

TESIS DEFENDIDA POR
Rafael Zamora Barrientos
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

Dr. Roberto Conte Galván.
Director del Comité.

Dr. David Hilario Covarrubias
Rosales.
Miembro del Comité.

Dr. Luis Armando Villaseñor
González.
Miembro del Comité.

M.C. Jorge Enrique Preciado
Velasco.
Miembro del Comité.

Dr. Oscar Iván Lepe Aldama.
Miembro del Comité.

Dr. Arturo Velázquez Ventura.
*Coordinador del programa de
posgrado en Electrónica y
Telecomunicaciones.*

Dr. Raúl Ramón Castro Escamilla.
Director de Estudios de Posgrado.

21 de Octubre de 2005

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DE ENSENADA**



**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**



**ANÁLISIS DE TRANSMISIÓN DE VOZ SOBRE IP EN TIEMPO REAL EN
REDES DE SATÉLITES DE ÓRBITA BAJA CON PROCESAMIENTO A BORDO.**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

RAFAEL ZAMORA BARRIENTOS

Ensenada, Baja California, México, Octubre del 2005.

RESUMEN de la tesis presentada por **Rafael Zamora Barrientos**, como requisito parcial para la obtención del grado de **MAESTRO EN CIENCIAS** en **ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**. Ensenada, Baja California, México. Octubre del 2005.

ANÁLISIS DE TRANSMISIÓN DE VOZ SOBRE IP EN TIEMPO REAL EN REDES DE SATÉLITES DE ÓRBITA BAJA CON PROCESAMIENTO A BORDO.

Resumen aprobado por:

Dr. Roberto Conte Galván
Director del Comité

Las nuevas redes de comunicaciones podrán proporcionar acceso global a tecnologías populares independientemente de la ubicación del usuario, mediante el uso de sistemas de banda ancha por satélite. Los sistemas de comunicación satelital se distinguen por su capacidad de cobertura global, de difusión, y su habilidad para apoyar la movilidad de sus usuarios. Esto los convierte en perfectos candidatos para proporcionar servicios integrados de banda ancha, tal como la telefonía sobre Internet, a lugares remotos o que tienen una pobre infraestructura de comunicaciones. Aunque la transmisión de voz sobre Internet (VoIP) por satélite es una opción atractiva en costo, para lograr su completa aceptación se deben alcanzar parámetros de calidad de servicio (QoS) similares a los obtenidos en las redes terrestres equivalentes, de ahí la importancia de su estudio.

En este trabajo se realiza el análisis y modelado de los principales parámetros de QoS para VoIP como son la latencia, jitter, BER, PLR y caudal eficaz por medio de una red satelital de banda ancha. Se considera el uso en tiempo real de satélites procesadores de órbita baja, así como de los problemas que surgen por la movilidad de los satélites en la red, tal como el corrimiento en frecuencia Doppler, el esparcimiento del retardo, los traspasos del enlace y el enrutamiento dinámico a bordo. En base al modelo planteado, se utilizó el simulador de red NS-2 para desarrollar la simulación de llamadas de VoIP a través de una red satelital de órbita baja en tiempo real entre distintas ciudades, y evaluar los parámetros de QoS antes mencionados. Dentro del proceso de la simulación se toman en cuenta aspectos relevantes como son los enlaces intersatelitales de unión cruzada, así como dos métricas de costo del algoritmo de enrutamiento del vector de distancia: conteo de saltos y retardo de propagación. A partir de las simulaciones realizadas se encontraron valores de cada uno de los parámetros de QoS de VoIP que podrían encontrar usuarios futuros de sistemas satelitales de órbita baja de banda ancha.

Palabras clave: VoIP, QoS, red satelital de órbita baja en tiempo real, satélites procesadores, enlaces intersatelitales de unión cruzada, algoritmo de enrutamiento.

ABSTRACT of the Thesis presented by **Rafael Zamora Barrientos**, as a partial requirement to obtain the **MASTER in SCIENCE** degree in **ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS**. Ensenada, Baja California, México. October 2005.

**ANALYSIS OF TRANSMISSION OF VOICE OVER IP IN REAL
TIME IN NETS OF SATELLITES OF LOW ORBIT WITH
PROCESSING ON BOARD.**

New communications networks will provide global access to popular technologies regardless of the users' location, through the use of broadband satellite systems. Satellite communications systems are widely recognized by their global area coverage and broadcast capacity, as well as their ability to support mobile users. These features make them perfect candidates to provide broadband integrated services, such as telephony over Internet, to remote sites or places with a poor telecommunications infrastructure. Although Voice over the Internet Protocol (VoIP) transmission over satellite is a cost-attractive option, in order to reach full public acceptance a number of Quality of Service (QoS) parameters, similar to those of terrestrial networks, must be reached.

In this work an analysis and modeling of the main QoS parameters for VoIP are performed, such as latency, jitter, Bit Error Rate, Packet Loss Rate and throughput, for a satellite broadband network. The use of real-time, Low Earth Orbit, On-Board Processing satellites is considered, as well as other issues due to the satellite's orbit, such as Doppler frequency shift, spread delay, intersatellite hand-offs and on-board dynamic routing. Based on the proposed model, a number of VoIP calls were simulated through a LEO real-time satellite network, between different cities, and the mentioned QoS parameters were evaluated using the Network Simulator NS-2. The simulation process considers relevant aspects such as cross-seam intersatellite links, and two different metrics to evaluate the algorithm cost for distance vector routing: hop count and propagation delay. From the performed simulations a number of values for each VoIP QoS parameters were obtained, which could be noticed by users of future LEO broadband satellite systems.

Keywords: VoIP, QoS, LEO real-time satellite network, On-Board processing satellites, cross-seam intersatellite links, algorithm of routing.

DEDICATORIA

A mis Padres

Margarita
y
Guillermo

Por demostrarme que a pesar de los obstáculos que hay en la vida, siempre se puede salir adelante y no dejarse vencer. Por ser los papás que siempre quise tener y darme un ejemplo de su amor como esposos y transmitirme los valores que me ayudaron a ser la persona que soy ahora. Por que a través de ustedes puedo ver un poquito de la grandeza del amor de nuestro papá DIOS. Los amo...

A mis Hermanos

Minerva (mi angelito), Guillermo (el padrecito) y César (el mecánico)

Por ser mi ejemplo de pureza, nobleza y esfuerzo respectivamente. Por ser mis carnales fieles que siempre trataron de cuidarme y apoyarme. Por lo momentos que pasamos juntos haciéndonos renegar, y los momentos que no parábamos de reír. A mi hermana Minerva, siempre serás mi angelito.

A mi futura Esposa

x

... y Madre de nuestros hijos, solo quería que supieras que desde hace tiempo estoy pensando en nuestro futuro.

AGRADECIMIENTOS

Te doy gracias *DIOS* por todas las cosas que me das, y por ayudarme a alcanzar este objetivo en mi vida. Por estar siempre conmigo. To/x/†. *Busca primero el reino de DIOS y su justicia divina, y todo lo demás se te dará por añadidura (Mateo 6, 33).*

A mi director de tesis *Dr. Roberto Conte Galván*, por su apoyo brindado no solo en este año de investigación, sino en los dos años de la maestría. Mi admiración y respeto como investigador y maestro, pero sobre todo como persona, gracias.

Al *Dr. David Hilario Covarrubias Rosales* por sus valiosas contribuciones en el desarrollo de este trabajo de investigación.

A los miembros del comité de tesis: *M.C. Jorge Enrique Preciado Velasco, Dr. Luís Armando Villaseñor González, Dr. Oscar Iván Lepe Aldama, y Dr. David Hilario Covarrubias Rosales*, por sus acertadas observaciones y comentarios acerca de mi trabajo.

Al *M.C. Raúl Rivera Rodríguez* y al *M.C. Raúl Tamayo Fernández* por su apoyo incondicional que me brindaron durante este trabajo.

A mis amigos de Torreón: Lulú (hermana mayor), Zayra (hermana menor), Juan, Arturo, Víctor, René, Julio, Aarón, por pedirle a DIOS por mí.

A mis *compañeros y amigos de generación 2003-2005*: Ruth, Ely, Aby, Karen, Ana, Caro, Ulises (por su apoyo y sus patadas en el fútbol), Hugo, Darío, Néstor, Aarón, Adán, a los *GUAMARAS (Adris, Damis, Gabis, Ivis y Rogis)*, por ser solidarios en los momentos difíciles y por no dejarnos vencer durante este tiempo. Se les va a extrañar, les deseo lo mejor para cada uno de ustedes. En dado caso que quieran una sabrosa discada de Torreón, siempre tendrán las puertas abiertas de su casa (nada más avisen). Que valor!!

También agradezco a mis amigos: Paúl (y sus anécdotas), Luigui, Cabanillas, Canek, Carlos, Juan Pedro, César, a la raza de la iglesia de piedra (Diana, Cynthia, Isabel, Cristy, Andrea, Juan 8, Marcos, padre Isidro, padre Carlos, padre Miguel), por su apoyo y consejos. Y por supuesto te agradezco a ti *Marcel*, por todos los detalles que tuviste conmigo, ojalá y DIOS nos siga dando la oportunidad de seguir conociéndonos, que te ayude a seguir cumpliendo tus sueños. Cuenta conmigo por siempre.

Al *CICESE* por darme la oportunidad de estudiar esta Maestría en Ciencias en especial al personal que labora en el departamento de Electrónica y Telecomunicaciones.

Al *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)* por su apoyo económico durante el transcurso de mis estudios de maestría.

Contenido.

Página

I	Introducción.....	1
I.1	Marco de Referencia del Trabajo de Tesis.....	1
I.2	Antecedentes.....	2
I.3	Planteamiento del Problema.....	4
I.4	Objetivos de la Tesis.....	5
I.5	Estado del Arte.....	6
I.6	Estructuración del Trabajo.....	7
II	Transmisión de Voz sobre IP por Satélite.....	9
II.1	Antecedentes.....	9
II.2	Características Básicas de los Sistemas Satelitales.....	10
II.2.1	Altura Orbital.....	11
II.2.1.1	<i>Satélites de Órbita Geoestacionaria (GEOS)</i>	11
II.2.1.2	<i>Satélites de Órbita Media (MEOS)</i>	12
II.2.1.3	<i>Satélites de Órbita Baja (LEOS)</i>	12
II.2.2	Servicio Proporcionado.....	13
II.2.3	Tecnología a Bordo del Satélite.....	14
II.2.3.1	<i>Satélites Repetidores</i>	15
II.2.3.2	<i>Satélites Procesadores</i>	15
II.2.3.2.1	<i>Satélites con Regeneración a Bordo</i>	15
II.2.3.2.2	<i>Satélites con Conmutación a Bordo</i>	17
II.2.4	Bandas de Frecuencia.....	19
II.3	Sistemas de Redes Satelitales.....	20
II.3.1	Arquitecturas de Red Satelital.....	21
II.3.1.1	<i>Arquitectura de Relevo</i>	21
II.3.1.2	<i>Arquitectura de Acceso</i>	21
II.3.1.3	<i>Arquitectura de Interconexión</i>	22
II.3.1.4	<i>Arquitectura de Malla</i>	22
II.4	Redes Satelitales de Banda Ancha.....	22
II.4.1	ATM sobre Satélite.....	23
II.4.2	IP sobre Satélite.....	24
II.4.2.1	<i>IP sobre Redes Satelitales no IP</i>	25
II.4.2.2	<i>IP sobre Redes Satelitales IP</i>	25
II.5	Tecnología Actual para VoIP por Satélite.....	25
II.6	Parámetros de Calidad de Servicio (QoS) de VoIP.....	28
II.6.1	Latencia.....	28
II.6.2	Variación del Retardo en el Arribo de los Paquetes (Jitter).....	29
II.6.3	Tasa de Errores de Bit (BER).....	29
II.6.4	Tasa de Pérdida de Paquetes (PLR).....	29
II.6.5	Caudal Eficaz (CE).....	30

Contenido (continuación).

Página

II.7 Conclusiones.....	30
III Modelado de Redes Satelitales LEO de Banda Ancha.....	31
III.1 Diseño y Modelado de Constelaciones Satelitales en Tiempo Real.....	31
III.1.1 Parámetros Orbitales.....	31
III.1.2 Geometría Tierra-Satélite.....	32
III.1.3 Tipos de Constelaciones Satelitales.....	38
III.1.3.1 Constelaciones Inclinas Walker.....	38
III.1.3.2 Constelaciones Polares (o Casi Polares).....	39
III.2 Problemas Principales en Redes Satelitales LEO.....	41
III.2.1 Enlaces Intersatelitales de Unión Cruzada (ISLs Cross-Seam).....	41
III.2.2 Traspaso de Enlace Satelital.....	43
III.2.3 Corrimiento Doppler en Frecuencia.....	46
III.2.4 Esparcimiento en el Retardo.....	48
III.2.5 Métricas de Costo de Enrutamiento.....	49
III.3 Conclusiones.....	52
IV Modelado de Parámetros de QoS de VoIP en Redes LEOS de Banda Ancha en ... Tiempo Real.....	54
IV.1 Modelo de Latencia en Redes Satelitales LEO.....	54
IV.1.1 Retardo de Transmisión.....	55
IV.1.2 Retardos de Propagación.....	55
IV.1.3 Retardo por Procesamiento y Conmutación a Bordo del Satélite.....	58
IV.1.4 Retardo del Protocolo de Control de Acceso al Medio.....	60
IV.2 Modelo de la Variación del Retardo en el Arribo de los Paquetes.....	61
IV.3 Modelo del BER en Constelaciones Satelitales LEO.....	63
IV.4 Modelo del PLR en Redes Satelitales LEO.....	68
IV.5 Modelo del Caudal Eficaz en las Redes Satelitales.....	69
IV.6 Conclusiones.....	69
V Resultados de Simulación y Análisis Numérico.....	71
V.1 Consideraciones de Simulación.....	71
V.2 Características del Ambiente del Simulador de Red NS-2.....	76
V.2.1 Extensiones del NS-2 para Satélite.....	77
V.3 Resultados de Simulación.....	78
V.3.1 Caracterización del Efecto Doppler.....	78
V.3.2 Esparcimiento del Retardo en Estaciones Terrenas.....	80
V.3.3 Evaluación de los Parámetros de QoS de VoIP.....	81
V.3.3.1 Latencia.....	82
V.3.3.2 Jitter.....	92
V.3.3.3 Tasa de Error de Bit (BER).....	99
V.3.3.4 Tasa de Paquetes Perdidos (PLR).....	102

Contenido (continuación).

	Página
V.3.3.5 <i>Caudal Eficaz (CE)</i>	104
V.4 Conclusiones.....	105
VI Conclusiones.....	107
VI.1 En cuanto a la Red Satelital LEO.....	107
VI.2 En cuanto a la Aplicación de VoIP.....	108
VI.3 En cuanto a la Evaluación de Parámetros de QoS de VoIP.....	109
VI.4 Tareas Realizadas.....	111
VI.5 Trabajos Futuros.....	111
REFERENCIAS.....	113

Lista de Figuras.

	Página
Figura 1. Arquitectura de un sistema satelital.....	11
Figura 2. Taxonomía de inteligencia de procesamiento a bordo del satélite [Cabanillas, 2004].	14
Figura 3. Parámetros orbitales usados en sistemas satelitales.	32
Figura 4. Consideraciones geométricas en constelaciones satelitales.	34
Figura 5. Relación geométrica de las huellas de cobertura efectiva como hexágonos inscritos dentro una huella de cobertura satelital.....	36
Figura 6. Parámetros de constelaciones polares.	40
Figura 7. Planos orbitales sobre la Tierra [Keller y Salzwedel, 1999].	42
Figura 8. Huella de cobertura con haz de antena fijo.	44
Figura 9. Huella de cobertura con haz de antena directivo.....	45
Figura 10. Variación de la distancia durante el trayecto del satélite sobre una estación terrena.	49
Figura 11. Visualización de la constelación propuesta sobre la superficie terrestre.	73
Figura 12. Huella y trayectoria de cobertura satelital sobre la superficie terrestre.	73
Figura 13. Extensiones para el simulador de red NS-2.....	77
Figura 14. Curva S normalizada del Doppler durante la ventana de visibilidad del satélite.	79
Figura 15. Esparcimiento del retardo en las estaciones terrenas.	80
Figura 16. Validación del programa en el simulador: (a) resultados obtenidos por Henderson y Katz,.....	82
Figura 17. Comportamiento del retardo extremo a extremo entre Ensenada y Acapulco. ...	83
Figura 18. Comportamiento del retardo extremo a extremo entre Ensenada y Antananarivo.	85
Figura 19. Comparación del retardo extremo a extremo entre Ensenada-Acapulco y Ensenada-Antananarivo sin considerar ISLs de unión cruzada.....	87
Figura 20. Comparación del retardo extremo a extremo entre Ensenada-Acapulco y Ensenada-Antananarivo empleando ISLs de unión cruzada.....	88
Figura 21. Diferencia de retardo entre la métrica de conteo de saltos y la métrica de retardo de propagación.....	90
Figura 22. Comportamiento del jitter en el enlace Ensenada-Acapulco.....	93
Figura 23. Comportamiento del jitter en el enlace Ensenada-Antananarivo.	95
Figura 24. Comparación del jitter entre Ensenada-Acapulco y Ensenada-Antananarivo....	96
Figura 25. Comparación del jitter Ensenada-Acapulco y Ensenada-Antananarivo.....	97
Figura 26. Variación del BER en el enlace descendente entre Ensenada y Acapulco.	100
Figura 27. Variación del BER en el enlace descendente entre Ensenada y Antananarivo.	101

Lista de Tablas.

	Página
Tabla I. Servicios satelitales definidos por la ITU.....	13
Tabla II. Bandas de frecuencias principales para enlaces satelitales.....	19
Tabla III. Frecuencias asignadas por la ITU para enlaces intersatelitales.....	20
Tabla IV. Características principales de los codificadores de voz más utilizados [Cabanillas, 2004].....	27
Tabla V. Configuración de la constelación satelital propuesta.....	72
Tabla VI. Estadísticas obtenidas del retardo.....	89
Tabla VII. Estadísticas de la diferencia del retardo entre las métricas de costo de enrutamiento.....	91
Tabla VIII. Estadísticas obtenidas del jitter.....	98
Tabla IX. Estadísticas del C/N y del BER en los enlaces satelitales.....	101
Tabla X. Tiempo de visibilidad inferior y superior del BER máximo permitido.....	102
Tabla XI. Estadísticas del PLR obtenidas de la simulación en ambas métricas de costo de enrutamiento.....	103
Tabla XII. Estadísticas del caudal eficaz obtenidas de la simulación en ambas métricas de costo de enrutamiento.....	104

I INTRODUCCIÓN.

I.1 Marco de Referencia del Trabajo de Tesis.

Una de las tecnologías más populares actualmente es el de la telefonía sobre Internet como una alternativa de bajo costo a las redes telefónicas de larga distancia nacional e internacional. Una manera de proporcionar este servicio de manera global, independientemente de la ubicación del usuario, es mediante el uso de redes de comunicaciones de banda ancha por satélite. Un sistema satelital bien diseñado puede cubrir la superficie entera de la Tierra, lo que lo convierte en una excelente opción para aquellos lugares que tienen una deficiente infraestructura de comunicaciones.

Los sistemas de comunicación satelital se distinguen por su capacidad de cobertura global, de difusión, su flexibilidad de ancho de banda en demanda y su habilidad para soportar movilidad, lo que los convierte en candidatos inmejorables para proporcionar servicios integrados de banda ancha a usuarios globalmente dispersos [Kota *et al.*, 2004]. Por otro lado, los proveedores de servicios multimedia esperan aprovechar los bajos costos que ofrece la tecnología satelital con procesamiento a bordo en aplicaciones remotas y rurales, aunados a las múltiples ventajas del acceso a Internet con respecto a las tecnologías terrestres.

Aunque la transmisión de voz sobre Internet (VoIP) por satélite es una opción atractiva en costo, para lograr su completa aceptación se debe alcanzar parámetros de calidad de servicio similares a los obtenidos en redes terrestres, principalmente mediante la reducción de los aspectos negativos inherentes a las comunicaciones por satélite como largos retardos, así como la pérdida de bits y paquetes debido a la atenuación de señales de radio frecuencia (RF) durante su propagación.

Uno de los beneficios esperados por los proveedores de servicio de la tecnología satelital de banda ancha es la posibilidad de ofrecer aplicaciones de Internet con cobertura global, manteniendo parámetros aceptables de calidad de servicio para casos tales como servicios en tiempo real (videoconferencia, telefonía y educación a distancia) además de los servicios típicos de transmisión de datos insensibles al retardo.

Una de las alternativas de las comunicaciones satelitales, la cual se aborda en esta tesis, es el diseño, modelado y simulación de redes satelitales de órbita baja (LEO) donde se evalúa su desempeño en aplicaciones de VoIP.

I.2 Antecedentes.

Un aspecto de interés dentro de los sistemas satelitales de banda ancha es la carga útil, la cual es responsable de las funciones de transporte y conversión de la señal de información dentro del satélite, y debido a esta carga útil, se genera la clasificación que divide a los satélites hoy en día en satélites repetidores y satélites procesadores. Los satélites

repetidores se limitan a recibir la señal de RF ascendente, amplificarla, cambiar su frecuencia portadora a un nuevo valor descendente y retransmitirla con la mayor potencia y directividad posible. Los nuevos satélites procesadores cuentan con subsistemas de procesamiento a bordo, lo que permite la regeneración, remodulación y recodificación de información, así como el enrutamiento y conmutación de paquetes hacia distintos transpondedores, antenas y/o haces de antena, todo esto con el fin de ofrecer una utilización del canal mucho más eficiente [Cabanillas, 2004].

La transmisión de VoIP utilizando satélites con procesamiento a bordo presenta un mejor comportamiento que empleando satélites repetidores, y las redes de satélites en órbita baja (LEO) presentan mejores prestaciones que las redes satelitales sobre órbita geostacionaria (GEO) [Cabanillas, 2004]. En ese mismo trabajo se consideró redes LEO fijas en el tiempo para facilitar su análisis, evitando los problemas causados por el desplazamiento continuo de los satélites, típico de las redes satelitales a órbitas bajas (LEO) en tiempo real. Estos problemas incluyen: la variación en el tiempo de retardo del enlace al variar la posición del satélite con respecto a la estación terrena; el traspaso del enlace entre satélites y la estación terrena, así como entre satélites continuos o adyacentes; las cuestiones de enrutamiento de paquetes y de la topología de la red satelital; y problemas de Doppler en la señal de RF. Sin embargo, el problema del enrutamiento dinámico a bordo del satélite debido al cambio continuo de las tablas de enrutamiento para los usuarios terrestres, presenta un reto que no ha sido completamente resuelto,

principalmente para aplicaciones sensibles al retardo. Esto afecta de distinta manera los principales parámetros de calidad de servicio (QoS).

I.3 Planteamiento del Problema.

Es necesario evaluar qué adecuaciones son necesarias o recomendables para realizar una comunicación telefónica por satélite en tiempo real a través de Internet que satisfaga los parámetros de calidad de servicio tales como latencia, variación en el retardo del arribo de paquetes, tasa de errores de bit, tasa de pérdida de paquetes y caudal eficaz. Estos parámetros han sido establecidos de acuerdo a la normatividad internacional para el transporte de voz sobre IP sobre una red satelital que emplea satélites de órbita baja. Esto se puede lograr mediante la utilización de una altura orbital satelital adecuada, el empleo de satélites con procesamiento a bordo para tener la capacidad de realizar enlaces intersatelitales (ISLs), además de una adecuada selección de las constelaciones satelitales, de tal manera que se pueda cumplir con los parámetros de calidad de servicio especificados para VoIP antes mencionados.

Dentro de los propósitos de este trabajo de tesis es demostrar que se puede ofrecer acceso y servicio de Internet a comunidades rurales en lugares remotos, o en áreas de desarrollo en países emergentes, mediante aplicaciones en tiempo real con calidad de servicio.

I.4 Objetivos de la Tesis.

- ❖ El *objetivo general* de este trabajo de tesis es analizar aspectos de QoS relacionados con la transmisión de VoIP utilizando redes de satélites en órbita baja en tiempo real.
- ❖ El *objetivo particular* de este trabajo de tesis es el modelado, diseño y simulación de una red de comunicaciones de banda ancha por satélite, para analizar el comportamiento de VoIP en constelaciones satelitales de órbita baja en tiempo real. Se modela la operación de satélites procesadores con capacidad de conmutar y enrutar paquetes hacia satélites continuos y adyacentes mediante enlaces intersatelitales, y hacia estaciones terrenas mediante enlaces tierra-espacio. Se modela efectos temporales (latencia, variación en el retardo-jitter, esparcimiento del retardo-delay spread, y Doppler) así como modelado de efectos en la integridad de la información (BER, Tasa de pérdida de paquetes). Finalmente se consideran aspectos en tiempo real como el enrutamiento de los paquetes y traspaso de los enlaces considerando el desplazamiento de los satélites.
- ❖ El *objetivo específico* de este trabajo de tesis es el desarrollo de programas de computadora para simular el comportamiento de la transmisión de VoIP en una red satelital de órbita baja de banda ancha en tiempo real, y comparar su nivel de desempeño e impacto en los parámetros de calidad de servicio de interés.

I.5 Estado del Arte.

