejoras, tanto en la Capa Física (PHY) como en la Capa de Acceso al Medio (MAC):

1. Modificación en la Capa Física (PHY): de OFDM a OFDMA - SOFDMA
2. Modificación en la Capa MAC: seguridad,handover (handoff),roaming y gestión de recursos (QoS,ancho de banda, potencia).

### 2.1.2 OFDM

**OFDM**.- Multiplexación por División Ortogonal de Frecuencia es una técnica de transmisión usada para lograr grandes tasas de transmisión de datos. Es una tecnología elegida por muchos sistemas inalámbricos, como las redes LAN 802.11, WiMAX 802.16, sistemas de difusión de audio y video como por ejemplo la Televisión Digital, y la evolución de interface aire de sistemas inalámbricos 3G basados en 3GPP y 3GPP2. Es un esquema de Multiplexación por División de Frecuencia (FDM), utilizado como método de modulación digital de multiportadoras, donde se usan varias subportadoras cortamente separadas en frecuencia que son ortogonales entre sí, las cuales portan los datos. Los datos son divididos en varios canales paralelos, uno para cada subportadora, la cual es modulada con un esquema convencional de modulación como QAM o PSK, a fin de mantener la tasa de datos como si se tratara de un esquema de una sola portadora en el mismo ancho de banda. La baja tasa de símbolo hace que el uso del período de guarda entre símbolos sea posible, así este período proporcionará el espacio suficiente para que un símbolo no interfiera con el siguiente, éste período

puede consistir en información nula. El período de guarda hace posible el soporte para multitrayecto y elimina la interferencia entre símbolos (ISI).

La figura 2.1 muestra el espectro resultante en el dominio de la frecuencia, donde se puede observar las subportadoras afectadas por el debilitamiento selectivo de frecuencia y la respuesta del canal.

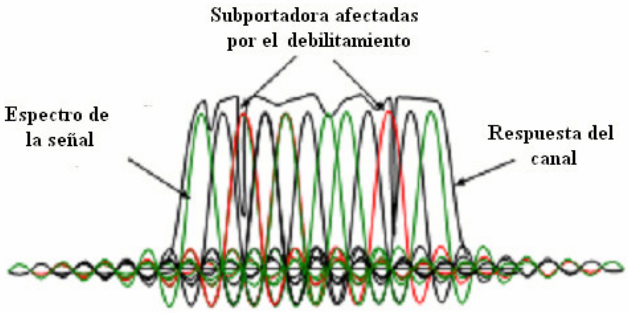


**Figura 2.1: Subportadoras OFDM**

### 2.1.3 Multitrayecto

El multitrayecto es un fenómeno que se da en las señales de radio cuando tratan de alcanzar una antena receptora por uno o más trayectos, entre las causas del multitrayecto están las condiciones atmosféricas, la reflexión de la Ionósfera, la refracción y la reflexión de las señales en objetos, agua, montañas, etc.

Existen efectos del multitrayecto que afectan en la fase de las señales, estos puedes ser constructivos y destructivos como en las comunicaciones de radio digital, el multitrayecto causa errores y afecta la calidad de la comunicación, como sucede con el Sistema Global para las Comunicaciones Móviles (GSM). Es por eso que se utilizan técnicas correctivas utilizando los efectos constructivos como lo hace OFDM al recibir las señales reflejadas y refractadas para sumarlas y construir una señal que se asemeje más a la original.

### 2.1.4 OFDMA

Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal(OFDMA) es una tecnología de acceso múltiple que es usada como un esquema de modulación digital, que se obtiene asignando grupos de subportadoras a usuarios individualmente.

En la figura 2.2 se puede observar la subportadora piloto o principal y las subportadoras de datos que son asignados a usuarios individualmente, se puede observar también las subportadoras que componen el período de guarda.

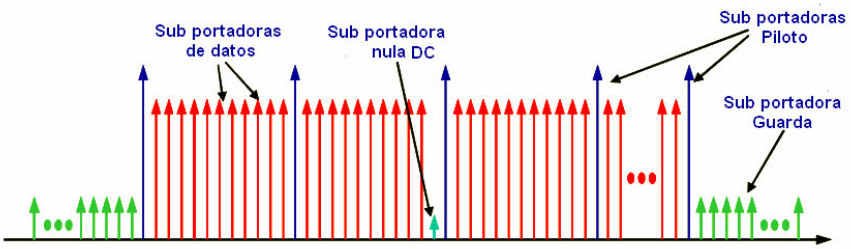


**Figura 2.2: Estructura de subportadoras OFDMA.**

### 2.1.5 OFDMA Escalable

La necesidad de utilizar un diseño que sea escalable para OFDMA, es creada gracias a la característica de que el estándar 802.16 soporta anchos de banda de tamaño variable entre los 1.25 y los 20 MHz para ambientes en los que no se cuenta con línea vista y el requerimiento de combinar el uso de modelo fijo y móvil. Para mantener el espaciamiento óptimo para cada subportadora, la modulación ODFM la cual puede ser realizada con la Transformada Rápida de Fourier (FFT), se debe ajustar a una cierta escala con el ancho de banda. Los parámetros de escalabilidad de OFDMA son de 128, 512, 1024 y 2048, para anchos de banda de 1.25, 5, 10 y 20 MHz respectivamente y el espaciamiento de frecuencia de las subportadoras, es de 11.1607 kHz.

Las principales características de S-OFDMA son:

El espaciamiento de las subportadoras es independiente del ancho de banda

El número de las subportadoras usadas debe escalar con el ancho de banda

El número de sub canales escala con el tamaño del FFT

## 2.2 ESTÁNDAR IEEE 802.16-2009

Este estándar es una enmienda que mejora al Estándar IEEE 802.16e-2005, el cual tiene principalmente características adicionales en la capa PHY y MAC. Estas características son:

Estructura H-FDD para soporte de FDD

Localización Persistente

Mejoras de handover

El estándar IEEE 802.16-2009, especifica la interface aire, incluyendo la capa de control de acceso al medio (MAC) y Física (PHY), de sistemas que combina acceso punto-multipunto de banda ancha inalámbrica fija y móvil (BWA). Esta revisión reemplaza y hace obsoleto al estándar IEEE 802.16-2004, corrigiéndolo y enmendándolo.

El Estándar especifica variantes en las bandas de frecuencia para su utilización; Las bandas de 10-66 GHz proveen un ambiente físico donde, para la longitud de onda corta, se requiere línea de vista (LOS) y el multitrayecto es despreciable. Los anchos de banda de canal son típicamente de 25MHz o 28MHz. Tasas de datos de 120 Mbps, el ambiente es adecuado para acceso punto-multipunto (PMP), sirviendo aplicaciones como oficinas pequeñas, medianas y grandes oficinas que exigen gran calidad en aplicaciones. Así, en la tabla 1.1 se presentan las distintas nomenclaturas para las variaciones de la interface aire.

**Tabla 2.1: Nomenclaturas para las variantes de la interface aire**

| Designación | Aplicabilidad | Duplexación |
|---|---|---|
| WirelessMAN-SC$^{TM}$ | 10-66 GHz | TDD, FDD |
| Fixed WirelessMAN-OFDM$^{TM}$ | Bajo 11 GHz<br>Bandas licenciadas | TDD, FDD |
| Fixed WirelessMAN-OFDMA | Bajo 11 GHz<br>Bandas licenciadas | TDD, FDD |
| WirelessMAN-OFDM TDD | Bajo 11 GHz<br>Bandas licenciadas | TDD |
| WirelessMAN-OFDM FDD | Bajo 11 GHz<br>Bandas licenciadas | FDD |
| WirelessHUMAN$^{TM}$ | Bajo 11 GHz<br>Bandas No licenciadas | TDD |

Estas variaciones de la interfaz aire, serán detalladas posteriormente en la sección referente a la Capa Física (PHY).

En cuanto a la capa MAC, se toma en cuenta tres subcapas, la subcapa de convergencia de servicio-específico(CS) la cual provee cualquier información o muestreo de datos externos, recibidos por el CS Punto de Acceso de Servicio (SAP), en la Unidad de Servicio de datos de la MAC(SDU's), recibido por la Subcapa de Parte Común (CPS) a través de la MAC SAP. Luego de clasificar las SDU's se, las asocia apropiadamente con el Identificador de Flujo de Servicio MAC (SFID) y el Identificador de Conexión (CID) y finalmente la Subcapa de Seguridad.

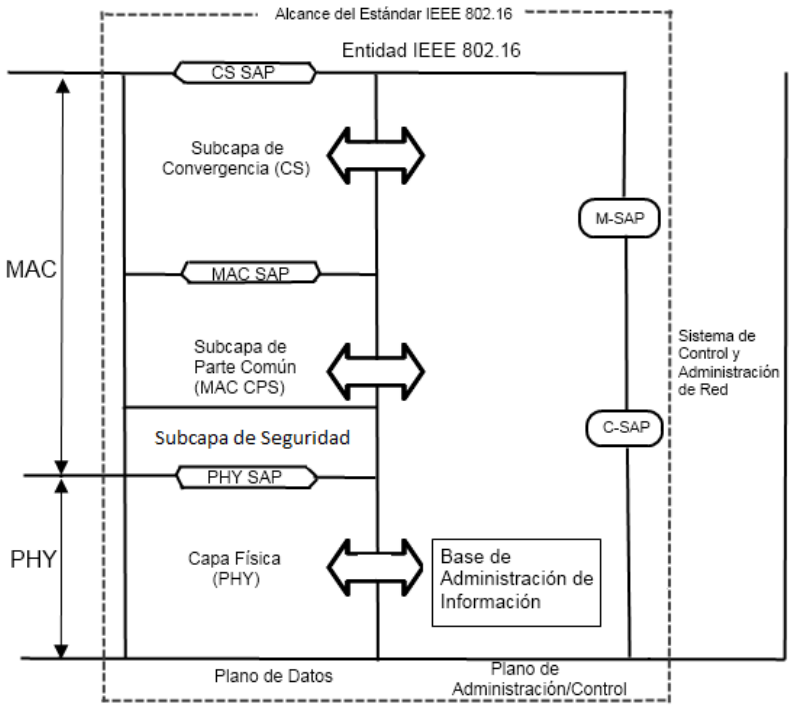


**Figura 2.3: Modelo Referencial de Protocolo IEEE802.16.**

**Unidad de Datos de Protocolo (PDU)**.- Es la información intercambiada entre entidades pares de la misma capa del protocolo. En dirección descendente, es la unidad de datos generada por la siguiente capa inferior, y en dirección ascendente, es la unidad de datos recibida desde las capas inferiores previas.

### Estación Base (BS)

La BS es el nodo lógico que conecta inalámbricamente el equipo suscriptor con el operador. Una BS consiste de infraestructura y elementos necesarios para habilitar la comunicación inalámbrica; antenas, transceivers y equipo de transmisión de ondas electromagnéticas. Las BSs son típicamente nodos fijos, pero puede ser parte de soluciones como ser fijadas a vehículos para proveer de comunicación WiMAX.

### Estación Suscriptora (SS)

La SS es un nodo inalámbrico fijo, se pueden ser usados tanto en interiores como en exteriores.

### Suscriptor Móvil (MS)

Definido en IEEE 802.16e-2005, MSs son nodos inalámbricos que trabajan a grandes velocidades por ejemplo que se encuentre en un vehículo y soporta mejorados modos de

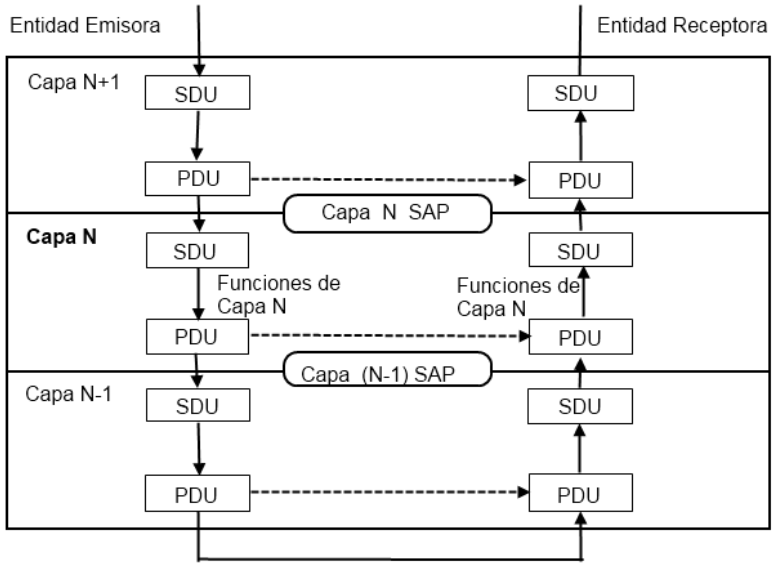


**Figura 2.4: Pila de Protocolos PDU y SDU.**

administración de energía de operación; laptops, teléfonos celulares y demás equipos portables.

### 2.2.1 Capa de Acceso al Medio MAC Subcapa de Convergencia (CS)

El Servicio-Específico reside en lo más alto de la MAC CPS y utiliza vía MAC SAP los servicios que provee la MAC CPS. Las funciones de la CS son:

- Aceptar Unidades de Datos de la capa del Protocolo(PDUs) superiores desde capas mas altas.
- Mejorar la clasificación de capas PDUs superiores.
- Procesar (si se requiere) la capa más alta de PDUs basada en la clasificación.
- Entregar CS PDU al apropiado MAC SAP
- Recibir CS PDUs desde la entidad par

### 2.2.2 Capa de Acceso al Medio MAC Subcapa de Parte Común (CPS)

La MAC CPS es el núcleo de la capa MAC, define el método de acceso al medio. La CPS provee funciones relacionadas a la duplexación, la canalización para acceso a la red, la trama PDU, ingreso a la Red e inicialización. Provee las reglas y el mecanismo para el acceso al sistema, asignación de ancho de banda, mantenimiento de conexión y para ejecutar decisiones de calidad de servicio (QoS) para programación de transmisión.

### 2.2.3 Subcapa de Seguridad

La capa de Seguridad se encuentra entre la MAC CPS y la capa PHY. La seguridad es el mayor problema en redes públicas. Esta subcapa provee el mecanismo para la encriptación y desencriptación de la transferencia de datos desde y hacia la capa PHY y es también usada para la autentificación e intercambio de llave de seguridad. Entre la MAC CPS y la PHY son transferidos datos, control de PHY y estadísticas a través de la PHY SAP.

Los componentes principales del sistema del Estándar IEEE 802.16-2009 son la Estación Suscriptora (SS) y la Estación Base (BS). Una BS y uno o más SSs pueden formar una celda con estructura Punto-Multipúnto (PMP).

**Operación Punto-Multipunto (PMP)**.-El canal descendente de la BS, opera con PMP. El enlace inalámbrico del estándar IEEE 802.16 opera con una BS central y una antena sectorizada capaz de manejar múltiples e independientes sectores simultáneamente. La Estación Base es la única transmisora que opera en esta dirección, así que transmite sin coordinar con las otras estaciones, excepto con la Duplexación por División de Tiempo (TDD) que divide el tiempo en períodos de transmisión de enlace ascendente (UL) y enlace descendente (DL). El DL es generalmente para difusión (*broadcast*). En casos donde el DL-MAP no indica explícitamente la porción de la subtrama de DL para una SS específica, todas las SSs tiene posibilidad de ser enlistadas en esa porción de subtrama de DL. Las SSs verifican el CID en las PDUs recibidas y son retenidas únicamente las PDUs que estén direccionadas a las SSs.

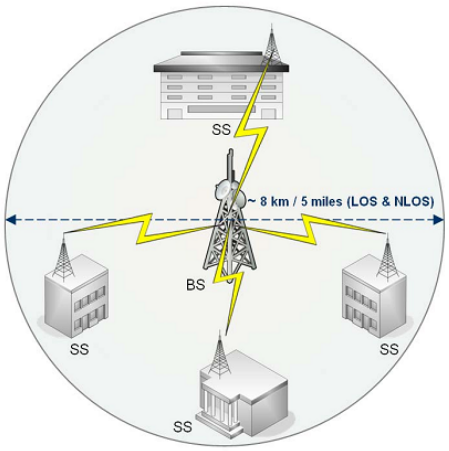


**Figura 2.5: Topología PMP Punto-Multipunto**

Las SSs comparten el UL hacia la BS en una base con demanda y dependiendo de la

clase de servicio utilizada, la SS es aceptada para transmitir, o el derecho de transmitir es garantizado por la BS luego de recibir un requerimiento desde el usuario.

WiMAX es una tecnología orientada a la conexión en la cual todos los datos son muestreados en una conexión entre la SS y la BS, es decir una conexión entre entidades debe ser establecida antes de que algún tráfico unicast pueda ser transmitido. La dirección de DL desde la BS puede proveer sectores independientes separados en frecuencia y servir a múltiples SSs localizados en esos sectores.

El tráfico de DL es usualmente de difusión así todas las SSs que están siendo servidas por la BS están disponibles para recibir datos.

### Conexiones

Las conexiones entre las entidades son usadas para mensajes y transmisión de datos. Están divididos en conexiones de administración y conexiones de transporte las cuales llevan los mensajes de administración y datos de usuario, respectivamente. Las conexiones de UL y DL son tratadas por pares, así inicializando, modificando o eliminando una conexión, afecta a la dirección opuesta en la misma vía. Las conexiones son identificadas por valores de CID de 16-bits, sin considerar el tipo de conexión. Una conexión de administración básica es creado cuando un SS entra en la red, así como UL y DL; conexiones de administración primarias. Las conexiones de administración básica son usadas para transportar mensajes de administración de MAC que demandan capas pequeñas, esto incluye muchos tipos de mensajes relacionados de QoS que tratan de mantener el enlace entre SS y BS, como Requerimiento Automático de Repetición (ARQ), handover y mensajes de entrada a red.

Las conexiones de transporte son usadas para llevar datos de aplicación entre entidades, los datos son almacenados dentro de las MAC PDUs durante la transmisión. Una conexión de transporte está identificada por un CID similar a las conexiones de administración. Una conexión de transporte tiene asociado un flujo de servicio el cual aplica QoS en un par básico de conexión.

### MAC PDU

Cada MAC PDU consiste de una porción de cabecera, una de carga útil (payload)que contiene información de SDU y un posible campo Control de Redundancia Cíclica (CRC). La subcapa de parte común MAC puede empaquetar o fragmentar MAC SDUs. Cuando el Paquete es usado, pequeños SDUs son concatenados en un PDU. Con la fragmentación un SDU puede dividirse en varios PDUs antes de pasar a la capa PHY.

Existen dos tipos de cabeceras MAC: una cabecera genérica (GMC) usada con

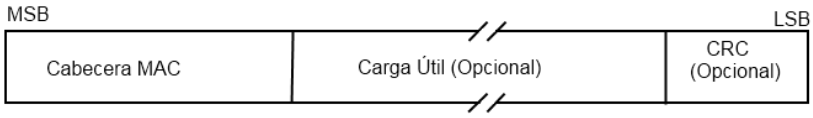


**Figura 2.6: Formatos MAC PDU**

PDUs que contienen mensajes de administración o datos de usuarios y una cabecera de requerimiento de ancho de banda (BRH) para la que la SS requiera ancho de banda para UL de la BS. La GMH es un tipo de cabecera usado en transmisiones de DL, y tanto GMH como BRH son usadas para UL.

La cabecera genérica MAC contiene información de carga útil encriptada, CRC, un CID, la longitud de PDU, información posible de subcabeceras y un tipo especial de carga útil como es la retroalimentación ARQ. El 802.16-2009 define cinco tipos de subcabeceras para la cabecera genérica MAC: Subcabecera de Empaquetamiento (PHS), Subcabecera de Fragmentación (FSH), Subcabecera de Asignación de Retroalimentación Rápida (FFSH), Subcabecera de Concesión de Administración (GMSH) y Subcabecera Extendida. La Cabecera de Requerimiento de Ancho de Banda (BRH) es el segundo tipo de cabecera principal luego de GMH.

### Requerimiento de Ancho de Banda (BR) y Asignación

El requerimiento de ancho de banda es usado por las SSs para informar a las BSs acerca de la necesidad de asignación de ancho de banda para UL. Los BRs pueden ser transmitidos en un paquete individual (BRHs) o incluido en un PDU normal *(piggybacking)*. El programador de BS puede asignar los recursos y es la SS quien decide como compartir el ancho de banda para cada una de las conexiones. Para conexiones de baja prioridad existen los métodos de enlistado unicast y basados en conexión, que permiten a las SSs transmitir BRs a las BSs.

Enlistado unicast es un mecanismo que usa una BS para asignar ancho de banda a las SSs cuando lo requiere.

Enlistado de multicast y broadcast para SSs agrupadas puede ser usado en lugar del enlistado unicast si no existe suficientes recursos para hacerlo, se diferencia del unicast en que en lugar de reservar una asignación de BR para un SS CID individual, existe asignaciones para CID de multicast o broadcast en UL-MAP (Protocolo de Acceso al Medio de UL) cuando las SSs usan BR.

### Mensajes de administración de MAC

Los mensajes de administración de MAC son diseñados para controlar las acciones de SS, RS o BS en requerimiento/respuesta,basado en acknowledgment (ACK). Algunos eventos ejecutados por los mensajes de intercambio son:

- Registro de Entrada a Red
- Handover
- Intercambio de llave de seguridad
- Servicio dinámico de adición, modificación y eliminación
- Descripción de canal físico de UL y DL.
- Repartición de información de usuario para UL y DL; mensajes DL/UL-MAP
- Enlistado Multicast

### ARQ

El Requerimiento automático de Repetición es un mecanismo de control de error usado en operaciones basadas en conexión las cuales el transmisor retransmite paquetes erróneos o caídos. ARQ trabaja en la capa MAC y puede ser usada para retransmisión de paquetes y MAC SDUs fragmentadas. Si ARQ es habilitada, el transmisor, luego de enviar un PDU, espera por un acknowledgment (ACK) desde el receptor indicando que ha recibido el paquete, si no llega o llega una confirmación de PDU erróneo, el transmisor reenvía el paquete. Un mensaje ARQ de retroalimentación, contiene información de ACK y puede ser enviado individualmente o incluido (*piggybacked*) con la carga útil. Dependiendo del tipo de tráfico ARQ puede tener un impacto positivo en QoS.

### Programación (*Scheduling*) y programación persistente

El servicio de programación es usado para administrar la transmisión de datos por la interfaz aire, está ubicado en la BS y controla el tráfico de UL mediante la asignación de recursos de usuario para sus transmisiones. Programación por cada conexión es determinada por los parámetros de QoS intercambiados entre entidades durante adición o modificación de una conexión de transporte. Los parámetros de QoS incluyen uno de los tipos de programación. El tipo de programación es escogida de acuerdo al tipo de tráfico, como VoIP o video el cual cambia el comportamiento de la programación.

La BS también controla la programación de DL la cual es un poco más simple cuando es comparado con la programación de UL. La BS llena ráfagas en la subtrama de DL de acuerdo al ancho de banda necesitado o parámetros de QoS de las SSs y luego el tráfico de DL es difundido a todas las SSs. El mecanismo de programación persistente reduce el *overhead* con tráfico VoIP asignando recursos persistentemente para conexiones VoIP con múltiples tramas, ya que las SSs no necesitan requerimiento de recursos en cada trama, el muestreo de señal disminuye y por lo tanto se produce menor desbordamiento (*overhead*).

**Entrada a Red y Alcance (*Ranging*) Inicial**

Uno de los procedimientos esenciales en un sistema inalámbrico es la entrada de red del suscriptor y el registro del equipo de usuario. La figura 1.7 representa el proceso de Entrada de Red Inicial que se lleva a cabo en una SS para operar en WiMAX, y es descrito a continuación:

**1. Sincronizando la BS.-** La SS, cuando es encendida, o luego de haber perdido señal, trata de detectar un canal de DL explorando frecuencias de DL y enlistando los preámbulos de tramas de DL, cuando detecta un DL-MAP, la SS realiza sincronización de frecuencia y tiempo. La SS decodifica el DL-MAP para descubrir la BS, información de Proveedor de Acceso de Red (NAP) y del posible Proveedor de Servicio de Red (NSP).

**2. Obtener los Parámetros de DL y UL.-** Luego de la sincronización la SS escucha mensajes de control como DL-MAP y UL-MAP para recibir información en el canal. De acuerdo a los parámetros recibidos, la SS decide si el canal está apto para la transmisión, si mantiene el enlace o explora otros canales.

**3. Alcance Inicial.-** Si la SC o OFDM PHY es usada, la SS comienza el alcance inicial transmitiendo un Requerimiento de alcance (RNG-REQ) a la BS cuando la oportunidad de alcance inicial ocurra. Cuando OFDMA está en uso, primero es enviado un código de alcance CDMA en el primer slot de alcance por la SS antes que el RNG-REQ. Durante el alcance inicial la BS asigna administración de CIDs básica y primaria para la SS la cual transmite esta información de la SS dentro de una respuesta de alcance (RNG-RSP).

**4. Negociación de Capacidades Básicas.-** Luego del alcance inicial la SS envía un mensaje SBC-REQ para obtener información de capacidades básicas desde la BS. El mensaje incluye consultas relacionadas con las capas MAC y PHY para requerimiento de ancho de banda, propuestas de asignación y número de canales HARQ.

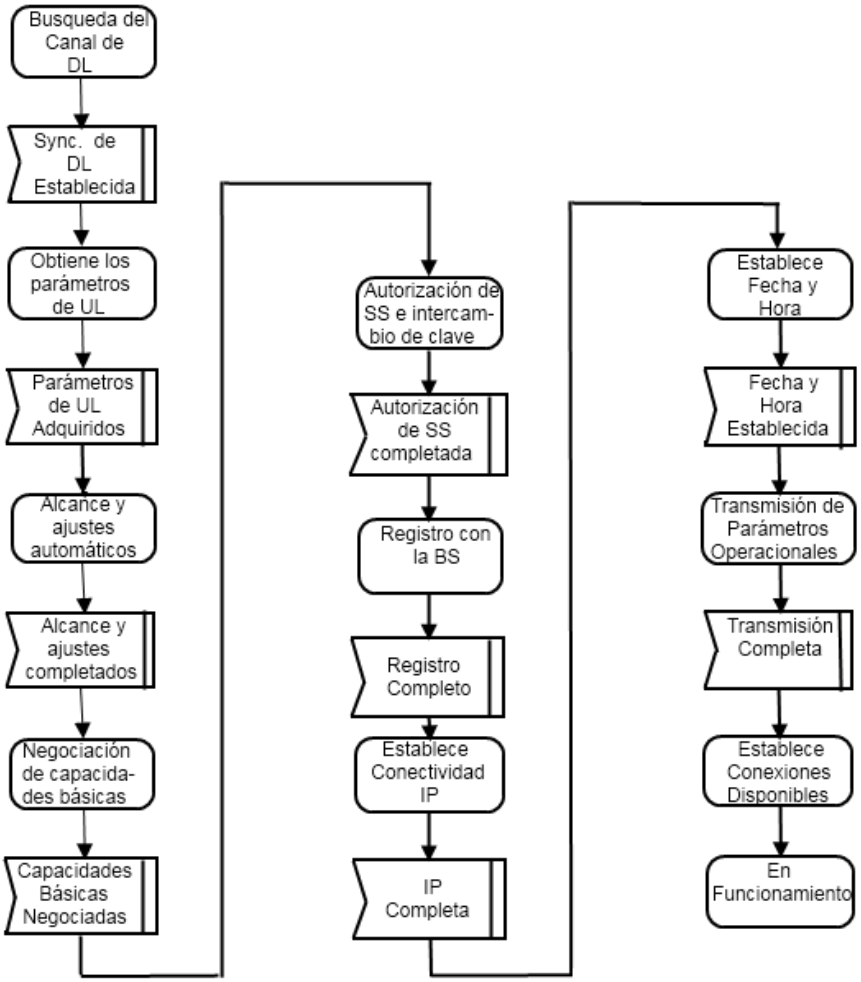


**Figura 2.7: Entrada a Red**

**5. Autorización e intercambio de llave.-** Si el Protocolo de Administración de llave y Privacidad (PKM) es habilitado durante el intercambio en SBC, el siguiente paso en la entrada de red es autorización e intercambio de llave de privacidad la cual está hecha vía mensajes PK-REQ y PKM-RSP. La política de autorización PKMv2 es usada y contiene autorización basado en RSA-o EAP en la utilización de certificado X.509 digital.

**6. Registro.-** El mensaje de requerimiento de registro (REG-REQ) inicia el proceso de registro durante la cual la conexión secundaria de administración es creada. Una pieza importante de información es llevado por el REG-REQ, es la duración del temporizador Indicador de Disponibilidad de Handover. Si un handover ocurre y la BS servidora transmite un mensaje MOB-BSHO-RSP/REQ, iniciará este temporizador. Luego de la culminación del temporizador la BS puede enviar una no-solicitada con-

cesión de UL a la SS para un mensaje de MOB-HO-IND. así la SS omitirá el requerimiento de ancho de banda y el proceso de handover es acelerado.

**7. Establecer Conectividad IP.-** Dependiendo de la implementación de la capa de red, estaciones fija y móvil pueden usar diferentes métodos para obtener direccionamiento de red. El mecanismo de Protocolo de Configuración Dinámica de Host (DHCP o DHCPv6) con IPv4 e IP v6 o Autoconfiguración de Dirección Sin Estado con IPv6 puede ser usado para configurar la dirección IP.

**8. Establecimiento de la Hora del Día.-** La información de la hora del día del servidor es definido en el IETF RFC 868. UDP es usado para adquirir la información de la hora del día la cual es necesitada en las SSss y BSs para marcar el tiempo de eventos realizados.

**9. Parámetros de Transferencia Operacional.-** Luego de obtener la dirección de red la SS descarga un archivo de configuración que contiene la dirección IP del software servidor y las especificaciones de configuración del proveedor.

**10.Configurar conexiones Provisionadas.-** Luego de una transferencia exitosa de los parámetros operacionales, la SS está lista para crear la conexión es decir la última etapa del proceso de entrada a red. Los mensajes DSA-REQ, DSA-RSP y DSA-ACK son transmitidos entre la BS y la SS que provee a las entidades la suficiente información para crear las conexiones de transporte. Una transacción DSA se realiza para cada conexión, durante el intercambio de mensajes la BS verifica desde el núcleo de la red (AAA server en la CSN y adjunta la Autorización de Flujo de Servicio (SFA) al ASN-GW), sin importar que un nuevo flujo de servicio pueda ser creado por el usuario, la BS crea un SFID el cual es usado para muestrear el flujo de servicio de la conexión.

#### Alcance (*Ranging*) Periódico

Durante la re-entrada a red la SS puede realizar también un alcance inicial para acelerar el handover, luego del alcance inicial la SS continúa con el alcance periódico. Este es usado para ajustar los parámetros de transmisión durante una operación normal entre la SS y la BS y mantener la comunicación en UL. Existen diferentes definiciones para el alcance periódico para cada tipo de capa PHY.

### 2.2.4 Capa Física PHY WirelessMAN-SC$^{TM}$

Esta es la única capa PHY definida para operar en la banda de frecuencia de 10 - 66 GHz, emplea una modulación de una sola portadora con perfil de ráfaga adaptativa en el que los parámetros de transmisión incluyen modulación y esquemas de codificación,

puede ser ajustado individualmente a cada Estación Suscriptora (SS) en una trama. El estándar soporta tanto Duplexación por División de Frecuencia (FDD) como Duplexación por División de Tiempo (TDD) para separar el canal ascendente del canal descendente. El estándar soporta half duplex FDD SS, el cual puede ser menos costoso ya que no transmite y recibe simultáneamente. Esta técnica de duplexación es común en todos las especificaciones de PHY. El acceso en el canal ascendente es realizado por una combinación de Multiplexación por División de Tiempo (TDMA) y Acceso Múltiple por Asignamiento de Demanda (DAMA), exactamente el canal ascendente es dividido en algunos slots de tiempo. La comunicación de canal descendente en Arquitectura PTM es empleada usando Multiplexación por División de Tiempo (TDM), y también especifica aleatoriedad, corrección de error en transmisión (FEC), modulación y esquemas de codificación.

### 2.2.5 Capa Física PHY WirelessMAN-OFDM PHY

Esta capa está basada en Multiplexación por División Ortogonal de Frecuencia (OFDM) con 256 (Transformada Rápida de Fourier)FFT para soportar múltiples SS en la banda de frecuencia de 2 - 11 GHz. El acceso es realizado por TDMA. El WiMAX Forum ha adoptado esta especificación de PHY para Acceso inalámbrico de Banda Ancha(BWA). Emplear OFDM y otras características como el método de corrección múltiple de error en transmisión, hacen a esta especificación la candidata más apta para proveer soporte fijo en ambientes NLOS.

### 2.2.6 Capa Física PHY WirelessMAN-OFDMA PHY

Esta especificación PHY usa Acceso OFDM (OFDMA), basada en al menos uno de los tamaños de FFT especificados (2048, 1024, 515 o 128) para proveer combinadamente acceso fijo y Móvil BWA. La operación está limitada a bandas de frecuencia licenciadas bajo los 11 GHz. En esta especificación el acceso múltiple provee el direccionamiento de un subconjunto de múltiples portadoras para receptores individuales.

### 2.2.7 Capa Física PHY WirelessHUMAN

Esta especificación está dirigida para bandas de frecuencias No licenciadas bajo los 11 GHz. Cualquier especificación para la banda de 2 - 11 GHz puede ser usada. Soporta únicamente TDD para duplexación.

### 2.2.8 Calidad de Servicio (QoS)

WiMAX móvil posee varias características que le permiten cumplir con los requerimientos de calidad de servicio (QoS "Quality of Service") para una gran cantidad de servicios y aplicaciones, entre ellas la capacidad de manejar tráfico UL/DL asimétrico y el poseer un mecanismo flexible de asignación de recursos. En la capa MAC, el QoS es proveído mediante flujos de servicio como se muestran en la figura 2.8 En este flujo unidireccional de paquetes se transmite un grupo de parámetros para QoS. Antes de entregar algún tipo de servicio la estación base y el terminal del usuario establece un enlace unidireccional entre las capas MAC llamado conexión. La capa MAC entonces asocia paquetes que atraviesan la interfaz MAC con un flujo de servicio para ser entregado en la conexión.

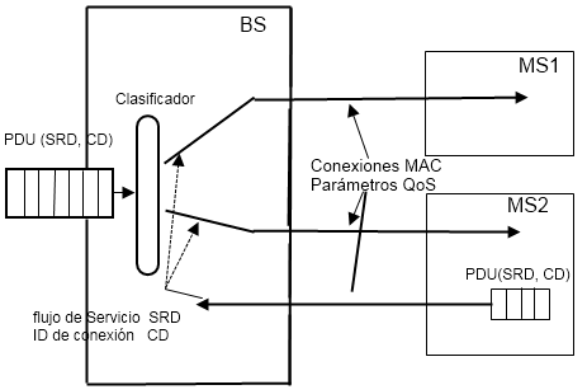


**Figura 2.8: Soporte QoS.**

Los parámetros QoS asociados con el flujo de servicios definen la clasificación de la transmisión y la asignación en la interfaz de aire. Ya que la interfaz de aire es usualmente el cuello de botella, las conexiones orientadas QoS pueden habilitar el control punto a punto QoS. Los parámetros del flujo de servicio pueden ser dinámicamente manejados a través de mensajes MAC para acomodar la demanda de servicios de manera dinámica. Los flujos de servicios están basados en el mecanismo QoS y aplica en ambos sentidos DL UL.

WiMAX móvil puede ser dinámicamente optimizado para el tipo de tráfico que se esté transportando. Los tipos de servicios soportados son:

- Servicio Garantizado No Solicitado (UGS, "Unsolicited Grant Service"): esta diseñado para soportar flujos de datos en tiempo real constituidos de paquetes de datos de un tamaño fijo emitidos en intervalos periódicos, como T1/E1 y voz sobre IP.

- Servicio bajo encuesta en tiempo real (rtPS, "real time Polling Service"): esta diseñado para soportar flujos de datos en tiempo real constituidos de paquetes de datos de un tamaño variable que son emitidos en intervalos periódicos, como el formato de video MPEG.

- Servicio no bajo encuesta (nrtPS, "not real time Polling Service"): esta diseñado para soportar flujos de datos tolerantes al retardo constituidos de paquetes de datos de un tamaño variable donde se requieren mantener una velocidad mínima, como en FTP

- Servicio al mejor esfuerzo (BE, "Better Effort"): esta diseñado para soportar flujos de datos para los cuales no se requiere un nivel mínimo y pueden ser manejados en los espacios disponibles.

WiMAX soporta un amplio rango de servicios y aplicaciones con una variedad de requerimientos que se han resumido en la tabla:

**Tabla 2.2: Categorías de Servicios y Aplicaciones**

| **Categoría de QoS** | **Aplicación** | **Especificación QoS** |
|---|---|---|
| UGS<br>Servicio Subvencionado No Solicitado | VoIP | Velocidad máxima mantenida<br>Máxima tolerancia a latencia<br>Tolerancia al Jitter<br>Velocidad mínima reservada |
| rtPS<br>Servicio de registro en tiempo real | Transmisión de datos y Video | Velocidad mínima reservada<br>Velocidad máxima mantenida<br>Máxima tolerancia a latencia<br>Prioridad de tráfico |
| nrtPS<br>Servicio de registro<br>(no en tiempo real) | Protocolo de transferencia archivos TFP | Máxima Tolerancia al Jitter<br>Velocidad máxima mantenida<br>Velocidad mínima reservada<br>Prioridad de tráfico |
| BE<br>Servicio al mejor esfuerzo | Transferencia de archivos, Web | Velocidad máxima mantenida<br>Prioridad de tráfico |

## 2.3 ESTÁNDAR IEEE 802.16j

Conmutación por Multisalto, *Multihop Relay* (MR) es un despliegue opcional que puede ser usado para proveer cobertura adicional o aprovechamiento de rendimiento en acceso a una red. Las varias características MR definidas en el estándar permiten que un sistema de conmutación sea configurado en algunos modos. Los protocolos que incluyen características de movilidad para el enlace de acceso, no tienen cambios, nuevas funcionalidades han sido especificadas en el enlace de conmutación para soportar características MR. Dos diferentes modos, programación centralizada y distribuída, son especificadas para control de asignación de anchos de banda para un SS o un RS (Estación de Conmutación). En el modo de programación centralizada, la asignación de ancho de banda para una estación subordinada de una RS es determinada en la MR-BS (Estación de Conmutación por Multisalto).

Dos tipos diferentes de RS son definidos, Modo Transparente y Modo No-Transparente. En el modo no-transparente RS puede operar en ambos modos de programación, centralizada y distribuída, mientras que en modo transparente una RS puede únicamente operar en el modo de programación centralizada. La capa MAC incluye extensiones de señalización para soportar funciones como Entrada de Red, Requerimiento de ancho de banda, Transmisión de PDUs, Administración de Conexión y Handover. La capa PHY

incluye extensiones para la capa OFDMA-PHY para transmisión de PHY PDUs por el enlace de conmutación entre la MR-BS y la RS. El estándar presenta nuevas técnicas de transmisión como el esquema basado en TÚNEL y el esquema basado en CID, a demás de especificaciones para requerimiento de QoS y mayor ganancia en la eficiencia de la capa MAC, diferentes parámetros como el Protocolo de Unidad de Datos MAC (MPDU).

### 2.3.1 Métodos

#### Estación Base de Conmutación (RS)

Definido en el IEEE 802.16j, RSs son SSs configurados para transmisión de tráfico hacia otros RSs o MSs en una zona de Multisalto.

#### Estación Base de Conmutación por Multisalto (MR-BS)

Son equipos que proveen conectividad, administración y control de estaciones de conmutación y suscriptoras.