A la fecha existen sistemas de comunicaciones satelitales con las siguientes características:

- Spaceway (órbita geoestacionaria/órbita media, IP banda ancha)
- Skyway (órbita geoestacionaria, IP banda ancha)
- DirectPC (órbita geoestacionaria, IP banda ancha)
- Globalstar (órbita baja, procesamiento a bordo)
- Iridium (órbita baja, procesamiento a bordo, enlaces intersatelitales normales)

Y un sistema propuesto hasta el año 2002:

- Teledesic (órbita baja, procesamiento a bordo, enlaces intersatelitales de unión cruzada)

La mayoría de estos sistemas satelitales se encuentran activos en la actualidad a excepción del Teledesic. Este trabajo de tesis recrea características particulares de operación parecidas a las redes satelitales de banda ancha de los sistemas Iridium y Teledesic en aspectos tales como movilidad de los satélites, enrutamiento, y traspaso del enlace, sin embargo se añade la generación de tráfico a través de la red para transportar información sensible en el tiempo. Debido a que se han encontrado pocos trabajos de investigación que traten el estudio del desempeño de redes satelitales de órbita baja en

tiempo real para el transporte de voz en particular VoIP [Henderson y Katz, 2000], [Nguyen *et al.*, 2001], resulta interesante realizar un análisis y evaluación de los principales parámetros de calidad de servicio para VoIP. Esto se puede realizar mediante diferentes escenarios con enlaces satelitales extremo a extremo, estableciendo un modelo de red satelital que sirva para modelar las estadísticas derivadas de los parámetros de QoS en los diferentes escenarios propuestos.

I.6 Estructuración del Trabajo.

Este trabajo de tesis se enfoca en el modelado y simulación de redes satelitales LEO en tiempo real, con el propósito de evaluar el desempeño y los parámetros de QoS del transporte de VoIP. En el capítulo II se estudian las características básicas de los sistemas satelitales, para después dar introducción a las redes satelitales de banda ancha y describir brevemente los conceptos básicos de la tecnología de VoIP a través de dichos sistemas satelitales, y por último, dar una definición de los parámetros de calidad de servicio a considerar en el transporte de VoIP. En el capítulo III se presenta el modelo del sistema para definir las expresiones matemáticas que ayudarán a estimar los parámetros de QoS de VoIP, se presenta una forma de realizar el diseño de redes satelitales LEO de banda ancha y se realiza un análisis de los problemas que ocasiona la movilidad de los satélites en tiempo real. En el capítulo IV se presenta un análisis de los principales parámetros de QoS en VoIP a través de redes satelitales LEO, y se definen expresiones matemáticas mediante las cuales es posible analizar, modelar y evaluar cada uno de los parámetros de QoS. En el capítulo V se establecen las consideraciones y escenarios de simulación del transporte de

VoIP extremo a extremo a través de redes satelitales LEO en tiempo real, obteniendo las estadísticas que permitan evaluar al sistema de acuerdo a los parámetros de QoS de VoIP. Por último en el Capítulo VI se presentan las conclusiones y aportaciones más importantes de este trabajo de tesis.

II TRANSMISIÓN DE VOZ SOBRE IP POR SATÉLITE.

Introducción.

En este capítulo se proporciona una descripción de los sistemas de comunicación satelital y de los tipos de inteligencia a bordo del satélite. Finalmente, se describen los conceptos básicos de la aplicación de VoIP sobre redes satelitales de banda ancha, así como los principales parámetros de calidad de servicio (QoS, Quality of Service) relacionados a la aplicación de voz sobre IP a considerar en este trabajo de investigación.

II.1 Antecedentes.

La tecnología de voz sobre IP ha surgido recientemente como una alternativa para el servicio de voz de la red telefónica de conmutación pública (PSTN), y como solución atractiva para integrar voz y datos en redes públicas y privadas. Dos factores importantes han contribuido para el desarrollo de VoIP, el primero es el crecimiento mundial de la Internet y de las redes basadas en IP, mientras que el segundo es la tendencia a unir redes de voz con redes de datos [Conte, 2000].

Los sistemas satelitales forman una parte íntegra de la infraestructura global de comunicaciones. En la actualidad se hace uso de sus capacidades para proporcionar servicios de transporte de paquetes de datos basados en IP, habilitando el crecimiento de servicios de VoIP con cobertura global y alcance en áreas remotas. Para el servicio de VoIP sobre satélite se necesita resolver problemas de transmisión y de calidad de servicio

[Cabanillas, 2004]. El servicio de VoIP tanto en redes terrestres como en redes satelitales tienen aspectos comunes en cuanto a la calidad del servicio, sin embargo el problema relacionado con el transporte de información es diferente. Este trabajo de tesis tratará de analizar el comportamiento de VoIP en relación a la calidad de servicio en un sistema de transporte satelital, particularmente en redes satelitales de órbita baja.

II.2 Características Básicas de los Sistemas Satelitales.

En la Figura 1 se muestra la arquitectura general de un sistema satelital, el cual consiste de dos partes, el segmento terrestre y el segmento espacial. El *segmento terrestre* está compuesto por estaciones terrenas transmisoras y receptoras localizadas en diferentes lugares, y pueden estar interconectadas con otras redes terrestres. La interconexión entre estaciones terrenas se realiza a través de los satélites utilizando diversas topologías de red, dependiendo de la aplicación, distribución y número de usuarios. Para realizar la gestión de recursos entre otras funciones de control de red se emplean los centros de control de red (NCC). El *segmento espacial* consiste de uno o varios satélites en órbitas particulares, con estaciones de telemetría y comando (TT&C) donde se controla y monitorea su funcionamiento [Nam, 2003]. Las características y clasificación de estos sistemas se basan en la órbita de operación, en el servicio que proporcionan y en las propiedades del sistema, como es la tecnología a bordo del satélite (carga útil) y las bandas de frecuencia a la que operan. A continuación se describen cada una de ellas.

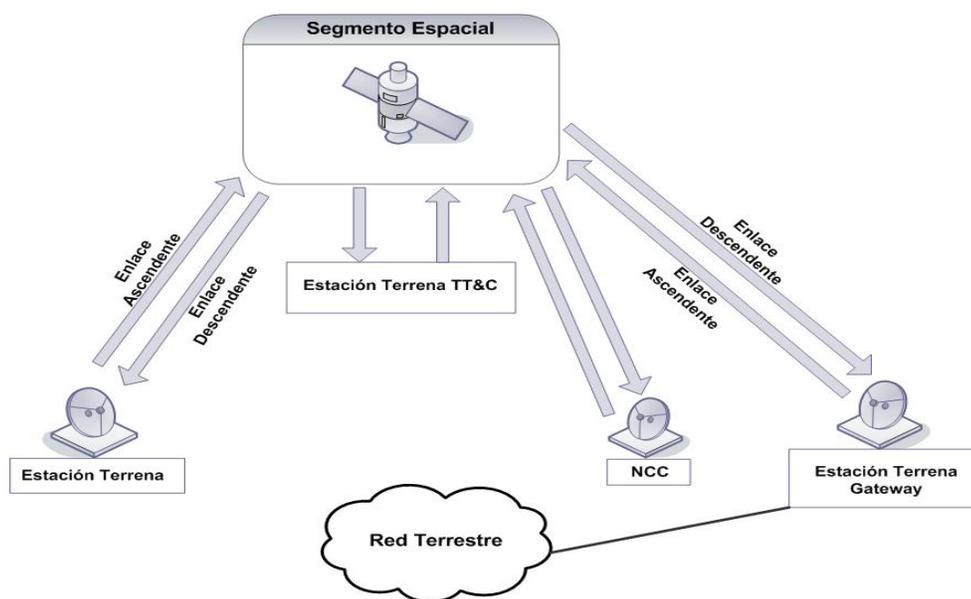


Figura 1. Arquitectura de un sistema satelital.

II.2.1 Altura Orbital.

De acuerdo al tipo de órbita en la que se encuentren, se puede clasificar a los satélites de la siguiente manera [Hu y Li, 2001]:

II.2.1.1 Satélites de Órbita Geoestacionaria (GEOS).

Los satélites GEO se encuentran a una altura aproximada de 36,000 km de la superficie terrestre girando sobre el plano ecuatorial de la Tierra. La velocidad angular de los satélites es la misma que la de la Tierra y giran en la misma dirección, por lo que el satélite parecerá estar fijo en el cielo para observadores terrestres, dando como resultado su utilización las 24 horas del día. Su velocidad lineal instantánea es de aproximadamente 11,000 km/hr. Esta altura permite que el área de cobertura de un solo satélite abarque aproximadamente una tercera parte de la superficie terrestre. La mayor desventaja de esta

altura orbital es la gran distancia que existe entre estaciones terrenas y el satélite, lo que provoca una gran atenuación de la potencia de la señal de radio frecuencia y un alto retardo de propagación de ida y vuelta (entre 240 y 280 ms) [Akyildiz y Seong-Ho, 1997].

II.2.1.2 Satélites de Órbita Media (MEOS).

Un satélite MEO se encuentra localizado a una altura orbital alrededor de 10,000 km, reduciendo el retardo de propagación de ida y vuelta entre 50 y 70 ms. La velocidad lineal instantánea de un satélite MEO es alrededor de 17,000 km/hr. El periodo orbital es aproximadamente de 6 horas.

II.2.1.3 Satélites de Órbita Baja (LEOS).

Los satélites LEO operan a una altura orbital entre 500 a 2,000 km sobre la superficie de la Tierra. A una altura de 700 km puede tener velocidades de 27,000 km/hr y un periodo orbital aproximado a 100 minutos. La altura orbital de éstos satélites reduce el retardo de propagación de ida y vuelta de los datos (alrededor de 10 ms). Debido a que existe un menor trayecto de propagación de las señales, el uso de satélites LEOS es el óptimo para aplicaciones en tiempo real, como puede ser telefonía, videoconferencia y transmisión de datos. Una de las ventajas de los LEOS es que permite tener terminales de bajo costo, ya que se reduce tanto la potencia que los satélites necesitan emplear para transmitir a la estación terrena, como la potencia que las estaciones terrenas requieren para transmitir hacia el satélite. Debido a que se reduce la huella de cobertura de dichos satélites, una de las desventajas es que se requiere de un mayor número de satélites trabajando en conjunto para ofrecer un servicio global, lo que se traduce en una mayor complejidad y costo de

tales sistemas. Un satélite LEO viaja a alta velocidad alrededor de su plano orbital para evitar ser atraído por la fuerza gravitacional de la Tierra. Esto provoca que sus transmisiones puedan verse afectadas por variaciones Doppler en el receptor terrestre, aunque este problema puede solucionarse prediciendo dichas variaciones e implementando el equipo para corregirlas. Otra característica de los satélites LEO es que emplean frecuentes trasposos de llamada (handover) entre satélites vecinos para mantener la transmisión continua en tiempo real.

II.2.2 Servicio Proporcionado.

Los tres diferentes tipos de servicios definidos por la ITU se muestran en la Tabla I [Nam, 2003]:

Tabla I. Servicios satelitales definidos por la ITU.

Tipo de Servicio	Característica
Fijo por Satélite	Comprende todo servicio de comunicaciones que no sea de tipo móvil entre dos puntos fijos en Tierra.
Móvil por Satélite	Comprende toda comunicación entre dos puntos cualesquiera en tierra, aire o mar. Uno o ambos puntos puede estar cambiando de posición.
Radiodifusión por Satélite	Utiliza la amplia difusión natural de los satélites. Señales transmitidas son recibidas directamente en los hogares de los usuarios. Se le conoce como servicio de difusión directa o servicio directo al hogar.

II.2.3 Tecnología a Bordo del Satélite.

A la carga útil de los satélites de comunicaciones se le conoce como transpondedor. La mayoría de los satélites existentes son repetidores, pero gracias al gran desarrollo tecnológico han surgido satélites con procesamiento a bordo (On Board Processing, OBP) de la señal, que incluyen funciones como la regeneración de bit, enrutamiento y conmutación a bordo del satélite [Conte, 2000].

La inteligencia a bordo de los satélites depende del tipo de procesamiento que se lleva a cabo dentro de sus respectivos transpondedores. Un satélite puede ser repetidor o procesador de alguna señal. El repetidor solamente retransmite una señal para enlazar diferentes estaciones terrenas en el mundo mientras que el procesador puede trabajar como un nodo real en el cielo para procesar la información y transmitirla a estaciones terrenas o a otros satélites. En la Figura 2 se presentan los principales tipos de satélites con respecto a su tipo y capacidad de procesamiento a bordo.

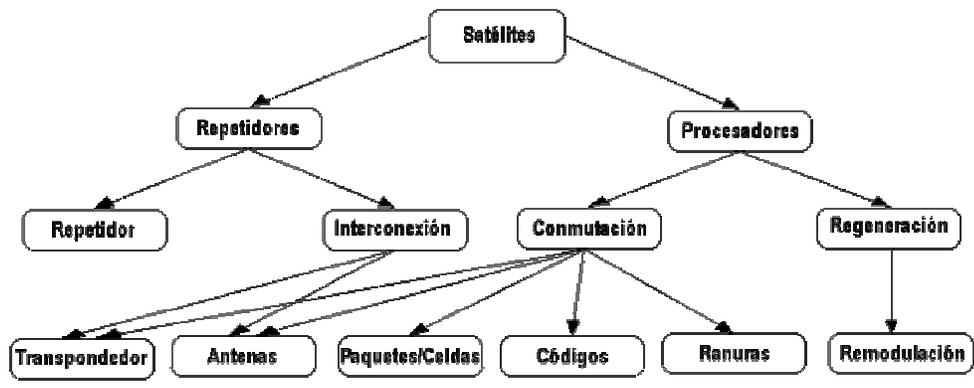


Figura 2. Taxonomía de inteligencia de procesamiento a bordo del satélite [Cabanillas, 2004].

II.2.3.1 Satélites Repetidores.

La inteligencia en los satélites repetidores es casi nula, sus funciones son recibir la señal de radio, amplificarla, cambiar su frecuencia y retransmitirla a Tierra [Cabanillas, 2004]. Existe una variante, denominada satélite repetidor de interconexión, que puede interconectar distintos transpondedores o antenas dentro del mismo satélite, ya sea desde su construcción o de manera remota desde el centro de control en tierra, pero no de manera independiente por el satélite ya que no posee inteligencia propia. Esta operación se lleva a cabo en la capa física del modelo de referencia OSI [Forouzan, 2002]. Algunos de los sistemas que emplean satélites repetidores son el GlobalStar¹ y el SkyBridge².

II.2.3.2 Satélites Procesadores.

Gracias al gran desarrollo tecnológico han surgido satélites con procesamiento a bordo (OBP) de la señal, que incluyen funciones como la regeneración de bit, enrutamiento y conmutación [Conte, 2000]. Sin embargo existen dos clases de procesamiento a bordo [Cabanillas, 2004] que a continuación se describen.

II.2.3.2.1 Satélites con Regeneración a Bordo.

Regeneración a bordo efectúa un tipo sencillo de procesamiento a bordo al demodular la señal de radio frecuencia y convertirla a banda base, lo que permite detectar y corregir errores en bits de la señal digital original que hayan surgido durante el enlace ascendente,

¹ Sistema digital de Telecomunicaciones basado en una constelación de 40 satélites LEO a 1,410 km de la Tierra [www.globalstar.com].

² Sistema soportado por una constelación de 80 satélites LEO [www.skybridge.com].

disminuyendo la tasa de error de bit (BER) a bordo del satélite [Cabanillas, 2004]. El BER total en un enlace satelital típico es el producto de los errores en los enlaces ascendente y descendente, mientras que en satélites regeneradores es la suma de los errores en cada uno de los enlaces, y con la corrección de errores a bordo, el BER total se reduce solamente al BER del enlace descendente [Maral y Bousquet, 2003]. Una vez corregidos los errores a bordo, el transpondedor recodifica y remodula la información, la monta a una portadora de RF y continúa con la transmisión. Esto se lleva a cabo en la capa de enlace de datos. A continuación se describen las características de un satélite con regeneración a bordo:

- Utiliza transpondedores regeneradores de la señal, de esta manera los enlaces ascendente y descendente son separados y procesados independientemente. La tasa de error de bit (BER) es disminuida con transpondedores regeneradores pudiendo resistir altos niveles de interferencia.
- Con regeneración a bordo es posible el manejo de señales de diferente tasa de bit, mientras en satélites repetidores, esto es implementado en el segmento terrestre.
- Se reduce la complejidad de las estaciones terrenas, son de menor tamaño así como de menor costo.
- Regeneración a bordo permite utilizar estaciones terrenas y nodos de interconexión más cercanos al destino final, asimismo se reducen los tiempos de espera por congestiónamiento y por doble salto satelital entre estaciones terrenas intermedias a lo largo de la red.

II.2.3.2.2 Satélites con Conmutación a Bordo.

Conmutación a bordo en el satélite presenta un diseño más complejo así como un mayor costo, sin embargo se tienen más ventajas, como el menor costo de estaciones terrenas, toma inmediata de decisiones de enrutamiento a bordo, mejores características en enlaces terrestres, y mejoras en la capacidad de tráfico, entre otras. Los satélites con conmutación a bordo, aparte de demodular y corregir bits, son capaces de leer encabezados de paquetes o celdas y de conmutarlos hacia distintos transpondedores o antenas en el satélite, multicanalizarlos en nuevas ranuras de tiempo o frecuencia, insertar nuevos códigos o direcciones de acceso múltiple por división de código (CDMA), o cambiar direcciones en el encabezado de los paquetes o celdas [Cabanillas, 2004]. Estas funciones se llevan a cabo en la capa de red, por lo que el satélite conmutador puede interpretar el direccionamiento de los paquetes o celdas y buscar en tablas de enrutamiento o conmutación para encontrar las trayectorias más adecuadas o de menor distancia hacia su destino final. Hay diferentes tipos de conmutación a bordo de los satélites, de los cuales los sugeridos son [Babu *et al.*, 1996]:

- *Conmutación de circuitos*: es eficiente en cuanto a la utilización del ancho de banda en redes basadas en conmutación de circuitos como los sistemas telefónicos convencionales. Sin embargo, cuando la red no soporta el tráfico basado en paquetes, parte del ancho de banda se desperdicia ya que en este tipo de redes la asignación es fija. La conmutación de circuitos a bordo dificulta proporcionar servicios de banda ancha en sistemas satelitales.

- *Conmutación de paquetes:* es una buena elección para redes satelitales transportando tráfico basado en paquetes así como tráfico basado en circuito. Es apropiado para redes basadas en IP. El ancho de banda se puede ver afectado debido al sobre-encabezado de los paquetes.
- *Conmutación Híbrida:* se considera como una solución al combinar los dos tipos de conmutación anteriormente explicados. Sin embargo, no hay equipos de conmutación híbrida disponibles actualmente.
- *Conmutación de celdas (conmutación ATM):* la conmutación por celdas utiliza la multiplexión estadística de celdas que genera una alta eficiencia en ancho de banda. Sin embargo, el sobre-encabezado de 5 bytes por celda (53 bytes) en ATM es superior que el límite del ancho de banda en enlaces inalámbricos, lo que provoca mayores exigencias en la capacidad y funcionamiento del equipo.

Cuando los satélites son equipados con regeneración a bordo y conmutación a bordo, se puede establecer la conexión directa entre satélites conocidos como *enlaces intersatelitales (ISLs)*. La utilización de ISLs para el enrutamiento de tráfico es de gran ayuda, a continuación se enumeran las principales ventajas y desventajas de ellos.

❖ *Ventajas de los ISLs.*

- Incrementa la cobertura global para el caso de relevos de llamada o acceso remoto sobre océanos u otras áreas sin estaciones terrestres.

- El uso de un centro de control de red simple, ya que es posible controlar los satélites por medio de la constelación que se diseñe para este fin.
- Los enlaces son enrutados por los satélites, de esta manera se reduce el retardo de extremo a extremo.

❖ *Desventajas de los ISLs.*

- Incrementa la complejidad y el costo de los satélites.
- Consumo de alta potencia debido a los constantes enlaces entre satélites.
- Se requiere de trasposos entre satélites debido a la movilidad en tiempo real de los satélites.

II.2.4 Bandas de Frecuencia.

La banda de frecuencia en la que operará el sistema en un enlace satelital es determinante, ya que las transmisiones pueden ser susceptibles a interferencias. La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) ha asignado las bandas de frecuencias presentadas en la Tabla II para enlaces satelitales [Neri, 2003].

Tabla II. Bandas de frecuencias principales para enlaces satelitales.

Banda	Enlace Ascendente (GHz)	Enlace Descendente GHz)	Ancho de Banda (MHz)
C	5.925-6.425	3.700-4.200	500
Ku	11.7-12.2/13.7-14.5	11.7-12.2	500/750
Ka	27.5-31.0	17.7-21.2	3,500

Las bandas de frecuencia C y Ku son las más utilizadas por satélites comerciales y debido a esto es casi imposible que la ITU otorgue concesiones de nuevas posiciones orbitales que trabajen en estas bandas sin que interfieran unas con otras [Conte, 2004]. La banda Ku está siendo utilizada para difusión satelital, así como para conexiones a Internet, y en algunos casos para canales de retorno. La mayor parte de los sistemas satelitales propuestos de banda ancha emplean esta banda de frecuencia, entre los que se encuentran Astrolink, Euroskyway, Teledesic, Spaceway e INTELSAT [Neri, 2003]. Existen planes sobre el uso de frecuencias cercanas a las bandas Q y V (50/40 GHz) que ofrecerán en el futuro anchos de banda mucho más amplios para sistemas multimedia. En lo que se refiere a enlaces intersatelitales (ISLs, Inter Satellite Links), en la Tabla III se presentan las frecuencias asignadas por la ITU [Neri, 2003].

Tabla III. Frecuencias asignadas por la ITU para enlaces intersatelitales.

Frecuencia (GHz)	Banda (aproximada)
22.25-27.5	K
32-33	Ka
54.25-58.2	U
65-71	U
116-134	EHF
170-182	EHF

II.3 Sistemas de Redes Satelitales.

Los sistemas satelitales de comunicación pueden complementar el servicio de Internet con otras tecnologías como cable, DSL (Digital Subscriber Line), fibra óptica y redes inalámbricas [Kota *et al.*, 2004].

II.3.1 Arquitecturas de Red Satelital.

Las redes satelitales toman un papel importante en la interconexión entre un usuario con alguna red. Las arquitecturas de redes satelitales son diferentes en cuanto a las funciones que pueden desempeñar [Toh y Li, 1998]: de relevo, de acceso, de interconexión, y de malla. De manera general, estas opciones se describen a continuación.

II.3.1.1 *Arquitectura de Relevo.*

Los enlaces son tratados como conductos de comunicación para remplazar enlaces terrestres y transmitir datos de un usuario remoto a otro. En esta arquitectura los satélites no procesan los paquetes de datos. Los enlaces satelitales son estáticos, de esta manera no necesitará de una capa de acceso al medio que soporte acceso múltiple y la asignación apropiada del ancho de banda. La arquitectura de relevo normalmente es aplicada a redes satelitales repetidoras donde los satélites no están equipados con funciones de procesamiento a bordo. En redes satelitales repetidoras la interconexión debe ser a través de gateways satelitales en Tierra.

II.3.1.2 *Arquitectura de Acceso.*

En esta arquitectura los satélites proporcionan el acceso a la red a las terminales extremo. La conexión puede establecerse entre un usuario y una red terrestre o entre diferentes usuarios. Se puede soportar a usuarios móviles y tanto satélites repetidores como procesadores a bordo pueden ser empleados en esta arquitectura.

II.3.1.3 *Arquitectura de Interconexión.*

Esta arquitectura proporciona interconexión de alta velocidad entre redes móviles y fijas. Para redes satelitales con procesamiento a bordo, se puede interconectar redes terrestres sin requerimiento de algún equipo en Tierra.

II.3.1.4 *Arquitectura de Malla.*

En esta arquitectura, los satélites forman una red en el espacio capaz de conmutar y enrutar tráfico, de realizar control de flujo y congestión además de soportar requerimientos de calidad de servicio (QoS). La arquitectura permite el acceso de usuarios a redes terrestres así como la interconexión entre redes. En esta arquitectura se requiere satélites con procesamiento a bordo, conmutadores y que sean capaces de realizar enlaces intersatelitales (ISLs).

Para este trabajo de investigación se contempla utilizar una arquitectura de red satelital tipo malla al utilizar satélites con procesamiento a bordo capaces de realizar ISLs.

II.4 Redes Satelitales de Banda Ancha.

Las redes satelitales de banda ancha están comenzando a desarrollarse para transportar aplicaciones multimedia, teniendo como principal objetivo el proporcionar un amplio rango de servicios a usuarios independientemente de su localización. Dos de las tecnologías candidatas para proporcionar servicios de banda ancha en redes satelitales son

el modo de transferencia asíncrona (ATM, Asynchronous Transfer Mode) y el protocolo de Internet (IP) que a continuación de describen de manera breve [Nam, 2003].

II.4.1 ATM sobre Satélite.

El modo de transferencia asíncrona (ATM) es una tecnología orientada a conexión que hace posible la red digital de servicios integrados de banda ancha (RDSI-BA) [Stallings, 1998]. En ATM los datos del usuario son colocados en celdas de tamaño fijo de 53 bytes, 5 son de encabezado y 48 de carga útil. Para la componente satelital se utilizan celdas ATM modificadas denominadas celdas S-ATM, las cuales conservan la misma longitud, variando únicamente el formato del encabezado para adaptarlo al sistema satelital [Mertzanis *et al.*, 1999]. ATM funciona basado en circuitos virtuales, ya que antes de iniciar la transferencia de información se determina el camino que seguirán los paquetes, estableciendo de esta manera el circuito que seguirán todos los paquetes hacia el destino. Esto garantiza el orden de los mismos y debido a que el circuito solo es establecido durante el tiempo que dura la transferencia, se le denomina circuito virtual.