**Estación Base de Conmutación en modo no-transparente (NT-RS)**

Es una estación base de conmutación que transmite preámbulos de tramas de DL y mensajes de MAP (Protocolo de Acceso al Medio)

**Estación Base de Conmutación en modo transparente (T-RS)**

Es una estación base de conmutación que no transmite preámbulos de tramas de DL ni mensajes de MAP (Protocolo de Acceso al Medio)

### 2.3.2 Modos de Conmutación

El estándar define dos diferentes modos de conmutación: modo transparente y el modo no-transparente. La diferencia principal entre los dos modos está en cómo son transmitidas las tramas de información, En el modo transparente, las conmutaciones no transmiten información de cabeceras, pero en modo no-transparente las conmutaciones si transmiten información de cabeceras. Las cabeceras contienen información de programación esencial como el uso de nodos para determinar cuando pueden transmitir y recibir información. Los modos de programación: centralizada y distribuída, están relacionadas con los modos de conmutación, todas las programaciones para todos los nodos en el sistema se llevan a cabo en la BS, la RS tiene cierta autonomía y puede realizar decisiones para los nodos con los que se comunica.

### 2.3.3 Modo Transparente

En este modo las RSs no transmiten tramas de información, por lo tanto no aumentan el área de cobertura del sistema de acceso inalámbrico, así el principal uso es facilitar el aumento de capacidad dentro del área de cobertura de la BS. Este tipo de conmutación es menos complejo y opera únicamente en un modo de programación centralizada para topologías hasta de dos saltos.

### 2.3.4 Modo No-transparente

Las RSs generan sus propias tramas de información o transmiten las recibidas desde la BS dependiendo del modo de programación, y pueden soportar grandes áreas de cobertura y su principal uso es el de aumentar la cobertura. Por otro lado la transmisión de tramas de información pueden tener alta interferencia entre RSs vecinas, la mejora en capacidad que se puede conseguir con este modo es limitada. Conmutaciones No-transparentes pueden operar en topologías con más de dos saltos tanto en modo de programación centralizada como en distribuída.

## 2.4 CAPA DE ACCESO AL MEDIO MAC

### 2.4.1 Esquema de Transmisión

El estándar define dos esquemas de transmisión, ambos intentan maximizar la eficiencia del sistema agregando tráfico donde es posible: El esquema basado en TÚNEL y el esquema basado en Identificador de Conexión (CID). La agregación de tráfico posee dos beneficios principales: Puede resultar en ganancias de eficiencia del sistema mientras menor información de señalización es enviada, y esto resulta en simplificar la administración como grupos de flujo a fin de que puedan ser manejados conjuntamente.

El Esquema basado en TÚNEL provee soporte para túneles explícitos caracterizados por un único CID, dos específicos puntos finales (*endpoints*), y requerimientos de QoS. El Esquema basado en CID no tiene túneles y no soporta explícitamente agregación de tráfico, pero requiere menos complejidad. En el esquema basado en TÚNEL, aproximaciones de túneles son usados para agregar tráfico desde las MSs hacia la conexión BS-RS ya sea por conexiones de administración o transporte con requerimientos similares de QoS. El esquema basado en CID, por otra parte soporta únicamente conexiones de administración de legado y de transporte de legado como se define en el estándar 802.16e-2005. Estos esquemas pueden ser diferenciados en términos de administración de QoS, manejo de error y exceso de tiempo, memoria o ancho de banda (*overhead*).

**El esquema basado en TÚNEL**.- En este modo, la estación al ingreso del túnel agrega una cabecera MAC al paquete o grupo de paquetes, indicando el CID del túnel que los paquetes deben atravesar. Esta cabecera es removida cuando el paquete llega a su destino RS. El uso del túnel requiere cierta inteligencia en las RSs a lo largo de la distribución de flujo de parámetros para diferentes servicios hacia las RSs en las programaciones centralizada y distribuída.

**El esquema basado en CID**.- La transmisión de los paquetes se basa en el CID de la estación de destino. En la programación centralizada la BS envía un mensaje a la RSs describiendo las características del canal de enlace de conmutación, incluyendo un campo extra especificando el retraso asociado con cada paquete ya sea en DL como en UL, así las RS conoce en qué trama cada paquete deberá transmitirse. Esto es necesario para conocer los requerimientos de QoS de cada conexión. En el caso distribuido la RS conoce los requerimientos de QoS de cada conexión y por lo tanto puede tomar sus propias decisiones de programación.

### 2.4.2 Administración de Enrutamiento y Trayecto

El enrutamiento en sistemas con 802.16j que soporta multisalto, existen decisiones que pueden ser tomadas con la RS y una MS en particular puede ser asociada. La administración de trayecto se refiere al establecimeinto de trayecto, mantenimiento y emisión para las cuales se han propuesto diferentes técnicas de administración de trayecto.

#### Selección de Enrutamiento/Trayecto

EL estándar proporciona decisiones de enrutamiento basadas en métricas como la disponibilidad de recurso de radio, calidad del enlace de radio y carga de tráfico en la RSs, pero no indica cómo la decisión debería ser tomada, la definición de decisión de selección del trayecto se deja a criterio del fabricante. Las decisiones son tomadas en la BS basada en la información provista por la RSs. Los mecanismos de administración de trayecto son usados para crear el trayecto de una manera apropiada. El estándar define dos aproximaciones de administración de trayecto: integrado y explícito. La diferencia entre estas dos aproximaciones está en como es distribuida la información de señalización para administrar el trayecto en el sistema.

Aproximación Integrada de Administración de Trayecto En esta aproximación se usa un esquema hereditario de asignación de CID. La BS asigna CIDs hacia sus estaciones subordinadas así como las CIDs asignadas a todas las RSs de cualquier estación son un subconjunto de CIDs asignados para esa estación. De esta forma no existe tabla de enrutamiento específico en cada RS y una reducida necesidad por señalizar la actualización de la información de trayecto.

#### Aproximación Explícita de Administración de Trayecto

Esta aproximación usa una señalización de mecanismo *end-to-end* para distribuir la tabla de enrutamiento a lo largo del trayecto. a BS envía necesariamente información a la RSs involucrada en el trayecto cuando un trayecto es creado, removido o actualizado. Cada trayecto es identificado por identificadores de trayecto a al cual los CIDs están ligados, así existe una tabla de enrutamiento más pequeña en la RSs y una reducción del *overhead* requerido para actualizar dichas tablas. Opcionalmente la BS puede incluir los requerimientos de QoS asociados a cada CID que permiten a las RSs realizar decisiones independientes respecto a la programación de distribución de paquetes.

### 2.4.3 Alcance (*Ranging*) y Entrada de Red

Existen dos diferentes aspectos para la entrada de red en 802.16j, diferencias relacionadas con la entrada a la red para la MS y procedimientos de entrada de red para

las RSs. Como 802.16j debe mantener la compatibilidad con terminales anteriores, el procedimiento de entrada de red debe mantenerse sin cambios, aún así existen diferencias en cuanto a cómo la BS y las RSs realizan dicho procedimiento partiendo del hecho que la red necesita determinar qué nodo debería ser el nodo de acceso para la MS.

**Alcance inicial de MS en modo transparente de conmutación**.- Las RSs monitorean el canal de alcance en la zona de acceso de UL y transmite los códigos de alcance que recibe hacia la BS. La BS espera un tiempo específico por otro mensaje con el mismo código de alcance desde otras RSs y determina el camino más apropiado para la estación, este puede ser directo o vía una RS; si el camino directo es escogido, la BS envía una respuesta directamente a la MS. Si el camino es vía RS, la respuesta es enviada a la RS la cual retransmite la respuesta hacia la MS.

**Alcance inicial de MS en modo no transparente de conmutación**.- Debido a limitaciones de legado, las MSs escogen la Bs o la NT-RS con el preámbulo más fuerte detectado, es decir que esencialmente no existe decisión de trayecto que tomar ya que la MS se está comunicando con una sola RS. Como la BS toma la decisión de la entrada de red, la RS debe comunicarse con la BS para asegurar que se le permite la entrada de red a la MS. El caso centralizado involucra comunicar toda la información de alcance de regreso a la BS, pero en el caso distribuido la RS maneja las funciones de alcance y simplemente crea una fila de entrada de red a la BS. El proceso de entrada de red para las RSs incorporan pasos adicionales y define un proceso de alcance específico, más específicamente, la entrada de red se sustenta en descubrimiento de vecindario y proceso de medida seguido por un algoritmo de selección de trayecto para determinar la estación de acceso más conveniente para la RS.

**Alcance inicial de RS**.- Durante el proceso la BS o la NT-BS puede determinar si un nodo de alcance es una RS basada en el código de alcance usado, un conjunto de códigos de alcance son reservados para las RSs. De esta manera las RSs en modo transparente puede fácilmente ignorar el alcance enviado por otra RSs, también esto habilita prioridad para el alcance enviado por una cierta RS. El resto del alcance inicial para las RSs es similar al de las MSs en modo de de conmutación no-transparente.

**Entrada de Red de RS**.- Luego del alcance inicial, la autentificación y el proceso de registro, la BS debe requerir que la RS determine la fuerza de la señal de cada RSs vecina y retransmitirla a la BS. La BS puede entonces determinar la estación de acceso mas conveniente a la cual asociar la RS basada en carga de tráfico, fuerza de la señal, etc. EL paso final para la entrada de red es la configuración de los parámetros de RS

incluyendo su modo de operación y modo de programación.

## 2.5 CAPA FÍSICA PHY

### 2.5.1 WirelessMAN-OFDMA PHY

#### Estructura de Trama

Se realiza un cambio para el modo TDD, la BS y la RS no asignan más de tres IEs (Elementos de Información) para asignación de alcance.

La estructura de trama definida en los estándares previos 802.16 fue diseñada para redes inalámbricas de saltos simples, pero en el 802.16j se realizan modificaciones para soportar arquitectura de conmutación. La estructura de trama está dividida en en dos subtramas: Downlink(DL) y Uplink(UL), y estas subtramas se divide en *zonas* para soportar comunicación entre BS-RS y comunicaciones entre RS-MS; zonas diferentes facilitan la comunicación entre diferentes partes del sistema. En los modos transparente y no-transparente, las llamadas *zonas de acceso* son definidas para el soporte de comunicación BS/NT-RS con la MS/T-RS, en el modo transparente la llamada *zona transparente* es definida para la comunicación entre T-RS y MS, en modo no-transparente *zonas de conmutación* son definidas para comunicación entre BS/NT-RS y NT-RS.

### 2.5.2 Estructura de Trama en modo de conmutación transparente

El modo transparente solo soporta topologías de dos saltos y es únicamente necesario tener una zona de acceso y una zona transparente en UL y DL. Las RSs cambian de modo; de transmitir a recibir y viceversa, cuando el sistema cambia de zona, entonces es necesario tener un salto de transición entre dos zonas. La programación es realizada vía MAPs que se transmiten por la BS. Se asume que las RSs tienen una capacidad reducida de buffer, como los múltiples saltos vía conmutación pueden ser programados en diferentes tramas.

### 2.5.3 Estructura de Trama en modo de conmutación no-transparente

La estructura de trama en modo no-transparente es considerablemente más compleja ya que tanto la BS como la RS pueden transmitir cabeceras de trama, algunos problemas de sincronización surgen: El estándar establece que ambas estaciones deben ser sincronizadas para transmitir el preámbulo de trama al mismo tiempo, así las subtramas de DL y UL deben ser sincronizadas tanto en la BS como en la RS. La subtrama de DL debe incluir por lo menos una zona de acceso de DL y puede incluir una o más

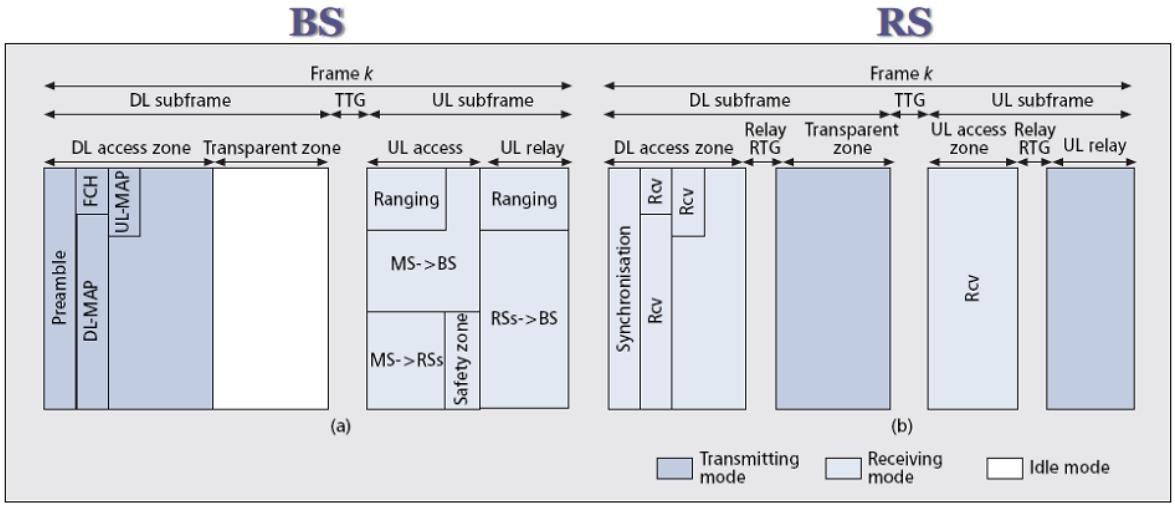


**Figura 2.9: Estructura de trama modo transparente, a) vista en la BS, b) vista en la RS**

zonas de conmutación. La subtrama de UL puede incluir una o más zonas de acceso y una o más zonas de conmutación. El comportamiento del sistema difiere en que el modo de operación que es usado; centralizado o distribuido. En ambos modos la BS transmite tres maps: dos para transmisiones de programación desde y hacia las MSs, con las cuales se comunica directamente, y uno para programación de comunicación BS - RS, llamada R-MAP. En modo centralizado la BS genera MAPs que son usados por las RSs para programar transmisiones desde y hacia sus subordinados, en este caso un mensaje RS-ACCESS-MAP es enviado por la BS a la RS y contiene el MAP que la RS debe transmitir al inicio de su zona de acceso de DL en una trama subsecuente. Cuando la programación centralizada es usada en topologías con más de dos saltos, un MAP puede ser generado por la BS para ser transmitida por las RSs como un R-MAP, esto es realizado usando un mensaje RS-RELAY-MAP. En programación distribuída las RSs pueden realizar su propia programación, esa es la razón por la que no necesitan estos mensajes.

El modo no-transparente provee soporte para RSs de Radio Única y Dual. En radio única es necesario introducir saltos de transición entre zonas dentro de subtramas, esto no es necesario en el caso dual en el cual la RS se comunica con su superior vía radio, y en el otro caso la vía radio es usada para la comunicación con sus subordinados, y típicamente operarán en diferentes canales.

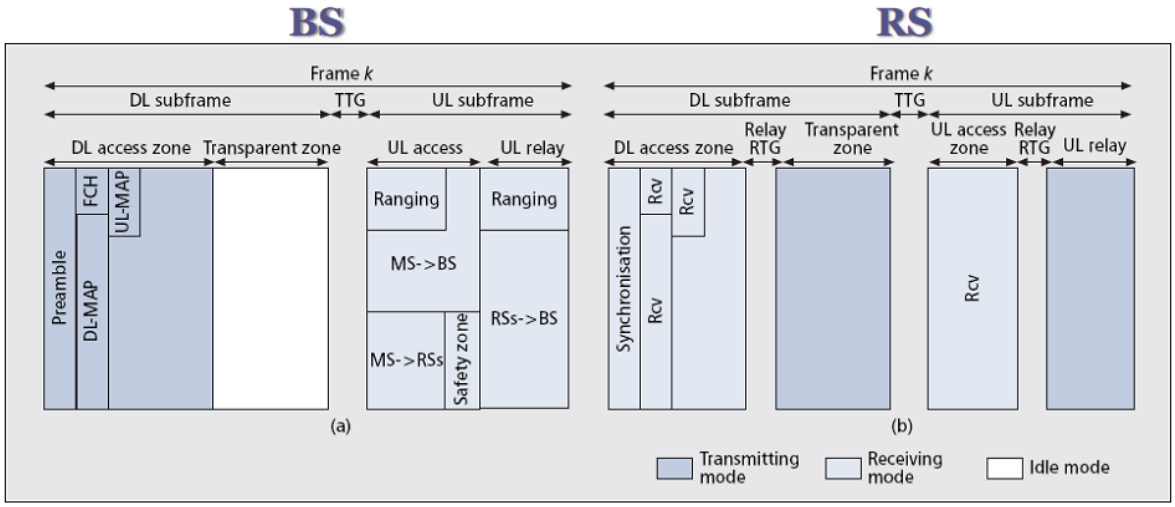


**Figura 2.10: Estructura de trama modo no-transparente, a) vista en la BS, b) vista en la RS**

## 2.6 TRABAJOS RELACIONADOS

### MAC Performance Evaluation of IEEE 802.16j

Este artículo evalúa la eficiencia de la capa MAC en base a la nueva técnica de transmisión de Túnel, requerimientos de QoS, el tamaño de la trama y de la Unidad de Datos de Protocolo(MPDU).

### IEEE 802.16j Relay-Based Wireless Access Networks: an overview.

El artículo presenta un análisis del estándar IEEE 802.16j, enfocándose en los modos de operación.

### Performance Analysis of Transparent Relays

Este artículo analiza el modo transparente y su potencial área de cobertura.

Se espera que los nuevos sistemas inalámbricos provean una tasa de datos alta así como en los sistemas móviles, alrededor de 100 MBPS y 1 Gbps para sistemas 3G.

Debido a las pérdidas significativas de la señal debido al desvanecimiento y multitrayecto se originan áreas con cobertura poca o nula, llevando a los proveedores de servicios y sistemas inalámbricos a grandes esfuerzos por resolver estos problemas y la manera más efectiva y utilizada hasta ahora ha sido aumentar la densidad al desplegar BSs, teniendo en cuenta que esto aumenta los costos significativamente y con el riesgo de que existan grandes interferencias con otras BSs. Así pues la alternativa de con-

mutación por multisalto se introduce en el diseño de redes inalámbricas para ayudar a extender la cobertura, mejorar el servicio, eliminar puntos muertos o sin señal y con una relación costo-beneficio muy atractiva.

**Tabla 2.3: Comparación del Estándar IEEE802.16e-2005 e IEEE802.16j**

| | **802.16e-2005** | **802.16j** |
|---|---|---|
| Topología | PMP | Estructura en Arbol, Compatible con PMP |
| Saltos | Salto Simple | Multisalto |
| Agregación de tráfico | No | Si, Sobre el camino de multisalto |
| Capacidad del Sistema | Bajo | Alto dentro del área de cobertura de la BS |
| Cobertura | Baja | Alta |
| Costo | Alto | Bajo |
| Soporte para Movilidad | Si | Si |
| Esquemas de Transmisión | CID | TÚNEL, CID |

# Capítulo 3

# MATERIALES Y MÉTODOS

## 3.1 SELECCIÓN DEL SOFTWARE DE SIMULACIÓN

NCTUns *(National Chiao Tung University, Network Simulator)*es una poderosa herramienta para simulación y emulación y cuenta con dos únicas características; primero usa la pila de protocolos TCP/IP o UDP/IP en tiempo real(ral-life) en el kernel (núcleo) de LINUX para realizar simulaciones y emulaciones. Segundo, puede arrancar cualquier programa de aplicación en tiempo real en los nodos de simulación durante la simulación para generar tráfico de red real en las simulaciones.

Este simulador permite desarrollar, evaluar y diagnosticar el desempeño de protocolos y aplicaciones en diferentes tipos de redes (LAN, MAN, WAN). Las simulaciones hechas con esta herramienta, cuentan con características muy especiales.

Éstas capacidades hacen que NCTUns genere resultados de simulación de alta confiabilidad y proporcione resultados del desempeño de las aplicaciones en tiempo real bajo varios escenarios y condiciones de red.

## 3.2 SOFTWARE NCTUns 6.0

### 3.2.1 Metodología de Simulación

NCTUns utiliza una metodología de modificación de kernel para utilizar el protocolo TCP/IP directamente en el kernel de Linux para simular una red IP. La principal ventaja en la metodología de modificación de kernel es la utilización de la interface TÚNEL. Una interface de TÚNEL es una pseudo interface de red que no tiene una red física real integrada, aún así desde el punto de vista del kernel, la funcionalidad de esta pseudo interface de red es exactamente la misma que una interface de red normal (Interface Ethernet). Entonces el programa de aplicación de red puede enviar sus paquetes hacia su host de destino por la interface de red TÚNEL o recibir paquetes desde una interface de red TÚNEL como si dichos paquetes fueran enviados o recibidos desde una interface Ethernet normal.

### 3.2.2 Soporte para Redes, Equipos y Protocolos

NCTUns simula redes IP basadas en Ethernet con nodos fijos y enlaces punto a punto, simula también redes Wireless LAN IEEE 802.11 (a)(b), incluyendo ad-hoc, redes celulares GPRS y redes ópticas. Redes WiMAX 802.16(d), incluyendo PMP y modos Mesh, redes WiMAX PMP móviles 802.16(e), redes WiMAX 802.16(j) en modo transparente y modo no-transparente. A demás simula redes satelitales GEO y aplicaciones ITSs (Sistemas de Transportación Inteligente) para V2V (vehículo a vehículo).

Simula equipos de red comunes como hubs Ethernet, switches, routers, hosts, interfaces y puntos de acceso inalámbricos IEEE 802.11(a)(b), switches para circuitos ópticos, estaciones base GPRS, BSs y SSs para WiMAX 802.16 (d)(e), para WiMAX 802.16 (j) BSs, RSs, SSs en modo transparente y no-transparente.

Soporte para protocolos como IEEE 802.3 CSMA/CD MAC, IEEE 802.11 (a)(b)(e)(p) CSMA/CA MAC, IP, IP Móvil, RIP, OSPF, UDP, TCP, HTTP, FTP, Telnet, RTP/RTCP/SDP, protocolos para WiMAX PMP IEEE 802.16(d)(e)(j), y modo mesh para 802.16(d).

### 3.2.3 Arquitectura de NCTUns

La arquitectura está distribuída de tal manera que soporta simulaciones remotas y concurrentes. El programa consta con GUI(Interfaz Gráfica de Usuario) y gracias a su modelo cliente-servidor de comunicación entre el GUI y el núcleo de simulación un usuario remoto puede usar el ambiente GUI y hacer uso remotamente del núcleo servidor de simulación, el servidor ejecutará la simulación configurada y luego regresará los resultados remotamente hacia el ambiente GUI para su correspondiente análisis, este esquema soporta fácilmente trabajos de múltiple simulación que se ejecutan al mismo tiempo en servidores diferentes. Funcionalmente, NCTUns se divide en seis componentes descritos de la siguiente manera:

**1. Interfaz Gráfica de Usuario**

GUI es un ambiente altamente integrado que habilita al usuario a editar topologías de red, configurar los módulos de protocolo de un nodo de red, ajustar los valores delos parámetros para un módulo de protocolo, especificar el tráfico de red, graficar el rendimiento de curvas, correr animaciones de conexiones para transferencias de paquetes, etc. Durante la simulación, el usuario puede poner en fila y configurar los valores de un objeto en cualquier momento, por ejemplo puede ajustar la tabla de enrutamiento de un router durante la simulación. GUI usa sockets internet TCP/IP para comunicarse con otras computadoras, así que también puede entregar un trabajo

de simulación a una máquina remota y los resultados regresarán al GUI cuando la simulación haya terminado.

**2. Núcleo de Simulación (S.E.)**

El núcleo de simulación es propiamente el núcleo de NCTUns, es un programa a nivel de usuario que provee una plataforma basada en módulos para que los usuarios desarrollen sus protocolos y los integren al simulador NCTUns. Cuenta también con servicios importantes como mantenimiento de reloj, administrador de reloj, programación de eventos y registro de variables.

**3. Dispatcher**

El programa dispatcher soporta simulaciones simultáneas en múltiples máquinas de simulación, estas deben ser ejecutadas y mantenidas en estado de encendido para manejar múltiples máquinas de simulación. Cuando un usuario inicia un trabajo de simulación al dispatcher, este seleccionará una máquina disponible para ejecutarlo, si la máquina no está disponible, el trabajo puede ser puesto en fila y manejado por el dispatcher como un trabajo de segundo plano, luego cuando la simulación se vuelve disponible, el dispatcher enviará automáticamente un trabajo en segundo plano para ejecutarlo en favor al usuario.

**4. Coordinator**

Cada máquina de simulación tiene un programa coordinator para comunicarse con GUI y el dispatcher, y cumple las siguientes tareas:

**a. Ejecución de un proceso de núcleo de simulación para lograr una simulación.-** Cuando el coordinator recibe un trabajo de simulación desde el dispatcher, ejecuta un proceso de núcleo de simulación para simular la red y protocolos especificados. Al final el proceso de ejecución del servidor de simulación se autoeliminará cuando la simulación haya finalizado.

**b. Reporte de estado de la máquina de simulación al dispatcher.-** El coordinator informa al dispatcher si ésta máquina está ocupada ejecutando otra simulación o no. Cuando se ejecuta, primero se registra a si mismo con el dispatcher para unirse al banco de máquinas de simulación del dispatcher. Luego cuando el estado cambia (ocio u ocupado), notifica al dispatcher del nuevo estado. Basado en la información de estado de máquina, el dispatcher puede escoger una máquina disponible desde su banco de máquinas para ejecutar un trabajo.

**c. Comunicación con GUI y dispatcher.-** El proceso de núcleo de simulación envía periódicamente el tiempo de la simulación actual de la red simulada al coordi-

nator, el cual transmite la información al GUI para reportar al GUI del usuario el progreso de simulación. Durante la simulación, el usuario puede también ajustar o recuperar en línea el valor de un objeto. El intercambio de mensajes entre el proceso de núcleo de simulación y el programa GUI es realizado via el coordinator.

**5. Programa de Aplicación Tiempo-Real (Real-Life)**

Cualquier programa de aplicación Tiempo-Real puede ejecutarse para generar tráfico de red realista, configurar redes y monitorear tráfico de red.

**6. Parches para el Kernel**

NCTUns usa la pila de protocolos de red tiempo-real en el kernel de linux para simular la capa de transporte y protocolos de la capa de red como son TCP, UDP e IP, modificaciones muy básicas en los temporizadores del kernel de Linux han sido realizados con el fin de que los temporizadores utilizados por la pila protocolos en el kernel para nodos simulados puedan anticipar sus tiempos basados en el reloj de la simulación (controlado por NCTUns) en lugar de basarse en el reloj de tiempo mundo-real (real-world).

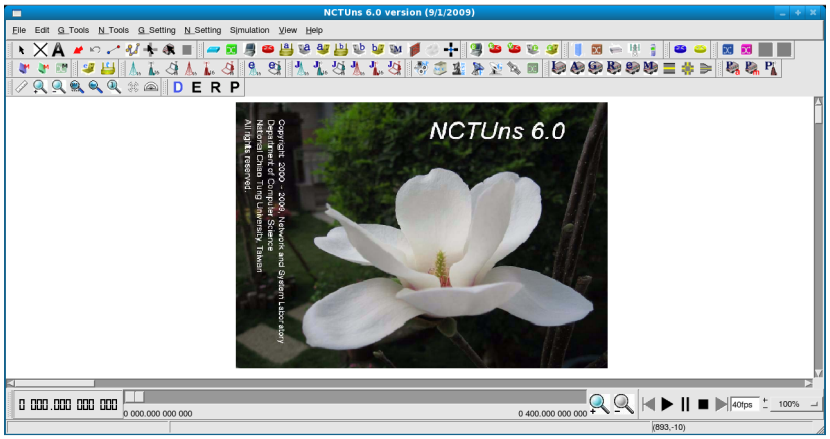


**Figura 3.1: NCTUns 6.0**

Algunas características de GUI se muestran a continuación:

### Editor de Topología

El editor de topología provee una conveniente e intuitiva forma de construir una topología de red gráficamente, esta red puede ser fija alámbrica o móvil inalámbrica.

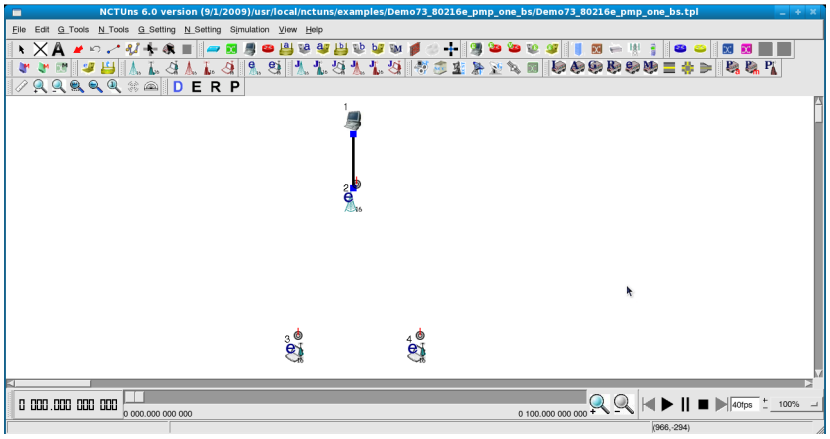


**Figura 3.2: Editor de Topología**

### Ventana de Diálogo de Atributos

Un equipo de red (nodo) puede incluir varios atributos, configurar y modificar atributos de un nodo de red puede ser una tarea fácil haciendo doble-click en el icono de un nodo de red y la ventana correspondiente al nodo se desplegará.

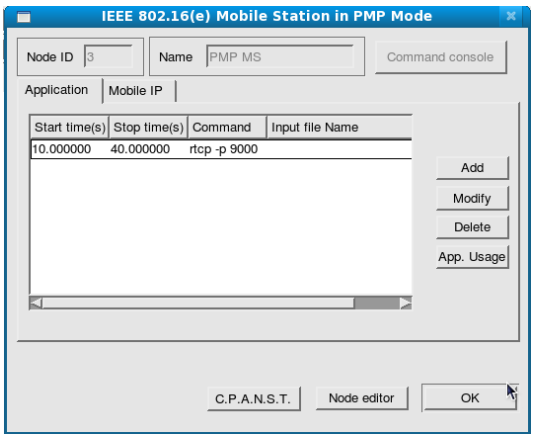


**Figura 3.3: Ventana de Diálogo de Atributos**

### Monitor de Desempeño

El monitor de desempeño es generado fácil y gráficamente de tal manera que se despliegen gráficas de la métrica del desempeño monitoreado con respecto al tiempo, presentando resultados de los formatos los mismos que puedan generar dos columnas x e y.

### Editor de Nodos

El editor de nodos provee un ambiente en el cual el usuario puede configurar los módulos de protocolo usados dentro del nodo de red, flexiblemente, es decir el usuario puede añadir, borrar o reemplazar un módulo. El usuario podrá a demás ajustar valores de parámetros usados por un específico módulo de protocolo y cada cuadro del editor representa un módulo de protocolo, haciendo doble-click en un cuadro con lo que se desplegará la ventana de diálogo.

### Intérprete de Animación de Paquete

El uso del intérprete de animación permite al usuario ajustar el rastreo de una transferencia de paquete realizada durante una simulación con una velocidad especificada. Esta capacidad es muy útil al momento de evaluar y depurar visualmente el comportamiento de un protocolo de red.

## 3.3 Configuración de una red inalámbrica WiMAX

Antes de continuar con la simulación propósito de éste proyecto, se realiza previamente la configuración de una red inalámbrica WiMAX, utilizando el estándar IEEE 802.16e, el cual es usado en redes totalmente IP y que como extensión del 802.16, incluye conexión de banda ancha para elementos portables.

Una red de modo PMP está compuesta por dos tipos de nodos, el primero es la Estación Base (BS) la responsable de asignar los recursos de red y coordinar las transmisiones de UL, la segunda es la Estación Móvil (MS) equipada con 802.16e para ejecutar sus aplicaciones. Para el soporte de elementos portables se emplea un esquema IP, ideal para superar inconvenientes en la capa de red, así el proceso para configurar la red se explica a continuación:

Como se muestra en la figura 3.24, los tres nodos BS, administran tres diferentes subredes, respectivamente, así como también están conectadas entre sí mediante routers, para este caso la MS transmite periódicamente paquetes de datos al host, el cual está conectado a la red mediante una línea fija, y se mueve hacia la derecha a una velocidad constante.

NCTUns posee la poderosa herramienta GUI, así que toda la configuración será realizada a través de ventanas como es el caso de la inserción de Nodos para la red, para lo cual se puede seleccionar el icono del nodo o elemento en la parte superior y posicionarlo en el espacio de diseño de topología, también se puede agrear mediante

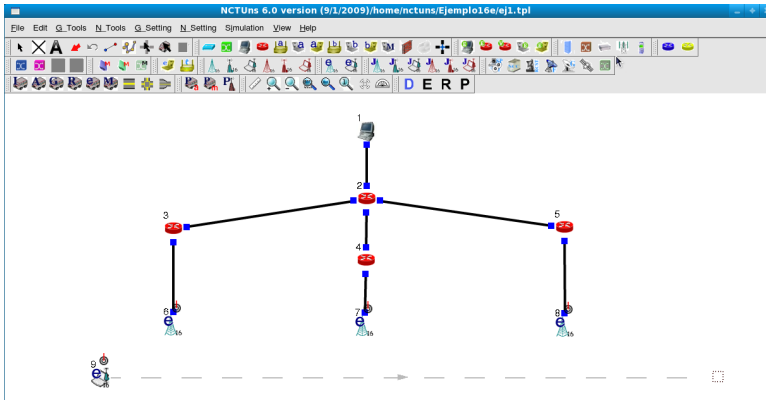


**Figura 3.4: Red IEEE 802.16e**

la barra de herramientas del Menú siguiendo la ruta: N-Tools - 802.16(e)Network - 802.16(e)PMP Mode nodes, de la cual se despliega una ventana en la que se puede especificar el número de nodos a insertar, la posición y la especificación de protocolos.

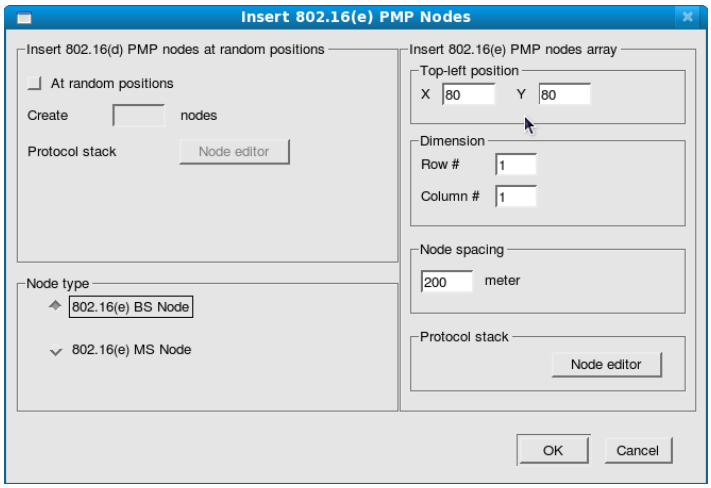


**Figura 3.5: Nodos IEEE 802.16e**

A continuación se especifica y administra las subredes, presionando el icono "Form Subnet", para agrupar un cierto número de nodos BS's y MS's, así se formará una subred y GUI genera automáticamente direcciones IP para los nodos.

**Figura 3.6: icono *Form Sunet***

Para continuar con la simulación y como NCTUns soporta requerimientos de QoS se debe especificar la provisión de QoS, para cada nodo MS, siguiendo la ruta: N-Setting - 802.16(e)Network - Set QoS Provision for Mobile Stations. NCTUns soporta

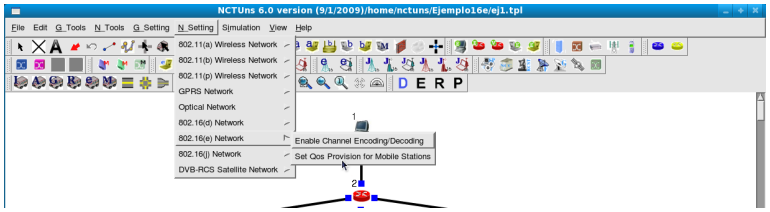


**Figura 3.7: Provisión de QoS para Estaciones Móviles**

únicamente tráfico del tipo mejor-esfuerzo y tipo de QoS (Un-garanted service) y como se muestra en la Figura 3.28 se especifica el único parámetro requerido para la provisión de QoS de cada nodo MS, "Sustained rate (Kbps)", la cual denota el máximo ancho de banda de enlace que el nodo MS puede usar.

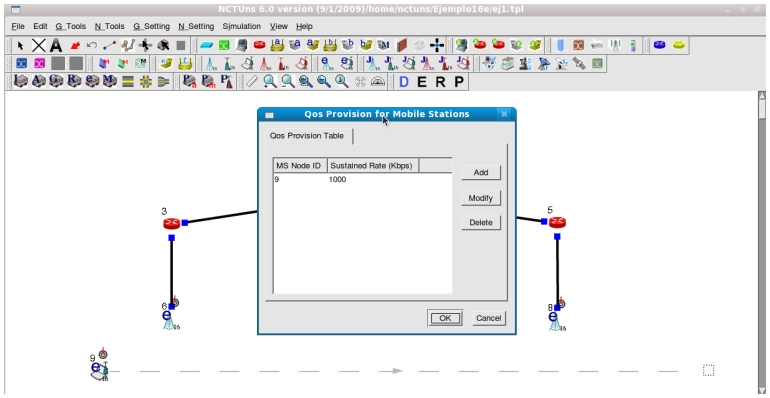


**Figura 3.8: Ventana de Provisión de QoS para Estaciones Móviles**

Finalmente como se muestra en la figura 3.29, se debe seleccionar el modo de edición y haciendo click en cualquier elemento o nodo se despliega una ventana de dialogo de atributos en la cual existe una opción llamada "Node Editor", la que despliega a su vez una ventana donde se puede visualizar la pila de protocolos de dicho nodo, y click en cualquier icono de un módulo dentro de la pila de protocolo se despliega una ventana de diálogo para especificar sus parámetros, como por ejemplo la figura 3.31 muestra las especificaciones de ID del canal, frecuencia, potencia y sensibilidad de la señal recibida para el módulo OFDMA-PHY.