Las redes satelitales de banda ancha basadas en ATM son capaces de ofrecer diferentes tipos de servicio en relación a la tasa de transmisión de los datos, los cuales según [Nam, 2003] se dividen en:

- ❖ Tasa de bit constante (CBR).
- ❖ Tasa de bit variable en tiempo real (rt-VBR).

- ❖ Tasa de bit disponible (ABR).
- ❖ Tasa de bit no especificada (UBR).
- ❖ Tasa de marco garantizado (GFR).

II.4.2 IP sobre Satélite.

El servicio de Internet extremo a extremo se basa en los protocolos TCP/IP, donde TCP es el protocolo de control de transmisión e IP es el protocolo de Internet. El modelo de capas de TCP/IP está organizado en cinco capas: la física, de acceso a la red, IP, TCP y de aplicación. La capa física tiene que ver con el medio de transmisión, el cual puede ser enlaces cableados o inalámbricos. La capa de acceso a la red está relacionada con el intercambio de datos entre un sistema y la red a la cual esté conectado, donde su estándar incluye conmutación de circuitos, conmutación de paquetes, o redes de área local, entre otras. La capa IP enruta los paquetes de datos a través de múltiples redes interconectadas proporcionando funciones de enrutamiento. En la capa TCP, los mecanismos de flujo y congestión extremo a extremo son empleados para detectar la congestión y para retransmitir paquetes perdidos. La capa de aplicación soporta varias aplicaciones de usuario, un ejemplo de esto son las transferencias de archivos y el navegador Web.

IP es un protocolo de capa de red orientado a datagrama que no garantiza la entrega de paquetes en el orden que fueron generados, debido a que los paquetes recorren diferentes trayectorias hacia el destino. Para transportar IP sobre redes satelitales se tienen los siguientes escenarios:

II.4.2.1 *IP sobre Redes Satelitales no IP.*

Los paquetes son transportados sobre otras tecnologías como ATM o transmisión de marcos (frame relay). En el nodo de ingreso a la red los paquetes IP son fragmentados y transportados sobre alguna tecnología particular en un cierto formato de marco, y en el nodo de egreso a la red los marcos recibidos son desfragmentados para obtener los paquetes IP.

II.4.2.2 *IP sobre Redes Satelitales IP.*

Los satélites son empleados como enrutadores para el transporte de paquetes IP en estas redes, y pueden desempeñar funciones de QoS. Estas redes satelitales IP pueden considerarse como sistemas autónomos, realizando conexiones con redes terrestres a través de estaciones terrenas (gateways) [Wood, 2000].

II.5 Tecnología Actual para VoIP por Satélite.

La investigación sobre la tecnología VoIP se ha enfocado en el desarrollo de arquitecturas de red y de protocolos que la puedan soportar con el objetivo de alcanzar la interoperabilidad con la PSTN y con las redes celulares móviles, así como la gestión en calidad de servicio. El método típico de transportar muestras de voz a través de una red IP requiere agregar tres encabezados para cada uno de los siguientes protocolos: el protocolo de Internet (IP, Internet Protocol), el protocolo de datagramas de usuario (UDP, User

Datagram Protocol) y el protocolo de transmisión en tiempo real (RTP, Real Time Protocol) [Nguyen *et al.*, 2001].

La pila de protocolos de VoIP en la capa de transporte utiliza el protocolo UDP para transportar voz, el protocolo de control de transmisión (TCP, Transmission Control Protocol) es empleado para transportar los mensajes de señalización y el protocolo RTP proporciona la entrega extremo a extremo de datos en tiempo real. El estándar H.323 es el conjunto de protocolos más ampliamente utilizado actualmente en plataformas de VoIP [Nguyen *et al.*, 2001].

VoIP consiste en la digitalización y paquetización de la voz para luego transmitirla por la red (enrutamiento de los paquetes) hacia el punto destino, donde a su vez los paquetes de datos se convierten nuevamente en voz. De esto se encargan los algoritmos de codificación, que realizan la conversión de una señal analógica (forma de onda de la voz) en una señal digital de información. Estos algoritmos muestrean la señal analógica a intervalos regulares y convierten el valor analógico en una representación numérica, conocida como cuantización, para después comprimirlo en bloques discretos de información.

El objetivo de la mayoría de las técnicas de codificación ha sido reducir significativamente la velocidad de transmisión, manteniendo la calidad y robustez de la misma para optimizar el ancho de banda disponible [Cabanillas, 2004]. Generalmente éste

objetivo se ha convertido en un compromiso entre estos dos factores. Las técnicas que alcanzan las menores tasas de transmisión, también reducen regularmente la calidad de voz, tienden a ser altamente sensibles al ruido y presentan elevados retardos de codificación. Los codificadores más comunes y recomendados por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) son el codificador por modulación por pulsos codificados G.711 (PCM), el codificador multitasa de transmisión G.723.1 y el codificador empleando el algoritmo de predicción lineal excitada por código algebraico de estructuras conjugadas (CS-ACELP) G.729, [ITU-T G.700, 2003]. En la Tabla IV se presentan las principales características de estos codificadores.

Tabla IV. Características principales de los codificadores de voz más utilizados
[Cabanillas, 2004].

Codificación de la Voz	G.711 (PCM)	G.723.1	G.729
<i>Tasa de transmisión</i>	64 Kbps.	5.3/6.3 Kbps.	8 Kbps
<i>Duración de la trama</i>	3.9 μ s	30 ms.	10 ms.
<i>Duración del encabezado</i>	_____	7.5 ms.	5 ms.
<i>Retardo de algoritmo</i>	0.75 ms	30 ms.	10 ms.
<i>Longitud de trama</i>	160 Bytes	20/24 Bytes	10 Bytes

El retardo en el que el codificador realiza el proceso de codificación depende del tiempo de codificación, del tiempo de decodificación así como del tiempo de duración del encabezado. Otro retardo a considerar en el codificador es el retardo de paquetización, que es el tiempo necesario para llenar un paquete IP en η tramas de voz producidas por el proceso de codificación [Cabanillas, 2004].

En este trabajo se hace la suposición de que el proceso de codificación y de decodificación de VoIP va ser implementado en el equipo del usuario final. Además se considera que el equipo del usuario posee una capacidad de procesamiento lo suficientemente potente como para despreciar el retardo por codificación y paquetización. Solamente se considerará la tasa de transmisión del codificador G.711 a 64 Kbps debido a que es el que ocupa mayor ancho de banda durante la transmisión [ITU-T G.700, 2003] y así estar considerando el peor de los casos.

II.6 Parámetros de Calidad de Servicio (QoS) de VoIP.

El servicio de voz sobre IP (VoIP) en tiempo real se ve afectado de distinta manera por los parámetros de calidad de servicio (QoS). Estos parámetros son determinantes para definir si el nivel de servicio que está proporcionando la red es el requerido, debido a que existen importantes aspectos que pueden degradar las garantías de QoS cuando se usan enlaces satelitales. Este trabajo de tesis considera los parámetros más importantes de QoS para VoIP definidos en [Cabanillas, 2004], y que a continuación serán descritos brevemente.

II.6.1 Latencia.

La latencia es el retardo extremo a extremo experimentado por los paquetes de datos al ser enviados de un nodo origen a un nodo destino. En una red satelital este parámetro se expresa como la suma del retardo de transmisión, retardo de propagación, retardo por enlaces intersatelitales, retardo por procesamiento a bordo y retardo por la capa de control

de acceso. La máxima latencia permitida para una buena calidad de voz en VoIP es de 400 ms [Goyal *et al.*, 1999].

II.6.2 Variación del Retardo en el Arribo de los Paquetes (Jitter).

Mejor conocido como jitter, se define como la variación del retardo que tienen los paquetes de información cuando arriban en el nodo destino. Las aplicaciones en tiempo real como VoIP son muy sensibles a estas variaciones, ya que estas aplicaciones proporcionan la información casi en el mismo instante en que los paquetes se están recibiendo. El máximo jitter permitido para VoIP es de 20 ms [González Rubio, 2000].

II.6.3 Tasa de Errores de Bit (BER).

La tasa de errores de bit se define como el número de errores que ocurren para un cierto número de bits transmitidos. El BER es más significativo en enlaces satelitales. La máxima tasa de errores de bit permitida en VoIP es de 10^{-5} [Nguyen *et al.*, 2001].

II.6.4 Tasa de Pérdida de Paquetes (PLR).

La tasa de pérdida de paquetes (PLR) es el porcentaje de paquetes que no llegaron a su destino. Las razones principales por las que se puede perder paquetes son por daños en la transmisión, por condiciones de congestión en los nodos, y por un exceso de retardo [Beltrán Jaime, 1999]. Las aplicaciones en tiempo real como VoIP, son muy sensibles al descarte de paquetes, ya que utilizan UDP como protocolo de transporte, y éste no cuenta con un mecanismo para la retransmisión de paquetes en caso de que sean descartados, por

lo que no se podría realizar la reconstrucción de la voz. VoIP tolera una pérdida de paquetes del 3 al 5% [Beltrán Jaime, 1999].

II.6.5 Caudal Eficaz (CE).

El caudal eficaz es la porción del tráfico ofrecido que se recibió con éxito en el nodo destino [Cruz Patiño, 2001]. El CE representa la cantidad de información útil que puede transmitirse por unidad de tiempo.

II.7 Conclusiones.

En este capítulo se definieron los principales conceptos de la tecnología satelital así como de VoIP, relacionando ambas tecnologías. Esto da por conclusión que se requiera estudiar las características de calidad servicio que satisfagan las necesidades de transmisión de VoIP a través de redes satelitales de banda ancha estableciendo los principales parámetros de QoS a estudiar (latencia, jitter, BER, PLR y CE), así como las características de las redes satelitales de banda ancha a implementar. En el siguiente capítulo se presenta las expresiones matemáticas que definen al modelo del sistema.

III MODELADO DE REDES SATELITALES LEO DE BANDA ANCHA.

Introducción.

En el capítulo anterior se analizó la tecnología y características de los sistemas satelitales bajo el servicio de VoIP, así como los parámetros de QoS establecidos para proporcionar dicho servicio. En este capítulo se presenta el modelo del sistema satelital para el que se definen las expresiones matemáticas necesarias para estimar los parámetros de QoS de VoIP. Se presenta un método para el diseño de redes satelitales LEO de banda ancha, así como un análisis de los principales problemas que la movilidad de los satélites ocasiona a aplicaciones sensibles al tiempo.

III.1 Diseño y Modelado de Constelaciones Satelitales en Tiempo Real.

El diseño apropiado de una constelación satelital LEO es muy importante, ya que debe proporcionar una cobertura global para lo que requiere de decenas de satélites. A continuación se describen las características más importantes en el diseño y modelado de constelaciones satelitales.

III.1.1 Parámetros Orbitales.

Los parámetros orbitales definen la trayectoria del satélite en el espacio. En la Figura 3 se muestran los parámetros geométricos usados en sistemas satelitales: semieje mayor, semieje menor y excentricidad.

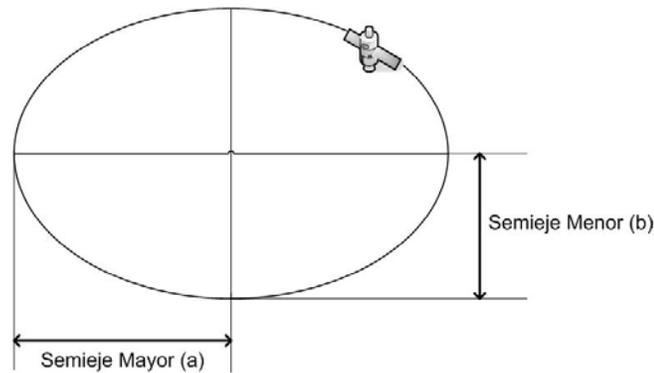


Figura 3. Parámetros orbitales usados en sistemas satelitales.

La excentricidad (e) determina la forma de la órbita y es una constante geométrica unidimensional con valor entre cero y uno. Para una órbita completamente circular, este parámetro es igual a cero. Este parámetro es calculado por la ecuación (1):

$$e = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2} \quad (1)$$

Donde a es el semieje mayor y b es el semieje menor.

III.1.2 Geometría Tierra-Satélite.

La geometría que existe entre un satélite y una estación terrena se presenta en la Figura 4, donde se muestran los principales parámetros a considerar en el diseño de las constelaciones satelitales, las cuales se describen a continuación.

- ❖ La altura orbital (h_{sat}) es la distancia desde la superficie de la Tierra al satélite. Para satélites LEO este valor se encuentra entre 500 y 2000 km. La altura orbital determina el período de rotación del satélite y el tiempo de visibilidad del mismo. Es uno de los parámetros que se debe definir para diseñar cualquier constelación satelital de órbita baja.
- ❖ Otro parámetro fundamental a definir es el ángulo mínimo de elevación (ϵ_{min}), que es el ángulo de elevación de la antena terrestre con el cual no existen problemas de propagación y/o interferencia de la señal de RF. Si el ángulo de elevación en alguna estación terrena es menor que el ángulo ϵ_{min} no podrá comunicarse con el satélite.
- ❖ El ángulo de nadir (ν) es visto desde el satélite, y se forma con la línea del centro de la Tierra al satélite y la línea del satélite a la estación terrena.
- ❖ El ángulo central en Tierra (α) que se forma con la línea del satélite al centro de la Tierra y la línea del centro de la Tierra a la estación terrena, así como el radio de la Tierra (r_e) y el radio satelital ($r_s = r_e + h_{sat}$).
- ❖ El ángulo beta (β) visto en la estación terrena, formado por las líneas del centro de la Tierra a la estación terrena y del satélite a la estación terrena ($90^\circ + \epsilon$).
- ❖ La distancia d entre la estación terrena y el satélite. Esta distancia varía conforme el satélite sigue su trayectoria, visto desde una estación terrena.

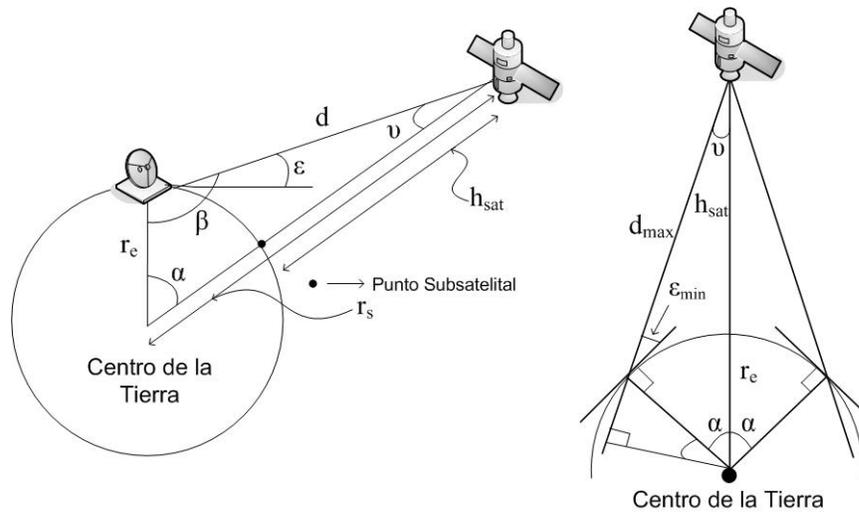


Figura 4. Consideraciones geométricas en constelaciones satelitales.

En base a los parámetros anteriores, se debe definir otras características que forman parte del diseño de constelaciones satelitales de órbita baja como lo son: el número de planos orbitales, el número de satélites por plano orbital, la huella de cobertura del plano orbital, el traslape en la cobertura individual de cada satélite, las estaciones terrenas (ETs) de interconexión (gateways), la topología física y lógica de la constelación, y el tipo de inteligencia satelital.

En relación con la Figura 4, y aplicando la ley de senos de un triángulo, se establece la ecuación (2):

$$\frac{d}{\text{sen}\alpha} = \frac{r_s}{\text{sen}\beta} = \frac{r_e}{\text{sen}\nu} \quad (2)$$

Pudiendo obtener de esta manera una expresión para el cálculo del ángulo de nadir:

$$\nu = \text{sen}^{-1} \left[\frac{r_e}{r_s} \text{sen} \beta \right] \quad (3)$$

Empleando los ángulos ya conocidos β y ν , y a la relación geométrica de ángulos internos en un triángulo, definidos en la expresión (4) se puede obtener el ángulo de cobertura central (α):

$$\alpha + \beta + \nu = 180^\circ \quad (4)$$

$$\therefore \alpha = 180^\circ - \beta - \nu \quad (5)$$

Otra manera de definir el ángulo de cobertura en relación al ángulo mínimo de elevación (ε_{\min}) es [Jamalipour, 1998]:

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{r_e}{r_s} \cos \varepsilon_{\min} \right) - \varepsilon_{\min} \quad (6)$$

El cálculo del ángulo de cobertura central en Tierra (α) es importante, ya que permite obtener el número mínimo de satélites necesarios para una cobertura global. En el diseño de un sistema de comunicaciones satelital con alcance global, las huellas de cobertura de los satelitales suelen traslaparse, lo que permite proporcionar cierta redundancia. La huella de cobertura efectiva de un satélite esta definida como el hexágono más grande inscrito

dentro de la huella satelital, sin especificar el tipo de constelación [Jamalipour, 1998], como se puede apreciar en la Figura 5.

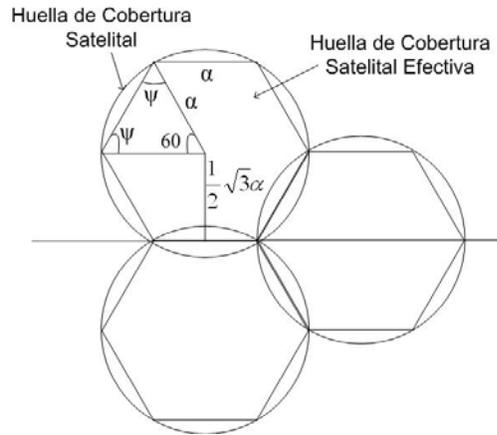


Figura 5. Relación geométrica de las huellas de cobertura efectiva como hexágonos inscritos dentro una huella de cobertura satelital.

Cada hexágono consiste de seis triángulos isósceles, con un ángulo central de 60° cada uno, y dos ángulos idénticos ψ . Suponiendo que la forma de la Tierra es completamente esférica, el ángulo ψ se obtiene de la siguiente manera:

$$\tan \psi = \frac{\frac{1}{2} \sqrt{3}}{\frac{1}{2} \alpha \cdot \cos \alpha} = \frac{\sqrt{3}}{\cos \alpha} \quad (7)$$

El exceso esférico de los triángulos (σ), se describe matemáticamente por:

$$\sigma = 2\psi - \frac{2\pi}{3} \quad (8)$$

Por lo que el área del hexágono o el área de cobertura satelital efectiva (tomando como factor el exceso esférico de los triángulos) se da por la ecuación (9).

$$A_{hex} = 6 r_e^2 \sigma \quad (9)$$

Para determinar el número de planos orbitales en una constelación LEO se considera la cobertura de un satélite en el ecuador, con la condición de que cada órbita debe cubrir $3r_e\alpha$ del ecuador [Jamalipour, 1998]. El número mínimo requerido de planos orbitales (Ω) para una cobertura global se define mediante:

$$\Omega = \left\lceil \frac{2\pi}{3\alpha} \right\rceil \quad (10)$$

Donde el término $\lceil x \rceil$ denota el número entero igual o mayor que x . El número de satélites por plano orbital (Sat/Orb) para una constelación LEO es dado por:

$$Sat / Orb = \left\lceil \frac{2\pi}{\sqrt{3}\alpha} \right\rceil \quad (11)$$

Por lo que el número de satélites en total (NumSat) será:

$$NumSat = (Sat / Orb)(\Omega) \quad (12)$$

Al incrementar la altura orbital de los satélites, la cobertura de los mismos también aumenta, de tal manera que el número mínimo de satélites necesarios para una cobertura global disminuye. Así mismo, al incrementar el valor del ángulo mínimo de elevación para delimitar el área de servicio del satélite, aumenta el número de planos orbitales y de satélites necesarios para proporcionar una cobertura global [Cabanillas, 2004].

III.1.3 Tipos de Constelaciones Satelitales.

En sistemas satelitales de comunicación LEO se emplean órbitas polares, órbitas casi polares y órbitas inclinadas (llamadas Walker). Las órbitas polares tienen una inclinación de 90 grados con respecto al ecuador, las órbitas casi polares tienen inclinaciones cercanas a 90 grados y son capaces de proporcionar una cobertura global completa. Las órbitas inclinadas tienen entre 0 y 60 grados de inclinación con respecto al ecuador y son capaces de proporcionar una cobertura casi global, ya que no cubre las regiones polares. Un solo satélite LEO puede cubrir un área limitada de la superficie de la Tierra, llamada huella de cobertura (footprint), por lo que se necesita más de un satélite en operación para dar cobertura completa y así formar una constelación. A continuación se describen los principales tipos de constelación [Nam, 2003].

III.1.3.1 Constelaciones Inclinadas Walker.

Este tipo de constelación [Walker, 1984] consiste de n planos orbitales y N satélites. La distancia que existe entre planos adyacentes es $\Delta\Omega = 2\pi/n$. Los satélites del mismo plano están separados a una distancia angular de $2\pi/m$. El ángulo de separación $\Delta\omega_F$ entre

planos orbitales adyacentes está en función del factor de fase F ($F = 0, 1, \dots, n-1$) y se representa por medio de:

$$\Delta\omega_F = 2\pi \frac{F}{N} \quad (13)$$

III.1.3.2 Constelaciones Polares (o Casi Polares).

En estas constelaciones, los satélites de órbitas adyacentes están girando en la misma dirección y son llamados planos co-rotatorios. Consecuentemente, existirá una órbita que tenga una órbita adyacente con rotación contraria cuando el último plano orbital encuentre al primero. Estas órbitas son planos contra-rotacionales y la región que existe entre ellos es llamada juntura o unión (seam). De acuerdo a la Figura 6, este tipo de constelación es caracterizada por los siguientes parámetros:

- a) El número de planos orbitales es n y el número de satélites es N . El número de satélites por plano orbital es obtenido por $m = N/n$.
- b) El corrimiento de fase entre satélites que se encuentran en planos orbitales co-rotacionales es π/m .
- c) El ángulo de separación entre planos orbitales co-rotacionales es menor que $(\alpha_{\text{máx}} + \Delta)$, donde Δ es calculado por medio de la siguiente expresión:

$$\cos \Delta = \frac{\cos \alpha_{\text{máx}}}{\cos(\pi/m)} \quad (14)$$

Donde $\alpha_{\text{máx}}$ es el ángulo central de cobertura en Tierra.

- d) El ángulo de separación entre dos planos orbitales contra-rotacionales tiene el máximo de 2Δ .

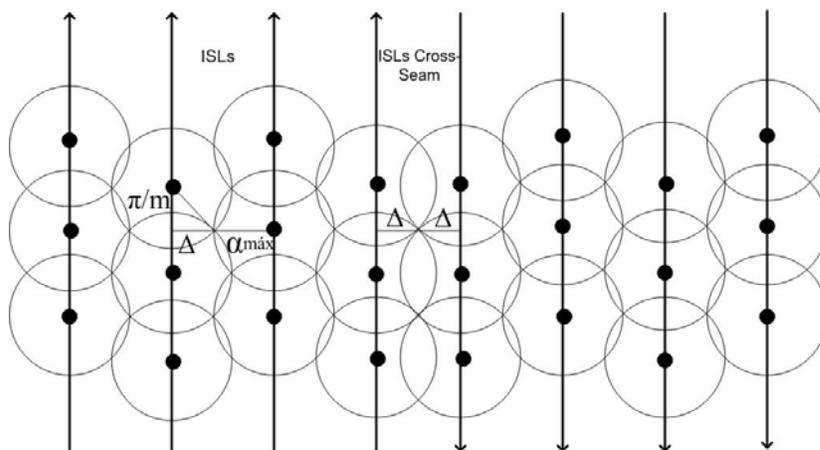


Figura 6. Parámetros de constelaciones polares.

Cabe mencionar que a los enlaces intersatelitales (ISLs) en planos orbitales contra-rotacionales se les da el nombre de enlaces intersatelitales de unión cruzada (ISLs cross-seam) [Henderson y Katz, 2000].

III.2 Problemas Principales en Redes Satelitales LEO.

Los sistemas satelitales LEO tienen como característica fundamental el constante movimiento de los satélites en sus respectivos planos orbitales en la constelación y el movimiento de rotación de la Tierra, lo que genera varios problemas interesantes de analizar, de los cuales se describen sus características ya que afectan de manera importante los parámetros de calidad de servicio de la información.

III.2.1 Enlaces Intersatelitales de Unión Cruzada (ISLs Cross-Seam).

Existen tres tipos de enlaces intersatelitales (ISLs). Los *ISLs intraplano* establecen una transmisión entre los dos o cuatro satélites más cercanos dentro del mismo plano orbital, y pueden verse como enlaces fijos en la topología de la red. Los *ISLs interplano* enlazan un satélite con sus vecinos más cercanos en planos orbitales adyacentes corrotacionales, por lo que no se establecen de manera permanente sino que son enlaces variantes en el tiempo. Esto se debe a tres razones: la primera es debido a que la distancia entre planos satelitales cambia en función de la latitud, la segunda es que la fase π/m no puede ser mantenida entre los planos, causando que los satélites de distintos planos se desplacen ligeramente con respecto a los demás, y la tercera es que los ISLs interplano se desactivan en la proximidad de los polos debido a que el ángulo de visibilidad entre satélites cambia demasiado rápido.