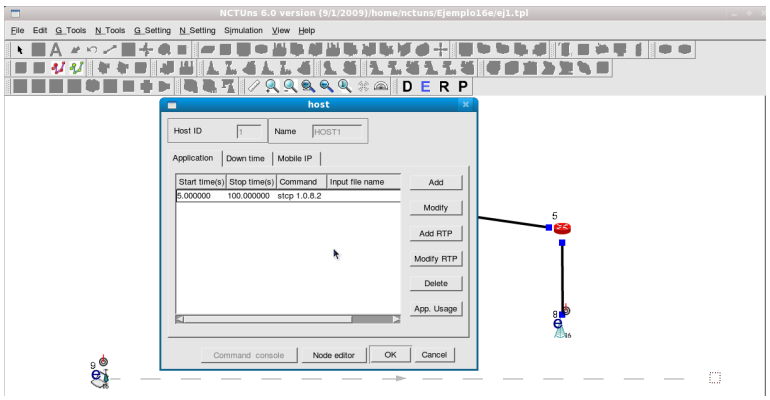


**Figura 3.9: Ventana de Atributos**

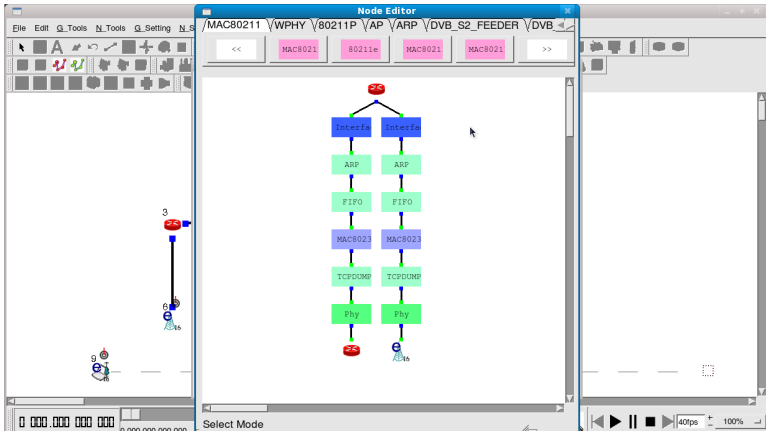


**Figura 3.10: Ventana de Pila de Protocolos**

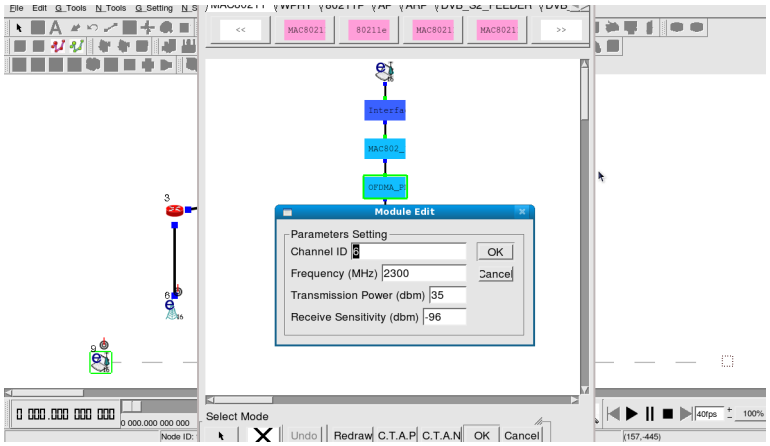


**Figura 3.11: Ventana de Configuración de Parámetros**

# Capítulo 4

# DISEÑO Y SIMULACIÓN DE LA RED INALÁMBRICA WiMAX IEEE 802.16j

## 4.1 MÓDULOS Y PARÁMETROS

El diseño de los escenarios para realizar una serie de simulaciones de una red WiMAX basada en el estándar IEEE 802.16j, se configura utilizando la estructura de trama en modo de conmutación transparente ya que es el modo más completo soportado por el software NCTUns, el cual proporcionará resultados de una manera más adecuada, explícita y sencilla para el propósito de este proyecto de grado, siendo este la evaluación del desempeño del estándar.

NCTUns posee una plataforma estructurada en módulos, los cuales corresponden a una capa de la pila de protocolos. Gracias a esta plataforma es posible insertar fácilmente un nuevo módulo en NCTUns y reemplazar el módulo por defecto en la pila de protocolos, permitiendo configurar los parámetros de PHY y MAC con los requerimientos para el análisis.

También posee tres tipos de nodos para el soporte de IEEE 802.16j; la Estación Base de Conmutación Móvil Transparente (TMR-BS), Estación de Conmutación Transparente (T-RS) y la Estación Móvil Transparente (T-MS). Una TMR-BS cumple la misma función que una estación base en una red convencional WiMAX PMP, es decir el control central en la red para asignar ancho de banda de enlace para las T-RSs y T-MSs que ésta administra. Una T-RS simplemente transmite datos entrantes de sus subordinados las T-MSs y deja la programación de estos datos a la TMR-BS. Una T-MS la cual es completamente compatible con IEEE 802.16e, puede trabajar normalmente sin ninguna modificación. En la topología soportada por NCTUns la TMR-BS provee servicios a través de una red de retorno (Backhaul) y así posee dos interfaces, una para las redes cableadas y otra para las comunicaciones inalámbricas con la T-RS y T-MS. Las T-RS y T-MS solo poseen una interface, la cual es inalámbrica para comunicarse con la TMR-BS.

Cuando la T-MS desea unirse a la red IEEE 802.16j trabajando en modo transparente, la TMR-BS es responsable de escoger una estación de acceso para la T-MS, ésta estación de acceso puede ser una TMR-BS o una T-RS.

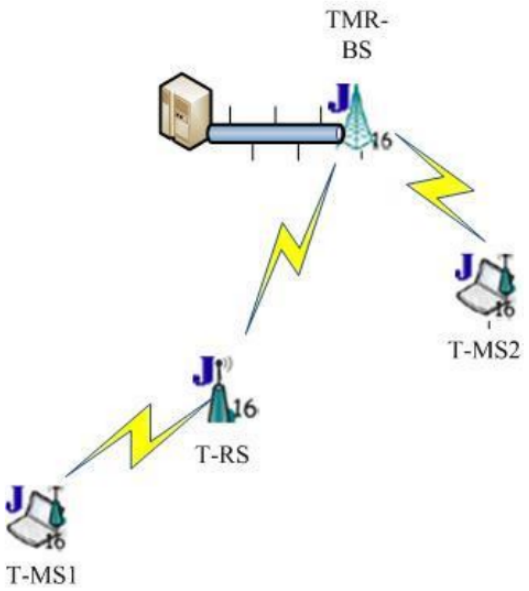


**Figura 4.1: Topología en NCTUns de IEEE 802.16j en modo transparente**

### 4.1.1 Pilas de Protocolos del Estándar para redes en modo Transparente en NCTUns

A continuación la figura 4.2 muestra las pilas de protocolos de los nodos de la red; TMR-BS, T-RS, T-MS disponibles en NCTUns, así como la relación y conexiones entre ellas.

### 4.1.2 Nodo IEEE 802.16j TMR-BS

La TMR-BS provee servicios a las T-MSs y se conecta con una red de backbone, posee dos interfaces, una es la interface IEEE 802.3 Ethernet para conectarse con la red de backbone y la interface de radio IEEE 802.26j para comunicarse con la T-RS y T-MSs. La interface IEEE 802.3 Ethernet debe tener el ancho de banda suficiente para soportar la red IEEE 802.16j en su totalidad. Este nodo también usa la pila de protocolos compuesta por ARP, FIFO, MAC8023 y módulos PHY. La interface de radio IEEE 802.16 es capaz de trabajar coordinadamente con el estándar IEEE 802.16j, la interface IEEE 802.16j de NCTUns tiene los siguientes módulos:

- Módulo de Interface

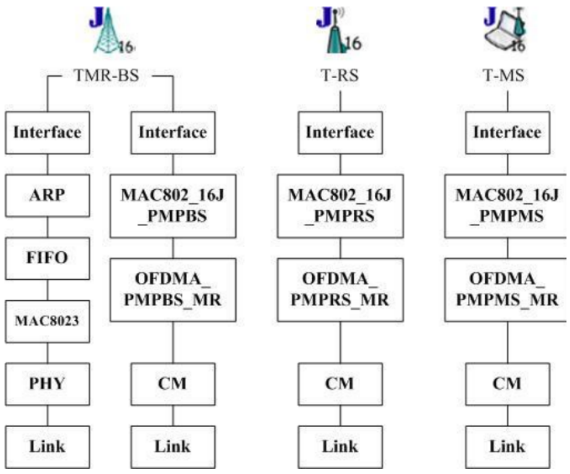


**Figura 4.2: Pilas de Protocolos en NCTUns para IEEE 802.16j en modo transparente**

- Módulo MAC802-16j-PMPBS
- Módulo OFDMA-PMPBS-MR
- Módulo CM
- Módulo LINK

El módulo de Interface conecta al nodo con el resto de módulos y protocolos, el módulo de enlace *(LINK)*, es el encargado de enlazar al nodo con otros nodos. Cabe recalcar que los módulos principales en la pila de protocolos de la TMR-BS son el módulo MAC802-16j-PMPBS, el cual realiza las funciones de la capa MAC de una TMR-BS y el módulo OFDMA-PMPBS-MR, la cual realiza funciones de la capa física con la tecnología OFDMA. El módulo de Modelo de Canal (CM) simula varias condiciones del canal como son atenuación de potencia, multitrayecto y efectos de desvanecimiento.

### 4.1.3 Nodo IEEE 802.16j T-RS

La pila de protocolos de una T-RS es muy similar a la de una T-MS porque actúa como una T-MS desde el punto de vista de la TMR-BS. Debido a que la T-RS no transmite mensajes de trama como el preámbulo y el DL-MAP, la T-MS no obtiene información de la existencia de una T-RS, ésta es la razón porque la T-RS es llamada una RS "transparente". La T-RS posee únicamente la interface inalámbrica IEEE 802.16j, que es usada para comunicarse con la TMR-BS y T-MS. La pila de protocolos de una T-RS está compuesta por un módulo de interface, un módulo MAC802-16j-PMPRS, un módulo OFMA-PMPRS-MR, un módulo CM y un módulo LINK. El módulo MAC802-16j-PMPRS realiza funciones de la capa MAC de una T-RS la cual incluye intercambio

de mensajes y datos de conmutación entre una TMR-BS y una T-RS. El módulo OFDMA-PMPRS-MR realiza funciones de la capa física, codifica y decodifica los datos transferidos a la TMR-BS y a la T-MS, así mismo el módulo de Modelo del Canal (CM) es agregado en la pila de protocolos de una TMR-RS para simular varias condiciones de canal.

### 4.1.4 Nodo IEEE 802.16j T-MS

La T-MS posee únicamente la interface inalámbrica IEEE 802.16j para comunicarse con la TMR-BS y T-RS, la pila de protocolos está compuesta de un módulo de interface, un módulo MAC802-16j-PMPMS, un módulo OFMA-PMPMS-MR, un módulo CM y un módulo LINK.

## 4.2 MÓDULOS PARA IEEE 802.16j EN MODO TRANSPARENTE

### 4.2.1 Módulo Capa MAC

Para el funcionamiento de una red IEEE802.16j basada en modo Transparente, el módulo de capa MAC divide sus funcionalidades y procedimientos en las siguientes partes: el procedimiento de alcance inicial, procedimiento de entrada de red, administración de mensajes de negociación, administración de red, administración de conexión y programación de paquetes.

El procedimiento de alcance inicial es usado por la T-MS para unir una red IEEE 802.16j en modo transparente, el objetivo principal del alcance es sincronizarse con la TMR-BS para que la T-MS pueda decodificar la trama recibida correctamente, cuando este proceso tiene éxito, una T-MS/T-RS puede empezar el envío y recepción de mensajes de administración. Durante todo el proceso la MR-BS asignará Identificadores de Conexión (CID) únicos para cada una de las estaciones T-MS y T-RS.

Luego de que el proceso de entrada de red esté completo, cada T-MS o T-RS establecerá tres conexiones con la TMR-BS, estas conexiones incluyen una conexión básica, una conexión primaria y una conexión de datos, así las conexiones básica y primaria son usadas para transmitir mensajes de administración, la conexión de datos es usada para transmitir paquetes de datos, los cuales son enviados desde los protocolos de capas superiores y serán clasificados dentro de una de las diferentes conexiones mencionadas y esperaran a ser programados.

### 4.2.2 Módulo Capa PHY

En NCTUns la Capa Física PHY usa la técnica Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDMA) y la estructura de trama TDD, es por eso que el módulo IEEE 802.16j OFDMA PHY es responsable de tareas como el procesamiento

de Cabecera de Control de Trama (FCH), la simulación del modelo del canal, codificación y decodificación de canal y por último las modulaciones.

La Cabecera de Control de Trama (FCH) es generada en la capa física y transmitida al comienzo de cada trama, ésta guarda el Prefijo de Trama de Canal Descendente (DLFP) y especifica la longitud del DL-MAP, así cuando una T-RS o T-MS recibe un paquete desde la TMR-BS, debe decodificar el DLFP para conocer la longitud del DL-MAP, ésta información es enviada a la capa MAC de la T-RS o T-MS, así las estaciones pueden conocer la asignación de recursos de downlink para la trama.

## 4.3 PARÁMETROS DE SIMULACIÓN

Antes de comenzar a las simulaciones, se detallan algunos parámetros que permanecerán fijos para cada escenario de simulación: El análisis propuesto se realizará en función de la capacidad de Uplink con el fin de obtener resultados que permitan evaluar la tasa de transmisión de datos de las estaciones móviles y de conmutación, el posicionamiento de dichas estaciones, así como el desempeño de la pila de protocolos y control de potencia, cabe recalcar que el simulador presenta resultados muy estables para análisis en uplink.

El tipo de servicio de programación de carga de tráfico soportado por NCTUns es el de Mejor Esfuerzo *(best-effort)*, NCTUns soporta únicamente la clase de calidad de servicio UGS, por lo tanto el parámetro de calidad de servicio (QoS) requerido por cada estación móvil es la provisión de Tasa Máxima Prolongada de Canal Ascendente (UGS) medida en kbps, el cual provee un ancho de banda fijo al canal ascendente para una estación fija o móvil. Se proveerá de un ancho de banda de 10 Mbps. La frecuencia utilizada es de 2.3 GHz que es la frecuencia por defecto sugerida por el simulador para una red WiMAX IEEE 802.16j, además este rango de frecuencia es aceptado en latinoamérica indicado por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) para transmisión de datos utilizando tecnología WiMAX Móvil.

### 4.3.1 Modelo del Canal

La Universidad de Stanford ha desarrollado un conjunto de modelos para ambientes donde afecta el multitrayecto, estos modelos denominados *Stanford University Interim* son abreviados SUI, utilizados para el diseño y pruebas de la tecnología WiMAX con frecuencias menores a los 11 GHZ, en seis diversos panoramas que van del SUI-1 al SUI-6, los que se aplican para tres tipos de terreno:

- Tipo A: Colinas pequeñas con moderada-alta densidad de árboles.
- Tipo B: Colinas grandes con baja densidad de árboles, o plano con moderada-alta densidad de árboles.

- Tipo C: Plano con baja densidad de árboles.

La utilización de los modelos SUI presenta inconvenientes, el primero ya que al estar relacionado directamente con la clasificación del terreno, y puesto que ningún modelo considera zonas urbanas o urbanas densas, y el segundo es que NCTUns no cuenta con el modelo de canal SUI, pero proporciona la opción de escoger varios métodos de propagación dentro de dos clases para modelado del canal, siendo estos; Modelos de Canal Teóricos y Modelos de Canal Analíticos, los que pueden ser ajustados o extrapolados a la frecuencia requerida, por esa razón el método seleccionado para las simulaciones es el método de COST 231 - Hata, desarrollado por la Cooperativa Europea para Investigación Científica y Técnica (EURO-COST), el cual extiende el modelo Hata al rango de los 2 GHz con distancias de hasta 20 km para ambientes urbanos.

El modelo indica las pérdidas para una zona urbana con la siguiente ecuación:

$$L\,(urbano)\,[dB] = 46,3{+}33,9{\cdot}\log(f_c){-}13,82{\cdot}\log(h_{tx}){-}a(h_{rx}){+}[44,99{-}6,55{\cdot}\log(h_{tx})]{\cdot}\log(d){+}k \quad Ec.(4.1)$$

donde: k es el factor de corrección para adecuar el modelo del canal a la frecuencia en la que opera, este factor puede ser:

- k = 0 dB para ciudades medianas y áreas suburbanas.
- k = 3 dB para centros metropolitanos.

El valor de

$$a(h_{rx})$$

se calcula con las siguientes fórmulas:

Para cuidades pequeñas y medianas:

$$a\,(h_{rx})\,[dB] = [1,1{\cdot}\log(f_c){-}0,7]{\cdot}h_{rx}{-}[1,56{\cdot}\log(f_c){-}0,8] \quad Ec.(4.2)$$

Para ciudades grandes:

$$a\,(h_{rx})\,[dB] = 3,2{\cdot}[\log(11,75{\cdot}h_{rx})]^2{-}4,97 \quad Ec.(4.3)$$

## 4.4 ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

Los primeros escenarios en los que se realizan las simulaciones de tráfico TCP entre el Host y las estaciones suscriptoras se componen de topologías que permiten variar el número de Estaciones Suscriptoras (SS) y el número de Estaciones de Conmutación(RS), la tasa media prevista para 4G es de 50 Mbps para Uplink, pero para un mejor aprovechamiento de las características del simulador y la plataforma en la que se ejecuta se ha elegido un valor proporcional para las simulaciones, siendo éste valor de 5 Mbps, así el ancho de banda total de la red será el doble es decir 10 Mbps. Se ajusta el parámetro de QoS con 5 Mbps y se configura también la altura de las antenas a utilizar, la altura de la antena de la estación suscriptora tiene 1,5 m de altura, valor típico para estaciones suscriptoras o usuarios, y el rango de altura para antenas transmisoras en el método COST 231-HATA es entre 30 y 200 metros para las cuales se ha escogido alturas mínimas promedio para antenas utilizadas en ambientes rurales, tal como indíca la tabla 4.1.

**Tabla 4.1: Altura de las Antenas**

| | | |
|---|---|---|
| Altura de Antena | TMR-BS | 30 m |
| | T-RS | 20 m |
| | T-MS | 1,5 m |

Finalmente se definen los parámetros de capa Física como muestra la tabla 4.2

**Tabla 4.2: Parámetros de Capa Física**

| | | |
|---|---|---|
| Potencia de Transmisión | TMR-BS | 43 dBm |
| | T-RS | 43 dBm |
| | T-MS | 35 dBm |
| Sensibilidad | TMR-BS | -96 dBm |
| | T-RS | -96 dBm |
| | T-MS | -96 dBm |

### 4.4.1 Throughput en función del Número de Estaciones Suscriptoras por Estación de Comutación

Como muestra la figura 4.3 se crea una topología sencilla donde se ubican quince estaciones suscriptoras distribuidas de forma randómica y hasta dos estaciones de

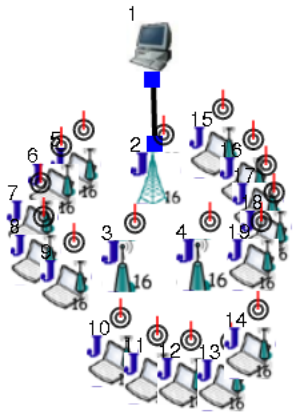

**Figura 4.3: Throughput basado en el número de SS**

conmutación posicionadas también de forma randómica, al igual que la mencionada topología se han creado cinco topologías más, en las cuales se varía el número de usuarios de la siguiente manera: 5, 10, 15, 20, 25 y 28, así con cada grupo de usuarios se varía el número de estaciones de conmutación de la siguiente manera: 0, 1 y 2, la variación del número de estaciones suscriptoras y estaciones de conmutación se ilustra en la tabla 4.3

**Tabla 4.3: Variación del Número de SS y RS**

| SS | RS |
|---|---|
| 5 | 0 |
| | 1 |
| | 2 |
| 10 | 0 |
| | 1 |
| | 2 |
| 15 | 0 |
| | 1 |
| | 2 |
| 20 | 0 |
| | 1 |
| | 2 |
| 25 | 0 |
| | 1 |
| | 2 |
| 28 | 0 |
| | 1 |

Los resultados que proporcionan las simulaciones descritas son debidamente recopilados, tabulados y posteriormente los datos son procesados y presentados en una figura la cual nos permitirá realizar el análisis respectivo.

### 4.4.2 Throughput en función del Número de Estaciones de Conmutación

**Figura 4.4: Throughput basado en el número de RS**

La figura 4.4 muestra una topología con veinte estaciones suscriptoras y hasta siete estaciones de conmutación, a continuación se crean veinte y seis topologías más, en las cuales se varía el número de estaciones de conmutación de la siguiente manera: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8, luego se varía el número de estaciones suscriptoras que se conectarán a las estaciones de conmutación de la siguiente manera: 10, 15 y 20, como se ilustra en la tabla 4.4.