Finalmente en la Figura 7 se puede observar que existen dos regiones en las cuales los planos adyacentes giran de manera contraria, formando una unión en la topología, los

ISLs de unión cruzada (ISLs cross-seam) son un caso especial de los ISLs interplano [Henderson y Katz, 2000]. En la actualidad hay sistemas que no soportan este tipo de enlaces, como Iridium³, ya que son rápidamente traspasados al siguiente satélite. En la actualidad se están desarrollando tecnologías que permitan lograr este proceso con eficiencia, como las antenas con haz directivo. Cuando el sistema no soporta los ISLs de unión cruzada, la comunicación entre dos estaciones terrenas localizadas en lados opuestos de la unión debe ser enrutada sobre uno de los polos [Henderson y Katz, 2000]. Este trabajo de tesis planea realizar las simulaciones con ambas suposiciones, tomando en cuenta solamente ISLs comunes y considerando también ISLs de unión cruzada.

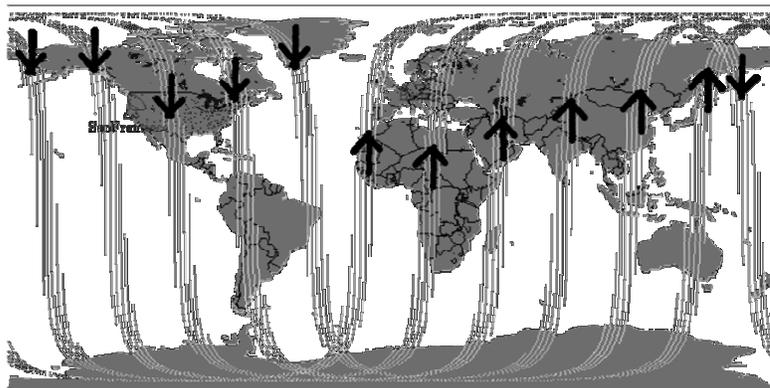


Figura 7. Planos orbitales sobre la Tierra [Keller y Salzwedel, 1999].

Para este modelo, se necesita conocer el periodo mínimo que tarda un ISL en estar comunicado con otro satélite, el cual lo proporciona la siguiente ecuación:

³ El sistema Iridium está conformado de una constelación de 66 satélites, distribuidos en 6 planos orbitales a una altura de 780 km y con un ángulo mínimo de elevación de 8.2 grados y con 86 grados de inclinación con respecto al ecuador.

$$T_{ISL \min} = \frac{T_{orbital_del_satelite}}{Sat/Orb} \quad (15)$$

Donde Sat/Orb es el número de satélites por órbita dado en la ecuación (11). El periodo mínimo de un ISL de unión cruzada (cross-seam) es:

$$T_{ISLunion_cruzada_min} = \frac{T_{orbital_del_satelite}}{2 * (Sat/Orb)} \quad (16)$$

Donde el periodo orbital está relacionado con la tercera ley de Kepler [Conte Galván, 2004] y está simplificada a la siguiente ecuación:

$$T_{orbital_del_satelite_min} = 165.87 \times 10^{-6} (r_s)^{3/2} \quad (17)$$

III.2.2 Traspaso de Enlace Satelital.

La idea principal del traspaso de enlace entre satélites de órbita baja está relacionado con el mecanismo que hace el traspaso de enlace en un sistema celular [Jamalipour, 1998]. En sistemas satelitales LEO, la huella de cobertura de cada satélite cubre una porción de la superficie terrestre con cierta huella de cobertura. Debido a que los satélites se encuentran en continuo movimiento con respecto a la superficie de la Tierra, el enlace entre una estación terrena y un satélite debe ser traspasado hacia otro cuando el satélite actual llegue

a estar sobre el horizonte. Cada sistema de red satelital debe emplear una técnica para controlar los traspasos de enlaces activos.

Actualmente existen dos técnicas para cumplir con este propósito, las cuales dependen de las capacidades del sistema [Henderson y Katz, 2000]. La primera técnica se conoce como *traspaso asíncrono*, la cual es apropiada para sistemas satelitales que cuentan con una huella centrada en el punto subsatelital. Como se muestra en la Figura 8, cuando un satélite se va desplazando a través del cielo, su huella de cobertura barre la superficie terrestre con una cierta velocidad constante. Cuando la estación terrena (E.T.) detecta el umbral de la huella de cobertura actual, se realiza el traspaso hacia un nuevo satélite cuya huella se encuentre en el área permitida. El proceso de traspaso es manejado por la estación de control central, la cual monitorea cada E.T. para detectar los umbrales en la cobertura de los satélites.

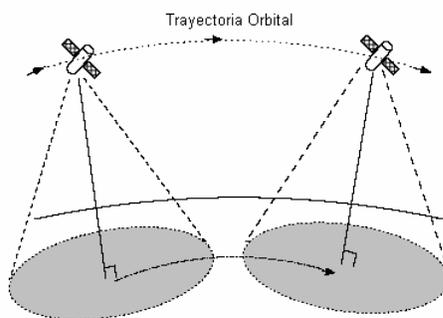


Figura 8. Huella de cobertura con haz de antena fijo.

La segunda técnica la propusieron [Restrepo y Maral, 1996] y se conoce como *traspaso síncrono*. En esta técnica se requiere que el satélite sea capaz de dirigir

electrónicamente su haz para compensar su movimiento durante la trayectoria, por lo que la huella de cobertura puede estar fija por un periodo corto de tiempo. Esto se muestra en la Figura 9, donde se pueden proponer celdas fijas en la Tierra. Después de cierto tiempo, los satélites se mueven fuera de sus respectivas huellas, por lo que el sistema deberá reasignar a cada satélite una nueva huella de cobertura o celda, lo que se considera traspaso en sincronía.

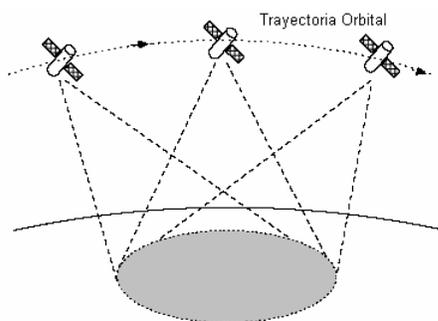


Figura 9. Huella de cobertura con haz de antena direccional.

En este trabajo se consideran traspasos de enlace del tipo asíncrono. El monitoreo de la calidad en la señal recibida de los enlaces satelitales, sean ISLs o enlaces entre estación terrena y satélite (GSLs), determina el momento exacto de los traspasos del enlace hacia otro satélite. La relación señal a ruido de la potencia en los enlaces ascendente y descendente, así como en ISLs durante el periodo de visibilidad directa, puede ser el parámetro a monitorear para establecer los traspasos de los enlaces. El tiempo de cualquier protocolo utilizado por la estación de control central (NCC) para realizar el traspaso del enlace de un satélite a otro en una estación terrena, está dado por:

$$T_{traspaso} = 4t_{UL_o_DL} \quad (18)$$

Esta última expresión es una consideración que se lleva a cabo independientemente del protocolo de traspaso de enlace.

III.2.3 Corrimiento Doppler en Frecuencia.

Al viajar el satélite a una alta velocidad que es relativa al observador terrestre, se pueden presentar problemas de corrimiento de frecuencia Doppler. Doppler es el problema de corrimiento en la recepción de frecuencias altas o bajas. Cuando el satélite se acerca a la estación terrena se presentan valores mayores en frecuencia en relación con la frecuencia portadora de operación. Por otro lado, cuando el satélite se aleja de la estación terrena se reciben niveles de frecuencia menores a la frecuencia de operación en la estación terrena. Los cambios en la frecuencia de la señal transmitida están relacionados con varios parámetros, como la velocidad del satélite, velocidad de la luz, altitud del satélite, velocidad de rotación de la Tierra, y el ángulo de elevación.

Se puede caracterizar matemáticamente el corrimiento Doppler normalizado en cualquier estación terrena considerando órbitas circulares, donde la expresión obtenida después de realizar un análisis del modelo presentado en [Ali *et al.*, 1998] de la geometría Tierra-Satélite, será la siguiente:

$$\frac{\Delta f}{f} = -\frac{1}{c} \frac{r_e r_s \text{Sen} \alpha \text{Cos} \left[\text{Cos}^{-1} \left(\frac{r_e}{r_s} \text{Cos} \varepsilon_{\max} \right) - \varepsilon_{\max} \right] \cdot \omega_{F(t)}}{\sqrt{r_e^2 + r_s^2 - 2r_e r_s \text{Cos} \alpha \text{Cos} \left[\text{Cos}^{-1} \left(\frac{r_e}{r_s} \text{Cos} \varepsilon_{\max} \right) - \varepsilon_{\max} \right]}} \quad (19)$$

La cual se basa en dos aproximaciones, la primera es cuando la órbita satelital de la constelación es completamente circular, la segunda es cuando la variación en la velocidad angular del satélite visto desde Tierra es muy pequeña o casi despreciable. Se puede observar que la ecuación normalizada del Doppler está en función del ángulo máximo de elevación (ε) y de la velocidad angular del satélite ($\omega_{F(t)}$). La estimación del Doppler puede ser implementado en el procesamiento de la señal en las estaciones terrenas, pudiendo predecir los valores de Doppler durante el tiempo que dure la visibilidad del satélite.

La estación terrena puede estimar la duración de la ventana de visibilidad del satélite [Ali *et al.*, 1998] por medio de la siguiente ecuación:

$$\tau \cong \frac{2}{\omega_{F(t)}} \cdot \text{Cos}^{-1} \left\{ \frac{\text{Cos} \left[\text{Cos}^{-1} \left(\frac{r_e}{r_s} \text{Cos} \varepsilon_{\min} \right) - \varepsilon_{\min} \right]}{\text{Cos} \left[\text{Cos}^{-1} \left(\frac{r_e}{r_s} \text{Cos} \varepsilon_{\max} \right) - \varepsilon_{\max} \right]} \right\} \quad (20)$$

Donde $\omega_{F(t)} \cong \omega_s - \omega_E \cos i \cong \frac{360^\circ(180/\pi)}{\text{Periodo Orbital del Satélite (seg)}}$, siendo ω_E la

velocidad angular de la Tierra. El cálculo de la ventana de visibilidad del satélite es fundamental, ya que permite evaluar el corrimiento en frecuencia Doppler en cualquier estación terrena durante algún enlace. Además permite establecer en qué periodo realizar trasposos de enlaces mediante mediciones de la relación señal a ruido en la potencia de la portadora.

III.2.4 Esparcimiento en el Retardo.

El problema de esparcimiento en el retardo se presenta debido a la variación que sufre la distancia que existe entre el satélite y la estación terrena cuando se tiene establecido un enlace entre ellos durante la ventana de visibilidad, como se puede observar en la Figura 10. Este retardo se observa claramente cuando el satélite aparece en el horizonte local, cuando existe una distancia máxima entre el satélite y la estación terrena con un ángulo mínimo de elevación. Conforme el satélite continúe su recorrido orbital, presentará una distancia mínima entre el satélite y la estación terrena con un ángulo de elevación de 90° , e instantes posteriores volverá a presentar una distancia máxima al igual que su ángulo mínimo de elevación, por lo que el retardo de propagación en los enlaces ascendente y descendente en una estación terrena varían conforme se desplace el satélite.

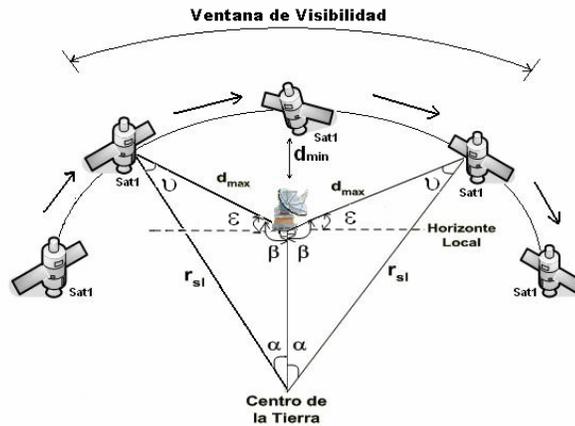


Figura 10. Variación de la distancia durante el trayecto del satélite sobre una estación terrena.

El análisis de esta variación del retardo (esparcimiento) se toma en consideración para el modelado de parámetros de QoS de VoIP en redes LEOS en el siguiente capítulo.

III.2.5 Métricas de Costo de Enrutamiento.

Los protocolos de enrutamiento terrestre no son satisfactorios para el enrutamiento en las constelaciones satelitales [Ekici *et al.*, 2001]. Sin embargo, la topología de estas constelaciones proporciona propiedades interesantes y útiles, como son: la *predictibilidad*, ya que la posición y la conectividad de los satélites puede ser calculado, gracias a que los parámetros del movimiento de los satélites y órbitas son conocidos; la *periodicidad*, se refiere a que la localización de los satélites se repiten de acuerdo a un periodo orbital; la *regularidad*, debido a que el periodo orbital y la velocidad de los satélites son constantes; y el *número constante de nodos satelitales*, ya que se considera una red que tiene tamaño fijo. En redes satelitales LEO los paquetes son entregados desde el origen al destino por diferentes trayectorias, sin una trayectoria permanente entre usuarios extremos. El mayor

desafío en redes satelitales, es enrutar paquetes a través de la trayectoria con menor retardo. El protocolo de vector de distancia o el de estado del enlace pueden ser operados en sistemas satelitales LEO, pero necesitan ser modificados ya que éstos no toman en cuenta aspectos de simplificación que proporcionan las propiedades de las redes satelitales LEO [Henderson, 2000].

En redes satelitales existen dos tipos de algoritmos de enrutamiento: los *algoritmos no adaptables*, que no basan sus decisiones de enrutamiento en mediciones o estimaciones de tráfico ni de topología actual. Y los *algoritmos adaptables* los cuales cambian sus decisiones de enrutamiento para reflejar los cambios de topología [Tanenbaum, 1997]. Un ejemplo del tipo adaptable es el algoritmo de vector de distancia. Éstos son divididos generalmente en centralizados y distribuidos dependiendo del lugar de decisión del enrutamiento. Las métricas son parámetros que definen el grado de alcanzabilidad de una red, y puede ser por cantidad de saltos, distancia geográfica, retardo, ancho de banda de los enlaces, tráfico, entre otros [Tamayo, 2004]. El conteo de saltos y el retardo son dos métricas comúnmente utilizadas dentro de los algoritmos de enrutamiento adaptables y son propuestos por investigaciones actuales para redes satelitales LEO.

Como se mencionó anteriormente (véase capítulo III.1.3.2), la red satelital está compuesta por n planos orbitales, y cada uno por N satélites. La localización geográfica de un satélite S está indicada por la longitud y latitud del satélite S dada por (lon_s, lat_s) respectivamente. La localización lógica del satélite S es dada por $\langle p, s \rangle$, donde $p = 0, \dots, n-$

1, es el número de planos, y $s = 0, \dots, N-1$, el número de satélites. El enrutamiento se realiza considerando estas localizaciones lógicas en forma de saltos. En este trabajo de tesis, se considera que cada satélite tiene cuatro satélites vecinos, dos en el mismo plano (uno arriba y otro abajo) y dos en planos adyacentes (uno a la izquierda y otro a la derecha). Cualquier satélite origen puede ser conectado a otro satélite destino usando trayectorias con saltos múltiples (multisaltos). Una trayectoria multisalto $P_{s_0 \rightarrow s_N}$ se define como la secuencia ordenada de los enlaces intersatelitales, tal que: $P_{s_0 \rightarrow s_N} = \{ISL_{s_0 s_1}, ISL_{s_1 s_2}, \dots, ISL_{s_{N-1} s_N}\}$ formando una N -trayectoria de saltos desde el satélite origen al satélite destino. El retardo total de propagación t_P en la trayectoria P es simplemente la suma de los retardos individuales de propagación de cada salto (ISL) en la misma trayectoria como muestra la ecuación (21) [Ekici *et al.*, 2001]:

$$t_P = \sum_{i=0}^{N-1} t(ISL_{s_i s_{i+1}}) \quad (21)$$

Donde $t(ISL_{ss'})$ es el retardo de propagación en cada salto, del satélite S al satélite S' . La trayectoria con mínimo retardo de propagación se define como sigue:

$$P^* s_0 \rightarrow s_N = \arg_{P \in \{P_{s_0 \rightarrow s_N}\}} \min\{t_P\} \quad (22)$$

Donde $\{Ps_0 \rightarrow s_N\}$ es el conjunto de todas las trayectorias multisaltos de S_0 a S_N . Los satélites procesan a cada paquete de manera independiente y el salto hacia el próximo satélite en una trayectoria se puede determinar en dos fases [Ekici *et al.*, 2001].

- ❖ *Fase de estimación de dirección:* la cual determina el próximo salto sobre la métrica de conteo de saltos mínimos. Para determinar la métrica de saltos mínimos, se usa la localización lógica actual del satélite S_0 origen y del satélite destino S_N . Después de determinar las localizaciones de cada satélite (S_0 y S_N), se calcula el número de saltos de cada trayectoria posible seleccionando las trayectorias con menores saltos.
- ❖ *Fase de perfeccionamiento:* toma en cuenta las distancias entre ISLs, y garantiza que cada paquete será enrutado sobre la trayectoria con mínimo retardo de propagación.

III.3 Conclusiones.

En este capítulo se presentaron las expresiones matemáticas que nos ayudarán a realizar el diseño de redes satelitales de banda ancha, considerando las características propias de los sistemas satelitales de órbita baja (LEO), así como los principales problemas y/o consecuencias que origina la movilidad de las constelaciones y en sí del satélite, las cuales se implementarán en el simulador de red NS-2, que es uno de los objetivos

principales de esta tesis. El siguiente paso será determinar un modelo que sirva para la evaluación de estas redes satelitales LEO de banda ancha al proporcionar el servicio de voz sobre IP (VoIP). En el siguiente capítulo se modelará cada uno de los parámetros de calidad de servicio (QoS) de VoIP a considerar en este trabajo de tesis.

IV MODELADO DE PARÁMETROS DE QOS DE VOIP EN REDES LEOS DE BANDA ANCHA EN TIEMPO REAL.

Introducción.

En el capítulo anterior se presentó el modelo del sistema con el que se pueden diseñar redes satelitales LEO de banda ancha, tomando en consideración aquellos problemas que conlleva la movilidad de los satélites. En este capítulo se establecerá y se presentará un análisis de los principales parámetros de calidad de servicio que afectan la transmisión de paquetes VoIP a través de dichas redes. Se deducen expresiones matemáticas que se derivan del modelado de redes satelitales LEO mediante las cuales es posible analizar, modelar y evaluar cada uno de los parámetros de QoS.

IV.1 Modelo de Latencia en Redes Satelitales LEO.

El retardo extremo a extremo experimentado por un paquete de datos transmitido en una red satelital LEO es la suma del retardo de transmisión, de los retardos de propagación del enlace ascendente y enlace descendente entre la estación terrena y los satélites respectivamente, del retardo de propagación de todos los ISLs, y del retardo total por procesamiento y conmutación a bordo [Nam, 2003]. Otro retardo que se agrega es el generado por el protocolo de control de acceso al medio. Este trabajo de tesis no considera retardo por procesamiento y conmutación a bordo ni retardo por el control de acceso, sin embargo se presenta una explicación de manera breve acerca de estos retardos.

IV.1.1 Retardo de Transmisión.

El retardo de transmisión de un enlace es el tiempo que se utiliza para transmitir un simple paquete de datos en la red a una determinada tasa de datos. Este es calculado por:

$$t_i = \frac{\text{Tamaño del Paquete}}{\text{Tasa de Transmisión de Datos}} \quad (23)$$

Para redes satelitales de banda ancha donde las tasas de transmisión en ISLs son de tasas de bits muy altas (Gbits/seg), el retardo de transmisión es despreciable.

IV.1.2 Retardos de Propagación.

El retardo de propagación se establece mediante la suma del retardo de propagación en el enlace ascendente (t_{UL}), el retardo de propagación en el enlace descendente (t_{DL}), y el retardo de propagación de los ISLs (t_i).

❖ *Retardo en el Enlace Ascendente (t_{UL}).*

De acuerdo a la ecuación (2) se puede realizar el cálculo de la distancia que existe entre la estación terrena y el satélite, obteniendo la siguiente ecuación:

$$d(\tau) = r_e \frac{\text{Sen}\alpha(\tau)}{\text{Sen}\nu(\tau)} \quad \text{o} \quad d(\tau) = r_s \frac{\text{Sen}\alpha(\tau)}{\text{Sen}\beta(\tau)} \quad (24)$$

Donde $d(\tau)$ tendrá diferentes valores debido a la variación del ángulo de elevación (ϵ), lo que provoca diferentes valores de los ángulos α , ν , y β conforme el satélite siga su trayectoria por encima de la estación terrena durante la duración de su ventana de visibilidad (τ), desde que sale del horizonte local hasta que se oculta. Esta variación en la distancia provoca que se tengan distintos valores de retardo de propagación, como se puede llegar a concluir en la siguiente ecuación:

$$t_{UL}(\tau) = \frac{d(\tau)}{c} \quad (25)$$

Donde c es la constante de la velocidad de la luz. A esta variación en el retardo de propagación es lo que se denomina como esparcimiento del retardo y afectará tanto para el enlace ascendente como para el enlace descendente.

❖ *Retardo en el Enlace Descendente (t_{DL}).*

Siguiendo con el razonamiento anterior se puede concluir que el retardo de propagación o esparcimiento en el retardo del enlace descendente, en cualquier estación terrena será:

$$t_{DL}(\tau) = \frac{d(\tau)}{c} \quad (26)$$

❖ *Retardo de Propagación por ISLs (t_i).*

El retardo total de propagación ISL (t_i) se define como la suma de los retardos de propagación debido a los enlaces intersatelitales empleando satélites con procesamiento y conmutación a bordo. Como se muestra en la ecuación (21) se puede establecer el retardo t_i tomando en cuenta la distancia o longitud de los enlaces intersatelitales a lo largo la trayectoria desde el origen hasta el destino mediante la siguiente ecuación [Nam, 2003]:

$$t_i = \frac{\sum \text{Longitud de los ISLs}}{c} \quad (27)$$

Donde las longitudes de los ISLs intraplano e interplano son derivadas por [Ekici *et al.*, 2001]. La longitud de todos los ISLs intraplanos es fija y es calculada por:

$$L_{ISL \text{ int } r \text{ plano}} = \sqrt{2} \cdot r_s \sqrt{1 - \frac{\text{Cos}(360^\circ)}{N}} \quad (28)$$

Donde r_s es el radio satelital y N es el número de satélites por órbita. Por su parte, la longitud de los ISLs interplanos es variable y se calcula con:

$$L_{ISL \text{ int } er \text{ plano}} = \sqrt{2} \cdot r_s \sqrt{1 - \frac{\text{Cos}(360^\circ)}{2n}} * \text{Cos}(lat) \quad (29)$$

Donde n es el número de planos orbitales y lat es la latitud en la cual se encuentran los ISLs interplano en determinado instante.

IV.1.3 Retardo por Procesamiento y Conmutación a Bordo del Satélite.

Como se mencionó anteriormente, este trabajo de tesis no considera retardos por procesamiento y conmutación a bordo del satélite, así como retardos por el control de acceso al medio. Sin embargo a continuación se presenta un análisis de estos retardos [Cabanillas, 2004], tomando como ejemplo una arquitectura satelital en banda base llamada S-ATM [Kota *et al.*, 2004]. Los satélites procesadores y conmutadores a bordo se consideran como elementos activos de red con capacidad de tomar decisiones hacia donde conmutar los paquetes que se reciben, ya sea hacia una estación terrena u hacia otro satélite a través de ISLs. Esta capacidad de conmutación y de procesamiento incrementa la latencia, dependiendo principalmente de la capacidad de procesamiento del conmutador, del tamaño del buffer y en gran medida de la intensidad de tráfico instantáneo de voz. A esto se le denomina retardo por procesamiento y conmutación a bordo del satélite.

Para modelar un conmutador S-ATM empleado en satélites procesadores se utiliza un modelo de colas M/D/1 y debido al tamaño fijo de las celdas S-ATM existirá un tiempo determinístico de servicio con un solo servidor y un buffer de tamaño infinito [Stallings, 1998]. Si se considera un conmutador S-ATM con capacidad de conmutación de R_{comm} bits/seg y celdas ATM satelitales con una longitud de 53 bytes, el conmutador tendrá la capacidad de conmutación de celdas S-ATM (R_{celdas}) descrita por:

$$R_{celdas} = \frac{R_{comm}}{(53 * 8)} \quad [\text{en celdas/segundo}] \quad (30)$$

Según [Tanenbaum, 1997], el retardo por procesamiento en cada conmutador S-ATM es de 1 μ s, por lo tanto, la tasa de drenado de buffer ($1/T_s$) del conmutador S-ATM se calcula con la ecuación (31).

$$\frac{1}{T_s} = \frac{1}{\frac{1}{R_{celdas}} + 1 \times 10^{-6}} \quad [\text{en celdas/segundo}] \quad (31)$$

Donde el inverso de la tasa de drenado de buffer será el tiempo en que tarda en drenar el buffer una celda S-ATM o mejor conocido como tiempo promedio de servicio. El retardo por almacenamiento del buffer (T_q), es la suma de los retardos que ocurren en cada salto en la red cuando una celda S-ATM espera ser atendida por el conmutador (conocido como retardo por almacenamiento temporal). Las celdas pueden ser encoladas debido a la naturaleza del tráfico en ráfaga, por congestión o debido al retardo por el control de acceso al medio. El máximo retardo por almacenamiento del buffer puede ser calculado con una estimación del tamaño del buffer en cada punto de la trayectoria de conexión [Goyal *et al.*, 1999], como se muestra en la ecuación (32).

$$\text{Retardo de almacenamiento del buffer } (T_q) \leq \frac{\text{tamaño del buffer}}{\text{Tasa de drenado del buffer}} \quad (32)$$

Otra manera de representar este retardo considerando una intensidad de tráfico de voz en la red satelital (ρ) medida en Erlangs [Stallings, 1998], está dada por:

$$T_q = \frac{\rho T_s}{2(1-\rho)} \quad [\text{en segundos}] \quad (33)$$

El tiempo promedio que cada celda experimenta para ser atendida por el sistema de conmutación a bordo del satélite (T_w), está dado por la suma del tiempo de drenado (T_s) y el tiempo promedio de espera por cada arribo (T_q) a través de la ecuación (34).

$$T_w = T_q + T_s \quad (34)$$

Este modelo de colas M/D/1 se puede emplear tanto para los nodos satelitales como para los gateway satelitales [Farserotu y Prasad, 2002].