**Tabla 4.4: Variación del Número de SS y RS**

| RS | SS |
|---|---|
| 0 | 10 |
| | 15 |
| | 20 |
| 1 | 10 |
| | 15 |
| | 20 |
| 2 | 10 |
| | 15 |
| | 20 |
| 3 | 10 |
| | 15 |
| | 20 |
| 4 | 10 |
| | 15 |
| | 20 |
| 5 | 10 |
| | 15 |
| | 20 |
| 6 | 10 |
| | 15 |
| | 20 |
| 7 | 10 |
| | 15 |
| | 20 |
| 8 | 10 |
| | 15 |
| | 20 |

Para los siguientes escenarios, se integran nuevos parámetros para la Capa Física PHY que proporcionen un alcance de cobertura de 4 km, suponiendo antenas omni-direccionales y tomando como base dos tipos de antenas principales de ganancias 15 dBi y 5 dBi, siendo la antena de 5 dBi la utilizada para las estaciones suscriptoras y la antena de 15 dBi para las estaciones de conmutación, y sus alturas son de 60 metros debido a que en el país la altura de las antenas de transmisión montadas sobre su torre no sobrepasa el valor mencionado, finalmente se ajusta el parámetro de potencia de transmisión similar a las condiciones anteriores entre 30 y 40 dBm, como muestra la tabla 4.5

**Tabla 4.5: Altura de las Antenas**

| | | |
|---|---|---|
| Altura de Antena | TMR-BS | 60 m |
| | T-RS | 60 m |
| | T-MS | 2 m |

Así los parámetros de la Capa Física PHY para el segundo grupo de simulaciones se indican en la tabla 4.6

**Tabla 4.6: Parámetros de Capa Física**

| | | |
|---|---|---|
| Potencia de Transmisión | TMR-BS | 40 dBm |
| | T-RS | 40 dBm |
| | T-MS | 30 dBm |
| Sensibilidad | TMR-BS | -83,251 dBm |
| | T-RS | -83,251 dBm |
| | T-MS | -73,251 dBm |

### 4.4.3 Throuhput en función del Número de Estaciones de Conmutación por cada Estación Base

En la presente sección de simulación se crea una serie de ocho simulaciones con el fin de obtener resultados del rendimiento (Throughput) de la red variando el número de estaciones de conmutación por cada estación base, la topología utilizada consta de una primera configuración de cuatro usuarios cada uno posicionados como muestra la figura

4.5 a una distancia de 4 km y posicionando las estaciones de conmutación a una cierta distancia entre mil y dos mil metros medidos desde la estación base, rango óptimo de distancia determinado en simulaciones que se presentan en la siguiente sección. Así se realizan simulaciones variando el número de estaciones de conmutación cada una con sus respectivas estaciones suscriptoras, agregando estaciones de conmutación como se muestra en la figura 4.6, para así obtener los resultados del número máximo de Estaciones de Conmutación en funcionamiento con las que se obtiene el mayor rendimiento.

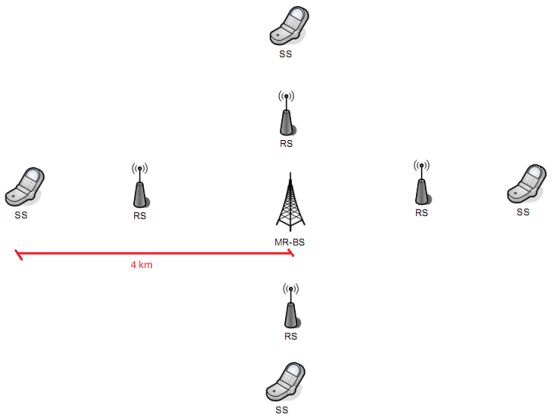


**Figura 4.5: Throughput en función del número de RS por cada BS**

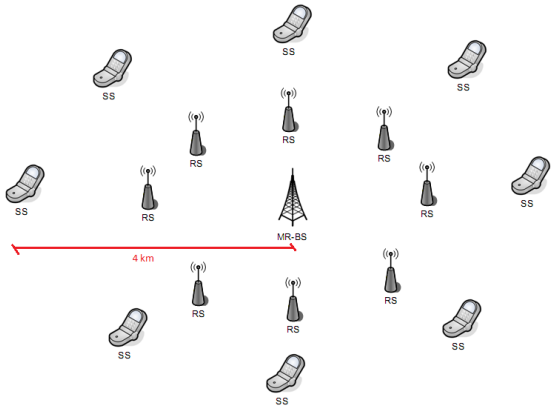


**Figura 4.6: Incremento del Throughput en porcentaje en función del número de RS**

### 4.4.4 Throughput en función de la distancia entre la Estación Base y las Estaciones de Conmutación

Para el análisis del rendimiento (Throughput) basado en la distancia entre la estación base y las estaciones de conmutación, se configura las topologías como muestran las figuras 4.7 y 4.8, donde se ubican las estaciones de conmutación a diferentes distancias dispuestas en un eje cartesiano, cada una de las estaciones suscriptoras establece conexión por medio de una estación de conmutación, con el fin de analizar qué estación suscriptora presenta una mayor tasa de transmisión y así determinar la posición óptima de una Estación de Conmutación respecto de la Estación Base.

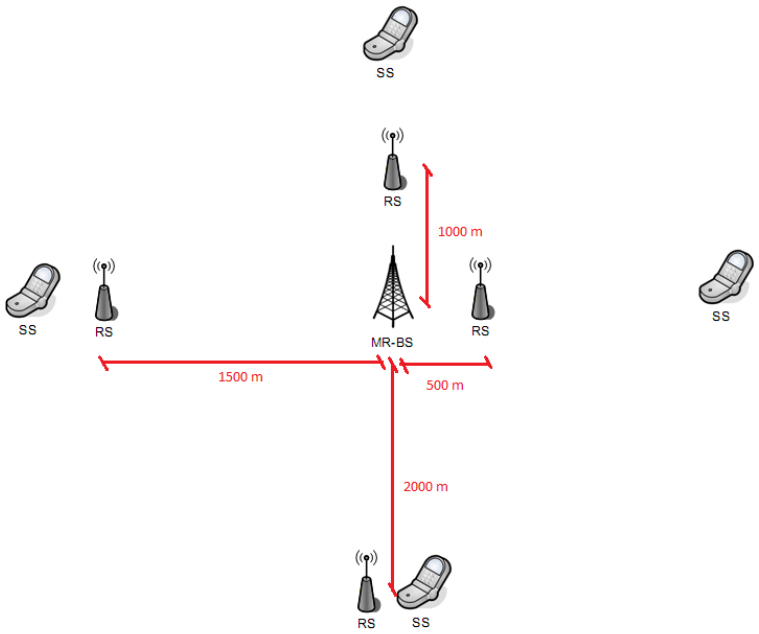


**Figura 4.7: Distancia óptima entre la BS y las RS**

Esta configuración pretende que los resultados que se obtengan de las simulaciones, dado que al análisis propuesto está basado en la tasa de transmisión en el canal ascendente (UL), sea un indicador con el cual sea posible determinar el incremento del throughput, y que además se tome como base para realizar futuras simulaciones ya que la posición de las estaciones de conmutación es un factor que influye en la variación del throughput de una red.

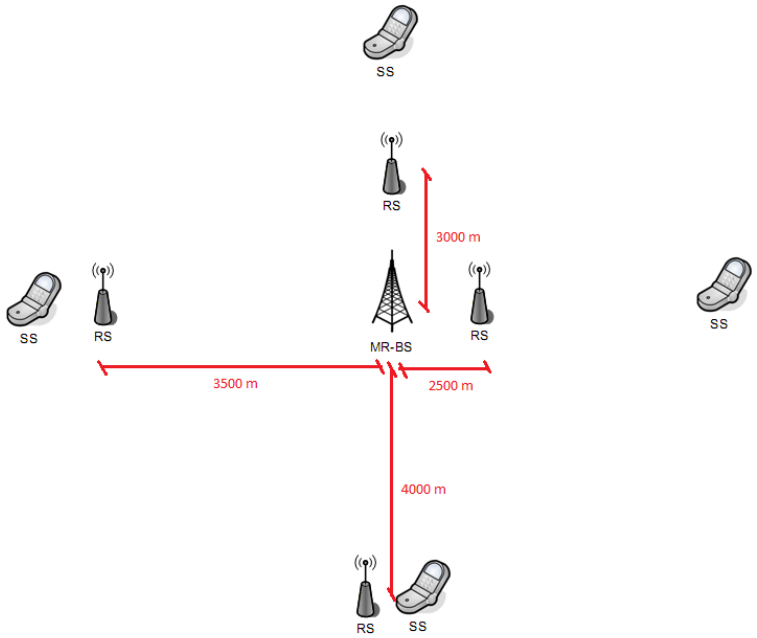


**Figura 4.8: Distancia óptima entre la BS y las RS**

En la sección final se configura una topología de red que consta de una Estación Base, una Estación de Conmutación y una Estación Suscriptora, se ajusta una trayectoria móvil por la cual la se mueve la estación móvil, se pretende obtener el throughput en el canal ascendente, el cual varía en función de la distancia, se asigna todo el ancho de banda es decir 10000 kbps de calidad de servicio, para asegurar todo el ancho de banda para UL y determinar el throughput total de la red para una estación móvil mientras se acerca y se aleja de la estación de conmutación.

### 4.4.5 Throughput en función de la distancia entre la Estación Base y la Estación Móvil

Para esta simulación con la cual se pretende determinar el throughput total de UL de la red mientras varía la distancia entre la Estación Base y la Estación Móvil. La configuración determinada consta de dos topologías, la primera consta de una Estación Base y una Estación Móvil separadas a 4 km, y una segunda topología, como muestra la figura 4.8, consta de una Estación Base, una Estación de Conmutación y una Estación Móvil , en ambas simulaciones se ajusta una trayectoria móvil de 4 km de distancia por la cual se moverá la estación móvil acercándose y alejándose de la estación base y la estación de conmutación respectivamente.

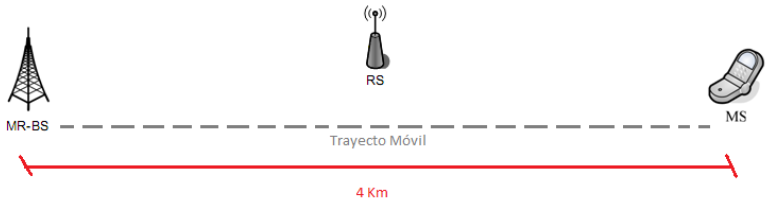


**Figura 4.9: Distancia entre la RS y la MS**

# Capítulo 5

# ANÁLISIS DE RESULTADOS

## 5.1 ANÁLISIS DE THROUGHPUT

Los resultados obtenidos de las simulaciones detalladas en el capítulo cuatro, han sido recopilados y tabulados para el análisis del rendimiento del estándar IEEE 802.16j.

Las simulaciones fueron realizadas utilizando la estructura de trama basada en el modo de conmutación transparente, por lo cual los resultados obtenidos se basan en el análisis de la tasa de transmisión a medida que aumenta el número de estaciones de conmutación en funcionamiento, esto tiene como propósito el aumento proporcional de estaciones móviles con un rendimiento óptimo de la red. Los siguientes resultados presentan las comparaciones correspondientes a la variación del número de Estaciones Suscriptoras(SS) o Estaciones Móviles(MS), variación del número de Estaciones de Conmutación(RS), y finalmente la variación de distancia entre la Estación Móvil(MS) y la Estación Base(BS) y entre la Estación Base(BS) y la Estación de Conmutación(RS).

### 5.1.1 Throughput en función del Número de Estaciones Suscriptoras por Estación de Comutación

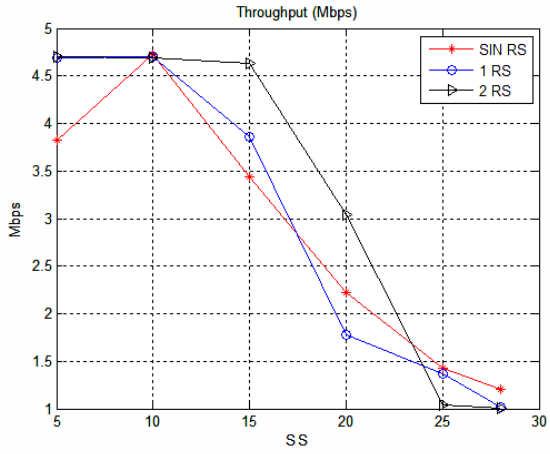


**Figura 5.1: Throughput en función del número de SS**

La figura 5.1 muestra el Throughput de la red en Mbps, en función del número de estaciones suscriptoras, parametrizado por el número de Estaciones de Conmutación, se puede observar que todas las curvas convergen en un punto cuando la simulación se ejecuta con diez estaciones suscriptoras, presentando un máximo de 4,7 Mbps, lo que representa una tasa de transmisión del 94%, a partir de diez estaciones suscriptoras, todas las curvas decrecen mientras el número de usuarios aumenta. La curva que representa a la simulación sin estaciones de conmutación tiene un decremeto notablemente mayor que las curvas que representan a las simulaciones en las cuales ya se utilizan una y dos estaciones de conmutación respectivamente. La curva que representa a la simulación con dos estaciones de conmutación y la más estable.

La figura 5.2 presenta la comparación de incremento de throughput en porcentaje, para lo cual se utilizó la Ecuación 5.1.

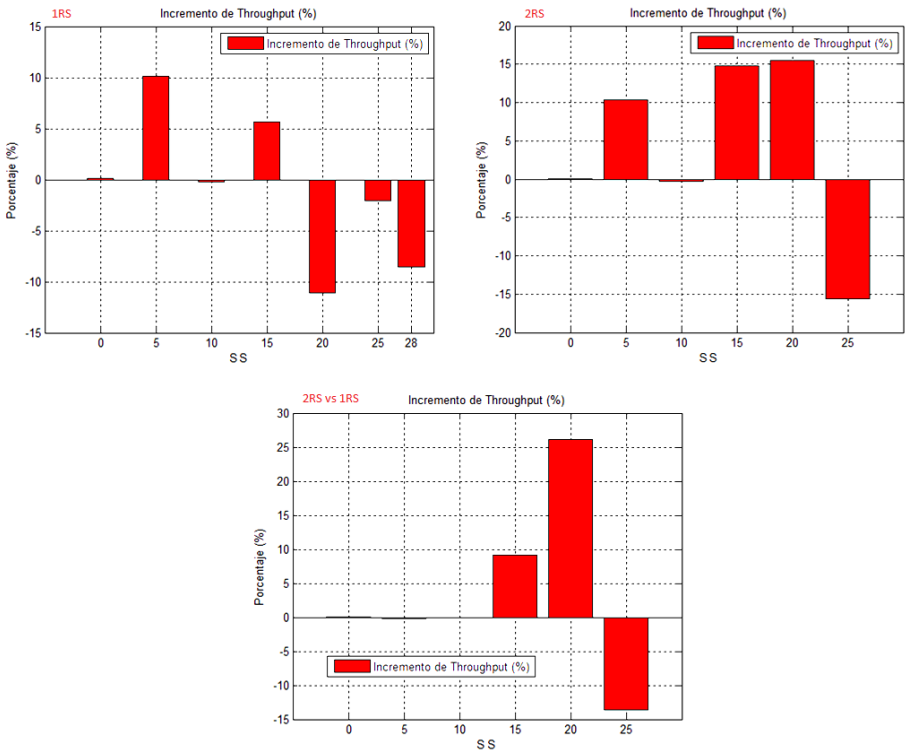


**Figura 5.2: Incremento de Throughput en función del número de SS**

$$\frac{Valor\,final - Valor inicial}{Valor\,final + Valor inicial} \times 100\% \qquad Ec.(5.1)$$

La figura 5.2 muestra en un primer plano el incremento de throughput cuando entra en funcionamiento una estación de conmutación frente a cuando no se encuentra en funcionamiento ninguna estación de conmutación, presentando el máximo incremento para cinco estaciones suscriptoras, siendo el 10,2 %.

En un segundo plano la figura muestra el incremento de throughput cuando entran en funcionamiento dos estaciones de conmutación frente a cuando no se encuentra en funcionamiento ninguna estación de conmutación, presentando el máximo incremento para veinte estaciones suscriptoras, siendo el 15,5 %.

Finalmente en un tercer plano la figura muestra la comparación del incremento del throughput cuando se encuentran dos estaciones de conmutación en funcionamiento frente a cuando se encuentra una sola estación de conmutación en funcionamiento, la misma que demuestra un incremento notable del 26% al utilizar dos estaciones de conmutación, siendo entonces, ésta la mejor condición.

### 5.1.2 Throughput en función del número de Estaciones de Conmutación

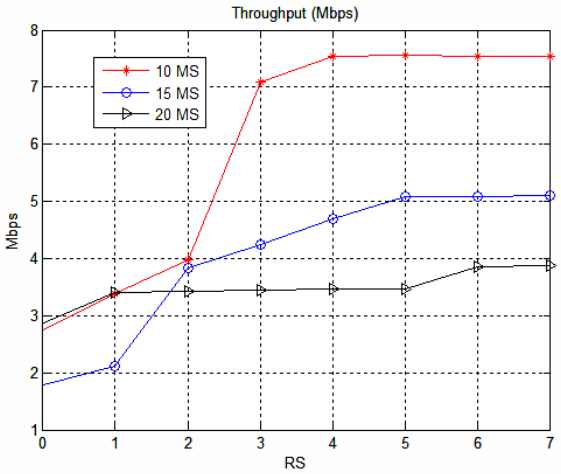


**Figura 5.3: Throughput en función del número de RS**

La figura 5.3 muestra la variación del throughput en función del número de Estaciones de Conmutación, parametrizada por el número de usuarios con la cual se realizó cada simulación. La curva que representa a la simulación con diez usuarios presenta una mejora notable en la tasa de transmisión, donde el throughput aumenta hasta un valor máximo de 7,5 Mbps para el canal ascendente estabilizándose a partir de cuatro estaciones de conmutación. En cada curva se puede observar que existe un aumento del throughput mientras entran en funcionamiento más estaciones de conmutación.

Los resultados obtenidos a partir de los datos que entrega el simulador determi-

nan que el throughput de la red aumenta mientras aumenta el número de estaciones de conmutación en funcionamiento y con un máximo de veinte estaciones suscriptoras se puede asegurar 3,8 Mbps para transmisión en UL cuando entran en funcionamiento siete estaciones de conmutación, pero la figura sugiere que el throughput tiende a incrementar mientras aumenta el número de estaciones de conmutación en funcionamiento, lo cual antecede a un análisis posterior en el cual se determinará el número máximo de estaciones de conmutación que pueden funcionar optimamente con cada estación base.

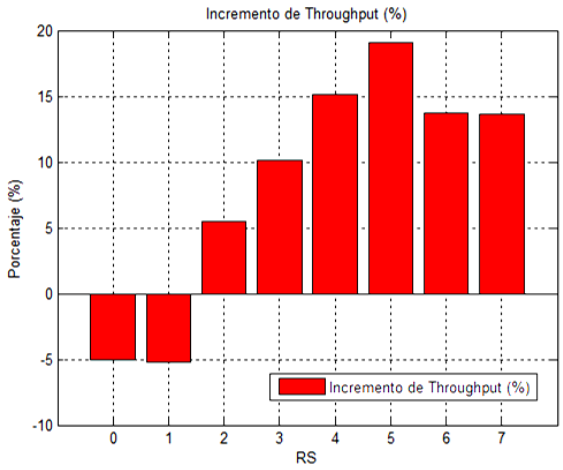


**Figura 5.4: Incremento de Throughput 15 SS vs 20 SS**

La figura 5.4 muestra la comparación del número de estaciones suscriptoras en operación utilizando el porcentaje de incremento de throughput, se ha comparado quince estaciones suscriptoras frente a veinte estaciones suscriptoras, el análisis muestra que la mejor condición del número de estaciones suscriptoras en operación, es de quince estaciones con un incremento del 19% de throughput.

### 5.1.3 Throughput en función del número de Estaciones de Conmutación por cada Estación Base

En la figura 5.5 correspondiente al análisis del throughput en función del número máximo de Estaciones de Conmutación por cada Estación Base, muestra la posibilidad de asegurar hasta un máximo de 4,6 Mbps en promedio lo que representa un 92% de tasa de transmisión para UL cuando se encuentran en funcionamiento cinco estaciones de conmutación.