IV.1.4 Retardo del Protocolo de Control de Acceso al Medio.

Los protocolos MAC son diseñados para coordinar la transmisión de paquetes, retransmisión de los paquetes dañados y resolución de colisiones entre estaciones durante un periodo de contención [Cabanillas, 2004]. Se considera un acceso múltiple por división de tiempo (TDMA) en las estaciones terrenas. El retardo de acceso al medio (t_{MAC}) es el tiempo entre el arribo de un paquete y el final de la duración de la trama [Peyravi, 1999]. Considerando la técnica de acceso TDMA se define el retardo de acceso al medio por:

$$t_{MAC} = \frac{1}{2} \frac{N_{et} b}{R_c} \quad (35)$$

Donde N_{et} es el número de estaciones terrenas que comparten el canal TDMA, b es el tamaño del paquete a transmitir, y R_c es la tasa de envío por el canal satelital.

Se pueden resumir todos los retardos posibles en la red satelital LEO de banda ancha en la ecuación (36) de Latencia:

$$Latencia = t_t + t_{UL} + t_{DL} + t_i + t_w + t_{MAC} \quad (36)$$

Donde los únicos retardos que se pueden considerar como fijos son el retardo de transmisión (t_t) y el retardo de control de acceso al medio (t_{MAC}).

IV.2 Modelo de la Variación del Retardo en el Arribo de los Paquetes.

Aunque las redes satelitales LEO tienen retardos de propagación relativamente menores en comparación con redes satelitales GEO, la variación en el retardo del arribo de paquetes consecutivos (jitter), puede ser significativa. En sistemas satelitales de órbita baja, el jitter puede aumentar por varios factores, que se describen a continuación:

❖ *Traspaso de Enlace Satelital y Enrutamiento.*

Como se comentó en el capítulo III.2.2, el movimiento de los satélites dentro de sus órbitas, causa el reemplazo de la posición de los satélites con respecto a las estaciones terrenas. Esto da como resultado el traspaso entre el enlace del satélite que desciende al horizonte y el satélite que se eleva sobre el horizonte opuesto. Se puede estimar que los traspasos en las estaciones terrenas ocurren en promedio cada 8 a 11 minutos [Goyal *et al.*, 1999] en base a la velocidad, altura orbital y cobertura de los satélites. El procedimiento de traspaso del enlace satelital, implica el enrutamiento de paquetes en la trayectoria de conexión establecida en ese instante, dando como resultado cambios en el retardo de propagación en los siguientes periodos de traspaso. Si los satélites en la trayectoria de conexión se encuentran localizados en ambos lados de la unión de la constelación (véase capítulo III.2.1 y IV.1.2), éstos se pueden comunicar vía ISLs de unión cruzada, lo que provoca traspasos de enlaces más frecuentes y puede tener consecuencias más significativas en el retardo de los paquetes de acuerdo a la ecuación (27).

❖ *Esparcimiento en el Retardo.*

Otro de los factores que se derivan del continuo movimiento de la red satelital, es el generado en las estaciones terrenas, causado por la variación del retardo de propagación tanto para el enlace ascendente como para el enlace descendente de acuerdo a las ecuaciones (25) y (26).

❖ *Almacenamiento en el Buffer y Procesamiento a Bordo.*

Los sistemas satelitales LEO experimentan retardos por almacenamiento del buffer y por procesamiento en cada uno de los satélites de la trayectoria de algún enlace entre estaciones terrenas. Para tráfico de tasa de bit constante (CBR, comúnmente usado en aplicaciones de voz sobre IP), el retardo por almacenamiento del buffer es pequeño, pero para el tráfico en ráfaga superior a la tasa de bit variable en tiempo real (rt-VBR, usado en aplicaciones de video), los efectos del retardo y de las variaciones en el retardo podrían ser bastante significativos. Al incrementar la intensidad de tráfico de voz en cada nodo satelital, aumenta el retardo promedio de espera en el buffer y el retardo promedio de espera en el sistema de acuerdo a las ecuaciones (32), (33) y (34).

IV.3 Modelo del BER en Constelaciones Satelitales LEO.

Para el modelado del BER en constelaciones satelitales LEO se sigue un análisis similar al presentado en el trabajo de tesis [Cabanillas, 2004] del capítulo IV.4.3. Cuando una señal se propaga entre una estación terrena y un satélite, sufre una atenuación debido a las pérdidas por espacio libre (L_o). Esta atenuación se incrementa conforme aumenta la distancia. La potencia de la portadora recibida C está dada por:

$$P_{Rx} = C = (PIRE)(G_R) \left[\frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 d(\tau)^2} \right] [W] \quad (37)$$

Donde λ es la longitud de onda de la frecuencia a utilizar en el enlace ascendente o descendente, $PIRE$ es la potencia isotrópica radiada efectiva, G_R es la ganancia de recepción de una antena parabólica y $d(\tau)$ es la distancia entre la estación terrena y el satélite. Conforme a la ecuación (24), se obtendrán diferentes valores de $d(\tau)$ a causa de la trayectoria del satélite. El tercer parámetro $\left[\frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 d(\tau)^2} \right]$ se define como el inverso de la atenuación debida a la propagación en el espacio libre (L_0). Debido al cambio en $d(\tau)$ se obtienen diferentes valores de atenuación y de potencia recibida conforme varía el trayecto del satélite. La ganancia máxima de recepción G_R de una antena parabólica, se define por la siguiente ecuación [Conte, 2004]:

$$G_R = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \quad (38)$$

Donde η es la eficiencia de la antena (proporcionada por el fabricante), y D es el diámetro de la antena.

La potencia isotrópica radiada efectiva (PIRE), se define como la potencia irradiada que pretende alcanzar la misma densidad de flujo de potencia de una antena directiva. Se expresa en forma lineal y en dBW mediante las ecuaciones (39) y (40) respectivamente:

$$PIRE = P_T G_T \quad [W] \quad (39)$$

$$[PIRE]_{dBW} = 10 \log P_T + [G_T]_{dBi} \quad [dBW] \quad (40)$$

La potencia de salida (P_T) del amplificador de alta potencia (AAP) en una estación terrena, es radiada por la antena transmisora, donde el grado de concentración de la potencia hacia una región determinada depende de la ganancia de dicha antena (G_T) [Neri, 2003]. Estos valores son proporcionados por el fabricante. Sustituyendo la ecuación (40) en la ecuación (37) es otra forma de representar la potencia portadora en el enlace ascendente, ecuación (41), y en el enlace descendente, ecuación (42), respectivamente:

$$[C_{dBW}]_{UL} = \underbrace{10 \log P_T + [G_T]_{dBi}}_{\text{estación terrena}} + \underbrace{[G_R]_{dBi}}_{\text{satélite}} - [L_0]_{dB} \quad (41)$$

$$[C_{dBW}]_{DL} = \underbrace{10 \log P_T + [G_T]_{dBi}}_{\text{satélite}} + \underbrace{[G_R]_{dBi}}_{\text{estación terrena}} - [L_0]_{dB} \quad (42)$$

La señal recibida en el satélite por una estación terrena es muy débil (del orden de picowatts o menor), no se puede amplificar directamente debido a que siempre va existir ruido a la entrada del receptor. La principal fuente de ruido eléctrico en el equipo receptor se debe al movimiento térmico aleatorio de los electrones en su interior, al que se le denomina ruido térmico [Cabanillas, 2004]. La potencia del ruido producida por una fuente de ruido térmico se calcula mediante:

$$N = kTB \quad [W] \quad (43)$$

Donde k es la constante de Boltzmann y es igual a 1.38×10^{-23} J/K, T es la temperatura de ruido equivalente (en grados Kelvin) y B es el ancho de banda de la información de interés (Hertz). El ruido térmico tiene una distribución uniforme en el espectro de frecuencia, lo que se conoce como “ruido blanco” y permite calcular la densidad espectral de la potencia de ruido mediante la ecuación (44).

$$N_o = \frac{N}{B} = kT \quad [\text{Joules o } W / \text{Hz}] \quad (44)$$

Para dimensionar las características del sistema satelital, es necesario conocer la relación portadora a ruido (C/N_o) que se mide en el receptor y puede derivarse de las ecuaciones (45) y (46) para los enlaces ascendente y descendente respectivamente:

$$\left(\frac{C}{N_o} \right)_{\text{subida}} = [PIRE]_{dBW} + \left(\frac{G_{\text{sat}}}{T} \right)_{\text{sat } dB/K} - 10 \log k_{dB.Hz} - [L_0]_{dB} - \underbrace{[L_r]_{dB}}_{(\text{Lluvia})} \quad (45)$$

$$\left(\frac{C}{N_o} \right)_{\text{bajada}} = [PIRE]_{dBW} + \left(\frac{G_R}{T_s} \right)_{E.T. dB/K} - 10 \log k_{dB.Hz} - [L_0]_{dB} - \underbrace{[L_r]_{dB}}_{(\text{Lluvia})} \quad (46)$$

El parámetro G/T es figura de mérito del satélite o de la estación terrena, y varía dependiendo de las características de la antena (ganancia y patrón de radiación), del número de transpondedores, así como de la posición de la estación terrena dentro de la huella de cobertura del satélite. Generalmente G/T es un valor cercano a cero dB/K. El valor del G/T puede ser definido en la información del fabricante para cada estación en

particular [Neri, 2003]. Además de las pérdidas por propagación, la potencia de la señal se ve afectada por la lluvia (L_r), que causa una disminución en la potencia a frecuencias mayores de 3 GHz debido a efectos de reflexión, dispersión y depolarización [Conte, 2004]. Dependiendo de la región geográfica de la estación terrena, la atenuación por lluvia puede ser mayor o menor basada en sus estadísticas de intensidad de lluvia, tamaño de gota, presión atmosférica y elevación sobre el nivel del mar. El valor de C/N_o total requerido para la prestación total del enlace a través de satélites procesadores será el C/N_o del enlace ascendente o el C/N_o del enlace descendente [Maral y Bousquet, 2003].

Cuando se emplean satélites con OBP se realiza la decodificación de la señal en banda base, por lo que se puede esperar una corrección de errores, disminuyendo la tasa de error de bit (BER). Según [Nguyen *et al.*, 2001], un valor de BER satisfactorio para la aplicación de VoIP es de 10^{-5} . Arriba de ese valor, se dice que la calidad de servicio para el transporte de VoIP se degrada considerablemente. En las ecuaciones (47) y (48) se presentan expresiones que relacionan C/N_o con E_b/N_o en forma lineal y en dB respectivamente:

$$(C/N_o)_T = (E_b/N_o)R_b \quad (47)$$

$$(C/N_o)_{T(dB)} = (E_b/N_o)_{dB} + (R_b)_{dB} \quad (48)$$

El BER esperado es una función de la relación (E_b/N_o) y a su vez, está en función de la relación portadora a ruido, lo que se expresa en las ecuaciones anteriores. Para el cálculo

del BER se puede considerar un canal satelital lineal sin interferencia donde la probabilidad de error es el obtenido teóricamente, es decir, no existe degradación debido al filtrado o a no linealidades [Maral y Bousquet, 2003]. El BER total del enlace satelital para satélites regeneradores se expresa como la probabilidad de tener un error en el enlace ascendente y de no tener errores en el enlace descendente, o de no tener errores en el enlace ascendente y un error en el enlace descendente [Cabanillas, 2004], lo que se resume en la siguiente ecuación:

$$BER_T = BER_{subida} + BER_{bajada} \quad (49)$$

Si el satélite con OBP es capaz de corregir los errores del enlace ascendente, se llega a la conclusión de que el BER total para satélites con procesamiento a bordo se reduce a los errores introducidos durante el enlace descendente como indica la ecuación (50).

$$BER_T = BER_{bajada} \quad (50)$$

IV.4 Modelo del PLR en Redes Satelitales LEO.

Las razones principales por las que se pueden perder paquetes de VoIP son por daños del equipo de transmisión, por condiciones de congestión en los nodos, y por un exceso de retardo. Un factor determinante en el cálculo del PLR (tasa de paquetes perdidos) en redes satelitales LEO es el número de paquetes que se envían y el número de paquetes que se

pierden a través de la red. El PLR a través de la red satelital se puede cuantificar usando la ecuación (51).

$$PLR = \frac{\text{Número de paquetes perdidos}}{\text{Número de paquetes enviados}} \quad (51)$$

IV.5 Modelo del Caudal Eficaz en las Redes Satelitales.

El caudal eficaz (CE) está relacionado en gran parte con el parámetro del PLR en las redes satelitales, y como se mencionó en el capítulo II.6.5, el CE representa el tráfico que se recibió con éxito. Se puede representar por medio de la expresión (52):

$$CE = \frac{\text{Número de paquetes recibidos}}{\text{Número de paquetes enviados}} \quad (52)$$

IV.6 Conclusiones.

En este capítulo se modelaron parámetros de calidad de servicio relacionados con la transmisión de voz sobre IP para redes satelitales LEO de banda ancha en tiempo real, como es la latencia, la variación en el retardo de arribo de los paquetes, la tasa de bits erróneos, la tasa de paquetes perdidos y el caudal eficaz, lo que ayuda a sustentar los resultados obtenidos de la simulación. Se discutió la manera en que los problemas causados por el desplazamiento de los satélites pueden afectar a cada uno de los parámetros de QoS, pudiendo ser el jitter el parámetro más afectado. Una vez que se han presentado los

fundamentos y herramientas necesarias, en el siguiente capítulo se explica el proceso de simulación del funcionamiento de las redes satelitales LEO de banda ancha en tiempo real para la transmisión de paquetes VoIP.

V RESULTADOS DE SIMULACIÓN Y ANÁLISIS NUMÉRICO.

Introducción.

En el capítulo anterior se realizó un análisis de los parámetros de QoS de VoIP para redes satelitales LEO en tiempo real, que ayuda a evaluar, analizar y modelar su comportamiento. En este capítulo se tiene como finalidad presentar los resultados de las simulaciones, así como un análisis numérico de las estadísticas obtenidas. Primeramente se establecen las consideraciones de simulación para poder evaluar cada uno de los parámetros de QoS, así como consideraciones propias del simulador de red NS-2, mediante el cual se tratará de recrear una red satelital LEO en tiempo real para el transporte de VoIP. Así mismo, se discute la ventaja de emplear ISLs de unión cruzada y se comparan las métricas de enrutamiento de conteo de saltos y del cálculo del retardo de propagación del algoritmo de vector de distancia.

V.1 Consideraciones de Simulación.

Para la simulación del funcionamiento de las redes LEOS se requiere establecer las consideraciones necesarias que permitan proponer los escenarios e iniciar el proceso de simulación. Las consideraciones para las simulaciones son las siguientes:

- ❖ Dependiendo de las características de los parámetros orbitales, de la geometría Tierra-satélite y al tipo de constelación, se pueden realizar diferentes diseños de redes satelitales LEO en tiempo real de banda ancha. Esta tesis se enfoca al diseño de una red

en particular considerando características cercanas a las redes satelitales LEO actuales como la de Iridium. En la Tabla V se describe la configuración del diseño de red satelital propuesto en base al modelo antes descrito. Para el diseño gráfico, se utilizó el software satelital SaVi® bajo el sistema operativo Linux [Wood, 2000].

Tabla V. Configuración de la constelación satelital propuesta.

<i>Altura orbital</i>	1500 km
<i>Ángulo mínimo de elevación</i>	20°
<i>Inclinación de la órbita con respecto al ecuador</i>	70°
<i>Planos orbitales</i>	6
<i>Satélites por plano orbital</i>	11
<i>Número total de satélites</i>	66
<i>Separación entre planos orbitales</i>	31.6°
<i>Área efectiva de cobertura de cada satélite</i>	13.553x10 ⁶ km ²
<i>Periodo orbital</i>	115.98 minutos

Se considera un valor del ángulo de inclinación con respecto al ecuador de 70° lo que permite una menor oferta satelital en los polos y una mayor en zonas pobladas. La Figura 11 muestra la visualización de la constelación satelital LEO propuesta, que corresponde a los valores de la Tabla V, en donde se aprecian las posiciones de los planos orbitales y de los satélites en determinado momento sobre la Tierra.

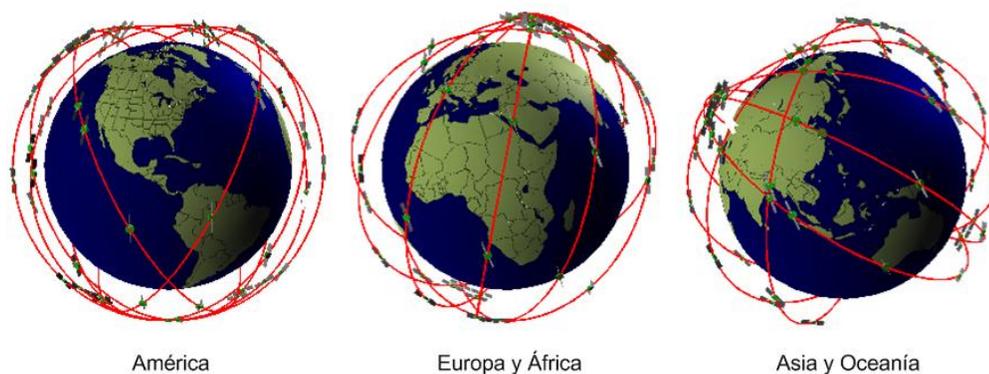


Figura 11. Visualización de la constelación propuesta sobre la superficie terrestre.

La Figura 12 permite observar la huella de cobertura satelital sobre la superficie terrestre, así como la trayectoria de los satélites para la constelación LEO propuesta.

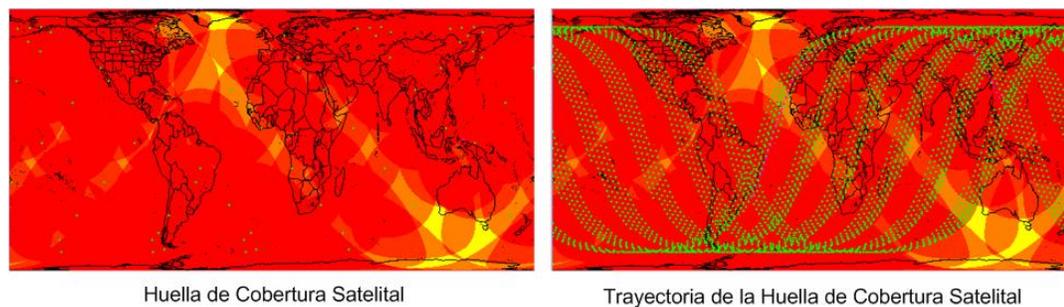


Figura 12. Huella y trayectoria de cobertura satelital sobre la superficie terrestre.

- ❖ Se considera que el proceso de codificación de voz sobre IP se implementa en el sitio del usuario final localizado en las estaciones terrenas, además de que el equipo del usuario posee una capacidad de procesamiento lo suficientemente potente como para despreciar el retardo por codificación y paquetización. Para esto, se considera la mayor tasa de transmisión de los paquetes que corresponde a la salida del codificador G.711 (64Kbps), ya que de los codificadores propuestos para VoIP es el que ocupa mayor

ancho de banda, elección que se hace para emplear el peor de los casos. Para el proceso de la simulación se considera la generación de un tamaño de paquete VoIP de 210 bytes, a una tasa de bit constante (CBR), transportado por el protocolo de datagrama de usuario (UDP).

- ❖ La arquitectura de red satelital a implementar es de tipo malla debido a que se considera la utilización de satélites con OBP capaces de realizar ISLs. El tipo de procesamiento a bordo a considerar es el de conmutación de paquetes.
- ❖ La banda de frecuencia a emplear en el enlace ascendente y en el enlace descendente es la Ku (14.25 GHz para el enlace ascendente y 11.95 GHz para el enlace descendente), y la banda de frecuencia para ISLs es la banda K con 25 GHz, de acuerdo a las frecuencias asignadas por la ITU.
- ❖ Para el proceso de simulación se considera emplear tanto ISLs comunes como ISLs de unión cruzada (cross-seam) de acuerdo al escenario planteado. Cada uno de los satélites serán capaces de enlazarse con cuatro vecinos en total, dos enlaces en el mismo plano orbital (anterior y posterior al satélite) y dos enlaces con sus dos planos orbitales adyacentes (uno a la izquierda y otro a la derecha).
- ❖ Debido a que no se toma en cuenta el uso de antenas capaces de dirigir electrónicamente su haz a bordo de los satélites, el tipo de técnica para el traspaso del enlace se considerará asíncrono.
- ❖ Se consideran estaciones terrenas equipadas con circuitos electrónicos capaces de corregir el efecto Doppler previamente caracterizado y calculado.

- ❖ El algoritmo de enrutamiento de paquetes que se considerará es del tipo adaptable debido al constante cambio de la topología de la red satelital. En particular se empleará el algoritmo de vector de distancia, donde las métricas de costo consideradas en este trabajo es el de conteo de saltos y de retardo de propagación, según el escenario a plantear.
- ❖ No se consideran retardos por procesamiento a bordo del satélite ni retardo por técnica de control de acceso al medio en el cálculo de la latencia debido a que el simulador de red NS no calcula dichos retardos.
- ❖ Se considerarán parámetros para el cálculo del BER en las estaciones terrenas como diámetro de la antena transmisora, diámetro de la antena receptora, potencia de transmisor, y potencia del receptor, entre los más importantes, así como parámetros en relación al lugar donde se encuentran localizadas tal como la región pluvial.
- ❖ En base a la red satelital diseñada, se consideran realizar enlaces para la transmisión de paquetes VoIP entre estaciones terrenas localizadas en Ensenada, Acapulco y Madagascar y así poder evaluar el valor de latencia, jitter, tasa de error de bit, tasa de paquetes perdidos y caudal eficaz de los paquetes transmitidos. A continuación se muestran las coordenadas geográficas de la localización de las estaciones terrenas propuestas.
 - a) Ensenada, México (Latitud: 31.5° Norte y Longitud: 116.3° Oeste)
 - b) Acapulco, México (Latitud: 16.76° Norte y Longitud: 99.75° Oeste)
 - c) Antananarivo, Madagascar (Latitud: 18.8° Sur y Longitud: 47.48° Este)

La elección del sitio en Antananarivo, Madagascar se hizo en base a que este lugar es el más opuesto a la ciudad de Ensenada, México, al otro lado del mundo, sobre tierra firme. Por lo tanto, este sitio presenta las condiciones de mayor distancia en un enlace de comunicaciones de tipo global. La estación terrena localizada en la ciudad de Ensenada actúa siempre como estación transmisora, mientras que las estaciones terrenas localizadas en las ciudades de Acapulco y Antananarivo serán siempre estaciones receptoras. De esta manera se tendrán los siguientes enlaces para los cuales se evaluarán los parámetros de QoS para la aplicación de VoIP:

- a) **Enlace 1:** Ensenada → Acapulco
- b) **Enlace 2:** Ensenada → Antananarivo

V.2 Características del Ambiente del Simulador de Red NS-2.

El simulador de red es un simulador conducido por eventos. Tiene una arquitectura orientada a objetos, y los objetos de simulación están implementados por una parte en C++ y por otra parte en una extensión orientada a objetos del lenguaje escrito Tcl conocido como OTcl. Los objetos de simulación existen en ambos dominios de los lenguajes, y la funcionalidad puede ser agregada en cualquiera de estos.

El simulador de red NS-2 no se enfoca en proveer simulaciones detalladas de las capas de enlace y físico, pero grupos de investigación han dado soporte para redes de área local (LAN), modelos de error de canal inalámbrico, y enrutamiento ad-hoc inalámbrico.

Sin embargo, NS-2 no fue diseñado para soportar movilidad de usuario o topologías dinámicas [Henderson y Katz, 2000]. Se debe enfatizar que el simulador NS-2 es más apropiado para simulaciones de protocolos por encima de la capa física en el modelo OSI (Interconexión de Sistemas Abiertos), por lo que se enfoca más a la investigación de protocolos de enrutamiento y de transporte.

V.2.1 Extensiones del NS-2 para Satélite.

La Figura 13 ilustra las adiciones principales al simulador. Se presenta primero un sistema coordinado esférico y se agrega un objeto de posición para cada nodo de red. A este objeto de posición se le puede dar una coordenada inicial y una ecuación que describa su trayectoria a través del sistema coordinado en función del tiempo. El objeto retardo-enlace fue cambiado para regresar un valor basado en las posiciones instantáneas de los nodos en el enlace.

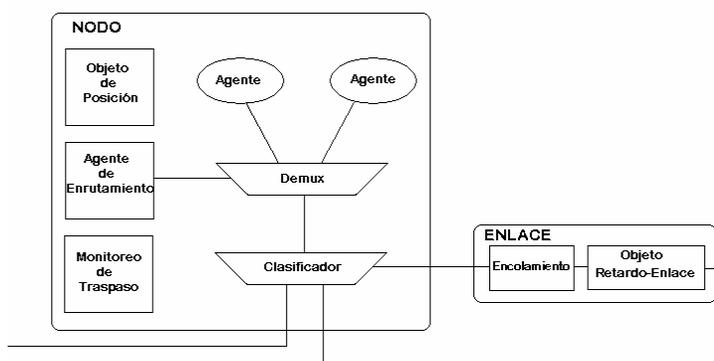


Figura 13. Extensiones para el simulador de red NS-2.

Se introducen agentes de traspaso, que son los responsables de monitorear las oportunidades para quitar, poner o traspasar enlaces. Distintas políticas pueden ser implementadas para realizar los traspasos. Se hace posible la construcción de agentes de enrutamiento dinámico distribuido. El código de enrutamiento que usa el *ns* utiliza un algoritmo de trayectoria corta para calcular nuevas rutas para cada nodo en el simulador cuando cambie la topología. Este algoritmo es útil inicialmente para construir tablas de enrutamiento en topologías estáticas, así que para topologías dinámicas se necesita un cálculo computacional complejo. En esta extensión se implementó algoritmos de trayectoria corta de fuente sencilla y se configuró el simulador para calcular rutas siempre que un paquete requiera ser enviado [Fall y Varadhan, 2005].

V.3 Resultados de Simulación.

Cuando se hacen simulaciones empleando satélites de órbita baja se tiene que considerar el efecto que provoca el movimiento del satélite durante su trayectoria sobre la frecuencia de la señal portadora del enlace. Por lo mismo, es indispensable realizar el cálculo del corrimiento Doppler de frecuencia en las estaciones terrenas con el propósito de compensar dicho efecto.

V.3.1 Caracterización del Efecto Doppler.

La Figura 14 muestra la caracterización del efecto Doppler normalizado (curva S) en cualquier estación terrena durante la duración de la ventana de visibilidad del satélite (τ) considerando la red satelital LEO propuesta.

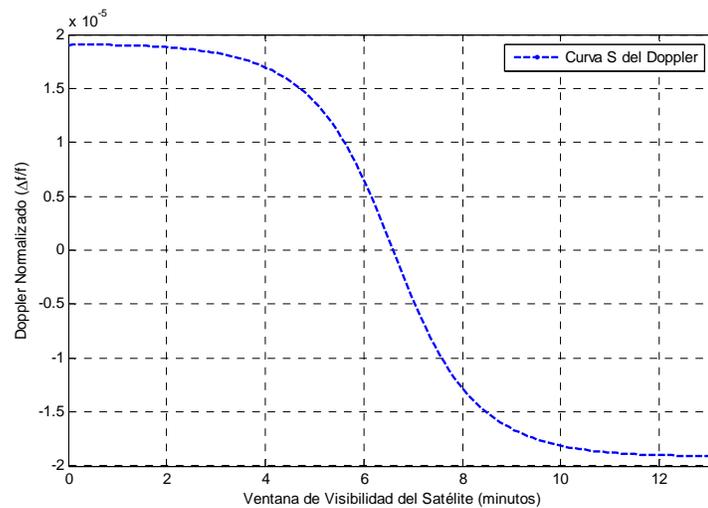


Figura 14. Curva S normalizada del Doppler durante la ventana de visibilidad del satélite.

Como se muestra en la Figura 14, la curva S tiene un mínimo (cero Doppler) exactamente a la mitad de la ventana de visibilidad del satélite, y dos máximos en un principio y en el final de esta ventana. Esto quiere decir que conforme aparezca el satélite en el horizonte, el corrimiento en la frecuencia irá disminuyendo hasta un punto en donde el satélite se encuentre exactamente por encima de la E.T., para ir aumentando conforme el satélite siga su trayecto y desaparezca por el otro lado del horizonte.

Esta aproximación de la curva S del Doppler puede ser obtenida en cualquier punto de la superficie terrestre ya que depende solamente de la geometría Tierra-Satélite durante la duración de la ventana de visibilidad. Estos valores de Doppler son normalizados $\left(\frac{\Delta_f}{f}\right)$, así que solo bastará tomar en cuenta la frecuencia portadora (f) del enlace para saber qué corrimiento (Δ_f) afectará en la estación terrena.

Al saber con anticipación una aproximación esperada del corrimiento Doppler en cualquier estación terrena, se podrá corregir fácilmente empleando algún circuito electrónico como el PLL (lazo amarrado de fase) [Ali *et al.*, 1998].

V.3.2 Esparcimiento del Retardo en Estaciones Terrenas.

La Figura 15 muestra el efecto en el retardo de la señal provocado por la movilidad del satélite durante su trayectoria en las estaciones terrenas. Este efecto es llamado esparcimiento del retardo.

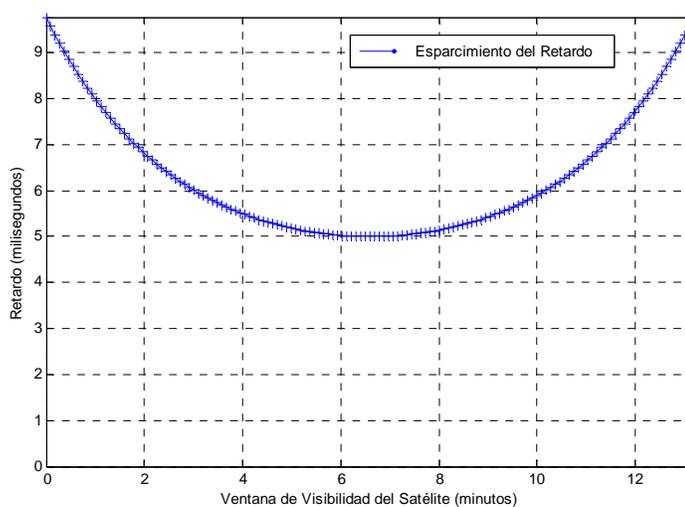


Figura 15. Esparcimiento del retardo en las estaciones terrenas.

Este esparcimiento va a estar presente en cada una de las estaciones terrenas receptoras durante la duración de la ventana de visibilidad (τ). Este efecto es tomado en cuenta en el

proceso de simulación para obtener los resultados de la latencia y el jitter a través de la red satelital presentados a continuación.

V.3.3 Evaluación de los Parámetros de QoS de VoIP.

Para evaluar los parámetros de calidad de servicio como la latencia, variación en el arribo de los paquetes (jitter), tasa de paquetes perdidos (PLR), y caudal eficaz (CE), en una red satelital LEO se desarrolló programación en el simulador de red NS-2. Para evaluar la tasa de error de bits (BER) se realizó el cálculo de presupuesto del enlace. Para realizar la validación del simulador, se obtuvo los resultados de la Figura 16 (b), donde se presentan los valores de retardo al transmitir un paquete por minuto durante un día a una tasa de bit constante (CBR) empleando UDP (Protocolo de Datagrama de Usuario) como protocolo de transporte en un enlace de Nueva York a San Francisco. Este utiliza como parámetros de entrada al simulador características de una constelación Iridium sin emplear ISLs de unión cruzada y con una métrica de costo de enrutamiento de retardo de propagación. Estos resultados de la Figura 16 (b), se comparan con los resultados de la Figura 16 (a), que son los valores del retardo de [Henderson y Katz, 2000] empleando una constelación Iridium en un enlace de Nueva York y San Francisco al transmitir un paquete por minuto durante un día sin emplear ISLs de unión cruzada.

Se observan pequeñas diferencias entre cada una de las gráficas de la Figura 16, pero en general, el comportamiento del retardo de los paquetes tienen una gran coincidencia durante el transcurso del día, incluso en los periodos donde el retardo de los paquetes

aumenta considerablemente debido al no tomar en cuenta la utilización de ISLs de unión cruzada.

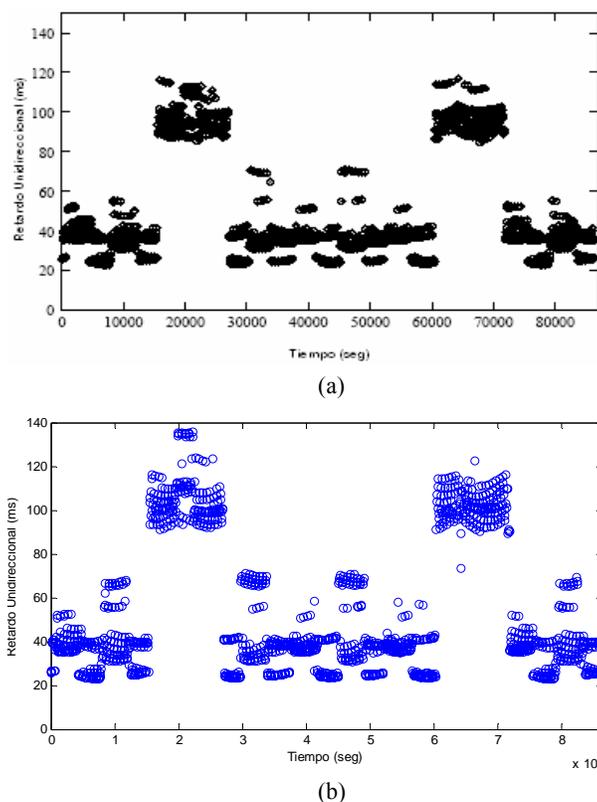
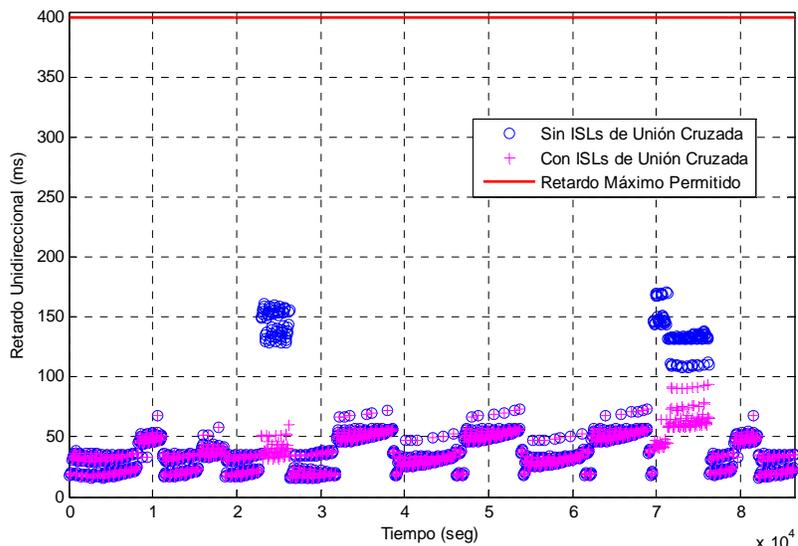


Figura 16. Validación del programa en el simulador: (a) resultados obtenidos por Henderson y Katz, (b) resultados obtenidos en el simulador.

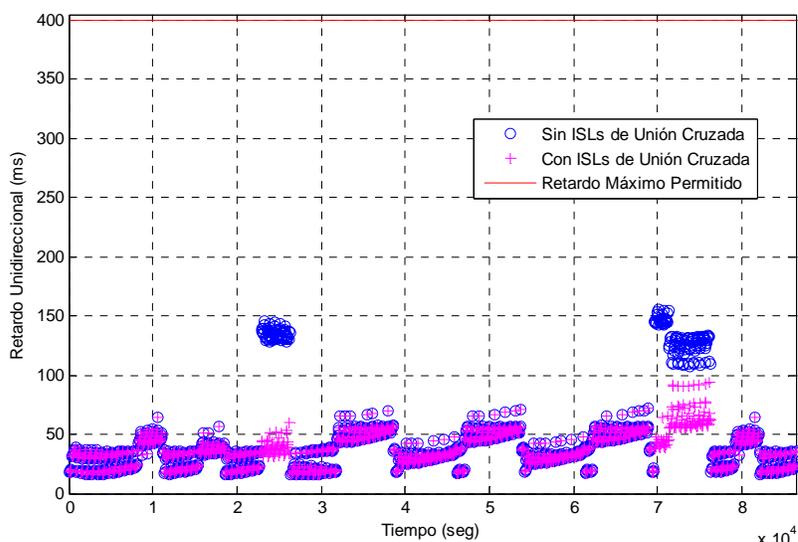
V.3.3.1 Latencia.

La Figura 17 muestra el resultado de la comparación en cuanto al comportamiento del retardo extremo a extremo de los paquetes generados por una fuente VoIP durante el transcurso de un día en el enlace Ensenada→Acapulco con y sin el empleo de ISLs de unión cruzada a través de la red satelital LEO propuesta y realizando la diferencia al

introducir las métricas de costo de enrutamiento del algoritmo de vector de distancia (cálculo de conteo de saltos y cálculo de retardo de propagación).



(a) métrica de costo de conteo de saltos



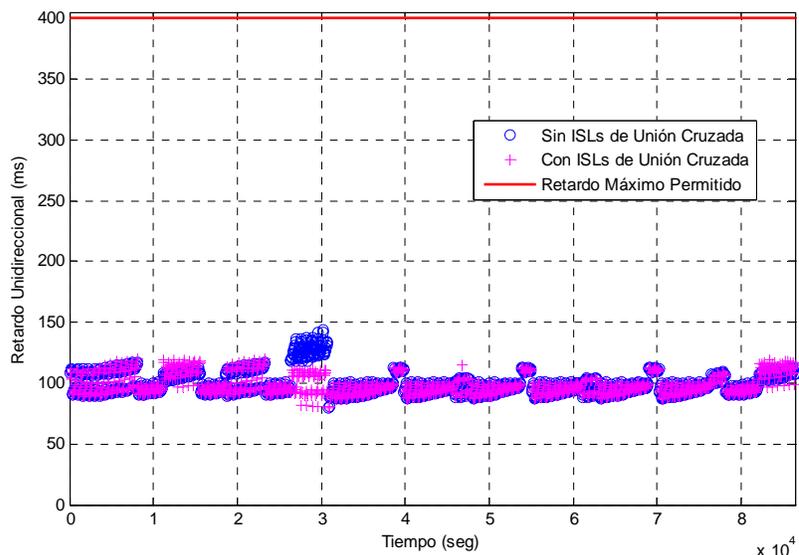
(b) métrica de costo de retardo de propagación

Figura 17. Comportamiento del retardo extremo a extremo entre Ensenada y Acapulco.

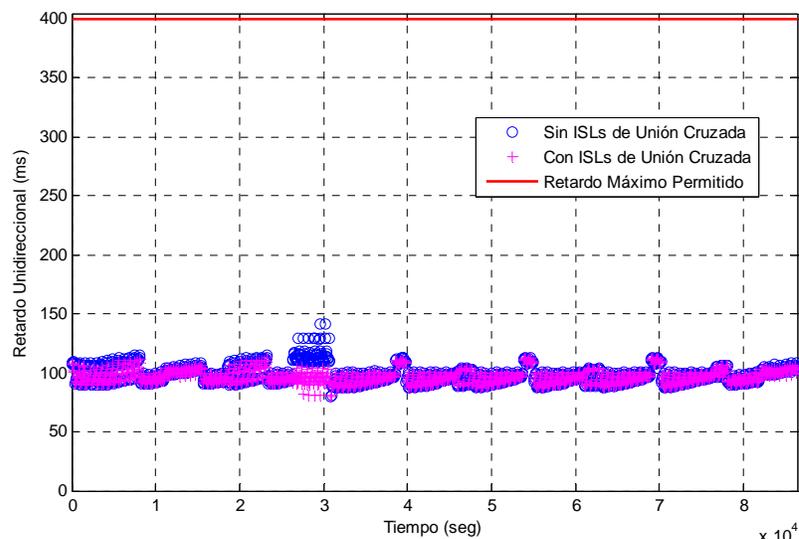
Los resultados de la Figura 17 (a) y (b) muestran como los valores del retardo de paquetes VoIP coinciden en casi todo el periodo del día independientemente si se consideran o no los ISLs de unión cruzada. Sin embargo, hay dos lapsos de tiempo en donde esta consideración afecta en gran medida en el retardo extremo a extremo de los paquetes, ya que cuando no se habilitan los ISLs de unión cruzada, el enrutamiento de paquetes VoIP se hace a través de caminos más largos, lo cual genera mayores retardos de propagación. Estos dos lapsos de tiempo corresponden al intervalo donde las estaciones terrenas de Ensenada y Acapulco se encuentran entre dos planos contra-rotacionales, esto es debido a la topología dinámica de la constelación y a la rotación de la Tierra. Se puede notar una diferencia al emplear diferentes métricas de costo de enrutamiento, en la Figura 17 (a), el conteo de saltos afecta en mayor medida cuando no se emplean ISLs de unión cruzada, y en la Figura 17 (b), el cálculo de retardo de propagación disminuye un poco los retardos máximos del enlace.

La Figura 18 muestra el resultado de la comparación en cuanto al comportamiento del retardo extremo a extremo de los paquetes generados por una fuente VoIP durante el transcurso de un día en el enlace Ensenada→Antananarivo con y sin el empleo de ISLs de unión cruzada a través de la red satelital LEO y realizando la diferencia al introducir las métricas de costo de enrutamiento planteadas. En la Figura 18 incisos (a) y (b) se observa el incremento del retardo de los paquetes VoIP debido a que existe una mayor distancia entre Ensenada y Antananarivo que entre Ensenada y Acapulco. En este enlace solo hay un lapso de tiempo en donde el deshabilitar ISLs de unión cruzada puede afectar

considerablemente, sin embargo, se puede observar que el comportamiento del retardo extremo a extremo es más estable o no tiene variaciones tan drásticas.



(a) métrica de costo de conteo de saltos

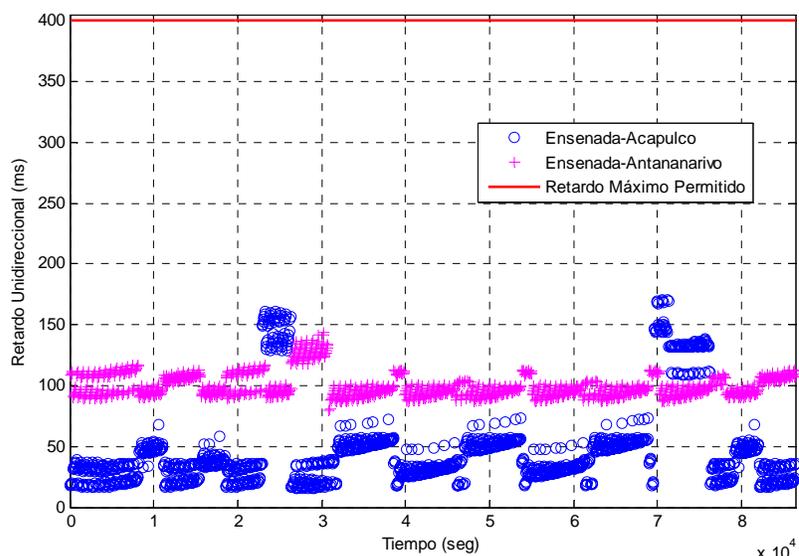


(b) métrica de costo de retardo de propagación

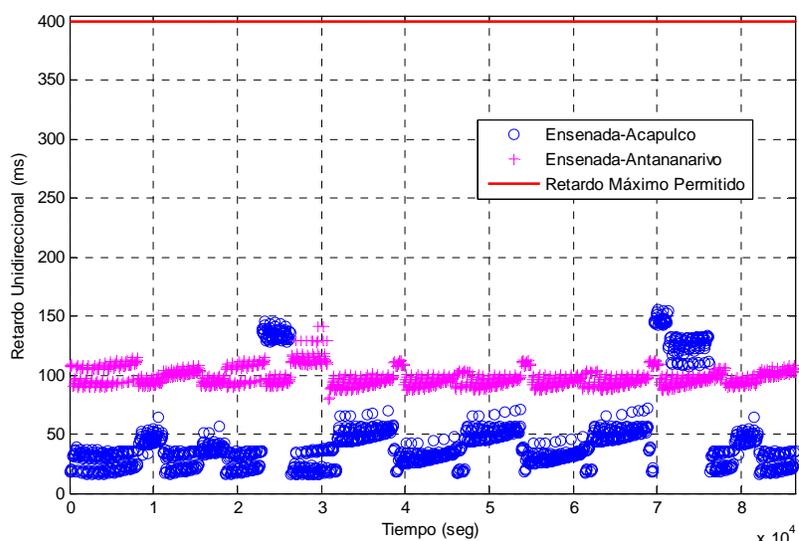
Figura 18. Comportamiento del retardo extremo a extremo entre Ensenada y Antananarivo.

En relación a la métrica de enrutamiento, se puede ver que no existe mucha diferencia entre utilizar una u otra. Sin embargo en la Figura 18 (a) se nota una ligera concentración de paquetes con mayor retardo al emplear la métrica de conteo de saltos mínimos, sobre todo en la primera mitad del día, tanto con ISLs comunes como para ISLs de unión cruzada.

La Figura 19 presenta una comparación del resultado del retardo extremo a extremo de paquetes VoIP entre los dos enlaces planteados sin considerar ISLs de unión cruzada en la red satelital LEO propuesta para ambas métricas de costo de enrutamiento. Si se observa la Figura 19 (a) y (b), se puede notar que la mayoría de los paquetes resultan con menor retardo extremo a extremo en el enlace Ensenada→Acapulco, a excepción de los dos periodos donde se incrementa de manera considerable, observándose un retardo extremo a extremo igual o incluso mayor que en el enlace Ensenada→Antananarivo. En relación a la métrica de enrutamiento, se nota un mejor comportamiento tanto en el enlace entre Ensenada y Acapulco como en el enlace entre Ensenada y Antananarivo, cuando se emplea el cálculo de retardo de propagación. Esta mejoría se puede observar en la Figura 19 (b), ya que disminuye el número de paquetes con retardos elevados, a comparación de la métrica de enrutamiento del cálculo de conteo de saltos mínimos que se observa en la Figura 19 (a).



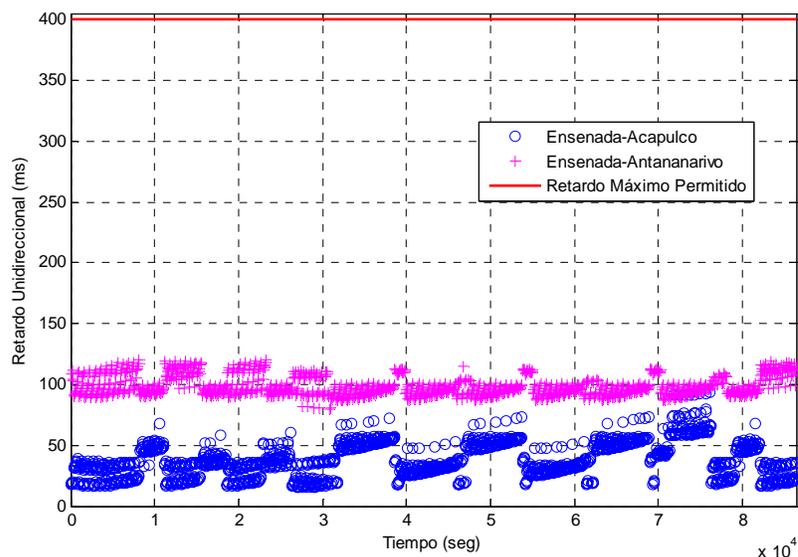
(a) métrica de costo de conteo de saltos



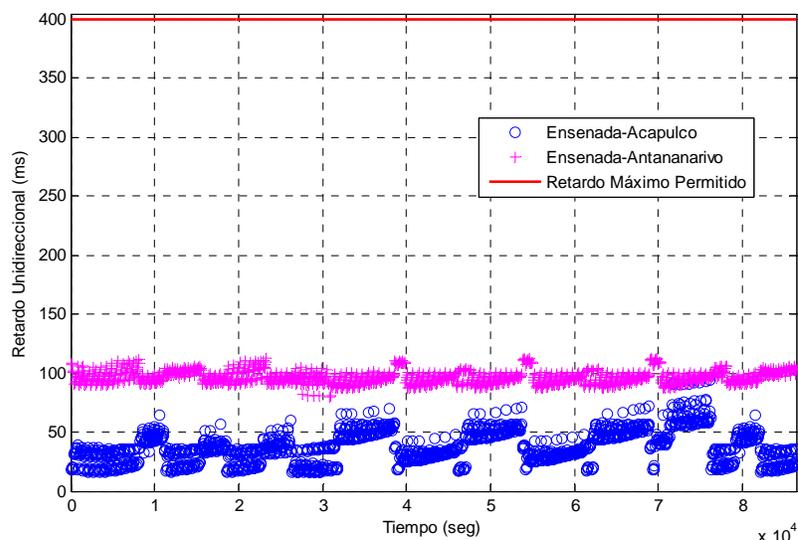
(b) métrica de costo de retardo de propagación

Figura 19. Comparación del retardo extremo a extremo entre Ensenada-Acapulco y Ensenada-Antananarivo sin considerar ISLs de unión cruzada.

La Figura 20 presenta una comparación del retardo extremo a extremo de paquetes VoIP entre los enlaces a considerar habilitando los ISLs de unión cruzada en la red satelital LEO propuesta para ambas métricas de costo de enrutamiento.