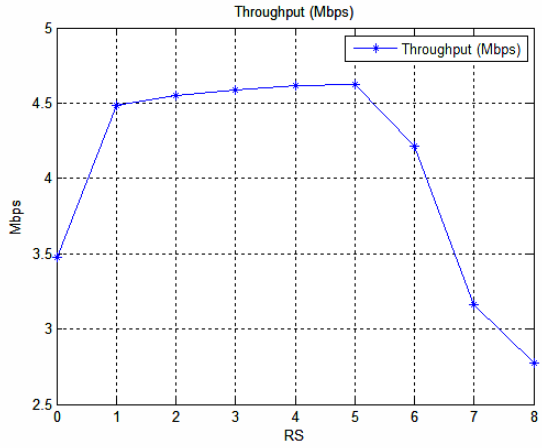


**Figura 5.5: Throughput en función del número de RS por cada BS**

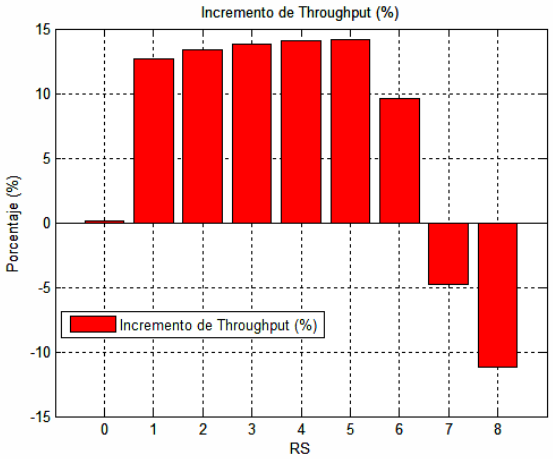


**Figura 5.6: Incremento del Throughput en porcentaje en función del número de Estaciones de Conmutación**

Utilizando la ecuación 5.1 se determina que el throughput de la red tiene un 15 % de incremento en la tasa de transmisión de UL con un máximo de cinco estaciones de conmutación antes de que exista un decremento en la tasa de transmisión, como se muestra en la figura 5.6, por lo tanto el número óptimo de estaciones de conmutación para asegurar un rendimiento máximo de la red es de cinco.

### 5.1.4 Throughput en función de la distancia entre la Estación Base y las Estaciones de Conmutación

La figura 5.7 determina que existe un rango de distancia en donde el throughput se mantiene constante con un valor de 4,68 Mbps, dicho rango va desde los mil metros hasta los dos mil metros respecto de la estación base.

Este rango de distancia es considerado en la simulación presentada en las figuras

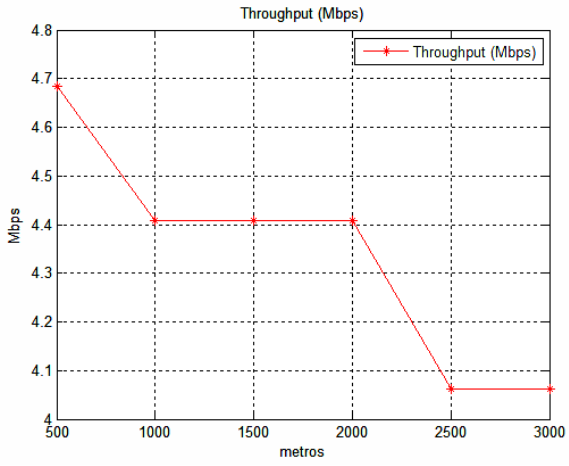


**Figura 5.7: Distancia óptima entre la BS y las RS**

4.5 y 4.6 detalladas en el capítulo anterior, con la cual se obtienen los resultados del número máximo de estaciones de conmutación que pueden entrar en funcionamiento para un throughput máximo.

Utilizando el método de propagación COST 231-HATA se obtiene la distancia óptima de la RS mediante el cálculo de la Potencia de Recepción, como se muestra en la tabla 5.1:

**Tabla 5.1: Potencia de Recepción vs Distancia**

| Distancia [m] | Potencia de Recepción [dBm] |
|---|---|
| 500 | -44,67 |
| 1000 | -54,68 |
| 1500 | -60,53 |
| 2000 | -64,69 |
| 2500 | -67,91 |
| 3000 | -70,54 |
| 3500 | -72,77 |
| 4000 | -74,70 |

Mediante los resultados de Potencia de Recepción, la tabla 5.1 sugiere que se podría operar hasta una distancia de 3000 metros, idealmente ya que la sensibilidad de los equipos de las estaciones suscriptoras son de -73,251, pero tomando en cuenta los resultados obtenidos en la simulación se puede concluir que el rango de distancia donde

se puede asegurar un tasa de transmisión constante se encuentra en el intervalo entre los mil y dos mil metros de distancia medidos desde la Estación Base.

### 5.1.5 Basado en la distancia entre la Estación de Base y la Estación Móvil

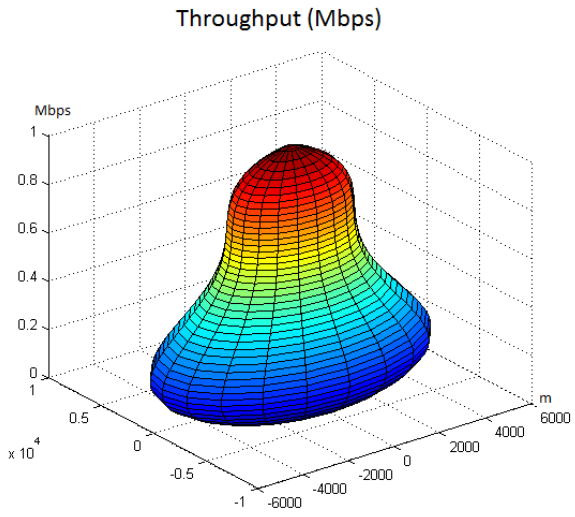


**Figura 5.8: Throughput basado en la distancia de la MS hacia la BS sin RS**

En la parte final de este análisis se puede observar las figuras en tercera dimensión y la comparación de los resultados de las simulaciones, donde no entra en funcionamiento ninguna estación de conmutación, como se muestra en la figura 5.8, en la cual se observa un lóbulo que representa a la cobertura de la red en función de la distancia, así la figura 5.9 determina que en la simulación donde entra en funcionamiento la estación de conmutación, el throughput de la red presenta un incremento, mostrando un lóbulo de cobertura más amplio en la parte superior.

La gama de colores representa el Throughput, siendo el nivel más alto de color rojo que representa al uno, el cual es equivalente a 10 Mbps, debido a que los resultados son sometidos a un proceso de normalización previo, tal como se indica en la figura 5.10

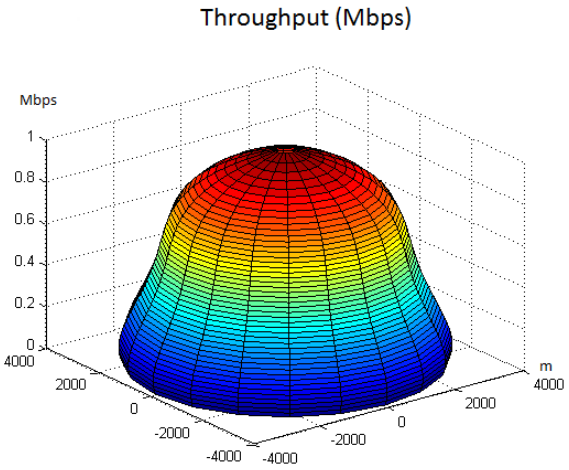


**Figura 5.9: Throughput basado en la distancia de la MS hacia la BS con RS**

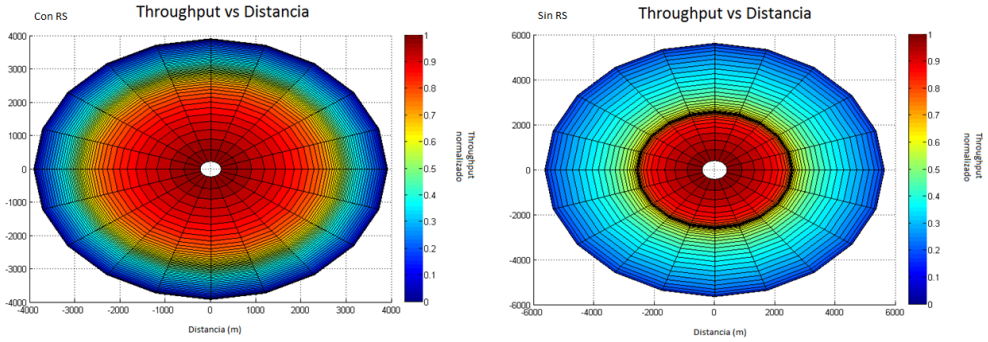


**Figura 5.10: Comparación del Throughput vs Distancia con y sin RS**

En la figura 5.10 se puede ver la diferencia entre los resultados de la primera simulación donde no entra en funcionamiento la estación de conmutación, con la segunda en donde entra en funcionamiento la estación de conmutación, donde el resultado muestra una tasa de transmisión más alta, representada con un color rojo intenso, dicha zona de color rojo intenso se extiende hasta los 3000 m, mientras que cuando no está en funcionamiento la estación de conmutación el color rojo intenso se extiende casi hasta los los 2000 m.

Se puede destacar que al entrar en funcionamiento el elemento de conmutación a una red WiMAX basada en el Estándar IEEE 802.16j, se puede asegurar un ancho de banda mayor para equipos o estaciones móviles que se encuentren dentro del perímetro óptimo el cual es de 3000 m.

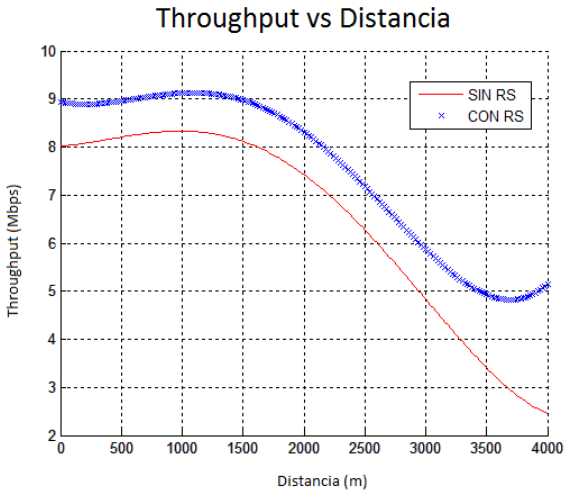


**Figura 5.11: Throughput vs Distancia con y sin RS**

Finalmente la figura 5.11 muestra como el throughput aumenta cuando entra en funcionamiento una estación de conmutación, con la cual se puede asegurar un throughput máximo de 9,2 Mbps en promedio para UL, extendiéndose 1500 metros de radio medidos desde la estación base, mientras que cuando se trabaja sin estación de conmutación, en la que se puede asegurar un throughput de 8,3 Mbps promedio hasta un máximo de 1300 metros, lo que representa un 5,14 % de incremento del throughput.

# Capítulo 6

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## 6.1 CONCLUSIONES

1. La estructura de trama que define el estándar IEEE 802.16j está dividida en una subtrama para UL y una subtrama para DL y a su vez las subtramas en zonas para acceso y transmisión, por lo tanto la estructura de múltiples tramas es una mejora del estándar que refleja un incremento en el throughput ya que la estación de conmutación (RS) será asignada para transmitir o recibir en diferentes tramas lo que significa menor procesamiento para la RS al interconectar segmentos de red.

2. Se ha determinado que el throughput de la red aumenta mientras incrementa el número de Estaciones de Conmutación (RS) en funcionamiento, posibilitando así, asegurar un 90% en la tasa de transmisión de UL para ambientes urbanos, denotando que a nivel de capa MAC, existe una mejora significativa referente a la reducción de mensajes de control, lo que se ve reflejado en el buen rendimiento de la capa MAC del estándar, con lo que los recursos de la red no se subutilizarían y se evitarían desbordamientos.

3. El estándar IEEE 802.16j define para la capa MAC dos esquemas de transmisión, el esquema basado en TÚNEL y el esquema basado en Identificador de Conexión (CID), los mismos que intentan maximizar la eficiencia del sistema agregando tráfico donde sea posible e incrementan la eficiencia del sistema al menorar la duración de la trama e impedir un desbordamiento lo que simplifica la administración del flujo de datos.

4. Se ha determinado el rango de distancia óptimo para el posicionamiento de las Estaciones de Conmutación (RS) respecto de la Estación Base (BS), el cual va desde los mil metros hasta los dos mil metros, para asegurar la tasa máxima de transmisión y con el número máximo de RS.

5. El análisis del throughput basado en el número máximo de Estaciones de Conmutación (RS) admitidas por cada Estación Base (BS), muestra la posibilidad de asegurar hasta un 92 % en promedio de tasa de transmisión para UL cuando se encuentran en funcionamiento un máximo de cinco Estaciones de Conmutación (RS).

6. El análisis del escenario donde se comparan quince estaciones suscriptoras (SS) frente a veinte estaciones suscriptoras en operación, utilizando el porcentaje de incremento de throughput, muestra que la mejor condición del número de estaciones suscriptoras en operación, es de quince estaciones obteniendose un incremento del 19 % de throughput.

7. Se ha determinado que el throughput de la red tiene un 15 % de incremento de la tasa de transmisión con un máximo de cinco estaciones de conmutación (RS) en funcionamiento y un número máximo de quince estaciones suscriptoras (SS).

8. Se ha analizado el throughput de una red basada en el estándar IEEE 802.16j, aplicando movilidad, demostrando un incremento en througput de 5,14 % total de la red para una estación móvil cuando entra en funcionamiento tan solo una Estación de Conmutación, se obtiene un máximo de 9,2 Mbps lo que representa una tasa de transmisión de 92 %.

9. El simulador NCTUns gracias a su interface gráfica amigable al usuario, su corto tiempo de aprendizaje, soporte para UGS como el mecanismo de QoS y el soporte para el modo de conmutación transparente especiicado en el estándar IEEE 802.16j, ha proporcionado los resultados esperados para la evaluación del desempeño del estándar.

10. El análisis del incremento de la capacidad de una red WiMAX IEEE 802.16j basada en el modo de conmutación transparente muestra resultados satisfactorios para ambientes urbanos, donde se espera un gran número de estaciones suscriptoras, por lo tanto se espera que el modo de conmutación no-transparente sea el óptimo para ambientes rurales.

11. Los resultados obtenidos con la utilización del modelo de propagación COST 231-HATA, cumplen con las condiciones requeridas para un ambiente urbano, identificados en términos de potencia y frecuencia utilizada.

## 6.2 RECOMENDACIONES

1. Se recomienda un estudio basado en el presente proyecto con el fin de determinar el control de la asignación del número de portadoras soportadas por el estándar IEEE 802.16j para cada estación suscriptora y su importancia en función del throughput.

2. Es recomendable analizar el desempeño del estándar IEEE 802.16j basado en el modo de conmutación no transparente, y que el mismo se realice para ambientes rurales que es donde se necesita un incremento en cobertura, ya que este proyecto se enfoca en el análisis del incremento de la capacidad de la red WiMAX.

3. Se recomienda realizar un estudio complementario del desempeño del estándar IEEE 802.16j para DL, así determinar la relación DL/UL óptima para asegurar el máximo rendimiento de la red.

4. Se recomienda el uso del simulador ns-2 ya que es un simulador de redes orientado a objetos que posee planificador de eventos, componentes de red y a pesar de que se necesita crear un módulo para el soporte del estándar IEEE 802.16j, el ns-2 es utilizado para aplicaciones script y es una de las más antiguas herramientas de simulación, el ns-2 se ha convertido en un icono de su área, esto ha llevado a que sea ampliamente utilizado.

5. Se recomienda también realizar un estudio donde se diferencien los esquemas de transmisión TUNNEL y CID, con el fin de determinar el impácto de su utilización para el desempeño de una red WiMAX basada en el estándar IEEE 802.16j.

6. Es recomendable utilizar el modelo de propagación SUI, ya que es un modelo que contempla varios rangos de frecuencia, pérdidas por trayectoria y clasifica el terreno en trers clases, donde se diferencian dolinas pequeñas con densidad de árboles moderada y alta, colinas grandes y finalmente una superficie plana con baja densidad de árboles, formando un total de seis escenarios, dicha clasificación genera un método más práctico para la estimación de pérdidas por multitrayecto.

# Bibliografía


[1] Juan Miguel Steller Solórzano,"WiMAX Móvil", Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería, Oct 2006

[2] Alex Eduardo Yánez Castellanos,"Diseño De Una Red Wimax (IEEE 802.16e) Que Brinde Servicios De Voz, Video Y Datos En El Sector De Sangolquí", Escuela Politécnica del Ejército ESPE, Sep 2008

[3] IEEE, Esatándar IEEE 802.16-2009, "IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems", May 2009

[4] IEEE, Esatándar IEEE 802.16j, "IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems,Amendment 1: Multiple Relay Specification", Jun 2009

[5] Junkai Zhang,Suili Feng,We Ye,Hongcheng Zhuang,MAC Performance Evaluation of IEEE 802.16j,Dept. of Electron. Eng., Univ. de Tecnología, China Guangzhou,20-22 Dic 2008.

[6] Vasken Genc, Sean Murphy, john Murphy, "Performance Analysus of transparent Relays", University College Dublin School of computer science and informatics, Abr 2008.

[7] Vasken Genc, Sean Murphy, Yang Yu, and John Murphy, "IEEE 802.16j Relay-Rased Wireless Access Networks: an overview", University College Dublin School of computer science and informatics, Oct 2008.

[8] Mohammad Azizul Hasan, "Performance Evaluation of WiMAX/IEEE 802.16 OFDM Physical Layer", HELSINKI Universidad de Ttecnología, Departmento de Eléctrica y Comunicaciones, Laboratorio de Ingeniería de Comunicaciones,Jun 2007

[9] Vesa Hytönen, "Handover Performance in IEEE802.16 mobile networks", Universidad de Jyväskylä Departmento de Información Tecnológica y Matemática, Dic 2009

[10] http://blog.ask4itsolutions.com/2009/06/19/login-as-a-root-from-gui-fedora-11/, 19 de Junio e 2009, 20 de Noviembre de 2009

[11] Shie-Yuan Wang, Hsin-Yu Chen, and Shih-Wei Chuang, "NCTUns Tool for IEEE 802.16j Mobile WiMAX Relay Network Simulations", Department of Computer Science National Chiao Tung University, Hsinchu, Taiwan, Sept 2009

[12] Prof. Shie-Yuan Wang, Chih-Liang Chou, and Chih-Che Lin, "The GUI User Manual for the NCTUns 6.0 Network Simulator and Emulator", Departamento de Ciencias de Computación, Universidad National Chiao Tung, Taiwan, Sept 2009.

[13] Eugene Visotsky, Junjik Bae, Roger Peterson, Randall Berry, and Michael L. Honig, *On the Uplink Capacity of an 802.16j System*, WCNC 2008, 802.16j

[14] Bin Lin Pin-Han Ho Liang-Liang Xie Xuemin Shen, *Relay Station Placement in IEEE 802.16j Dual-Relay MMR Networks*,Beijing, 19-23 May 2008.

[15] Yang Yu, Seán Murphy, Liam Murphy , *Planning Base Station and Relay Station Locations in IEEE 802.16j Multi-hop Relay Networks*,Beijing,Department of Computer Science and Informatics University College Dublin, Ireland

# Apéndice A

# ANEXOS

**SISTEMA OPERATIVO FEDORA 11 (Linux)**

**Fedora 11** El Proyecto Fedora fue creado a finales del 2003 cuando Red Hat Linux fue descontinuado.Red Hat Enterprise Linux (RHEL) continúa siendo la distribución Linux oficialmente soportada por Red Hat, mientras que Fedora es un proyecto comunitario. La rama de liberaciones de RHEL derivan de las versiones de Fedora.

El nombre de Fedora deriva de Fedora Linux, un proyecto creado por voluntarios que proveía software adicional a la distribución Red Hat Linux, y del característico sombrero Fedora usado en el logotipo de la distribución comercial. Fedora Linux fue finalmente absorbido en el Proyecto Fedora. Fedora es una distribución Linux para propósitos generales basada en Red Hat Package Manager, que se mantiene gracias a una comunidad internacional de ingenieros, diseñadores gráficos y usuarios que informan de fallos y prueban nuevas tecnologías. Cuenta con el respaldo y la promoción de Red Hat.