(a) métrica de costo de conteo de saltos



(b) métrica de costo de retardo de propagación

Figura 20. Comparación del retardo extremo a extremo entre Ensenada-Acapulco y Ensenada-Antananarivo empleando ISLs de unión cruzada.

En esta ocasión, se observa que el empleo de ISLs de unión cruzada reduce más notablemente el retardo extremo a extremo de los paquetes en el enlace

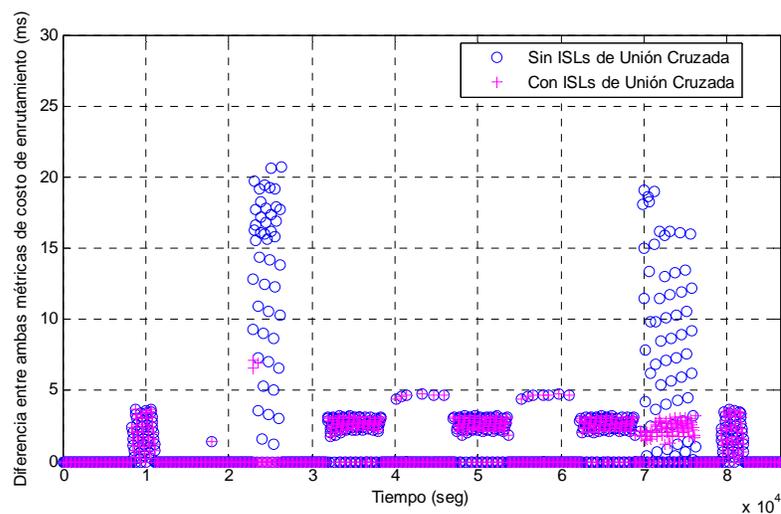
Ensenada→Acapulco. Y se nota que no existe diferencia tan visible entre las diferentes métricas de costo de enrutamiento de la Figura 20 (a) y (b).

En la Tabla VI se resumen las estadísticas obtenidas de las simulaciones más importantes acerca del retardo extremo a extremo de los enlaces propuestos empleando las dos diferentes métricas de costo de enrutamiento a considerar.

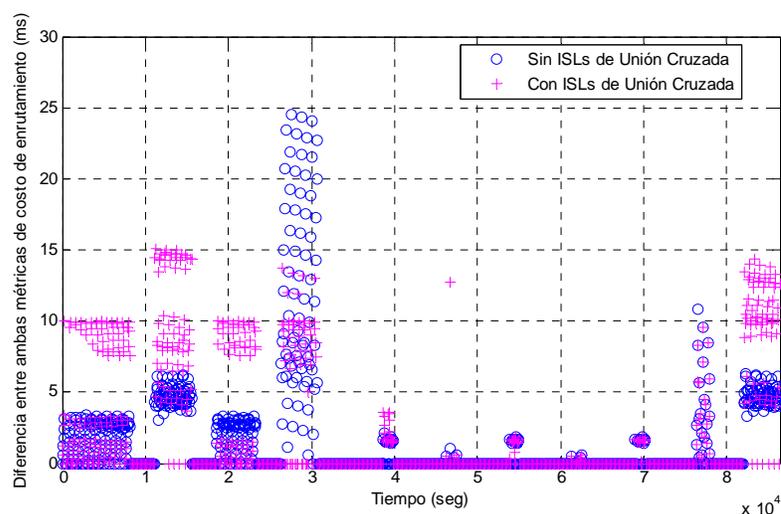
Tabla VI. Estadísticas obtenidas del retardo.

ENLACE	RETARDO Máximo Establecido: 400 ms Métrica de Costo: Conteo de Saltos	RETARDO Máximo Establecido: 400 ms Métrica de Costo: Retardo de Propagación
<i>Ensenada-Acapulco sin ISLs de Unión Cruzada</i>	Retardo Mínimo: 15.7 ms Retardo Máximo: 170.9 ms Retardo Promedio: 35.6 ms Desv. Estándar: 35.515	Retardo Mínimo: 15.7 ms Retardo Máximo: 156.1 ms Retardo Promedio: 35.6 ms Desv. Estándar: 33.361
<i>Ensenada-Acapulco con ISLs de Unión Cruzada</i>	Retardo Mínimo: 15.7 ms Retardo Máximo: 93.7 ms Retardo Promedio: 35.3 ms Desv. Estándar: 14.595	Retardo Mínimo: 15.7 ms Retardo Máximo: 93.7 ms Retardo Promedio: 35.3 ms Desv. Estándar: 14.002
<i>Ensenada-Antananarivo sin ISLs de Unión Cruzada</i>	Retardo Mínimo: 79.8 ms Retardo Máximo: 143.5 ms Retardo Promedio: 96.3 ms Desv. Estándar: 9.8699	Retardo Mínimo: 79.8 ms Retardo Máximo: 141.5 ms Retardo Promedio: 96.2 ms Desv. Estándar: 7.7038
<i>Ensenada-Antananarivo con ISLs de Unión Cruzada</i>	Retardo Mínimo: 79.8 ms Retardo Máximo: 113.1 ms Retardo Promedio: 95.8 ms Desv. Estándar: 8.1556	Retardo Mínimo: 79.8 ms Retardo Máximo: 113.1 ms Retardo Promedio: 95.8 ms Desv. Estándar: 5.6402

A continuación se presenta la Figura 21, donde se muestra claramente la diferencia entre elegir una métrica de costo de enrutamiento de conteo de saltos mínimos y una métrica de costo óptima como es el cálculo del retardo mínimo de propagación durante la trayectoria de los paquetes VoIP en cada uno de los enlaces.



(a) Ensenada-Acapulco



(b) Ensenada-Antananarivo

Figura 21. Diferencia de retardo entre la métrica de conteo de saltos y la métrica de retardo de propagación.

Se puede ver en la Figura 21 que existe una diferencia en el retardo de la trayectoria de los paquetes al usar la métrica del retardo de propagación contra la métrica de conteo de saltos, sobre todo en enlace entre Ensenada y Antananarivo y más aún cuando se emplean los ISLs de unión cruzada, Figura 21 (b).

En la Tabla VII se presenta las estadísticas obtenidas acerca de la diferencia entre usar el cálculo de conteo de saltos mínimos y el cálculo del retardo de propagación como trayectoria más corta.

Tabla VII. Estadísticas de la diferencia del retardo entre las métricas de costo de enrutamiento.

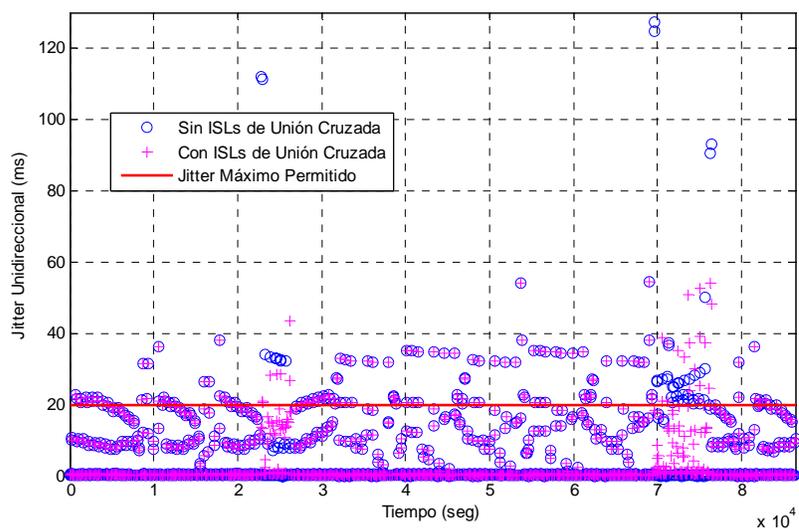
ENLACE	Diferencia de Retardo Entre Métricas de Costo de Enrutamiento
<i>Ensenada-Acapulco sin ISLs de Unión Cruzada</i>	Diferencia Mínima: 0 ms Diferencia Máxima: 20.7 ms Diferencia Promedio: 1.33 ms Desv. Estándar: 3.2733
<i>Ensenada-Acapulco con ISLs de Unión Cruzada</i>	Diferencia Mínima: 0 ms Diferencia Máxima: 7.1 ms Diferencia Promedio: 0.67 ms Desv. Estándar: 1.2116
<i>Ensenada-Antananarivo sin ISLs de Unión Cruzada</i>	Diferencia Mínima: 0 ms Diferencia Máxima: 24.5 ms Diferencia Promedio: 1.44 ms Desv. Estándar: 3.3053
<i>Ensenada-Antananarivo con ISLs de Unión Cruzada</i>	Diferencia Mínima: 0 ms Diferencia Máxima: 15.1 ms Diferencia Promedio: 1.9 ms Desv. Estándar: 3.8275

V.3.3.2 Jitter.

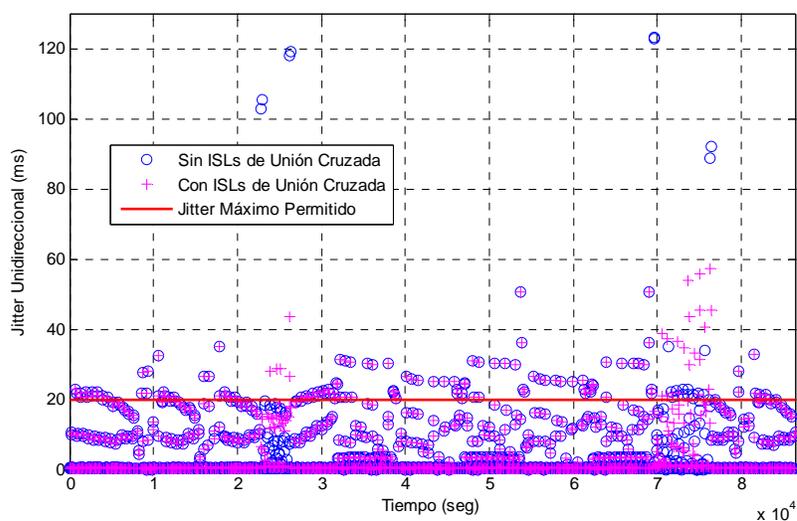
La variación del retardo de los paquetes, es generado por la topología dinámica de la constelación satelital LEO, provocando que el retardo en el arribo de cada paquete consecutivo obtenga distintos valores, a lo que se le denomina jitter. A continuación se presentan una serie de resultados del jitter obtenidos del simulador durante los enlaces propuestos.

En la Figura 22 se muestra el resultado de la comparación en cuanto al comportamiento del jitter de los paquetes recibidos de una fuente VoIP durante el transcurso de un día en el enlace Ensenada→Acapulco con y sin empleo de ISLs de unión cruzada a través de la red satelital LEO propuesta y realizando la diferencia al introducir las métricas de costo de enrutamiento del algoritmo de vector de distancia (cálculo de conteo de saltos y cálculo de retardo de propagación). Como se muestra en la Figura 22 (a) y (b), el jitter generado en la red satelital tiene un comportamiento muy parecido, independientemente de la métrica de costo de enrutamiento utilizada. Durante los periodos donde se tienen mayores retardos, el jitter obtenido al no utilizar ISLs de unión cruzada presenta en general un mejor comportamiento a excepción de unos cuantos paquetes que se encuentran por encima del jitter obtenido con ISLs de unión cruzada. Esto se puede deber a que con ISLs de unión cruzada, los traspasos del enlace entre satélites son demasiado rápido en la región de unión, y sobre todo a que la distancia entre Ensenada y Acapulco es corta, y por lo tanto estas variaciones se ven rápidamente reflejadas. En este enlace se

observa que existen valores de jitter muy por encima del máximo permitido, sin embargo la mayoría de los paquetes presenta un comportamiento aceptable.



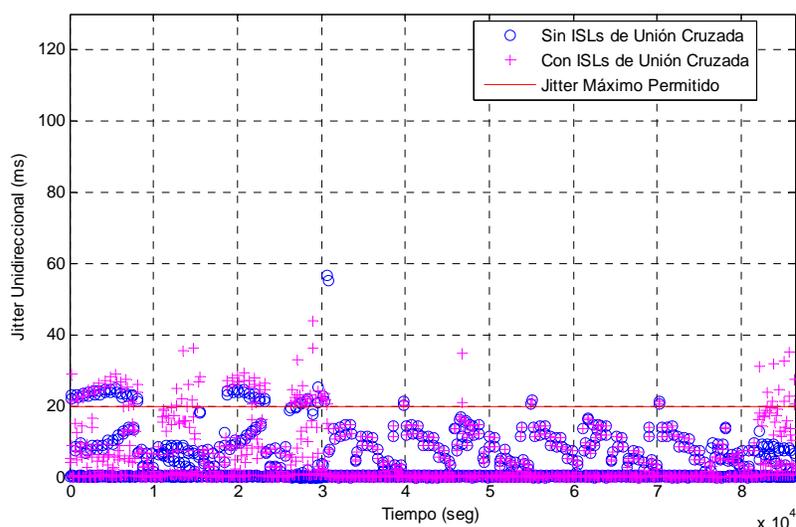
(a) métrica de costo de conteo de saltos



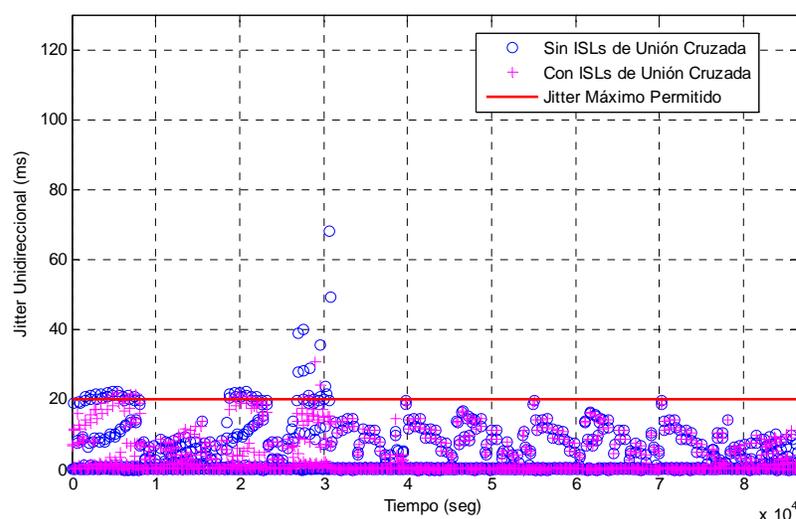
(b) métrica de consto de retardo de propagación

Figura 22. Comportamiento del jitter en el enlace Ensenada-Acapulco.

La Figura 23 muestra el resultado de la comparación en cuanto al comportamiento del jitter de los paquetes recibidos por una fuente VoIP durante el transcurso de un día en el enlace Ensenada→Antananarivo con y sin empleo de ISLs de unión cruzada a través de la red satelital LEO y realizando la diferencia al introducir las métricas de costo de enrutamiento planteadas. Se observa que al igual que en el enlace anterior, el comportamiento del jitter es muy parecido independientemente de la métrica de costo de enrutamiento empleada. Sin embargo, el jitter obtenido en la región de unión cuando se emplea la métrica de retardo de propagación observado en la Figura 23 (b) tiene una mejoría en relación a la métrica de costo de conteo de saltos visto en la Figura 23 (a). Esta diferencia se hace más notoria cuando se emplean los ISLs de unión cruzada. Una observación importante es que a diferencia del enlace Ensenada→Acapulco donde la distancia entre estas ciudades influye a que el jitter generado por ISLs de unión cruzada se vea afectado en mayor medida, en el enlace Ensenada→Antananarivo esta variación del jitter es compensada conforme el paquete sigue su trayectoria hasta la estación terrena. Este enlace presenta valores de jitter menores que el máximo permitido en su mayoría y aún menores que los obtenidos en el enlace entre Ensenada y Acapulco.



(a) métrica de costo de conteo de saltos

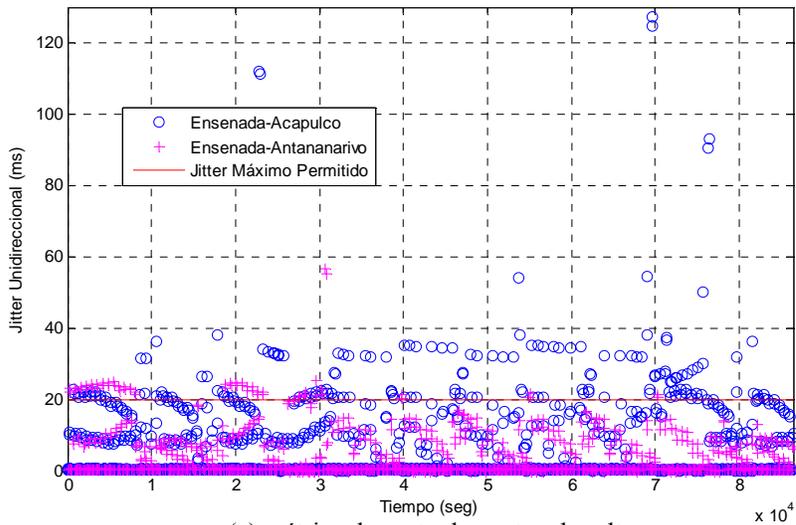


(b) métrica de costo de retardo de propagación

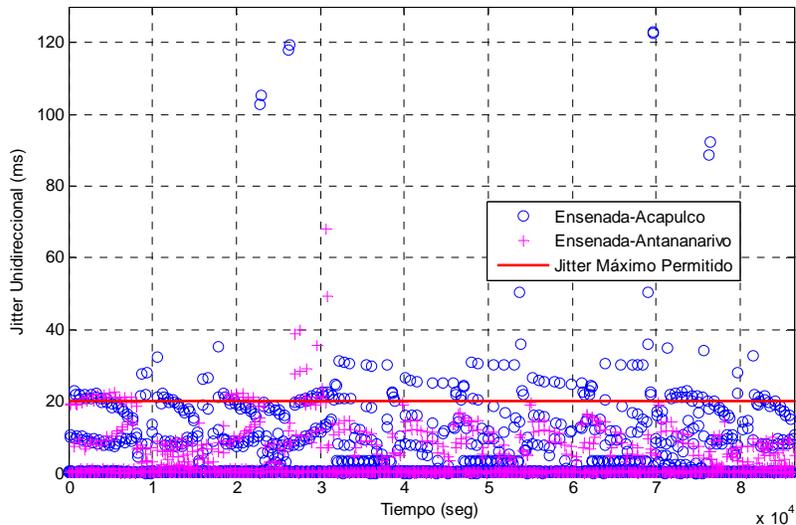
Figura 23. Comportamiento del jitter en el enlace Ensenada-Antananarivo.

A continuación en la Figura 24 se presenta una comparación del resultado del jitter de paquetes VoIP recibidos entre los dos enlaces propuestos, sin considerar ISLs de unión cruzada en la red satelital LEO para ambas métricas de costo de enrutamiento. Se nota que los valores de jitter en el enlace Ensenada→Acapulco son mayores a los valores del jitter

presentados por el enlace Ensenada→Antananarivo donde casi todos los paquetes tienen un valor de jitter por debajo de lo permitido.



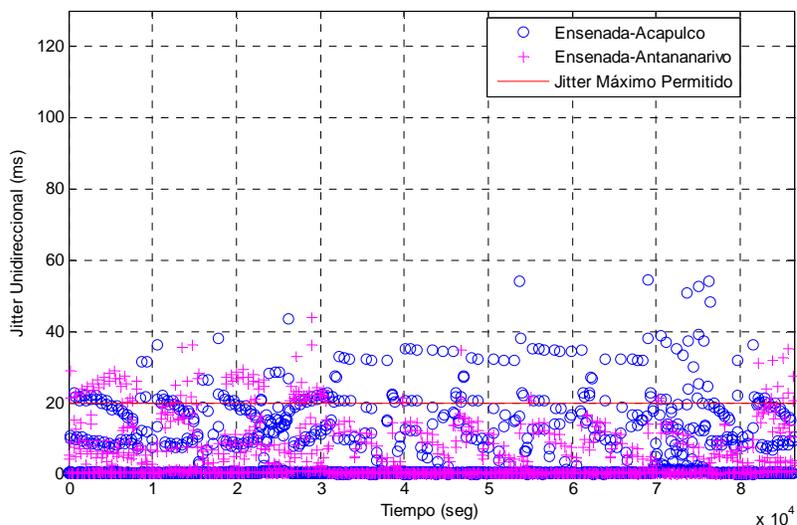
(a) métrica de costo de conteo de saltos



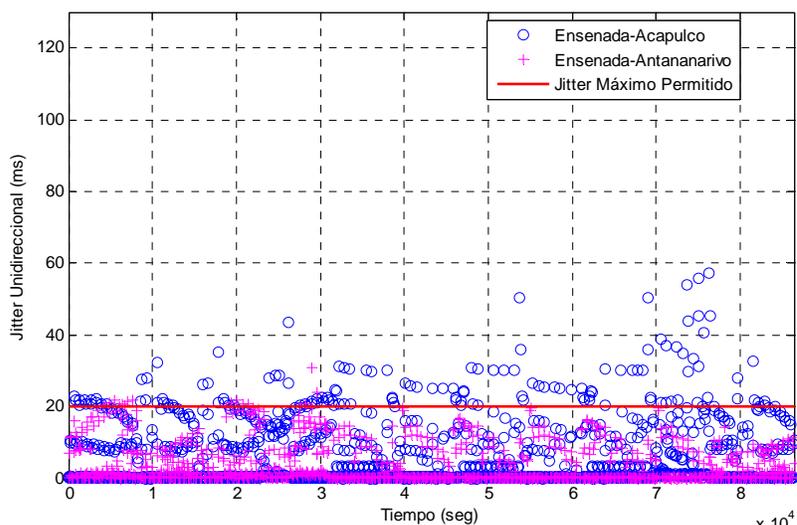
(b) métrica de costo de retardo de propagación

Figura 24. Comparación del jitter entre Ensenada-Acapulco y Ensenada-Antananarivo sin considerar ISLs de unión cruzada.

En el otro caso, la Figura 25 presenta una comparación del jitter de los paquetes VoIP recibidos entre los enlaces propuestos habilitando los ISLs de unión cruzada en la red satelital LEO para ambas métricas de costo de enrutamiento.



(a) métrica de costo de conteo de saltos



(b) métrica de costo de retardo de propagación

Figura 25. Comparación del jitter Ensenada-Acapulco y Ensenada-Antananarivo empleando ISLs de unión cruzada.

En la Figura 25 se puede notar una leve mejoría en el comportamiento del jitter al emplear la métrica de costo de retardo de propagación. También se puede ver que el habilitar ISLs de unión cruzada durante la simulación, genera valores de jitter menos elevados. Para el enlace Ensenada→Antananarivo se tiene en su mayoría, un jitter por debajo del máximo permitido. A continuación se presenta la Tabla VIII de las estadísticas obtenidas del jitter de paquetes VoIP entre los enlaces propuestos empleando las dos diferentes métricas de costo de enrutamiento.

Tabla VIII. Estadísticas obtenidas del jitter.

ENLACE	JITTER Máximo Establecido: 20 ms Métrica de Costo: Conteo de Saltos	JITTER Máximo Establecido: 20 ms Métrica de Costo: Retardo de Propagación
<i>Ensenada-Acapulco sin ISLs de Unión Cruzada</i>	Jitter Mínimo: 0 ms Jitter Máximo: 141.5 ms Jitter Promedio: 0.3 ms Desv. Estándar: 12.55	Jitter Mínimo: 0 ms Jitter Máximo: 123 ms Jitter Promedio: 0.4 ms Desv. Estándar: 11.194
<i>Ensenada-Acapulco con ISLs de Unión Cruzada</i>	Jitter Mínimo: 0 ms Jitter Máximo: 54.3 ms Jitter Promedio: 0.4 ms Desv. Estándar: 9.2934	Jitter Mínimo: 0 ms Jitter Máximo: 57.4 ms Jitter Promedio: 0.4 ms Desv. Estándar: 8.8475
<i>Ensenada-Antananarivo sin ISLs de Unión Cruzada</i>	Jitter Mínimo: 0 ms Jitter Máximo: 56.8 ms Jitter Promedio: 0.3 ms Desv. Estándar: 5.9367	Jitter Mínimo: 0 ms Jitter Máximo: 68.1 ms Jitter Promedio: 0.35 ms Desv. Estándar: 6.0066
<i>Ensenada-Antananarivo con ISLs de Unión Cruzada</i>	Jitter Mínimo: 0 ms Jitter Máximo: 43.9 ms Jitter Promedio: 0.5 ms Desv. Estándar: 7.31	Jitter Mínimo: 0 ms Jitter Máximo: 30.7 ms Jitter Promedio: 0.4 ms Desv. Estándar: 5.0627

La Tabla VIII muestra que el jitter alcanza valores por arriba del permitido (20 ms), sin embargo el jitter promedio de los paquetes en cada uno de los enlaces se encuentra en 0.4 ms. Al igual que el retardo, el uso de los ISLs de unión cruzada disminuye significativamente el jitter máximo en cada enlace.

V.3.3.3 Tasa de Error de Bit (BER).

Debido a que se consideran satélites con OBP, se considera una tasa de error de bit únicamente en el enlace descendente de las estaciones terrenas receptoras (ver capítulo II.2.3.2). Los parámetros más importantes que fueron considerados para el cálculo del BER son el diámetro de la antena de transmisión (10 m), diámetro de la antena receptora (1 m), potencia del transmisor (100 W), potencia del receptor (5 W), así como región pluvial de Acapulco y de Antananarivo entre otros.

La Figura 26 presenta el comportamiento del BER en el enlace descendente en la estación terrena de recepción del enlace Ensenada→Acapulco durante el tiempo de visibilidad total del satélite. Se nota en la Figura 26 que el comportamiento del BER en el enlace entre Ensenada y Acapulco mejora conforme el satélite sigue su trayectoria por encima de la estación terrena hasta llegar a un punto donde se obtiene el BER mínimo del enlace para después ir aumentando conforme el satélite desaparece del horizonte local. Cabe señalar que el tiempo de visibilidad total del satélite (17.47 minutos para la constelación propuesta) es el tiempo que resulta al considerar un ángulo de elevación de cero grados en la estación terrena. Es importante observar los puntos donde el BER supera

el máximo permitido ya que a continuación se nota una ligera diferencia con respecto al enlace entre Ensenada y Antananarivo.

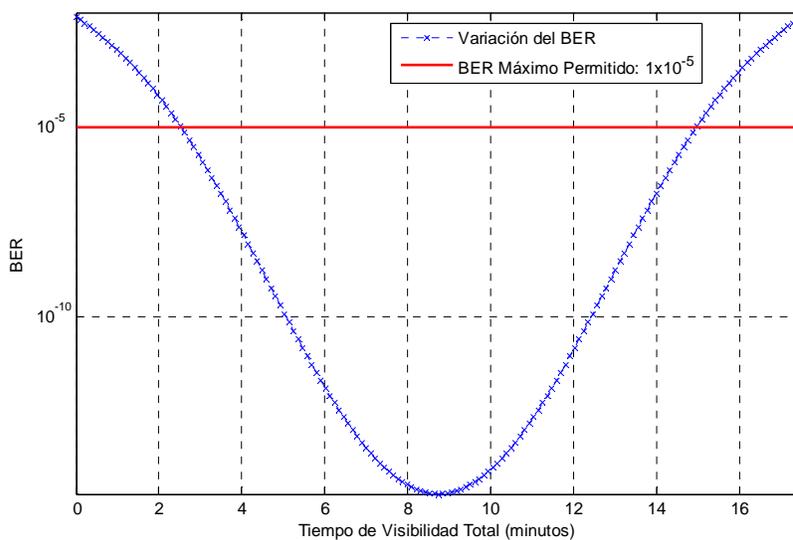


Figura 26. Variación del BER en el enlace descendente entre Ensenada y Acapulco.

En la Figura 27 se presenta el comportamiento del BER en la estación terrena de recepción durante el enlace descendente entre Ensenada y Antananarivo durante el tiempo de visibilidad total del satélite. En el enlace entre Ensenada y Antananarivo se puede observar por medio de la Figura 27 un ligero aumento del tiempo en que el nivel del BER está por encima de lo permitido. Sin embargo, las dos figuras anteriores son semejantes en el sentido de que en ambos enlaces se nota que la mayor parte del tiempo se obtiene un BER inferior al máximo permitido.

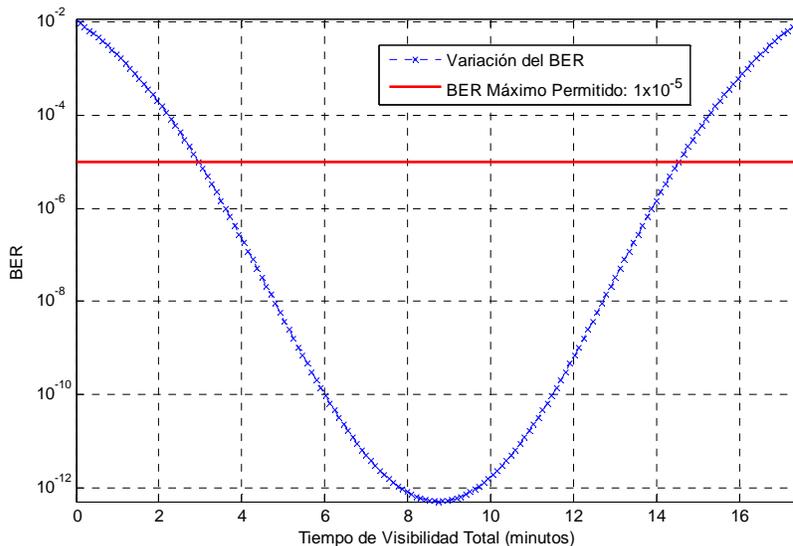


Figura 27. Variación del BER en el enlace descendente entre Ensenada y Antananarivo.

A continuación, en la Tabla IX se muestran las estadísticas más importantes de la relación portadora a ruido (C/N) y de la tasa de error de bit en cada uno de los enlaces.

Tabla IX. Estadísticas del C/N y del BER en los enlaces satelitales.

ENLACE	C/N Total	BER Máximo Establecido: 1×10^{-5}
<i>Ensenada-Acapulco</i>	C/N Máximo: 26.195 dB C/N Mínimo: 10.873 dB C/N Promedio: 23.256 dB Desv. Estándar: 4.3397	BER Máximo: 8.65×10^{-3} BER Mínimo: 2.173×10^{-15} BER Promedio: 3.0083×10^{-9} Desv. Estándar : 0.00157
<i>Ensenada-Antananarivo</i>	C/N Máximo: 25.275 dB C/N Mínimo: 9.9531 dB C/N Promedio: 22.336 dB Desv. Estándar: 4.3397	BER Máximo: 11.25×10^{-3} BER Mínimo: 5.1413×10^{-13} BER Promedio: 5.102×10^{-8} Desv. Estándar : 0.00214

En la Tabla X se muestra el tiempo en que el BER fue superior o inferior en cada uno de los enlaces.

Tabla X. Tiempo de visibilidad inferior y superior del BER máximo permitido.

ENLACE	Tiempo de Visibilidad del Satélite en la Estación Terrena Tvisibilidad = 17.47 minutos
<i>Ensenada-Acapulco</i>	Tvisibilidad inferior a un BER de $1 \times 10^{-5} = 12.26$ minutos Tvisibilidad superior a un BER de $1 \times 10^{-5} = 5.21$ minutos
<i>Ensenada-Antananarivo</i>	Tvisibilidad inferior a un BER de $1 \times 10^{-5} = 11.40$ minutos Tvisibilidad superior a un BER de $1 \times 10^{-5} = 6.07$ minutos

En la Tabla IX se puede ver que el comportamiento del BER para el enlace entre Ensenada y Acapulco es ligeramente mejor que en el enlace entre Ensenada y Antananarivo. Y en la Tabla X se muestra el tiempo de cada enlace en que el valor del BER se encuentra por debajo y por arriba del máximo permitido, donde se puede notar que en los dos enlaces, el tiempo de visibilidad inferior a un BER de 1×10^{-5} , se encuentra dentro de los límites de la duración de la ventana de visibilidad τ a 20 grados de elevación mínima (13.18 minutos), lo que genera menos errores durante la transmisión.

V.3.3.4 Tasa de Paquetes Perdidos (PLR).

Los resultados obtenidos por el simulador de red NS-2 en relación a la tasa de paquetes perdidos durante el tiempo de simulación al emplear tanto la métrica de costo de

conteo de saltos como la de retardo de propagación tienen un comportamiento similar y se resumen en la Tabla XI.

Tabla XI. Estadísticas del PLR obtenidas de la simulación en ambas métricas de costo de enrutamiento.

ENLACE	Porcentaje de Tiempo del Enlace Tiempo total: 86400 seg	Tasa de Pérdida de Paquetes (PLR) Máximo Establecido: 3-5 %
<i>Ensenada-Acapulco sin ISLs de Unión Cruzada</i>	11.675 %	PLR = 0.014 %
	76.581 %	PLR = 0.029 %
	11.744 %	PLR = 0.072 %
<i>Ensenada-Acapulco con ISLs de Unión Cruzada</i>	11.674 %	PLR = 0.014 %
	82.352 %	PLR = 0.029 %
	5.974 %	PLR = 0.043 %
<i>Ensenada-Antananarivo sin ISLs de Unión Cruzada</i>	94.998 %	PLR = 0.058 %
	5.002 %	PLR = 0.087 %
<i>Ensenada-Antananarivo con ISLs de Unión Cruzada</i>	100 %	PLR = 0.058 %

En la Tabla XI se puede ver que la mayor tasa de paquetes perdidos se obtiene en el enlace entre Ensenada y Antananarivo, sin embargo los valores obtenidos se encuentran muy por debajo del máximo permitido debido a que para estas simulaciones no se consideró ningún tráfico proveniente de otras fuentes que cursara por la red satelital. Cabe señalar que los valores más altos de PLR fueron obtenidos durante los periodos de simulación donde se obtuvieron los retardos más elevados.

V.3.3.5 Caudal Eficaz (CE).

El comportamiento del caudal eficaz obtenido en base a los resultados durante el tiempo de simulación se resume en la Tabla XII, donde al igual que el PLR presenta un comportamiento similar para ambas métricas de costo de enrutamiento.

Tabla XII. Estadísticas del caudal eficaz obtenidas de la simulación en ambas métricas de costo de enrutamiento.

ENLACE	Porcentaje de Tiempo del Enlace Tiempo total: 86400 seg	Caudal Eficaz (%)
<i>Ensenada-Acapulco sin ISLs de Unión Cruzada</i>	11.675 %	99.985
	76.581 %	99.971
	11.744 %	99.927
<i>Ensenada-Acapulco con ISLs de Unión Cruzada</i>	11.674 %	99.985
	82.352 %	99.971
	5.974 %	99.956
<i>Ensenada-Antananarivo sin ISLs de Unión Cruzada</i>	94.998 %	99.942
	5.002 %	99.912
<i>Ensenada-Antananarivo con ISLs de Unión Cruzada</i>	100 %	99.942

Como era de esperarse, el caudal eficaz presenta un comportamiento aceptable al igual que la tasa de pérdida de paquetes en cada uno de los enlaces ya que ambos parámetros están fuertemente relacionados.

V.4 Conclusiones.

En este capítulo se dieron a conocer los resultados obtenidos de la simulación de una red satelital LEO en tiempo real para el transporte de VoIP. Así mismo, el comportamiento del programa de simulación se validó con referencia a un artículo de investigación [Henderson y Katz, 2000]. Se realizó la caracterización de la curva S del corrimiento Doppler en la frecuencia que depende de la geometría Tierra-Satélite, por lo que se puede aproximar de manera general a cualquier estación terrena en la red satelital, independientemente de su localización. Se mostraron gráficas del esparcimiento que afecta al retardo extremo a extremo y al jitter en estaciones terrenas. Se presentó la evaluación de dos enlaces, uno a distancia corta (Ensenada - Acapulco) y otra a gran distancia (Ensenada - Antananarivo) para analizar cada uno de los parámetros de calidad de servicio en la aplicación de VoIP. Se realizó el enrutamiento de paquetes en base a dos métricas diferentes del algoritmo de vector de distancia (conteo de saltos y retardo de propagación) y considerando el empleo de ISLs comunes e ISLs de unión cruzada en la constelación. Se observó una pequeña mejoría en el retardo extremo a extremo al usar la métrica de costo de enrutamiento de retardo de propagación que usando la métrica de costo de enrutamiento de conteo de saltos para la constelación diseñada. Los resultados del simulador permiten observar que el empleo de ISLs de unión cruzada presenta mejores prestaciones en cuanto al retardo extremo a extremo, tasa de paquetes perdidos y caudal eficaz. Sin embargo a distancias pequeñas, los ISLs de unión cruzada pueden generar jitter más elevado debido a la rapidez y a la no periodicidad de los traspasos del enlace en la región de unión de la constelación satelital.

En resumen, se puede decir que los parámetros de QoS de VoIP como latencia, BER, PLR y CE presentan un comportamiento aceptable por debajo de las normas establecidas a través de redes satelitales de órbita baja con satélites procesadores. Sin embargo, el parámetro del jitter presenta un comportamiento deficiente en todos los casos presentados en las simulaciones. Esto es causado en gran medida por la topología dinámica de la constelación satelital LEO, provocando que la variación del retardo en el arribo de cada paquete consecutivo haya obtenido valores muy por encima de las normas establecidas, presentando un obstáculo importante en el desempeño de VoIP en redes satelitales LEO. En el siguiente capítulo se presentan las conclusiones y las principales aportaciones de este trabajo de tesis.

VI CONCLUSIONES.

Considerando el planteamiento del problema y los objetivos de esta tesis, y tomando en cuenta la metodología de investigación seguida, se pueden concluir y mencionar las principales aportaciones de este trabajo de investigación.

VI.1 En cuanto a la Red Satelital LEO.

Se modeló y simuló una red satelital LEO con satélites OBP resaltando los siguientes aspectos:

- ◆ Se definieron las características de una red satelital LEO así como de la tecnología a bordo del satélite que permitieron simular una red satelital con topología dinámica tipo malla por medio del simulador de red NS-2 en su extensión de la parte satelital.
- ◆ Se utilizó un diseño en particular para el proceso de la simulación, por lo que es muy probable que los resultados obtenidos difieran si se consideran otros tipos de constelaciones.
- ◆ Se integra en la simulación la capacidad de realizar ISLs de unión cruzada. En la actualidad existen sistemas de redes satelitales de banda ancha que no los consideran como es el caso del IRIDIUM.

La principal aportación en este aspecto es integrar en la simulación la movilidad de los satélites en su plano orbital en tiempo real, y como consecuencia, la simulación de los

traspasos de los enlaces entre satélites y en las estaciones terrenas, características que trabajos anteriores no consideraban. Otra aportación dentro de este aspecto es la capacidad de realizar ISLs de unión cruzada.

VI.2 En cuanto a la Aplicación de VoIP.

Se generó tráfico de voz sobre IP a través de la red satelital LEO en los enlaces satelitales propuestos en los escenario de simulación. Al respecto se menciona lo siguiente:

- ◆ La mayoría de las investigaciones publicadas a la fecha referentes al transporte de VoIP a través de redes satelitales consideran a los satélites como elementos repetidores y por lo tanto no lo aplican a redes satelitales capaces de realizar el enrutamiento de los paquetes.
- ◆ Se creó una fuente de tráfico de paquetes VoIP en la estación transmisora a una tasa constante de 64 kbps y empleando como transporte el protocolo de datagrama de usuario utilizando programación en NS-2. La tasa de transmisión generada es la de un decodificador G.711 (PCM).
- ◆ En este proyecto de investigación se analizó y evaluó la viabilidad del transporte de VoIP a través de una arquitectura de red satelital tipo malla. Para este propósito se realizó el modelo matemático de los principales parámetros de calidad de servicio requeridos para esta aplicación apegados a normatividad.
- ◆ Investigaciones actuales proponen el algoritmo adaptable de vector de distancia en redes satelitales LEO para el enrutamiento de paquetes IP aplicando las métricas de

costo de conteo de saltos y retardo de propagación. Sin embargo no muestran resultados del beneficio entre escoger la métrica de menor retardo sobre la métrica de saltos mínimos.

En este sentido, la principal aportación es la simulación de la transmisión de VoIP sobre la red satelital de órbita baja en tiempo real y comparar su nivel de desempeño e impacto en parámetros de calidad de servicio.

VI.3 En cuanto a la Evaluación de Parámetros de QoS de VoIP.

Se presentaron los resultados de las simulaciones relacionadas con los principales parámetros de calidad de servicio de VoIP, observándose lo siguiente:

- ◆ Los resultados de los parámetros de calidad de servicio de VoIP se obtuvieron en un tiempo de simulación de 86400 segundos (1 día). El simulador de red entrega un archivo de salida con información necesaria, la cual se procesa para la obtención de la latencia, jitter, PLR y CE. El BER se calculó con el presupuesto de cada uno de los enlaces a simular.
- ◆ Con el análisis de cada uno de los parámetros de QoS se comprobó que el principal problema que afecta en las redes satelitales LEO es la distancia y la variación de la misma entre cada uno de los nodos que conforman dicha red. Sin embargo el comportamiento de cada uno de estos parámetros es satisfactorio.

- ◆ Ya que el simulador de red NS-2 no soporta simulaciones de capa física, no se consideró el tiempo del procesamiento de los paquetes en cada uno de los nodos, por lo que los resultados obtenidos estarían incompletos. Sin embargo, no se encontró ningún trabajo que realizara alguna investigación similar que tomara a consideración este retardo, lo cual se puede tomar como un importante tema a investigación futura.

Dentro de las aportaciones efectuadas en relación al estudio de parámetros de calidad de servicio de VoIP, se puede mencionar lo siguiente:

- La evaluación de los parámetros de QoS de VoIP por satélite ha sido poco reportada en trabajos de investigación, por lo que la realización de esta tesis representa una buena base y referencia para estudiar qué tan eficiente puede ser la implementación de voz sobre IP a través de redes satelitales de órbita baja en tiempo real.
- Las estadísticas obtenidas de los parámetros de QoS de VoIP extremo a extremo de los enlaces simulados, son valores que podrían encontrar usuarios futuros de sistemas LEO de banda ancha.
- El programa de simulación desarrollado puede servir como herramienta para ser modificado y mejorado, con el objetivo de implementar nuevas características tanto para las redes satelitales LEO como para la aplicación de VoIP. Sin embargo, muchas de las limitaciones y carencias surgen de la falta de implementaciones en relación a la capa física y de enlace del mismo simulador de red en la parte satelital.

VI.4 Tareas Realizadas.

Habiendo finalizado este trabajo de tesis, las tareas realizadas en base a los objetivos planteados al inicio de este trabajo son:

- ❖ Se estudió la tecnología de los sistemas satelitales de banda ancha, así como la tecnología de voz sobre IP como aplicación en redes satelitales.
- ❖ Se estudiaron los principales parámetros de calidad de servicio de redes VoIP por satélite.
- ❖ Se modeló y se simuló una constelación satelital LEO así como el enrutamiento satelital de paquetes en tiempo real.
- ❖ Se simuló enlaces VoIP por satélite para evaluar el desempeño de los parámetros de QoS como latencia, jitter, BER, PLR y CE a través de una red satelital LEO.

De acuerdo a los objetivos esperados que se propusieron al iniciar este trabajo de tesis y a los resultados obtenidos durante su proceso, se puede concluir que se ha cumplido satisfactoriamente los objetivos planteados.

VI.5 Trabajos Futuros.

Se pueden mencionar las siguientes recomendaciones para líneas futuras de investigación con respecto a este trabajo de tesis:

- ❖ En este trabajo sólo se consideró una sola fuente de transmisión de paquetes de VoIP que cursaban la red satelital LEO. La implementación en el simulador de red NS-2 de más fuentes VoIP e incluso tráfico de fondo llamado autosimilar podría ser generado. Con esto se podría tener un análisis más cercano a la realidad de los parámetros de calidad de servicio de VoIP por satélite.
- ❖ Estudiar, analizar y modelar arquitecturas de red más complejas como S-ATM para la aplicación de voz e incluso realizar el análisis y modelado empleando diferentes arquitecturas satelitales para ofrecer garantías de calidad de servicio en la red satelital (por ejemplo: Interserv, Diffserv, MPLS).
- ❖ Una desventaja de los sistemas LEO es que debido a su baja altura orbital se necesita una gran cantidad de satélites para formar la red satelital. Se puede analizar, diseñar y simular el comportamiento de las constelaciones satelitales de órbita media (MEO) e incluso redes mixtas para el transporte de la aplicación de VoIP u otras aplicaciones, para generar más opciones y así determinar cuál de ellas es la más conveniente.

REFERENCIAS.

- Akyildiz, I. y Seong-Ho J., 1997. Satellite ATM Networks: A Survey. IEEE Communications Magazine. 35 (7): 30-40 p.
- Ali, I., Al-Dhahir, N. y Hershey, J.E., 1998. Doppler Characterization for LEO Satellites. IEEE Transactions on Communications. 46(3): 309-313 p.
- Babu, T.V.J.G., Le-Ngoc, T. y Hayes, J.F., 1996. Performance Analysis of Onboard Switching in Broadband Satellite Communication Systems. IEEE International Conference on Communication. 3 (1): 1487-1491 p.
- Beltrán Jaime, R., 1999. Impactos al implementar el servicio de voz a través de una red IP. Tesis de Maestría en Ciencias. CICESE, Ensenada B.C. 118 pp.
- Cabanillas Noris J.C., 2004. Análisis de satélites con procesamiento a bordo y su impacto en QoS para redes de banda ancha por satélite. Tesis de Maestría en Ciencias. CICESE, Ensenada B.C. 177 pp.
- Conte, R., 2000. Satellite Rural Telephone Network Design: A Methodology for Performance Optimization. Tesis de Doctorado en Filosofía en Ingeniería Eléctrica y Computación en el Instituto Politécnico de Virginia, Blacksburg, Virginia.
- Conte, R., 2004. Mecánica Orbital. Apuntes de la Asignatura Sistemas Satelitales I. DET-CICESE, Ensenada B.C. (No publicado).
- Cruz Patiño, H., 2001. Análisis y modelado de mecanismos para la implementación de redes con calidad de servicio. Tesis de Maestría. CICESE, Ensenada B.C. 79 pp.
- Ekici, E., Akyildiz, I.F. y Bender, M.D., 2001. A Distributed Routing Algorithm for Datagram Traffic in LEO Satellite Networks. IEEE/ACM Transactions on Networking. 9(2): 137-147 p.

- Fall, K. y Varadhan, K., 2005. The ns Manual. Una colaboración entre investigadores de la UC Berkeley, LBL, USC/ISI, y Xerox PARC. 391 pp.
- Farserotu, J. y Prasad, R., 2002. IP/ATM Mobile Satellite Networks. Artech House. Norwood, Massachusetts, EE.UU. Primera edición. 274 pp.
- Forouzan, B., 2002. Transmisión de datos y redes de comunicaciones. McGrawHill. Segunda Edición. Madrid. 887 pp.
- González Rubio, I., 2000. Análisis del sistema de señalización No.7 para el transporte de voz mediante el protocolo de IP. Tesis de Maestría en Ciencias. CICESE, Ensenada B.C. 141 pp.
- Goyal, R., Jain, R., Goyal, M., Fahmy, S., Vandalore, B. y Kota, S., 1999. Traffic Management for TCP/IP over Satellite ATM Networks. IEEE Communications Magazine. 37(3): 56-61 p.
- Henderson Thomas, 2000. Networking over Next-Generation Satellite System. Tesis de Doctorado en Filosofía. Universidad de Berkeley. California, EE.UU. 142 pp.
- Henderson Thomas, R. y Katz Randy, H., 2000. Network Simulation for LEO Satellite Networks. Proceedings of 18th AIAA International Communication Satellite Systems Conference (ICSSC). Del 10 al 14 de Abril de 2000. Oakland California, EE.UU. 2: 1-11p.
- Hu, Y. y V.O.K. Li, 2001. Satellite-Based Internet: A Tutorial. IEEE Communications Magazine. 39(3): 154-162 p.
- ITU-T 1996. Marco de trabajo de la serie G.700. Recomendaciones G.711, G.723.1, y G.729. Ginebra, Suiza. Unión Internacional de Telecomunicaciones: <http://www.itu.int/rec/recommendation.asp?type=products&lang=e&parent=T-REC-G>.

- Jamalipour, A., 1998. Low Earth Orbital Satellites for Personal Communication Network. Artech House. Primera edición. Boston. 273 pp.
- Keller, H. y Salzwedel, H., 1999. Link Strategy for the Mobile Satellite System Iridium. Proceedings of the IEEE Vehicular Technology Conference. 2(1): 1220-1224 p.
- Kota, S., Pahlavan, K. y Leppanen, P., 2004. Broadband Satellite Communications for Internet Access. Kluwer Academic Publishers. Norwell, Massachusetts, EE.UU. 421 pp.
- Maral, G. y Bousquet M., 2003. Satellite Communications Systems. John Wiley & Sons, Ltd. Cuarta edición. Inglaterra. 757 pp.
- Mertzanis, I., Sfikas, G. y Tafazolli, R., 1999. Protocol Architectures for Satellite ATM Broadband Networks. IEEE Communications Magazine. 37(3): 46-54 p.
- Nam Nguyen, Hoang, 2003. Routing and Quality of Service in Broadband LEO Satellite Networks. Kluwer Academic Publishers. Norwell, Massachusetts, EE.UU. 187 pp.
- Neri Vela, R., 2003. Comunicaciones por Satélite. Thompson. Primera edición. México. 492 pp.
- Nguyen, T., Yengenoglu F. y Sciuto A., 2001. Voice over IP Service and Performance in Satellite Networks. IEEE Communications Magazine. 39(3): 164-171 p.
- Peyravi, H., 1999. Medium access control protocols performance in satellite communications. IEEE Communications Magazine. 37(3): 62-71 p.
- Restrepo, J. y Maral, G., 1996. Cellular Geometry for Worldwide Coverage by Non-GEO Satellites using Earth-Fixed Cell Technique. Comunicaciones Espaciales. 14(1): 179-189 p.

- Stallings, W., 1998. High-Speed Networks–TCP/IP and ATM Design Principles. Prentice Hall. Primera edición. New Jersey. 576 pp.
- Tanenbaum, A. 1997. Redes de Computadoras. Prentice Hall. Tercera edición. México. 813 pp.
- Tamayo, R., 2004. Algoritmos de Enrutamiento. Apuntes de la Asignatura Redes de Comunicaciones I. DET-CICESE, Ensenada B.C. (No publicado).
- Toh, C.K. y Li, O., 1998. Satellite ATM Network Architectures: An Overview. IEEE Network. 12 (5): 61-71 p.
- Walker, J.G., 1984. Satellite Constellations. Journal of the British Interplanetary Society. 37 (1): 559-571 p.
- Wood, L., 2000. Internetworking with Satellite Constellations. Tesis de Doctorado en Filosofía. Universidad de Surrey, UK. 208 pp.