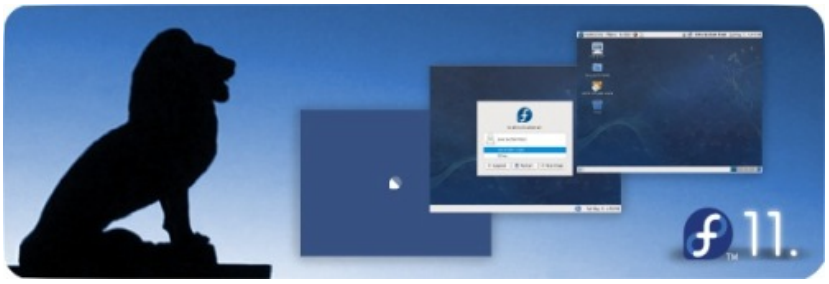

**Figura A.1: Fedora 11**

Fedora 11, cuyo nombre en código es "Leonidas", es la última versión estable, liberada el 9 de junio de 2009, se han agregado algunas mejoras y características importantes. Fedora 11 ya soporta Ext4 como sistema de ficheros por defecto, el cual mejora considerablemente los tiempos de acceso al disco y contribuye para conseguir la meta del arranque completo del sistema en 20 segundos. Nouveau es el nuevo driver

escogido para las tarjetas gráficas NVidia, se ha mejorado el soporte para dispositivos de lectura de huellas dactilares, el control del volumen se ha modificado para hacerlo más cómodo y se ha incorporado la integración de PolicyKit y el servicio CUPS.

**INSTALACIÓN DE NCTUns 6.0** La versión más reciente de NCTUns, la versión 6.0 se ejecuta únicamente en un sistema Linux de Fedora 11, por ésta razón es necesario la instalación previa de Fedora 11 en un ordenador.

Software Fedora 11 Linux (Compilador gcc instalado), Interfaz gráfico para linux KDE-GNU (recomendado), Privilegios de administrador (ROOT), Interprete de ordenes bash/tcsh para GNU (Shell). **Hardware** Memoria RAM mínima de 256 Mb o mayor, procesador de 1.6 GHz o mayor, 200 MB de espacio libre en el disco o más, Doble núcleo de 32 bits, solo se usara uno de ellos (Para procesadores de 64 bits se debe ejecutar el sistema Fedora en el modo de 32 bits) **Previo a la instalacion** Todo el proceso de instalación se debe realizar en el modo de administrador de LINUX(ROOT), así se tendrá todos los permisos necesarios. Se debe tomar en cuenta que ingresar en modo root o administrador es peligroso ya que se puede eliminar algún archivo de vital importancia para sustentar al sistema y es más peligroso aún usarlo en su interfáz gráfica GUI. En este caso si se sigue los pasos correctamente no hay lugar a ocasionar ningún tipo de daño, éstos se detallan a continuación:

1. Primero ingresar como usuario normal y editar los archivos /etc/pam.d/gdm y /etc/pam.d/gdm-password.

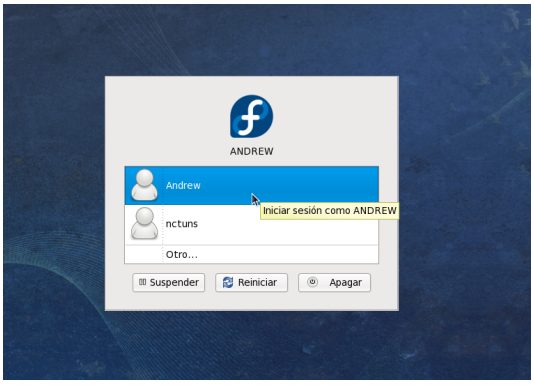


**Figura A.2: GUI de Usuario Normal**

2. Abrir una ventana de terminal; Aplicaciones, Herramientas del sistema, terminal.
3. Escribir en el terminal la dirección del archivo como se muestra en la figura.

**Figura A.3: Directorio de archivo gdm**

4. Para habilitar el ingreso a Fedora 11 en la interfaz gráfica se debe agregar en la segunda línea el signo numeral en la segunda línea del archivo gdm tal como se muestra en la figura 3.7

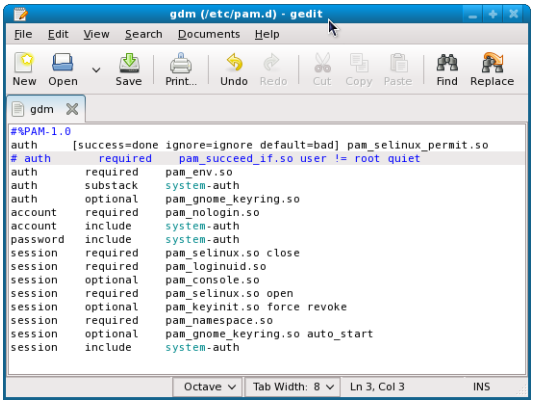


**Figura A.4: Edición del archivo gdm**

5. A continuación se debe agregar en la segunda figura el signo numeral en la segunda línea del archivo gdm-password tal como se muestra en las figuras 3.8 y 3.9

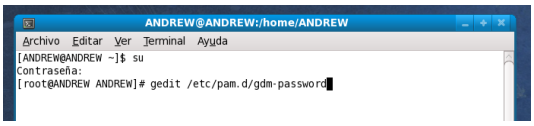


**Figura A.5: Edición del archivo gdm-password**

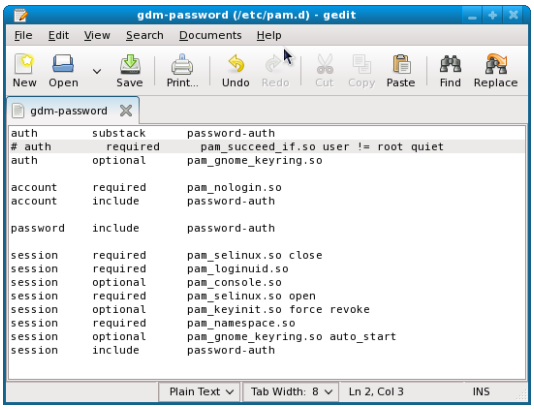


**Figura A.6: Edición del archivo gdm-password**

Para finalizar se deben guardar los cambios realizados y reiniciar el sistema, luego se debe ingresar digitando root y a continuación la contraseña de administrador root.

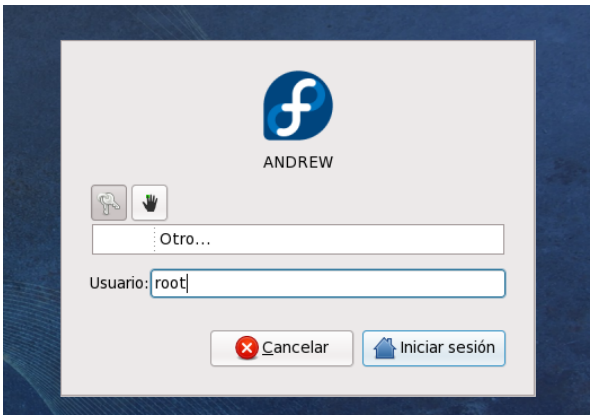


**Figura A.7: Ingreso en modo root con GUI**

Ya en el modo root se procede a descargar los paquetes necesarios desde internet para evitar errores durante la instalación del simulador. El gestor de paquetes utilizado fue Yellow dog Updater, Modified (YUM). En una ventana de terminal se escribe las siguientes líneas de comando:

**yum install gcc gcc-c++**

**yum install xinetd rsh-server**

**yum install readline-devel**

Para continuar con la instalación de NCTUns una vez descargado los paquetes necesarios se procede a descomprimir la carpeta donde se encuentra el instalador del NCTUNS, ubicándose en el directorio del mismo y escribiendo las siguiente línea de comando:

tar -xzf NCTUns-allinone-linux-2.6.28.9-f11.20090908.tar.gz

Una vez descomprimida la carpeta que contiene todos los archivos se procede a ejecutar la aplicación de instalación mediante el siguiente comando:

./install.sh

Mientras se ejecuta la instalación aparecerán unas preguntas, para las cuales responderemos SI a todo ya que de esa manera se deshabilitará el SELinux, se configurarán las variables de entorno necesarias para la ejecución del NCTUNS 6.0 y se creará un kernel por defecto para nctuns.

En caso de que se despluiegue el aviso del siguiente error, mostrado en la figura 3.11:

El siguiente paso es ir a la carpeta descomprimida e ingresar a la carpeta con el nombre RPMS y escribir el siguiente comando como se muestra en la siguiente figura:

**Figura A.8: Mensaje de error**

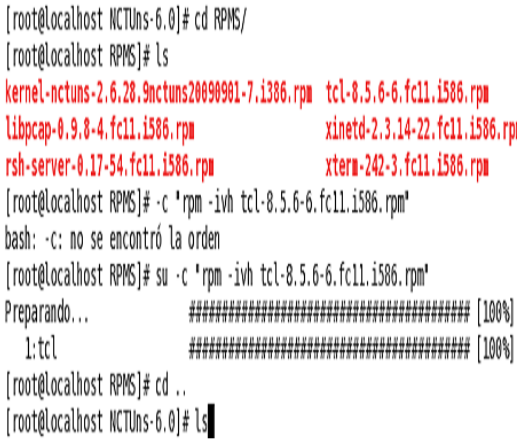


**Figura A.9: Corrección de error**

Luego de regresar a la carpeta principal NCTUNS-6.0 reiniciar la instalación con el comando

./install.sh

A continuación el sistema se reiniciará y aparecerá un menú grub con todos los kernel instalados, como se muestra en la figura 3.13

Se debe elegir el kernel correspondiente al NCTUNS creado recientemente, y el usuario tenrá el nombre por defecto (nctuns) y contraseña por defecto (nctuns)

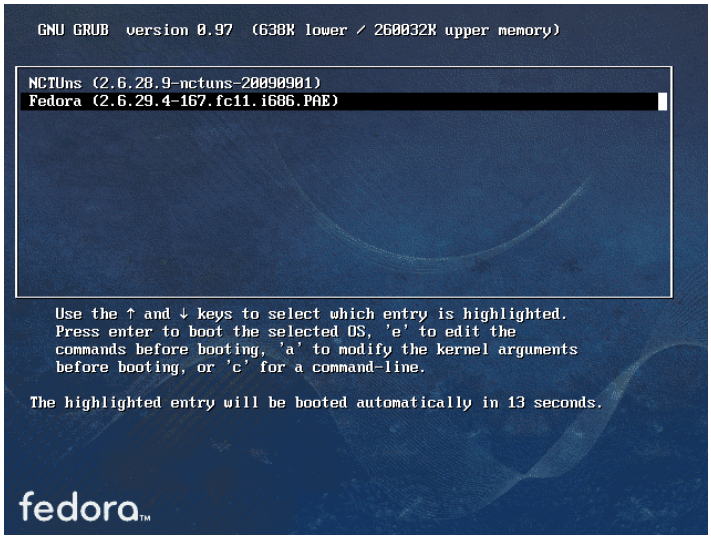


**Figura A.10: Menú Grub**

**Configuraciones previas** Antes de la ejecución del simulador se debe realizar algunas configuraciones previas, comenzando por limpiar todas las configuraciones de las IP en el firewall en el caso de tenerlas, con el fin de obtener el correcto uso de los sockets desviados del kernel, los cuales son usados en simulaciones relacionadas a Mobile IP.

Para observar el estado del firewall y sus configuraciones se puede usar la siguiente línea de comando:

iptables -L

Para limpiar todas las configuraciones del firewall se pone:

iptables -F

Y para detener todos los servicios del iptables:

service iptable stop

```
[root@localhost /]# iptables -L
Chain INPUT (policy ACCEPT)
target     prot opt source               destination
ACCEPT     all  --  anywhere             anywhere            state RELATED,ESTAB
LISHED
ACCEPT     icmp --  anywhere             anywhere
ACCEPT     all  --  anywhere             anywhere
ACCEPT     tcp  --  anywhere             anywhere            state NEW tcp dpt:s
sh
REJECT     all  --  anywhere             anywhere            reject-with icmp-ho
st-prohibited

Chain FORWARD (policy ACCEPT)
target     prot opt source               destination
REJECT     all  --  anywhere             anywhere            reject-with icmp-ho
st-prohibited

Chain OUTPUT (policy ACCEPT)
target     prot opt source               destination
[root@localhost /]# iptables -F
[root@localhost /]# service iptables stop
iptables: Flushing firewall rules:                         [  OK  ]
iptables: Setting chains to policy ACCEPT: filter          [  OK  ]
iptables: Unloading modules:                               [  OK  ]
[root@localhost /]#
```

**Figura A.11: Configuracion iptables**

Otra configuración para trabajar con NCTUns es deshabilitar el SELinux, en Fedora esta opción por defecto se encuentra activada, es posible deshabiliralo durante la instalación del simulador o se puede deshabilitar mediante líneas de comando, de la siguiente manera:

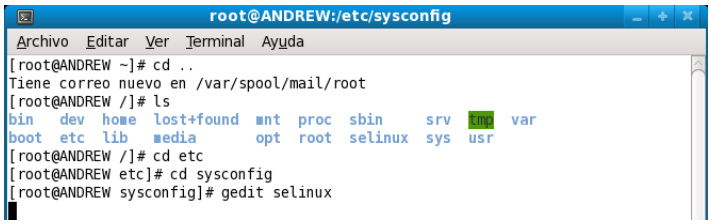


**Figura A.12: Directorio SELinux**

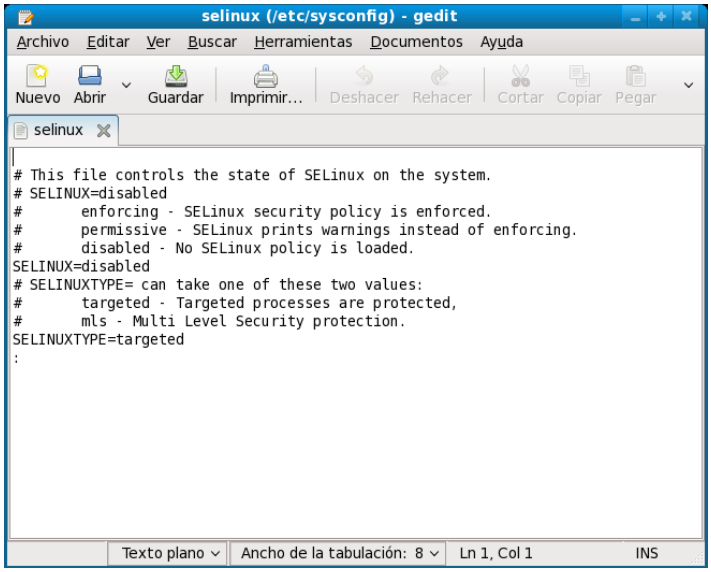


**Figura A.13: Edición de SELinux**

Para evitar errores al ejecutar el programa dispatcher se deben agregar las siguientes líneas para configurar las variables de entorno en los archivos bashrc y cshrc como muestra la figura:

**Variable bashrc**

Al final de este archivo luego de habilitar el ingreso de texto se deberá poner lo indicado en la figura:

**Figura A.14: Directorio Bashrc**

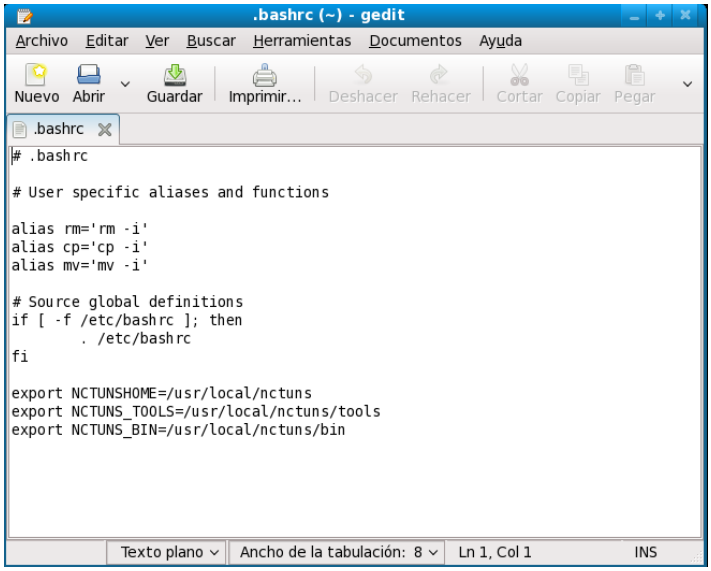


**Figura A.15: Variable bashrc**

### Variable cshrc

De la misma manera para esta variable se deberá agregar las siguientes líneas al final del texto:

**Figura A.16: Directorio Cshrc**

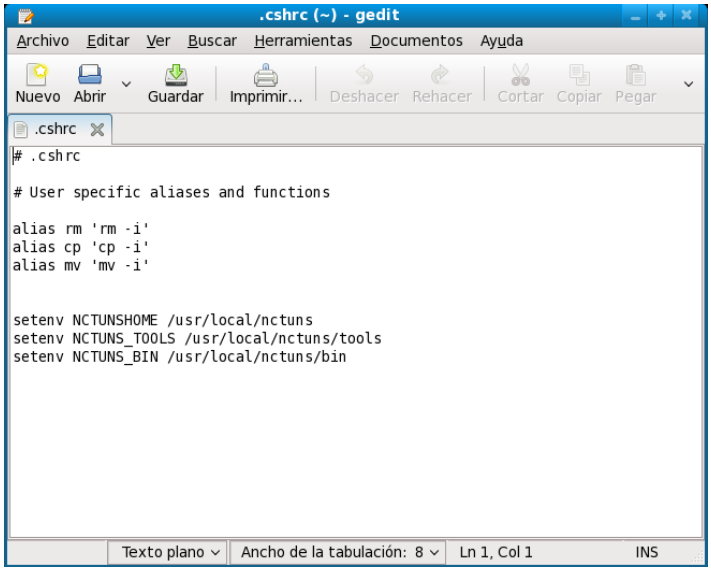


**Figura A.17: Variable cshrc**

Para finalizar se debe reiniciar el sistema para que los cambios hagan efecto.

**Ejecución** Para ejecutar el simulador, el cual se ejecuta desde terminal y por línea de comando, se deben abrir tres terminales y en cada uno se ejecutan diferentes programas en un orden determinado para abrir el simulador:

**Terminal 1: ./dispatcher**

**Terminal 2: ./coordinator**

**Terminal 3: ./nctunsclient**

A continuación se muestra cada uno de estos ejecutados en los terminales:

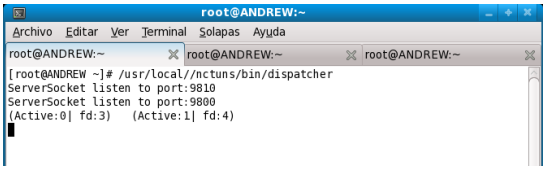


**Figura A.18: Dispatcher**

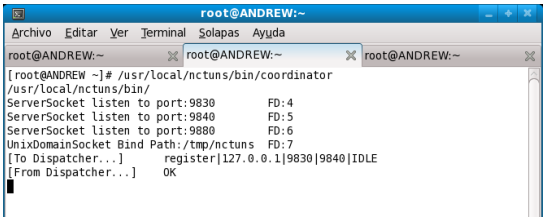


**Figura A.19: Coordinator**

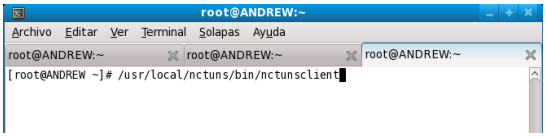


**Figura A.20: Nctunsclient**

Luego de realizar los pasos indicados finalmente el software NCTUns está listo para trabajar.

FECHA DE ENTREGA:_____

_____

Sr. Andrés Moscoso

**AUTOR**

_____

Ing. Gonzalo Olmedo

**DIRECTOR DE CARRERA DE INGENIERIA EN ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES**