

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



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

**ANÁLISIS DE VOZ SOBRE IP POR SATÉLITE Y EL IMPACTO DE
DISTINTAS ÓRBITAS GEO Y LEO EN LA CALIDAD DE SERVICIO Y
DESEMPEÑO**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el
grado de

MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

JULIO CÉSAR DEL VALLE PÉREZ

Ensenada, Baja California, México, Agosto de 2006

TESIS DEFENDIDA POR
Julio César del Valle Pérez
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

Dr. Roberto Conte Galván
Director del Comité

Dr. David Hilario Covarrubias
Rosales
Miembro del Comité

Dr. Arturo Velázquez Ventura
Miembro del Comité

Dr. Jose Rosario Gallardo Lopez
Miembro del Comité

Dr. Jorge Torres Rodriguez
Miembro del Comité

Dr. Arturo Velázquez Ventura
*Coordinador del programa de
posgrado en electrónica y
telecomunicaciones*

Dr. Edgar Gerardo Pavía López
Director de Estudios de Posgrado

25 de Agosto de 2006

RESUMEN de la tesis de **Julio César del Valle Pérez**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIA en ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES. Ensenada, Baja California, México. Agosto 2006.

ANÁLISIS DE VOZ SOBRE IP POR SATÉLITE Y EL IMPACTO DE DISTINTAS ÓRBITAS GEO Y LEO EN LA CALIDAD DE SERVICIO Y DESEMPEÑO

Resumen aprobado por:

Dr. Roberto Conte Galván
Director

Las nuevas redes de comunicaciones podrán proporcionar acceso con cobertura global basadas en tecnología 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 les permitirá proporcionar servicios integrados de banda ancha, como la telefonía por 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, modelado y simulación de los principales parámetros de QoS para VoIP como son Latencia, Tasa de pérdida de paquetes (PLR), variaciones en el retardo (Jitter), Tasa de errores de bits (BER) y Caudal eficaz (Throughtput). Esto se lleva a cabo mediante la simulación de tráfico de voz sobre redes IP que se encuentran interconectadas a una red satelital de banda ancha, la cual emplea ya sea satélites geoestacionarios (GEO) o una constelación de satélites de órbita baja (LEO).

El desarrollo computacional se hizo utilizando programación en Matlab® y aplicando modelos de fuente de tráfico de paquetes VoIP, se modela una constelación de satélites GEO y LEO en tiempo real, así como el comportamiento de las redes IP terrestres, la capa de acceso al medio y el uso de memorias de dispersión de retardo.

A partir de las simulaciones realizadas se encontraron valores de importancia para cada uno de los parámetros de Calidad de Servicio de Voz sobre IP, que se podrían aplicar al diseño de servicio telefónico y aplicaciones de VoIP a través de satélites de órbita geoestacionaria y constelaciones de satélites de órbita baja.

Palabras clave: Satélites, VoIP, QoS, RTP, simulación, órbita geoestacionaria, órbita baja, latencia, jitter, caudal eficaz, BER, PLR, canal satelital, telefonía.

ABSTRACT of the thesis presented by **Julio César del Valle Pérez** as a partial requirement to obtain the MASTER OF SCIENCE degree in ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS. Ensenada, Baja California, México. August 2006.

ANALISYS OF VOICE OVER IP ON SATELLITES AND THE IMPACT OF DIFFERENT GEO AND LEO ORBITS IN QUALITY OF SERVICE AND PERFORMANCE

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

In this work an analysis, modeling and simulation of the main QoS parameters for VoIP is performed, regarding Latency, Jitter, Bit Error Rate (BER), Packet Loss Rate (PLR) and Throughput values. This is carried out by simulating VoIP Traffic over IP networks which are interconnected through broadband satellite networks composed of Geostationary Orbit (GEO) satellites, or a constellation of Low Earth Orbit (LEO) satellites.

The computer simulation was performed using Matlab[®] and applying models of VoIP traffic sources, modeling real-time GEO and LEO satellite constellations, as well as terrestrial network behavior, multiple access layers and de-jitter buffers.

From the performed simulations a number of important values for QoS parameters for Voice over IP were obtained, which could be applied to the design of telephon system and VoIP applications through geostationary orbit satellites and constellations of low earth orbit satellites.

Keywords: satellites, VoIP, QoS, RTP, simulation, geostationary orbit, low earth orbit, latency, jitter, bit error rate, packet loss rate, throughput, mobile communications, telephony.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a las siguientes personas e instituciones por haberme apoyado en la realización de este trabajo de tesis:

Dr. Roberto Conte Galván

Dr. David Hilario covarrubias

Dr. Arturo Velázquez Ventura

Dr. Jose Rosario Gallardo López

Dr. Jorge Torres Rodriguez

MC. Dolores Sarracino Ramírez

Dr. Luis Alberto Delgado Argote

Quim. Lina Ivonne Best Guzmán

MC. Ramon Muraoka Espiritu

Amelia Guadalupe ChavezComparán

Cecilia Gonzalez Iñiguez

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada

Universidad Autónoma de Baja California

Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

Tabla de Contenido

	<i>Página</i>
I INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
<i>I.1 Antecedentes.....</i>	<i>1</i>
<i>I.2 Planteamiento del problema.....</i>	<i>2</i>
<i>I.3 Objetivos.....</i>	<i>3</i>
I.3.1 Objetivo General.....	3
I.3.2 Objetivos Particulares.....	3
<i>I.4 Metodología.....</i>	<i>4</i>
<i>I.5 Hipótesis.....</i>	<i>4</i>
<i>I.6 Justificación.....</i>	<i>5</i>
<i>I.7 Limitaciones.....</i>	<i>5</i>
<i>I.8 Infraestructura utilizada.....</i>	<i>6</i>
<i>I.9 Organización de la tesis.....</i>	<i>7</i>
II INTRODUCCIÓN A LA COMUNICACIÓN DE VOZ SOBRE IP A TRAVEZ DE SATÉLITES.....	9
<i>II.1 Antecedentes a la transmisión de Voz a través Internet.....</i>	<i>9</i>
II.1.1 Estándares utilizados en voz sobre IP.....	12
II.1.1.1 Estándar de VoIP H.323.....	13
II.1.1.1.1 Terminal H.323.....	14
II.1.1.1.2 La pasarela H.323.....	14
II.1.1.1.3 Portero H.323.....	15
II.1.1.1.4 Unidad de control multipunto H.323.....	15
II.1.1.2 Protocolo de transporte para aplicaciones en tiempo real.....	15
II.1.1.3 Codificadores de voz.....	16
II.1.1.3.1 Codificación por cuantificación multimpulso de máxima verosimilitud G.723.1.....	18
II.1.1.3.2 Codificación por predicción lineal excitada por tabla de códigos algebraicos G.729.....	19
II.1.2 Compresión de encabezado de protocolo RTP.....	19
<i>II.2 Tecnología de transmisión de IP sobre satélite.....</i>	<i>21</i>
II.2.1.1 Voz sobre IP a través de satélites.....	22
II.2.2 Estado del arte de voz sobre IP a través de satélites.....	23
<i>II.3 Principios de órbitas de los satélites y sus parámetros.....</i>	<i>24</i>
II.3.1 Altura del satélite.....	25
II.3.2 Velocidad del satélite.....	25
II.3.3 Periodo de un satélite.....	26
II.3.4 Ángulo de inclinación.....	26
II.3.5 Ángulo de elevación.....	26
<i>II.4 Introducción a los satélites geoestacionarios.....</i>	<i>27</i>
II.4.1 Características de las órbitas geoestacionarias.....	28

<i>II.5 Introducción a los satélites de órbitas bajas</i>	29
II.5.1 Geometría de las constelaciones.....	30
II.5.1.1 Constelaciones de tipo estrella polar y casi polar.....	31
<i>II.6 Medición de la Calidad de Servicio de Voz sobre IP</i>	32
<i>II.7 Ciclo de calidad de servicio</i>	33
II.7.1 Requerimientos de calidad de servicio del usuario.....	34
II.7.2 Calidad de servicio ofrecido por el proveedor de servicio.....	34
II.7.3 Calidad de servicio alcanzado por el proveedor de servicio.....	34
II.7.4 Calidad de servicio percibido por el usuario.....	35
<i>II.8 Parámetros de calidad de servicio</i>	35
II.8.1 Tasa de error de bits.....	35
II.8.2 Latencia.....	35
II.8.3 Variaciones en el retardo.....	36
II.8.4 Tasa de pérdida de paquetes.....	37
II.8.5 Caudal Eficaz.....	38
<i>II.9 Percepción de la calidad de servicio</i>	38
II.9.1 Puntuación de opinión media.....	39
II.9.2 Herramienta para calcular el MOS.....	41
III DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN DE VOZ SOBRE IP POR SATÉLITE	44
<i>III.1 Descripción</i>	44
<i>III.2 Kernel del simulador en Matlab</i>	44
<i>III.3 Bloque de fuente de paquetes de voz sobre IP</i>	47
III.3.1 Modelado de la generación de tráfico de paquetes de voz sobre IP.....	50
<i>III.4 Bloque de Redes Terrestres de IP</i>	52
<i>III.5 Bloque de las estaciones pasarelas</i>	54
III.5.1 Compresión de paquetes.....	58
III.5.2 Capa de Acceso al Medio.....	58
<i>III.6 Bloque de red satelital</i>	59
III.6.1 Modelo de mecánica orbital.....	59
III.6.2 Movimiento de los satélites.....	62
III.6.3 Presupuesto de enlace.....	63
III.6.4 Corrección de errores.....	65
III.6.5 Retardo por propagación a distintas órbitas.....	67
III.6.6 Modelado de errores en el canal.....	68
<i>III.7 Bloque de Recepción</i>	70
III.7.1 Memoria de dispersión de retardo.....	70
<i>III.8 Monitores</i>	72
IV SIMULACIÓN DE ESCENARIOS DE VOZ SOBRE IP A TRAVÉS DE SATÉLITES A DISTINTAS ÓRBITAS	73
<i>IV.1 Propuesta de red satelital de órbita geoestacionaria</i>	73
<i>IV.2 Propuesta de red IP satelital de órbita baja</i>	74
<i>IV.3 Fuente de tráfico</i>	77

	<i>Página</i>
<i>IV.4 Estaciones terrenas.....</i>	<i>80</i>
<i>IV.5 Tráfico de las redes terrestres.....</i>	<i>81</i>
V RESULTADOS DE SIMULACIONES.....	82
<i>V.1 Resultados del sistema empleando órbita geoestacionaria.....</i>	<i>82</i>
V.1.1 Latencia.....	82
V.1.2 Variación en el retardo.....	85
V.1.3 Tasa de pérdida de paquetes.....	87
V.1.4 Caudal Eficaz.....	89
<i>V.2 Resultados del sistema empleando una constelación de satélites de órbita baja.....</i>	<i>91</i>
V.2.1 Latencia.....	91
V.2.2 Tasa de pérdida de paquetes.....	93
V.2.3 Variación en el retardo.....	95
V.2.4 Caudal Eficaz.....	97
VI ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	99
<i>VI.1 Comparación de resultados.....</i>	<i>99</i>
VI.1.1 Latencia.....	99
VI.1.2 Tasa de pérdidas de paquetes.....	101
VI.1.3 Variación en el retardo.....	101
VI.1.4 Caudal Eficaz.....	104
VII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	106
<i>VII.1 Conclusiones.....</i>	<i>106</i>
VII.1.1 Codificadores de voz y fuente de tráfico.....	106
VII.1.2 Análisis de órbitas para VoIP.....	106
VII.1.3 Latencia.....	107
VII.1.4 Variación de retardo.....	107
VII.1.5 Tasa de pérdida de paquetes.....	108
VII.1.6 Tasa de errores de bits.....	108
VII.1.7 Caudal eficaz.....	108
VII.1.8 Conclusiones finales.....	109
<i>VII.2 Aportaciones.....</i>	<i>109</i>
<i>VII.3 Trabajo Futuro.....</i>	<i>110</i>
VIII BIBLIOGRAFÍA.....	111
APENDICE A CODIGO FUENTE DEL SIMULADOR.....	114
A.1 Kernel del simulador.....	114
A.2 Modelo de fuente de tráfico.....	117
A.3 Modelado de redes terrestres.....	119
A.4 Modelado de mecánica orbital y canal satelital.....	120
A.5 Modelado de pasarela satelital.....	123
A.6 Modelado de recepción de tráfico.....	125

Índice de Figuras

Página

Figura 1: Red de comunicación híbrida de voz y datos.....	9
Figura 2: Red de telefónica IP.....	10
Figura 3: Protocolos en H.323.....	13
Figura 4: Componentes de un sistema de VoIP - H.323.....	14
Figura 5: Comparación de encabezado entre un paquetes IP y otro de cRTP.....	20
Figura 6: Sistema de VoIP que incluye un segmento especial en la red.....	22
Figura 7: Ejemplo de órbita geoestacionaria con una cobertura terrestre proporcionada por tres satélites.....	28
Figura 8: Gráfico simulado por SAVI de la constelación Iridium con 66 satélites.....	30
Figura 9: Ruta de cobertura de una constelación de satélites LEO.....	31
Figura 10: Vista polar de un patrón de estrella.....	32
Figura 11: Ciclo de calidad de servicio.....	33
Figura 12: Efecto de la variación de retardo sobre la latencia extremo a extremo.....	37
Figura 13: Aplicaciones vs pérdidas de paquetes.....	39
Figura 14: Escala de calificación de calidad de servicio para el servicio de telefonía.....	41
Figura 15: Escala del factor R y su equivalencia en la calidad subjetiva de la comunicación por voz.....	42
Figura 16: Factor R vs Porcentaje de pérdida de paquetes vs Retardo del enlace de punto-a-punto para un codificador G.729A.....	42
Figura 17: Diagrama de flujo del funcionamiento del kernel de simulación.....	45
Figura 18: Campos de la matriz de eventos “cal_event[]”.....	46
Figura 19: Bloques de funcionamiento del escenario básico del simulador.....	47
Figura 20: Diagrama de flujo para la generación de tráfico de paquetes de VoIP.....	51
Figura 21: Campos de la matriz de control de paquetes “v_IP[]”.....	52
Figura 22: Diagrama de flujo para la estación terrena transmisora.....	55
Figura 23: Diagrama de flujo del algoritmo de modelado para las estaciones pasarela.....	57
Figura 24: Diferentes parámetros utilizados para describir constelaciones de satélites.....	62
Figura 25: Ciclo de cálculos para la mecánica orbital y parámetros de desempeño.....	66
Figura 26: Cambio de la longitud del enlace de un satélite LEO con respecto al tiempo de visibilidad del satélite.....	68
Figura 27: Diagrama de flujo para la generación de errores en el canal.....	70
Figura 28: Memoria de eliminación de dispersión de retardo.....	71
Figura 29: Diagrama de flujo para la memoria de dispersión de retardo.....	72
Figura 30: Órbita geoestacionaria representado por el simulador en Matlab.....	74
Figura 31: Escenario de la constelación.....	76
Figura 32: Cobertura de la constelación de satélites simulado en Matlab.....	77
Figura 33: Cobertura de la red de Iridium mostrada por el software SAVI.....	77
Figura 34: Función de distribución acumulativa complementaria para los periodos de duración de una fuente ON-OFF.....	78
Figura 35: CDF promedio de un codificador.....	79

Figura 36: Comparación del retardo por procesamiento depaquetización de dos codificadores de acuerdo al número de muestras de voz por paquete IP.....	80
Figura 37: Resultados de Latencia para órbita geoestacionaria.....	82
Figura 38: Resultados de Latencia para órbita GEO utilizando codificador G.729A.....	84
Figura 39: Resultados de Latencia para órbita GEO utilizando codificador G.723.1.....	84
Figura 40: Resultados de variación de retardo para órbita GEO utilizando codificador G.729A.....	86
Figura 41: Resultados de variación de retardo para órbita GEO utilizando codificador G.723.1.....	87
Figura 42: Resultados de tasa de pérdida de paquetes para órbita GEO utilizando codificador G.729A.....	89
Figura 43: Resultados de tasa de pérdida de paquetes para órbita GEO utilizando codificador G.723.1.....	89
Figura 44: Resultados de caudal eficaz para órbita GEO utilizando codificador G.729A.....	90
Figura 45: Resultados de caudal eficaz para órbita GEO utilizando codificador G.723.1.....	90
Figura 46: Resultados de Latencia para la órbita LEO.....	91
Figura 47: Resultados de Latencia para órbita LEO utilizando codificador G.729A.....	92
Figura 48: Resultados de Latencia para órbita LEO utilizando codificador G.723.1.....	93
Figura 49: Resultados de tasa de pérdida de paquetes para órbita LEO utilizando codificador G.729A.....	94
Figura 50: Resultados de tasa de pérdida de paquetes para órbita LEO utilizando codificador G.723.1.....	95
Figura 51: Resultados de variación de retardo para la órbita LEO utilizando codificador G.729A.....	96
Figura 52: Resultados de variación de retardo para la órbita LEO utilizando codificador G.723.1.....	97
Figura 53: Resultados de cauda eficaz para la órbita LEO utilizando codificador G.729A... ..	98
Figura 54: Resultados de cauda eficaz para la órbita LEO utilizando codificador G.723.1... ..	98
Figura 55: Distribución de retardos de los paquetes en órbita geoestacionaria.....	100
Figura 56: distribución de retardo de paquetes en una órbita baja.....	101
Figura 57: Histograma Jitter antes de la memoria de dispersión de retardo para el codificador G.729A.....	102
Figura 58: Histograma de Jitter después de la memoria de dispersión para el codificador G.729A.....	103
Figura 59: Histograma de Jitter para G.723 antes de la memoria de dispersión de retardo..	104
Figura 60: Histograma de Jitter para G.723 después de la memoria de dispersión de retardo	104
Figura 61: Ganancia de codificación del caudal eficaz en la transmisión de datos por el canal satelital utilizando compresión de encabezado.....	105

Índice de Tablas

	<i>Página</i>
Tabla I: Estándares para compresión de voz.....	17
Tabla II: Parámetros para el modelo de fuente de tráfico de VoIP.....	48
Tabla III: Características de algunos codificadores de VoIP (ITU).....	50
Tabla IV: Parámetros para el modelo de retardo y errores de bit de una red de área local con tráfico de VoIP (Hernandez, 2003).....	53
Tabla V: Parámetros para el modelo de retardo y errores de bit de una dorsal de banda ancha con tráfico de VoIP (Hernandez, 2003).....	53
Tabla VI: Parámetros de la mecánica orbital.....	73
Tabla VII: parámetros del enlace satelital.....	74
Tabla VIII: Parámetros de la mecánica orbital de una constelación LEO.....	75
Tabla IX: Parámetros operativos de la red satelital de órbita baja.....	76
Tabla X: Posiciones de las estaciones terrenas.....	80
Tabla XI: Combinaciones de tráfico posible en la redes terrestres.....	81
Tabla XII: Media y desviación estandar de la latencia en órbita GEO con codificador G.729.....	83
Tabla XIII: Media y desviación estandar de la latencia en órbita GEO con codificador G.723.1.....	83
Tabla XIV: Media y desviación estandar de variación de retardo en la órbita GEO con codificador G.729.....	86
Tabla XV: Media y desviación estandar de variación de retardo en la órbita GEO con codificador G.723.1.....	87
Tabla XVI: Media y desviación estandar de la tasa de pérdidas de paquete en la órbita GEO con codificador G.729.....	88
Tabla XVII: Media y desviación estandar de la tasa de pérdidas de paquete en la órbita GEO con codificador G.723.1.....	88
Tabla XVIII: Media y desviación estandar de latencia en la órbita LEO con codificador G.729.....	92
Tabla XIX: Media y desviación estándar de latencia en la órbita LEO con codificador G.732.1.....	93
Tabla XX: Media y desviación estandar de la tasa de pérdida de paquetes en la órbita LEO con codificador G.729.....	94
Tabla XXI: Media y desviación estandar de la tasa de pérdida de paquetes en la órbita LEO con codificador G.723.1.....	95
Tabla XXII: Media y desviación estandar de la variación en el retardo de paquetes en la órbita LEO con codificador G.729.....	96
Tabla XXIII: Media y desviación estandar de la tasa de variación de retardo de paquetes en la órbita LEO con codificador G.723.1.....	97

I INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 Antecedentes

El término de Voz sobre IP significa voz a través del protocolo de Internet, esto es, la capacidad de enviar información de voz de un punto a otro por medio de la red de Internet. Esta tecnología surgió hace varios años y su uso ha ido creciendo significativamente a medida que aumenta el ancho de banda en las redes de usuarios.

Una de las tecnologías más atractivas en la actualidad es la telefonía a través de Internet como una alternativa de bajo costo en comparación a las redes telefónicas tradicionales de larga distancia. Sin embargo, la transmisión de voz a través de la red de Internet presenta algunos problemas debido a que ésta fue creada para transportar únicamente información en paquetes binarios haciendo el mejor uso eficiente de la red, muy lejos de considerar parámetros de calidad de servicio propias de la transmisión de voz en tiempo real.

Por otro lado, el creciente uso de Internet ha propiciado la convergencia de redes de diferentes tecnologías para llegar a un mayor número de usuarios. El empleo de satélites de comunicaciones tiene la característica de que permite el acceso a una mayor área de cobertura con mayor facilidad y en menor tiempo en comparación con una red cableada. Sin embargo, el uso de satélites agrega un retardo significativo al transporte de datos debido a la distancia que existe entre el satélite y la estación terrena y la velocidad de propagación, además de afectar severamente la integridad de los datos y por consecuencia la calidad del servicio.

En este trabajo de tesis, se investigará una propuesta para contrarrestar los efectos de latencia, variación de retardo y pérdida de paquetes mediante un análisis, evaluación y simulación de una red de datos IP el cual considera tecnología de red satelital en la trayectoria de los paquetes, distintos protocolos de transporte, así como altitudes orbitales tales como

geoestacionaria y órbita baja. También considera diversos algoritmos de conversión de voz a paquetes y distintas técnicas de control de errores, con el propósito de determinar los valores de los parámetros más adecuados para el transporte de voz sobre IP a través de satélites. Esto permitirá mantener las ventajas de costo y cobertura minimizando los efectos negativos en la calidad de servicio.

Mi motivación por la realización de este trabajo de investigación es debido a mi experiencia con sistemas de comunicación por satélite en ambientes marinos. Actualmente la flota pesquera en México usa los servicios de sistemas satelitales de órbita geoestacionaria del sistema INMARSAT (Maral y Bousquet, 2002) y de órbita baja del sistema IRIDIUM (Tanenbaum, 2003) para comunicaciones de voz. Sin embargo, la demanda de servicios de datos sigue creciendo para el uso de correo electrónico, adquisición de cartas meteorológicas, estadísticas de zonas de pesca, transferencia de archivos por FTP, alarmas, rastreo y seguimiento de flota y envío de posición en caso de desastre, entre otros servicios. La necesidad por el uso cada vez mayor de Internet hace que las compañías navieras contraten servicios de datos con mayor ancho de banda como los servicios de FLEET, MSAT. Debido a que la forma actual de cobro es diferente para el uso de voz y de datos, se genera el interés por conocer la conveniencia del uso de tecnología de voz sobre el protocolo de datos IP en aplicaciones de comunicaciones por satélite para compañías con flotas de embarcaciones en Baja California, Sinaloa y Veracruz.

1.2 Planteamiento del problema

Siguiendo la evolución de las tecnologías de comunicaciones, Voz sobre IP es una idea de gran interés debido a la diversidad de aplicaciones que puede presentar, por lo que existe una

gran cantidad de investigación y desarrollo en cuanto a calidad de servicio e integración y operatividad con otras redes. Al mismo tiempo, existe muy poca información de VoIP a través de satélites, siendo este tema importante para su desarrollo.

Es por ello, que es importante realizar un estudio del comportamiento de la aplicación de Voz sobre IP si se emplean satélites en la red de datos, y así conocer si es posible cumplir con los estándares de calidad de servicio de comunicaciones de voz.

Es necesario, entonces, realizar un análisis de los parámetros de latencia, variaciones de retardo, tasa de pérdida de paquetes y caudal eficaz en el transporte de paquetes de voz sobre IP en satélites repetidores de órbita geoestacionaria y de órbita baja.

1.3 Objetivos

Los objetivos definidos para este trabajo de investigación se comentan a continuación:

1.3.1 Objetivo General

Analizar los aspectos de calidad de servicio y desempeño relacionados en la transmisión de voz sobre IP en satélites de órbitas geoestacionarias y órbitas bajas.

1.3.2 Objetivos Particulares

Para alcanzar el objetivo general, se plantearon en este trabajo las siguientes metas:

- Investigar los diferentes componentes que conforman la tecnología de voz sobre IP en una red. Investigar el estado del arte actual de esta tecnología para su integración a una red satelital, así como encontrar un método para calificar su desempeño.
- Desarrollar una herramienta de simulación que permita evaluar los diferentes parámetros de calidad de servicio para calificar el desempeño de la red como lo son latencia, variación de retardo, tasa de pérdida de paquetes y caudal eficaz en la

transmisión de voz sobre el protocolo IP a través de satélites, bajo distintos escenarios que involucran terminales, protocolos, distintas condiciones de tráfico e interferencia en el canal satelital considerando diferentes alturas orbitales.

- Comparar los resultados de las simulaciones basado en el planteamiento del objetivo anterior para los satélites en órbita geoestacionaria y órbita baja, y publicar los resultados.

1.4 Metodología

Para alcanzar los objetivos planteados en esta tesis, se programaron las siguientes actividades.

- Realizar una investigación sobre el estado del arte de la tecnología de voz sobre IP por satélite.
- Implementar un modelo de fuente de tráfico de paquetes basados en estándares de voz sobre IP.
- Implementar un modelo correspondiente al flujo de paquetes empleando el estándar de compresión de paquetes de tiempo real RFC3545.
- Implementar modelos de retardo por propagación en enlaces satelitales.
- Integrar cada uno de los modelos en un software de simulación.
- Definir los diferentes escenarios y capturar los resultados de la simulación para su presentación.

1.5 Hipótesis

Existen varias diferencias entre el desempeño de transporte de datos tanto para satélites en órbita geoestacionaria como en órbita baja; sin embargo, el empleo de satélites en órbitas

bajas debe mejorar la calidad del servicio.

Otra forma para mitigar los efectos del retardo es, comprimir los encabezados, por lo que, el uso de un protocolo para compresión de encabezado debe mejorar los parámetros de calidad de servicio.

1.6 Justificación

En este trabajo, se proporcionarán resultados de los efectos causados por el empleo de satélites en una red IP con tráfico de paquetes de voz, para investigar si las aplicaciones de voz sobre IP mantienen las características suficientes para ofrecer calidad de servicio.

Con este trabajo, otros investigadores encontrarán los elementos necesarios para complementar su estudio de comunicaciones de voz sobre IP a través de satélite. Así los usuarios en áreas rurales o de negocios con diferentes puntos de ventas distribuidos en una extensa región geográfica con infraestructura de red satelital serían los beneficiarios finales.

Hasta el momento, no se ha encontrado ninguna publicación que trate un análisis del uso de compresión de encabezado IP para comunicaciones por satélite.

1.7 Limitaciones

Las limitaciones impuestas a este trabajo son las siguientes:

- Los diferentes estándares de protocolos de VoIP manejan dos tipos de tráfico de paquetes, uno es el flujo de control específico según el estándar y el flujo de paquetes de voz. Se ha simplificado el modelado de únicamente el flujo de paquetes que contienen las muestras de voz del protocolo de RTP, el cual es el mismo para todos los estándares. Este flujo de paquetes de voz es de mayor intensidad que el flujo de control y por lo tanto, éste último no se considera.

- Debido a las características de las constelaciones de los satélites de órbita baja, se requiere de un mecanismo de traspaso de llamadas entre satélites para permitir la continuidad de la comunicación. Se utilizará un modelo simplificado en donde la estación terrena se encontrara siempre bajo la cobertura de un solo satélite, por tanto, la duración de la simulación de llamada de voz se restringen a una duración de 5 a 10 minutos, dependiendo de la altura orbital seleccionada para la constelación satelital.
- En este trabajo, únicamente serán contemplados satélites repetidores de órbita baja. Aun que en la literatura existe gran información sobre satélites con procesamiento a bordo, ello no quiere decir que ya no se emplee su uso, sino que es otro medio tecnológico, el cual se encuentra en este mismo momento aplicado en sistemas como EuroSkyWay (Cruickshank et al, 2001).
- Aunque el tema de tesis implica calidad de servicio en redes de IP, los protocolos de servicios diferenciados (*DiffServ*) y servicios integrados (*IntServ*) para agregar calidad de servicio en las redes IP no serán considerados en los escenarios de simulación.

1.8 Infraestructura utilizada

Computadora personal:	Procesador Intel Pentium III; 1Ghz; 512 MB Ram.
Software Sistema Operativo:	Microsoft Windows XP SP2 Linux Distribución Mandriva 10.2
Software MATLAB:	Versión 6.5.0.180913a Release 13, June, 2002 con Toolbox Statistics

Software RealVNC:	Versión 4.0b4
Bibliografía:	Biblioteca del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (<i>CICESE</i>) Biblioteca de la Universidad Autónoma de Baja California (<i>UABC</i>) Biblioteca del Centro de Estudios Tecnológico y Superior (<i>CETYS</i>) Biblioteca de la Universidad de California Campus San Diego (<i>UCSD</i>)

1.9 Organización de la tesis

Este trabajo de tesis se encuentra organizada en capítulos de la siguiente manera:

El primer capítulo introduce el tema de tesis, especificando la información que se puede obtener de este documento y lo que se espera obtener como resultado.

En el capítulo II se definen los fundamentos de los conceptos de voz sobre IP a través de satélites necesarios para comprender los capítulos posteriores y procedimientos usados en este trabajo. Se describe la tecnología de VoIP, su evolución desde la telefonía tradicional hasta su concepto actual, se describe sus componentes, sus características y estándares. También se describe los principios de constelación y mecánica orbital los dos tipos de órbitas tratados en esta tesis, que son órbita geoestacionaria y órbita baja y finalmente se concluye el capítulo con los conceptos para la medición de calidad de servicio en este tipo de aplicación.

En el capítulo III describe el desarrollo de una herramienta de simulador por software de un

una red IP con tráfico de VoIP a través de satélites. Esta es una herramienta desarrollada para permitir cumplir con los objetivos de esta tesis. Este capítulo es necesario si el lector se encuentra interesado en conocer y evaluar los métodos y modelos utilizados en este trabajo para cumplir con los objetivos especificados. Aquí se describen cada uno de los módulos que componen al simulador, se explica con detalle los modelos matemáticos y las fuentes de donde se basaron para su implementación.

La sección IV presenta los escenarios para la simulación. Se describen los parámetros para las condiciones iniciales del simulador. Los parámetros a simulador y a capturar.

El el capítulo V se presentan los resultados obtenidos de la simulaciones de los diferentes escenarios y el capítulo VI se presenta el análisis y comparación de los resultados.

El capítulo VII proporciona las conclusiones y aportaciones más importantes de este trabajo de investigación.

Se incluye un apéndice al final de la tesis que incluye el código fuente utilizado para obtener los resultados finales a partir de simulaciones.

II INTRODUCCIÓN A LA COMUNICACIÓN DE VOZ SOBRE IP A TRAVEZ DE SATÉLITES

II.1 Antecedentes a la transmisión de Voz a través Internet

Introducción

Los sistemas de telefonía actual se encuentran basados en conmutación de circuitos, el cual ofrece garantías de calidad de servicio a sus clientes. Un circuito se tiene que establecer primero antes de iniciar una comunicación entre dos puntos. Por lo contrario, la comunicación de datos no se considera en tiempo real debido a que es llevada en redes de conmutaciones de paquetes como el Internet, el cual se encuentra sobre un conjunto de protocolos tales como TCP/IP.

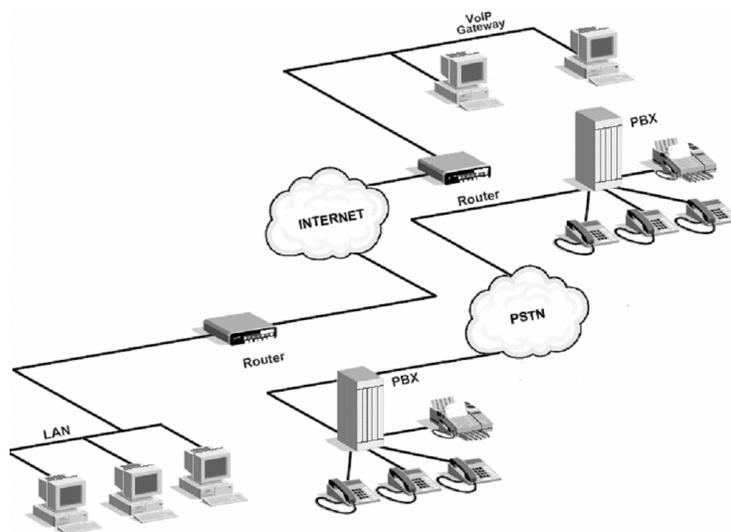


Figura 1: Red de comunicación híbrida de voz y datos

La mayor diferencia entre la red conmutada de telefonía pública convencional y la telefonía IP, es el servicio de voz implementado sobre una red de datos existente. Como resultado, la

telefonía IP puede ir más allá de los servicios ofrecidos para una comunicación de voz. Los servicios de datos pueden combinarse fácilmente para crear nuevas aplicaciones y servicios los cuales no son posibles con la telefonía convencional.

Gracias a que la telefonía IP puede ser transportada sobre una red de datos, empresas con múltiples ubicaciones geográficas pueden consolidar su red existente de telefonía con la red de datos para conseguir grandes ahorros de costos. El ahorro de costos, viene del hecho de que las empresas solo necesitan mantener una sola red para el soporte de voz, datos y fax, como se muestra en la figura 2.

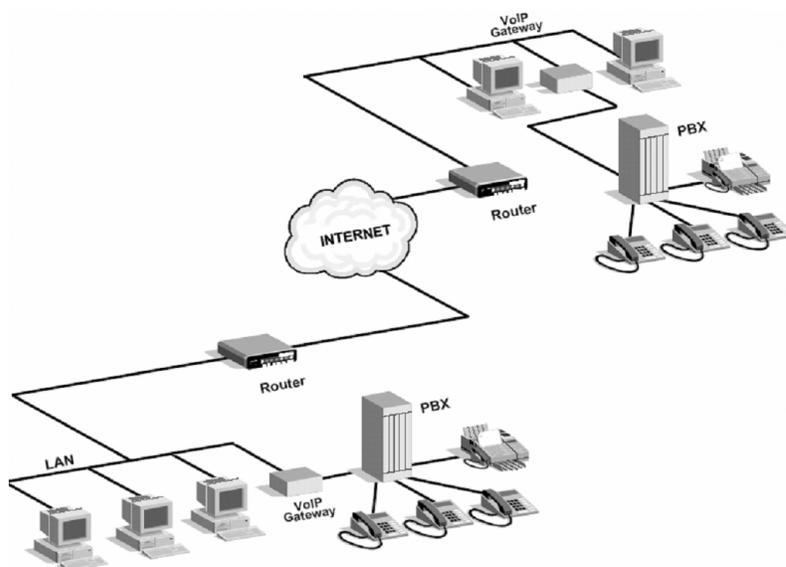


Figura 2: Red de telefónica IP

A diferencia de la red de telefonía convencional, el cual usa la tecnología de conmutación de circuitos, la telefonía IP usa tecnología de conmutación de paquetes. Con conmutación de paquetes no hay un enlace dedicado para la llamada de voz, ya que todas las llamadas comparten los recursos de la red, dando como resultado los **bajos costos** de las llamadas.

La red de telefonía pública conmutada soporta solo un **ancho de banda** de audio de 4 KHz. Por lo tanto, la red telefónica no es apropiada para ofrecer servicios con calidad de sonido de alta fidelidad. Los teléfonos IP pueden soportar altas tasas de calidad de sonido, siempre y cuando haya el suficiente ancho de banda en la red.

Los **centros de servicio basados en WEB** permiten a una persona navegando en Internet iniciar una llamada de voz sobre IP hacia la organización a la que pertenece el sitio WEB. El usuario de Internet no necesita detener su búsqueda de navegación; en su lugar, el servicio de llamada por Internet sería una extensión de su actividad.

Existen varias arquitecturas para los usuarios. La primera es la arquitectura de computadora a computadora, en donde los usuarios se encuentran equipados con una computadora multimedia conectada directamente a Internet usando unas tarjetas como interfaz en el caso de redes de área local o vía modem cuando la conexión es a través de un proveedor de servicio. Todo el muestreo, compresión y codificación sucede en la computadora. Las llamadas entre los usuarios son establecidas usando direcciones IP. En esta arquitectura, el protocolo IP y la red de telefonía conmutada se encuentran operando en forma independiente. Otra alternativa de telefonía IP es la arquitectura de teléfono IP a teléfono convencional. Esto es, usar la red de Internet como dorsal para reducir los costos de telefonía. Un usuario que quiere comunicarse con otro usuario, marca un número en particular, el cual, es recibido por una pasarela que se encuentra entre la red IP y la red de conmutación de circuitos. Todo el muestreo y codificación de la voz toma lugar en la pasarela. Los paquetes de voz son entonces transportados sobre la red de datos hasta la pasarela cerca del segundo usuario, el cual se encarga de convertirlo de nuevo a una señal analógica, y transportado por la red de telefonía

convencional hasta su destino final.

Cuando se usa VoIP sobre una red de área local (LAN), generalmente hay suficiente ancho de banda disponible y el retardo entre los nodos que se comunican es muy bajo. En estas redes, VoIP puede usarse sin mucho problema. Pero cuando una red de área de cobertura amplia (WAN) es usada – como Internet por ejemplo – los problemas son mayores. Un problema es la latencia: mientras que la latencia en una LAN es muy baja, en una red WAN es mucho mayor. Si la latencia llega a ser muy grande, la conversación no va a ser muy interactiva. Otro problema es la calidad de la señal de la voz. Cuando ciertas redes llegan a estar altamente congestionadas, los paquetes en la red WAN pueden perderse, causando interrupciones en la señal de la voz, provocando disturbios en la conversación. Para aligerar a carga, se usan técnicas de compresión digital de la voz, lo cual por otro lado, causa cierta degradación en la señal.

Voz sobre IP esta sujeto a varios estándares como el de la ITU H.323, SIP de IEFET, los cuales recomiendan una serie de especificaciones como codificadores de voz, protocolos de transporte, compresión.

se compone de varios componentes como la terminal o teléfono IP, pasarelas y otros dispositivos.

II.1.1 Estándares utilizados en voz sobre IP

Voz sobre IP usa un número considerable de protocolos. En 1994, la ITU introduce la familia de protocolos para el estándar H.323 para agregar la capacidad de transporte multimedia sobre la red de Internet. En paralelo, la IETF también a contribuido con estándares de protocolos como RTP, RTSP, RTCP, Megaco, SIP y SDP entre otros. Estos protocolos vienen

a ser la base para los estándares de la telefonía IP.

II.1.1.1 Estándar de VoIP H.323

El estándar H.323 es una recomendación publicada por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU por sus siglas en inglés) y define la integración de una serie de elementos de red y protocolos que permite una transmisión multimedia de voz, video y datos a través de una red basada en conmutación de paquetes. H.323 también es considerado el elemento de señalización para una llamada multimedia, es decir, el responsable por abrir y cerrar las llamadas.

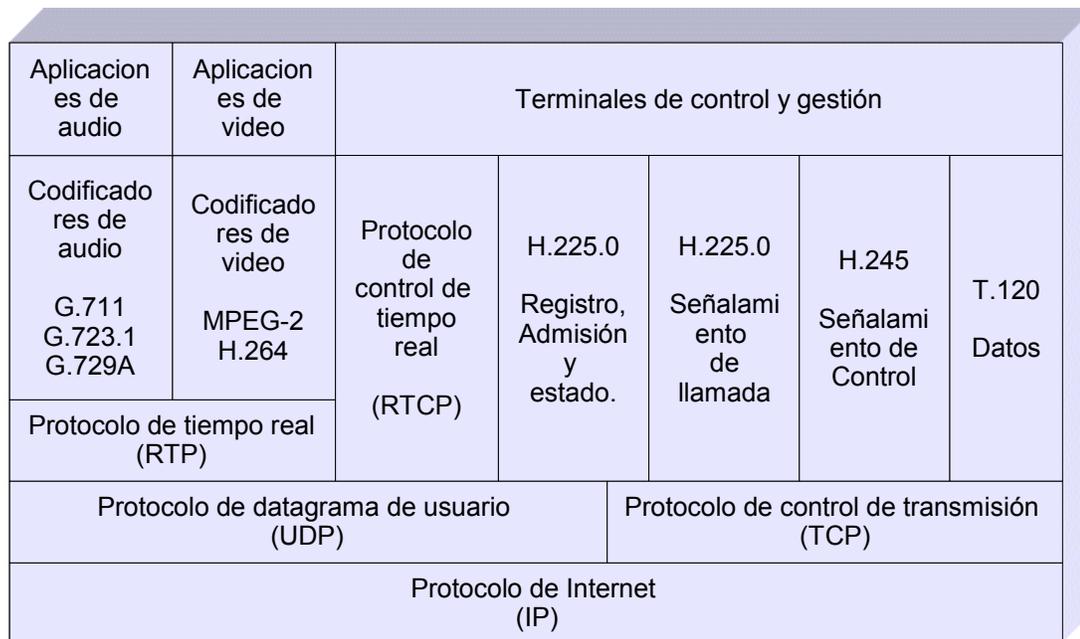


Figura 3: Protocolos en H.323

H.323 define un número de elementos (o entidades H.323) que son requeridos para la transmisión multimedia. Algunos de estos elementos son obligatorios, algunos otros son opcionales. Algunas veces, las entidades son implementadas en software y es posible que una

o más entidades se encuentren instaladas en una computadora. Los elementos más importantes son mencionados a continuación:

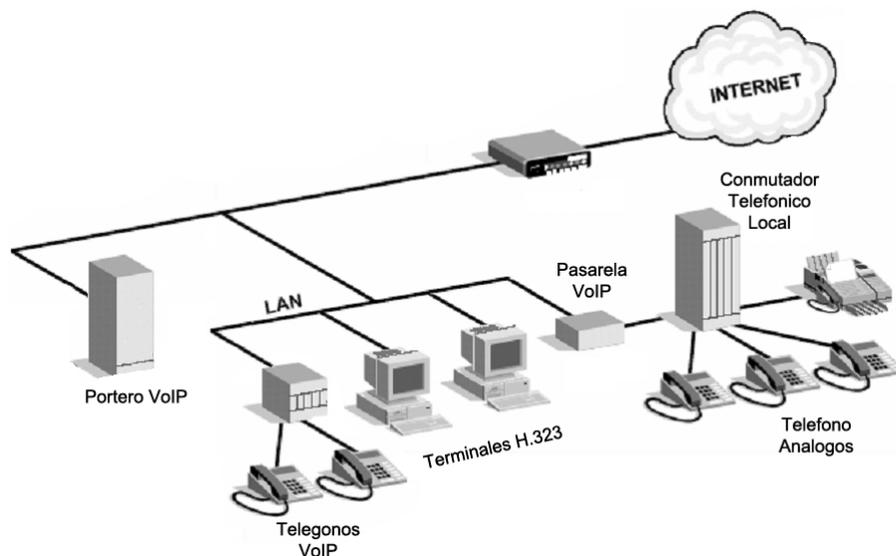


Figura 4: Componentes de un sistema de VoIP - H.323

II.1.1.1.1 Terminal H.323

Una terminal H.323 es un punto final en la red el cual provee una comunicación en tiempo real hacia otra terminal, la unidad portero o la unidad de control multipunto. La terminal puede proveer únicamente la voz, voz y datos, voz y video o voz, datos y video.

II.1.1.1.2 La pasarela H.323

La pasarela provee la conversión de protocolo entre una terminal H.323 y otra terminal que no soporte el estándar H.323. Por ejemplo, una pasarela puede enrutar llamadas de voz sobre IP provenientes de una terminal H.323 a la red de telefonía pública, permitiendo que las llamadas de teléfonos regulares pueden establecer comunicación con clientes H.323.

II.1.1.1.3 Portero H.323

El portero es una entidad opcional. Uno de sus propósitos es proveer un control de admisión básico a la red por medio de la autorización (o rechazo) de comunicaciones entre las otras entidades H.323 dentro de una zona de control. También provee un servicio de traslación de las direcciones.

II.1.1.1.4 Unidad de control multipunto H.323

La MCU, por sus siglas en ingles, provee un servicio que permite que tres o más terminales tomen parte de una llamada de conferencia multipunto manejando el control de las llamadas y el intercambio de medios (voz, video, datos, etc.) en una conferencia.

II.1.1.2 Protocolo de transporte para aplicaciones en tiempo real

Tanto el estándar *H.323* y *SIP* para VoIP dependen del protocolo de transporte en tiempo real (RTP por sus siglan en inglés) el cual proporciona el transporte extremo a extremo entre aplicaciones que requieran transmisión en tiempo real, como por ejemplo, los servicios de audio y video a través de redes de paquetes hacia un solo destino o múltiples destinos. El protocolo *RTP* proporciona los siguientes servicios: identificación del tipo de información transportada (denominada carga útil), numeración secuencial, inclusión de marcas de tiempo y minitreo de la entrega de paquetes al destinatario. Normalmente *RTP* está por encima de *UDP*, pero puede igualmente funcionar sobre otros protocolos de transporte o incluso de red. *RTP* no proporciona ningún medio para asegurar temporización en la entrega de información, ni tampoco entrega garantías de calidad de servicio. *RTP* proporciona los mecanismos necesarios para solventar dificultades tales como la dispersión temporal o posibles pérdidas, así como la recuperación de la señal de reloj y de sincronización.

La función básica del protocolo RTP es multiplexar varios flujos de datos que se caracterizan por ser de tiempo real, en un sólo flujo de paquetes UDP. Este flujo puede enviarse a un sólo destino ó múltiples destinatarios. Cada paquete enviado en un flujo de datos RTP le es asignado un número mayor a su predecesor. Esta numeración le permite al destino determinar si un paquete se ha perdido, y aproximar algún valor faltante por medio de interpolación. La retransmisión no es una opción práctica, dado que el paquete probablemente llegue tarde para ser de alguna manera útil.

Otra necesidad de las aplicaciones de tiempo real es que necesitan una estampa de tiempo. La idea es permitir que la fuente pueda asociar una estampa de tiempo con la primera muestra de cada paquete. La estampa es relativa al inicio del flujo de datos, así, solo la diferencias entre estampas de tiempo entre paquetes son significativas. Los valores absolutos no tienen significado.

El protocolo de control en tiempo real (RTCP) trabaja en conjunto con RTP para proveer a la aplicación la información de retroalimentación sobre la calidad de servicio con el que se encuentra experimentando el receptor. RTP reporta parámetros de calidad de servicio como la pérdida de paquetes y la cantidad de retardo variable en ese momento, con esta información la fuente de paquetes puede ajustar sus tasas de transmisión.

II.1.1.3 Codificadores de voz

En los inicios de la telefonía, la voz era modulada y transmitida a través de un par de cables. Con el avance de la tecnología, las compañías de telecomunicaciones han optado por manejar la información en forma digital, convirtiendo la señal análoga de la voz a una señal eléctrica digital. Los codificadores de voz son las herramientas que permiten convertir la información

de voz análoga a información digital para ser transmitida por medios digitales. Al llegar a su destinatario, esta información de datos es nuevamente convertida a su forma análoga.

La tabla I se encuentra basada en la presentada por *Torten, 2000* en donde se muestran las características de diferentes codificadores de voz.

Tabla I: Estándares para compresión de voz

Tipo de código	Tasas de transferencia	Carga de procesamiento	Calidad de la voz	Retardo
G.711 PCM	64 kbps	-	Muy bueno	Mínimo
G.723.1 MP-MLQ	6.4 / 5.3 kbps	20 MIPS	Bueno	Alto
G.726 ADPCM	40 / 32 / 24 / 16 kbps	8 MIPS	Bueno	Variable
G.728 LD-CELP	16 kbps	40 MIPS	Bueno	Bajo
G.729 CS-ACELP	8 kbps	30 MIPS	Bueno	Bajo
G.729A CS-ACELP	8 kbps	20 MIPS	Satisfactorio	bajo

Algoritmos como el de conciliación de la pérdida de paquetes (*PLC* por sus siglas en inglés) o el de recuperación de paquetes perdidos (*PLR* por sus siglas en inglés) al final de la red pueden ser usados para compensar los paquetes perdidos. Aun con una tasa del 5% de paquetes perdidos puede ser aceptable cuando se usa un codificador G.711. Varios codificadores de voz se encuentran basados en predicción lineal excitada por tabla de códigos algebraicos (*CELP* por sus siglas en inglés), como G.728 y G.729, los cuales tienen integrado el algoritmo *PLC*.

Algoritmos de compresión de la voz deben de ser considerados debido a que reducen los requerimientos de ancho de banda, pero también reduce la calidad del sonido percibido. La pérdida de paquetes tiene mayor consecuencia cuando se usan codificadores con alta compresión dado que es mayor la información perdida.

Otros algoritmos como el detector de actividad de voz (*VAD*, por sus siglas en inglés) y el generador de ruido de confort (*CNG* por sus siglas en inglés) ayudan a la conservación de ancho de banda. El *VAD* detecta la presencia de voz y envía datos de control en lugar de paquetes completos con contenido de silencio. El *CNG* reproduce un sonido de fondo en lugar de un silencio absoluto de esta manera, no se genera un flujo de paquetes del cual no contiene información significativa para el usuario y al mismo tiempo, libera recursos disponibles para la red. La causa principal de silencio es cuando una de las partes se encuentra escuchando durante la conversación, pero periodos cortos de silencio ocurren entre las palabras y frases. Todo junto, el silencio llega a ser cerca del 60 por ciento de los bits enviados durante una conversación de voz PCM a 64 kbps.

Codificación por modulación por puños de codificados G.711

Este es el primer codificador digital de voz utilizado en comunicaciones. La magnitud de la señal es muestreada a intervalos regulares y convertidos a una serie de símbolos de 8 bits en base a una tabla (según el estándar del país) a una tasa de 64 kbps. Como no existe un procesamiento de la señal más allá que el muestreo se considera un codificador en tiempo real.

II.1.1.3.1 Codificación por cuantificación multiimpulso de máxima verosimilitud G.723.1

Este codificador convierte la voz u otro tipo de audio en tramas utilizando un codificador de predicción lineal de análisis por síntesis. El tamaño de la trama es de 30 ms, además de otro retardo de 7.5 ms mientras procesa la siguiente trama. Este codificador tiene asociado dos tasas de bits, una de 6.4 kbps de alta calidad y otra de 5.3 kbps de buena calidad para dar flexibilidad en la transmisión.

II.1.1.3.2 Codificación por predicción lineal excitada por tabla de códigos algebraicos G.729

La base de este codificador son modelos matemáticos de la voz humana. El procesador analiza el flujo de datos de la voz y los compara con un modelo matemático, de manera que el codificador genera un código para cada componente de la voz basado en los componentes del modelo matemático al mismo tiempo que estima una diferencia del error entre el flujo de la voz y el modelo usado.

II.1.2 Compresión de encabezado de protocolo RTP

Desde que el protocolo de transporte en tiempo real fue publicado en el RFC1889, ha habido un interés creciente en usar RTP como un paso para implementar aplicaciones de audio y video en diferentes tipos de redes. Sin embargo, ha existido la preocupación acerca de que el tamaño de su encabezado de 12 bytes es demasiado grande para una probable carga útil de 20 bytes cuando opera en canales de baja velocidad.

En 1999 se publicó el RFC2508 que describe como comprimir el tamaño del encabezado del protocolo de tiempo real, en el 2003 se publicó una mejora de este procedimiento en el RFC3545. La compresión puede aplicarse al encabezado de RTP únicamente, pero se obtiene una mayor ganancia en la compresión al combinarse los 40 bytes de encabezado de RTP, UDP e IP, resultando en un solo encabezado de 2 a 4 bytes. La comparación del encabezado con compresión y sin compresión se puede ver fácilmente en la figura 5.

La compresión del encabezado del protocolo RTP viene de la observación de que, la mitad de los bytes de los encabezados de IP y UDP permanecen constantes durante toda la conexión, en tanto que, varios campos del encabezado de RTP varían con cada paquete

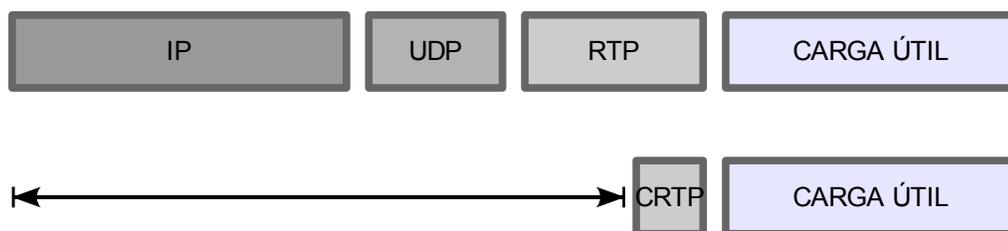


Figura 5: Comparación de encabezado entre un paquetes IP y otro de cRTP

Un descompresor puede reconstruir el encabezado original sin ninguna pérdida de información. Esto es manteniendo un encabezado de referencia y a partir de éste, se genera nuevamente los encabezados originales a base de los datos que reciba del encabezado *cRTP*.

El contenido del encabezado del protocolo *cRTP* es la diferencia de información entre los paquetes consecuentes. Esto quiere decir que, en lugar de transportar la marca de tiempo con el que se genera cada paquete, solo lleva la diferencia de tiempo entre cada paquete, logrando reducir más aún el número de bytes debido a que la diferencia es mucho menor y no se requiere demasiada memoria.

Existen diversos métodos para contrarrestar la pérdida de paquetes que emplean compresión de encabezado. Uno de ellos recomienda el envío del encabezado sin compresión por periodos regulares fijos, de esta manera se minimiza las pérdidas consecutivas de paquetes. Otro ejemplo es el algoritmo “*twice*”, este método se basa en la naturaleza típica de las aplicaciones en tiempo real en que son generados en forma periódica, cuando el receptor detecta una inconsistencia en el campo de *checksum*, el algoritmo trata de estimar cuales serían los valores correctos del encabezado de *cRTP* y comparándolo con el campo de *checksum*.

II.2 Tecnología de transmisión de IP sobre satélite

Varios factores influyen en el creciente interés de transmitir paquetes IP sobre satélite. Los satélites cubren áreas en donde no existe infraestructura para conexiones terrenas. Un satélite puede servir como un enlace de acceso a una red terrestre o formar un enlace de comunicación directa entre dos lugares separados por una gran distancia. Los enlaces satelitales pueden interconectar corporaciones para formar una intranet; también pueden sortear los enlaces terrestres congestionados. Satélites que utilizan transpondedores más potente se pueden tener enlaces comerciales de hasta 155 megabits por segundo de ancho de banda.

Para proveer el servicio de transporte de paquetes IP sobre satélites, la red satelital necesita una estructura de marco para que el datagrama IP pueda ser encapsulado en tramas y ser transportado vía satélite desde un punto de acceso a otro punto. Esta trama puede estar basado en protocolos de enlace de datos estándares. La encapsulación de IP es también definido en las redes existentes, como *dial-up*, ATM, DVS-S y DVS-RCS, los cuales soportan protocolos de Internet o una relación con Internet. Las redes de ATM usan una encapsulación de capa de tipo 5 (AAL5 por sus siglas en ingles) para encapsular los paquetes IP para la transmisión sobre redes ATM, y en DVS-S, los paquetes IP incluyendo los de *multicast* son encapsulados con un encabezado parecido al de Ethernet usando un estándar llamado encapsulado multi-protocolo (MPE por sus siglas en ingles).

II.2.1.1 Voz sobre IP a través de satélites

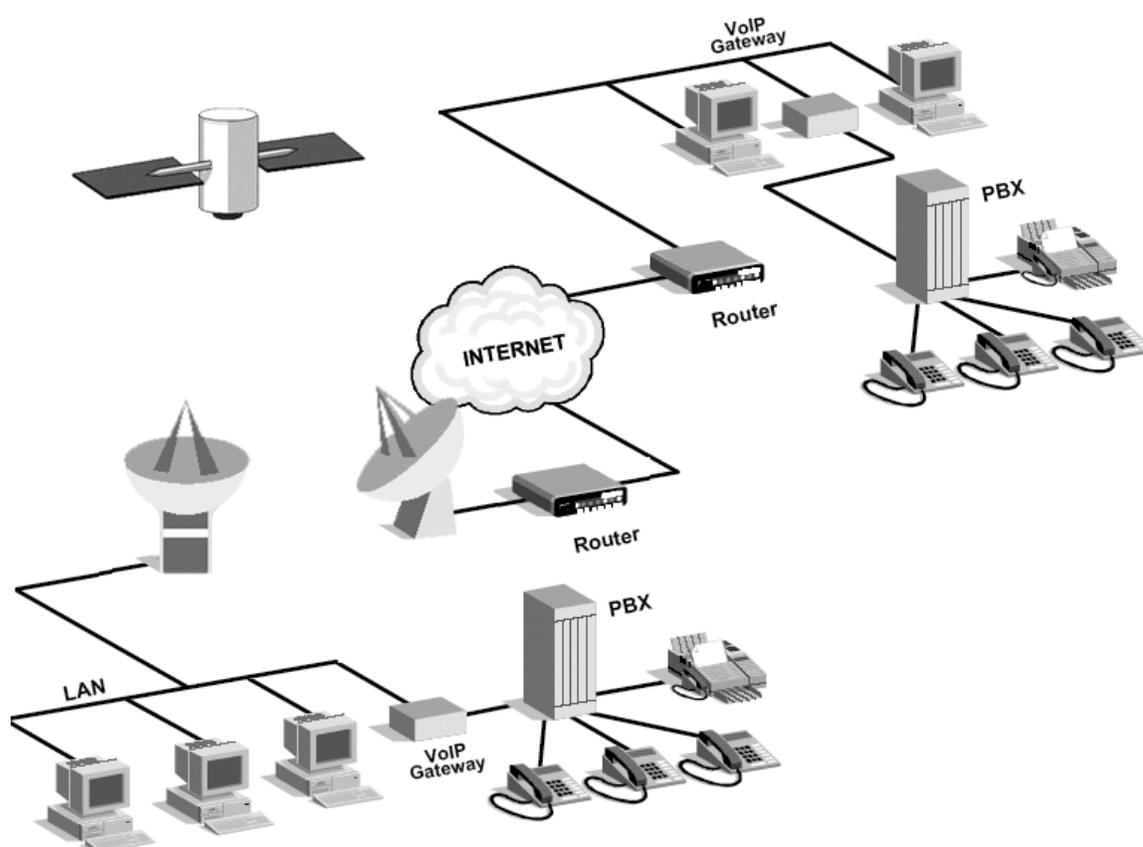


Figura 6: Sistema de VoIP que incluye un segmento especial en la red

Los satélites se están considerando en el futuro ser parte complementaria de las redes terrestres. Una de las mayores aplicaciones para redes satélites IP es la transmisión de información a un número grande de usuarios que se encuentran dispersos. Los nuevos satélites con múltiples puntos de cobertura y procesamiento a bordo, así como, constelaciones de satélites de órbita baja podrán soportar aplicaciones de tiempo real como la telefonía por IP y servicio de conferencias multipartitas. Un sistema de VoIP el cual emplea un segmento satelital es mostrado en la figura 6.

II.2.2 Estado del arte de voz sobre IP a través de satélites

Información sobre el proyecto de EuroSkyWay denominado VIP-TEN. Descritos por Sun et al., 2001, presenta una descripción detallada sobre los parámetros del proyecto VIP-TEN, así como del sistema EuroSkyWay. Su conclusión, son que los satélites con capacidad de procesamiento abordo(OBP) pueden ofrecer servicio de Voz sobre IP.

Igualmente, Cruickshank et al., 2001, presenta el análisis de evaluación del transporte de VoIP sobre satélite empleando el sistema EuroSkyWay. Especifican los distintos escenarios, así como la descripción de la prueba. Sus conclusiones son las siguientes: un bajo valor de variación de retardo, aun con tráfico de datos; El retardo impuesto por el enlace geoestacionario sigue siendo alto; sin embargo, dada la naturaleza no-determinística de Internet, los retardos pueden ser mayores; Para escenarios que incluyen computadoras personales, la opción que se elija como aplicación de comunicación de voz puede influir en la retardo de extremo a extremo; Así como la diferencia de los codificadores de voz, en un rango de 2 a 100 ms. La pérdida de paquetes fue menor al 1%.

En Nguyen et al., 2001, los autores realizan una simulación utilizando equipo H.323 existente y un simulador de enlace satelital por *hardware*. Las condiciones en su simulador, es un enlace utilizando un satélite geoestacionario. Sus resultados muestran que el enlace puede proveer un medio robusto para el transporte de tráfico de VoIP. El retardo por propagación no afecta las operaciones normales de los equipos pasarelas y portero. Bajo condiciones de errores en el enlace, las operaciones de VoIP siguen siendo robusta, tolerando un BER tan alto como 10^{-5} . VoIP no es eficiente en ancho de banda debido al pequeño tamaño de la carga útil y los encabezados extras de IP, UDP y RTP, y se puede mejorar usando

técnicas como compresión de voz y supresión de silencio.

Hasta ahora, hemos visto publicaciones basados en el uso de satélites geoestacionarios. Existen varias referencias con respecto al análisis de parámetros para satélites geoestacionarios, probablemente en este sentido esta tesis no pueda aportar nuevos resultados, se puede empezar por comparar nuestra simulación con los datos ya publicados para validar el simulador desarrollado, así podremos asegurar una confiabilidad para nuestras simulaciones con satélites de órbita baja.

En lo referente a estudios con satélites de órbita baja, la tesis de Cabanillas Norris, 2004, el cual se encuentra enfocada al diseño de contestaciones LEO de banda ancha con procesamiento a bordo, hace un breve análisis con tráfico de VoIP. Concluye que los satélites procesadores ofrecen mejores prestaciones en los parámetros de calidad de servicio de latencia, variación en el retardo, tasa de errores de bit, tasa de pérdida de paquetes y caudal eficaz para la aplicación de VoIP, ya sea para satélite GEO como LEO. Los satélites procesadores soportan una mayor intensidad de tráfico de voz en el transporte de VoIP a través de una red híbrida terrestre-satelital. Debido a la capacidad de regeneración en banda base y conmutación de celdas a bordo de los satélites procesadores. Los satélites LEO se ajustan mejor a los requerimientos de las aplicaciones en tiempo real que los satélites GEO, principalmente por la altura orbital en la que se encuentran los satélites LEO.

II.3 Principios de órbitas de los satélites y sus parámetros

Un satélite es un objeto físico que orbita alrededor de algún cuerpo celeste. Un satélite gira alrededor de la Tierra en una trayectoria circular o elíptica. Los círculos y elipses son figuras geométricas que suelen describirse de manera matemática con mucha precisión.

Un simple satélite puede cubrir una sólo una parte de la superficie de la tierra para dar servicio de comunicación; un satélite en una órbita geoestacionaria sobre el Ecuador no puede ver más del 40% de la superficie (Clarke, 1945). Para una cobertura mayor se necesita un número mayor de satélites – una constelación de satélites. Podemos describir una constelación de satélites como un número de satélites similares, diseñados para ser complementarios, con el propósito de compartir una órbita, bajo un sistema de control compartido.

Para poder entender la órbita de un satelites es necesario definir ciertos parámetros utilizados para el diseño de órbitas y constelaciones, las más importantes se mencionana continuación.

II.3.1 Altura del satélite

En órbita circular, la altura es sólo la distancia del satélite a la Tierra. Sin embargo, en cálculos geométricos, la altura en realidad es la distancia entre el centro de la Tierra y el satélite. Cuando el satélite está en órbita elíptica, el centro de la Tierra es uno de los puntos focales de la elipse. En este caso, la distancia del satélite a la Tierra varía según su posición. Por lo general, los dos puntos de mayor interés son el punto más lejanos sobre la Tierra (apogeo) y el punto más cercano (perigeo). La distancias de apogeo y perigeo por lo común se miden del geocentro de la Tierra.

II.3.2 Velocidad del satélite

La velocidad varía de acuerdo con la distancia del satélite a la Tierra. Para una órbita circular, la velocidad es constante; no obstante, para una órbita elíptica la velocidad varía según la distancia en que se encuentre con respecto a la superficie terrestre en ese momento. La velocidad es mayor al acercarse al punto de perigeo y disminuye con forme se acerca al punto

de apogeo.

II.3.3 Periodo de un satélite

Un periodo es el tiempo que toma un satélite en completar una órbita completa. También se le llama periodo sideral. Una órbita sideral usa algún objeto externo, fijo o en apariencia inmóvil, por ejemplo el Sol o una estrella, como referencia para determinar un periodo sideral. La razón de emplear un punto de referencia fijo es porque mientras el satélite está girando alrededor de la Tierra, ésta también gira.

Otro método de expresar el tiempo de una órbita es la revolución o periodo sinódico. Una revolución es el periodo entre el paso sucesivo del satélite sobre un meridiano de referencia de longitud sobre la Tierra.

II.3.4 Ángulo de inclinación

El ángulo de inclinación de la órbita de un satélite es el ángulo entre el plano ecuatorial de la tierra y el plano de la órbita del satélite al entrar en el hemisferio norte. Cuando el ángulo de inclinación es 0° , el satélite estará directamente arriba del ecuador. Si el ángulo de inclinación es 90° , el satélite pasará sobre los polos una vez por periodo. Las órbitas con inclinación de 0° por lo general se llaman órbitas ecuatoriales, la cual es la utilizada por los satélites geoestacionarios, mientras que los satélites con ángulos de inclinación de 90° se denominan órbitas polares, generalmente los satélites de órbitas bajas.

II.3.5 Angulo de elevación

En ángulo de elevación de un satélite es el que aparece entre la línea de la antena de la estación terrena al satélite y la línea de la antena de la estación terrena y el horizonte de la Tierra en ese lugar. Esta es una referencia utilizada para indicar la posición del satélite con

respecto a un punto geográfico específico y se usa principalmente para apuntar las antenas directamente al satélite.

II.4 Introducción a los satélites geoestacionarios

En 1945, Clarke A. sugirió la posibilidad de colocar satélites artificiales en una órbita tal que al observarlos desde un punto sobre la superficie de la Tierra pareciera como si estuviesen fijos en el cielo. Los satélites no cambian aparentemente de posición y esto trae consigo grandes ventajas, pues su operación se simplifica y el costo de los equipos terrestres necesarios para utilizarlos se reducen en relación con el uso de otras órbitas. Además, casi la totalidad del mundo habitado se puede intercomunicar por radio con solo tres satélites colocados en esa órbita tan especial, como se puede observar en la figura 7.

Los satélites se mantienen en órbita como resultado de un balance entre la fuerza centrífuga y la gravitacional; obviamente debe haber un balance entre la aceleración, la velocidad y la altitud del satélite. La tierra gira sobre su propio eje, completando una vuelta cada 24 horas, por lo que se produce la ilusión de que el satélite no se mueve para un observador en un punto fijo de la Tierra.

El satélite debe desplazarse en el mismo sentido de rotación que la Tierra; además, para no perder altura poco a poco y completarse una vuelta cada veinticuatro horas, debe estar aproximadamente a 36,000 km de altura sobre el nivel del mar. Para lograrlo, el satélite debe tener una velocidad constante de 3,705 m/s, siguiendo una órbita circular alrededor del planeta.

Dado a que un satélite geoestacionario parece mantener una posición fija, no se requiere de ninguna antena especial para seguir su trayectoria. Un solo satélite geoestacionario puede

proveer comunicación a aproximadamente el 40% de la superficie de la tierra.

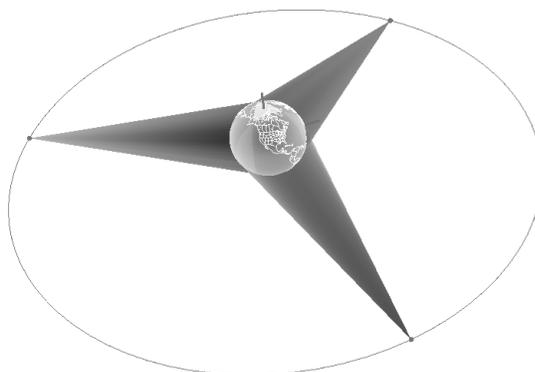


Figura 7: Ejemplo de órbita geoestacionaria con una cobertura terrestre proporcionada por tres satélites.

Las órbitas geoestacionarias son órbitas circulares; es por eso que la velocidad de rotación es constante en toda la órbita. Solo existe una órbita geoestacionaria, sin embargo, es ocupada por un gran número de satélites.

Existen varios requisitos para los satélites en órbita geoestacionaria. La primera es que deben encontrarse a un ángulo de inclinación de 0° (el satélite debe encontrarse exactamente arriba del plano del ecuador de la Tierra). El satélite debe encontrarse orbitando en la misma dirección de rotación de la Tierra con la misma velocidad angular a una revolución por día.

II.4.1 Características de las órbitas geoestacionarias

Los satélites geoestacionarios permanecen casi estacionarios con respecto a una determinada estación terrestre. En consecuencia, las estaciones terrestres no necesitan costosos equipos.

Los satélites geoestacionarios están disponibles para todas las estaciones terrestres dentro de su área de cobertura el 100% del tiempo. La cobertura de un satélite abarca todas las estaciones terrestres que tienen una trayectoria visual hacia el satélite, y que quedan dentro de

la distribución de radiación de las antenas del satélite.

No hay necesidad de cambiar de uno a otro satélite geoestacionario porque pasen por su respectiva órbita. En consecuencia, no hay interrupciones de transmisión causadas por los tiempos de comunicación, son despreciables los efectos de desplazamiento Doppler.

Los satélites geoestacionarios se encuentran colocados a gran altura e introducen retardos de propagación de ida y vuelta entre dos estaciones terrestres de 500 a 600 ms.

Los satélites geoestacionarios requieren mayor potencia de transmisión y receptores más sensibles, por las mayores distancias y mayores pérdidas en la trayectoria.

II.5 Introducción a los satélites de órbitas bajas

En años recientes, ha habido varias propuestas para el uso de redes satelitales de órbita baja en comunicaciones. La gran ventaja para las redes de satélites LEO por sus siglas en inglés sobre los satélites en órbita geoestacionaria es el menor retardo de propagación. Las órbitas de los satélites LEO se encuentran a 1,500 km o menos sobre la superficie de la tierra y el retardo de ida y vuelta típicamente anda alrededor de 10 mseg. comparado con los 230 ms. para satélites GEO. Sin embargo, las bajas altitudes también introducen desventajas, como el movimiento constante de los satélites con respecto a la superficie de la tierra, y la necesidad de una cantidad mayor de satélites para proveer una cobertura completa de la tierra. Los satélites LEO pueden ser usados para suplementar las redes terrestres proveyendo enlaces entre los destinos que serían muy difíciles o poco económicos para conectarse vía terrestre. Un ejemplo de una constelación de satélites de órbita baja con cobertura global se muestra en la figura 8.

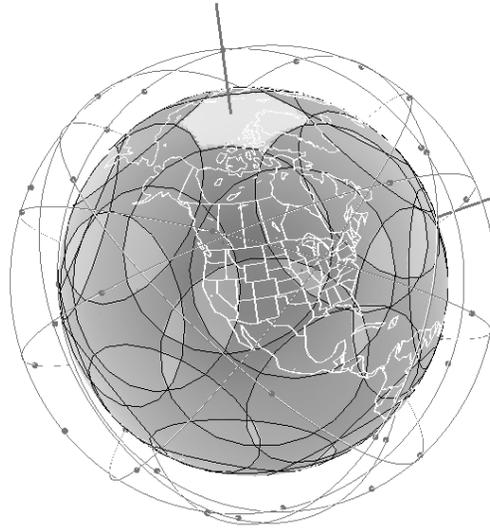


Figura 8: Gráfico simulado por SAVI de la constelación Iridium con 66 satélites

La altitud de los satélites es constante e igual a cientos o miles de kilómetros. El periodo se encuentra en el orden de media hora a dos horas. Con una inclinación cerca a los 90° , este tipo de órbita garantiza una amplia cobertura global como resultado de la combinación del movimiento de los satélites y la rotación de la tierra.

Por otro lado, como los satélites se encuentran tan cercanos a la Tierra, las estaciones terrestres no necesitan mucha potencia, y el retardo del viaje de ida y vuelta es de tan solo algunos milisegundos, así mismo, las antenas no requieren de un sistema de seguimiento de trayectoria hacia el satélite, sino unas simples antenas omnidireccionales apuntando al cielo debido a que siempre estará bajo la cobertura de uno de los satélites.

II.5.1 Geometría de las constelaciones

Muchas constelaciones se encuentran basadas alrededor de la idea de planos co-rotados, ligeramente desfasados para proveer un completo traslape, proporcionando una ruta para su cobertura.

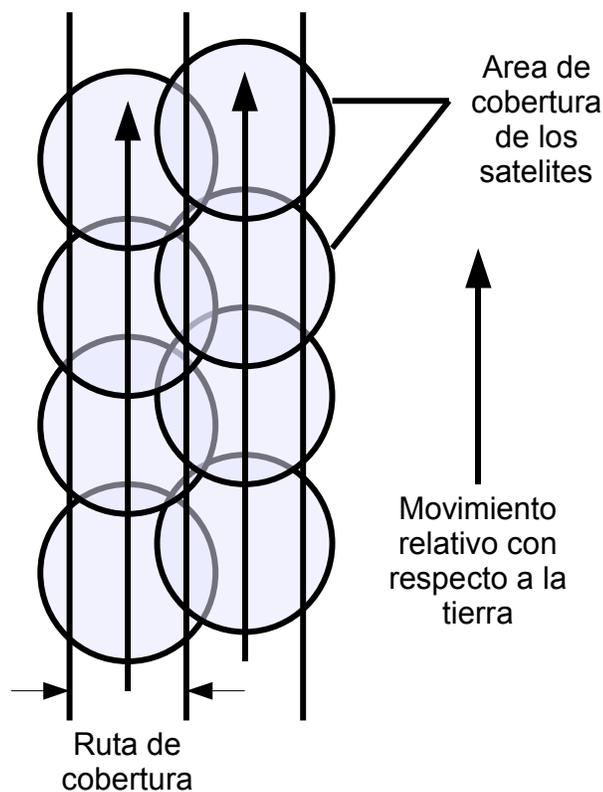


Figura 9: Ruta de cobertura de una constelación de satélites LEO

Los planos co-rotados mostrados en la figura 9 tienen la misma inclinación con respecto al plano de referencia. Cuando el satélite tiene un ángulo de inclinación dado, se dice que la órbita es ascendente o descendente. Al moverse el satélite de sur a norte y cruzar el ecuador, la órbita es ascendente. Si el satélite va de norte a sur a través del ecuador, la órbita es descendente.

II.5.1.1 Constelaciones de tipo estrella polar y casi polar

El tipo de órbita polar tiene una inclinación de exactamente 90° y las constelaciones con órbitas cerca del plano polar tienen por lo general un ángulo de inclinación cerca, pero tolerante.

Walker, investigó diferentes tipos de constelaciones.

Esto es debido al hecho de que todas las órbitas cruzan cerca de los polos, y si es vista desde uno de los polos los planos orbitales se interceptan para formar una estrella como se ilustran en la figura 10.

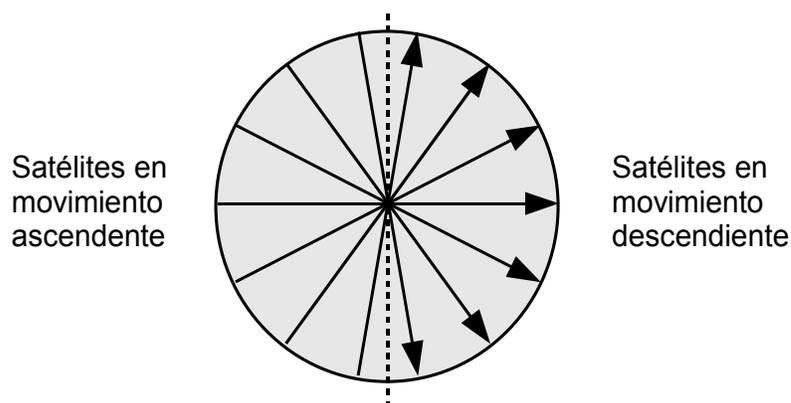


Figura 10: Vista polar de un patrón de estrella

II.6 Medición de la Calidad de Servicio de Voz sobre IP

La calidad de servicio que ofrece una red se ha confundido muchas veces con el de “desempeño de la red”. Como lo especifica Oodan et al. (2003) la calidad es experimentada por el usuario y el usuario indica que nivel de desempeño se requiere. También el usuario indica que nivel de desempeño es percibido por el servicio prestado. El *desempeño de la red* es el desempeño técnico de los elementos de la red o de toda la red, contribuye hacia la calidad de servicio y debe ser derivado de la calidad de servicio que se va a ofrecer al usuario. Ofrecer al usuario calidad de servicio basado en la capacidad y limitaciones de la red es ofrecer lo que hay disponible, independientemente de lo que se requiere.

La calidad de servicio se puede interpretar como la habilidad de la red para garantizar y

mantener un cierto nivel de desempeño para cada una de las aplicaciones de acuerdo a las necesidades específicas para cada usuario.

II.7 Ciclo de calidad de servicio

El desempeño de la red contribuye a la calidad de servicio experimentado por el usuario. El desempeño de la red puede ser extremo a extremo. Por ejemplo, el desempeño de acceso es usualmente separado del núcleo del desempeño de la red en las operaciones de una simple red IP mientras que el desempeño de Internet comúnmente refleja el desempeño de la red de redes automátatas.

Hay cuatro puntos de vista de calidad de servicio definida por la recomendación de ITU-T G.1000, en la figura 11 se muestra la relación entre cada una de ellas corresponde a las diferentes perspectivas

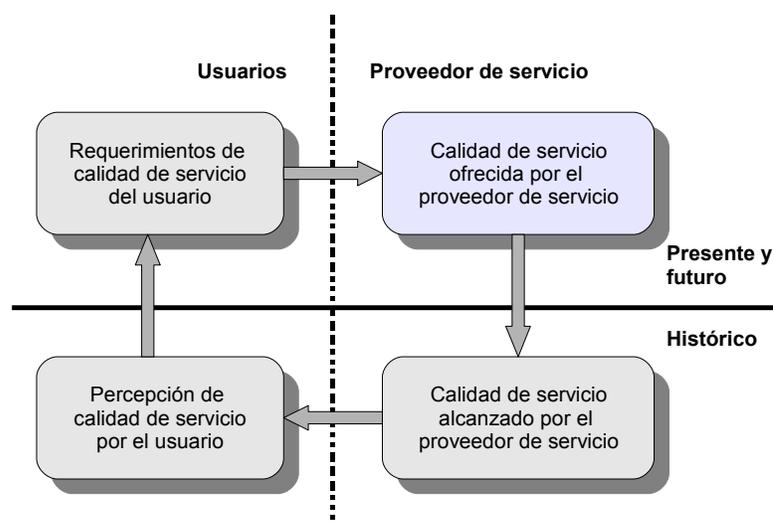


Figura 11: Ciclo de calidad de servicio

Hay dos partes principales: los usuarios y los proveedores de servicio. Los estudios de calidad de servicio pueden dividirse en futuro y pasado. Para el proveedor de servicio, estas

divisiones lo llevan a la planeación y prestación de calidad de servicio. Para el usuario estas divisiones lo llevan a sus requisitos de calidad de servicio o expectativas, y su percepción o experiencia sobre el desempeño. Cada uno de los puntos definidos se describen a continuación:

II.7.1 Requerimientos de calidad de servicio del usuario

Los requerimientos de calidad de servicio del usuario son los estados, las relaciones de los parámetros y los niveles de calidad del servicio en particular. El nivel de calidad puede ser expresado por el usuario en lenguaje técnico y no técnico. Un usuario típico no le interesa como se le está proporcionando el servicio o cualquier otro aspecto del diseño interno de la red, sino únicamente los resultados de la calidad de servicio extremo a extremo.

II.7.2 Calidad de servicio ofrecido por el proveedor de servicio

La *calidad de servicio ofrecida por el proveedor de servicio* es una relación del nivel de calidad esperado para ser ofrecido al usuario por el proveedor de servicio. El nivel de calidad es expresado por el **valor de sus parámetros de calidad**. Cada servicio tendrá sus propios valores de parámetros de calidad. El proveedor podrá expresar la calidad que se ofrece en términos no técnicos, cuando sea necesario para beneficio del usuario y en términos técnicos para su propio uso.

II.7.3 Calidad de servicio alcanzado por el proveedor de servicio

La *calidad de servicio alcanzado por el proveedor* es una relación del nivel de calidad provista al usuario. Ésta es expresada por **valores asignados a los parámetros**, los cuales deberán ser iguales a los especificados en la calidad ofrecida para que puedan ser comparados. Las figuras de desempeño son resumidas por periodos de tiempo específicos.

II.7.4 Calidad de servicio percibido por el usuario

La *calidad de servicio percibida por el usuario* es una relación expresando el nivel de calidad del cual *creo* que ha experimentado. La calidad de servicio percibida es usualmente expresada en términos de **grado de satisfacción** y no en términos técnicos. La calidad de servicio percibida es estimado por medio de encuestas provenientes de los comentarios propios de los usuarios a cerca del nivel de servicio.

II.8 Parámetros de calidad de servicio

La definición de calidad de servicio de ITU-T se encuentra basada en una aproximación hacia el usuario, es decir, no refleja bien la relación entre calidad de servicio y desempeño de red con la conexión de redes.

Los parámetros típicos a monitorear son:

- para señales análogas: la relación señal a ruido
- para señales digitales: la tasa de error de bit,
- A nivel paquetes: retardo por propagación y variaciones de retardo, tasa de perdida de paquetes y caudal eficaz.

II.8.1 Tasa de error de bits

La tasa de error de bits (*BER* por sus siglas en inglés) son los bits, elementos, caracteres o bloques incorrectamente recibido del total de número de bits, caracteres o bloques enviados durante un intervalo de tiempo específico.

II.8.2 Latencia

La transmisión de paquetes de datos de voz no es instantánea, y latencia es el término usado para describir el tiempo ocupado por todo lo siguiente:

- Un paquete de datos de voz para moverse a través de la red y llegar a un extremo.
- Codificación y paquetización en una terminal de transmisión.
- Variaciones de retardo provocados por congestionamiento en las redes y decodificando en la terminal receptora.

La latencia es también llamado latencia de extremo a extremo o latencia de boca a oído.

Conversaciones generalmente involucran “turn-talking” de espacios de 200 ms.

Cuando la latencia de la red se aproxima a este valor, el flujo de una conversación empieza a ser distorsionado. Las dos partes podrían empezar a hablar al mismo tiempo e interrumpirse el uno al otro. Un retardo de 170 ms, aún con señal perfecta degrada rápidamente la aceptabilidad.

II.8.3 Variaciones en el retardo

Cuando un flujo de paquetes viaja sobre una red IP, no hay garantía de que cada paquete de la red vaya a viajar por el mismo camino, como en las redes de conmutación de circuitos. Intervalos de tiempo en los arribos de paquetes varían debido a que un paquete pudo haber dado más “saltos” en la red que otro. A esta irregularidad en los arribos se le conoce como *variación en el retardo*.

Si un paquete IP es retrasado y no llega a tiempo al receptor, entonces se le considerará perdido. Si esto sucede muy seguido, la calidad de la voz será afectada considerablemente.

Para permitir un flujo continuo de paquetes hacia el receptor, aun cuando los tiempos de llegada de los paquetes sea variable, una técnica usada consiste en que el receptor retiene durante un tiempo predefinido en una memoria de almacenamiento el primer paquete que recibe, mientras espera a que otros paquete arriben. La cantidad del tiempo de retención depende del tamaño de la memoria de almacenamiento. Este tiempo de retención contribuye al retardo total de extremo-a-extremo del paquete.

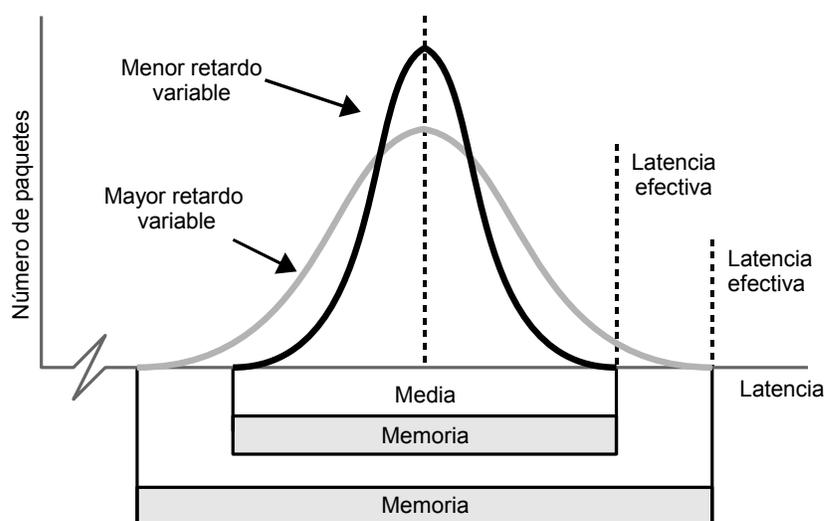


Figura 12: Efecto de la variación de retardo sobre la latencia extremo a extremo

II.8.4 Tasa de pérdida de paquetes

Un paquete se puede perder en la red por varias razones, las redes IP tratan a los paquetes de voz como si fueran paquetes de datos, los paquetes de voz pueden ser descartados bajo ciertas condiciones de tráfico alto y congestión. Los paquetes perdidos pueden causar un severo daño a la calidad de la telefonía IP. Cada paquete contiene de 40 a 80 ms de información de voz. El cerebro humano tiene la capacidad de poder resolver algunas pérdidas de la información, pero demasiados paquetes perdidos pueden provocar una comunicación

indescifrable.

Existen algunas técnicas para resolver el problema de los paquetes perdidos. Mientras que algunas se enfocan en reducir la tasa de pérdida de paquetes, otras se concentran en la reparación del daño causado por los paquetes perdidos.

II.8.5 Caudal Eficaz

El *caudal eficaz* es la tasa a la cual una red de datos envía o recibe información. Es por lo tanto una buena medida de la capacidad del canal en un enlace de comunicaciones. El caudal eficaz es la cantidad de datos que puede ser transferida a través de una conexión digital durante un periodo de tiempo. Usualmente se mide en bits por segundos. Un método típico para medir el desempeño es transferir una cantidad grande de información y medir el tiempo que toma en llegar a su destino. El caudal eficaz es calculado dividiendo el tamaño de la información por el tiempo transcurrido en megabits o kilobits por segundo.

II.9 Percepción de la calidad de servicio

Calidad de servicio del usuario y sus requerimientos

** ITU G.1010

Basado en los requerimientos requeridos por las aplicaciones, se puede hacer una mapa de bloques de pérdida de paquetes y retardo en una sola vía como se muestra en la figura 13. El tamaño y forma de las cajas provee una indicación general de los límites de retardo y pérdida de información tolerable para cada de las clases de las aplicaciones.

Se pueden ver que hay 8 grupos diferentes, entre ellos existe los que pueden tolerar pérdida de información y aquellos que no lo pueden.

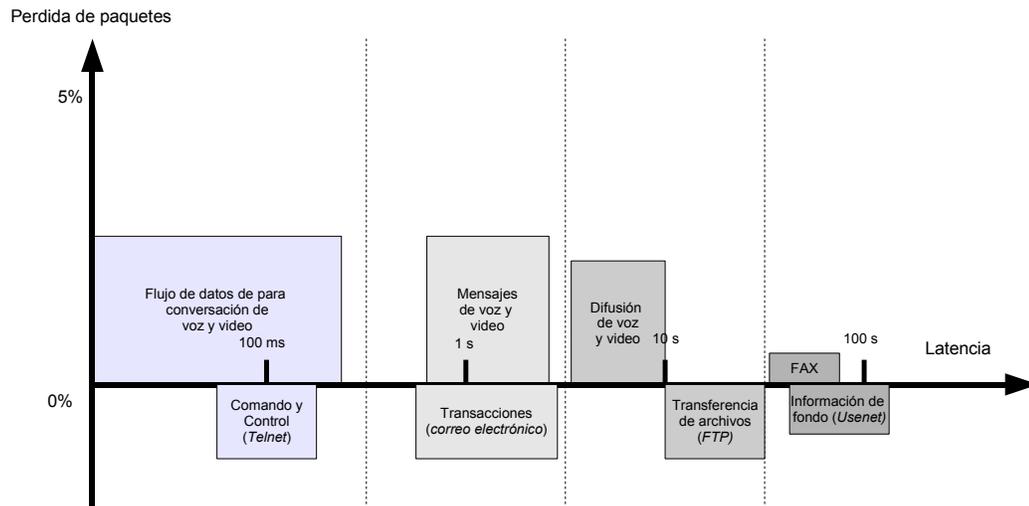


Figura 13: Aplicaciones vs pérdidas de paquetes

Deferentes técnicas pueden ser usadas para reducir el retardo en los extremos.

- Optimizar el buffer del jitter
- Optimizar el tamaño del paquete – un tamaño de paquete de 10 ms es optimo para reducir el retardo por paquetización. Sin embargo, un numero grande de paquetes pequeños con relativamente sobre encabezado puede ser peor que paquetes de 20 ms en algunas situaciones.
- Evitar la perdida de sincronía de los codificadores.
- Usar un tamaño de paquete estable.
- Usar un codificador de baja compresión.
- Asegurarse que los protocolos de red son eficientes y correctamente especificado su prioridad para trafico de VoIP.

II.9.1 Puntuación de opinión media

La percepción de la calidad de la voz en una transmisión durante una conversación telefónica

es primordialmente un juicio *subjetivo*. El concepto de calidad no se puede considerar con un valor numérico discreto y depende en gran medida de las expectativas del usuario con respecto al servicio.

La medida tradicional de la opinión de la percepción de un usuario sobre la calidad es la puntuación de opinión media (MOS) definida en “Métodos para la determinación subjetiva de la calidad de la voz (ITU-T P.800)”. En P.800, un equipo de expertos calificaron muestras de voz de acuerdo a una clasificación de los algoritmos de la codificación y de la compresión de voz bajo condiciones controladas. En la actualidad, a una serie de participantes se les encuesta para calificar la calidad de la voz en una escala del 1 al 5, donde 1 es como “¿que dijiste?” y 5 es como “la persona se encuentra a mi lado”. La población del consumidor debe ser significativamente variado estadísticamente (hombres, mujeres, jóvenes, tercera edad, etc.) y un mínimo de 40 personas. El resultado es tabulado para calcular el promedio (media aritmética), y con esto se obtiene la *puntuación de opinión media (MOS* por sus siglas en inglés) de la calidad de voz.

La escala del MOS para calidad de voz análoga ha sido usada desde hace mucho tiempo. Oficialmente la puntuación es como se muestra en la figura 14, una puntuación de 5 es generalmente considerada como *calidad local*, donde el servicio ofrecido para ambos usuarios proviene de la misma oficina central. La puntuación de 4 (o mayor) es conocida como *calidad de llamada telefónica*, y la mayoría de las llamadas de largas-distancias caen dentro de esta categoría. Puntuaciones entre 3 y 4 son típicamente consideradas *calidad de llamada celular*. Puntuación de 2 para abajo son a nivel de los intercomunicadores en los servicios de comida rápida, en donde se requieren una repetición constante de frases

solicitadas por el escucha.

PUNTUACIÓN DE OPINIÓN MEDIA	5	4	3	2	1
CATEGORÍA DE LA TRANSMISION DE VOZ	MÁXIMO	ALTO	MEDIO	BAJO	MALO

Figura 14: Escala de calificación de calidad de servicio para el servicio de telefonía

La mayoría de las regulaciones esperan observar una puntuación de MOS de 4 o mejor para servicios de línea terrestre y 3 o mejor para telefonía inalámbrica.

II.9.2 Herramienta para calcular el MOS

Las medidas de calidad de servicio definidas por la ITU tienden a ser muy subjetivas en sistemas de comunicaciones, y al paso de los años se han realizado varias investigaciones con la intención de predecir las sensaciones de calidad de servicio usando criterios objetivos.

En el capítulo II.9.1 se explico un método para calificar la calidad del servicio en una red de telefonía. Sin embargo, nuestro trabajo requiere calificar la calidad a partir de parámetros de desempeño, para ello existe una herramienta que hace precisamente esta función, la ITU-T desarrolló un método conocido como el modelo-E.

Este modelo es una herramienta que ayuda a predecir la calidad subjetiva de una llamada telefónica basada en la caracterización de los parámetros de transmisión. En otras palabras, combina las imperfecciones causada por estos parámetros en un valor llamado R , el cual puede ser usado para predecir la reacción de satisfacción del usuario.

PUNTUACIÓN DE OPINIÓN MEDIA	5	4	3	2	1
RANGO DEL VALOR R	100 - 90	89 - 80	79 - 70	69 - 60	59 - 0
CATEGORÍA DE LA TRANSMISION DE VOZ	MÁXIMO	ALTO	MEDIO	BAJO	MALO

Figura 15: Escala del factor R y su equivalencia en la calidad subjetiva de la comunicación por voz.

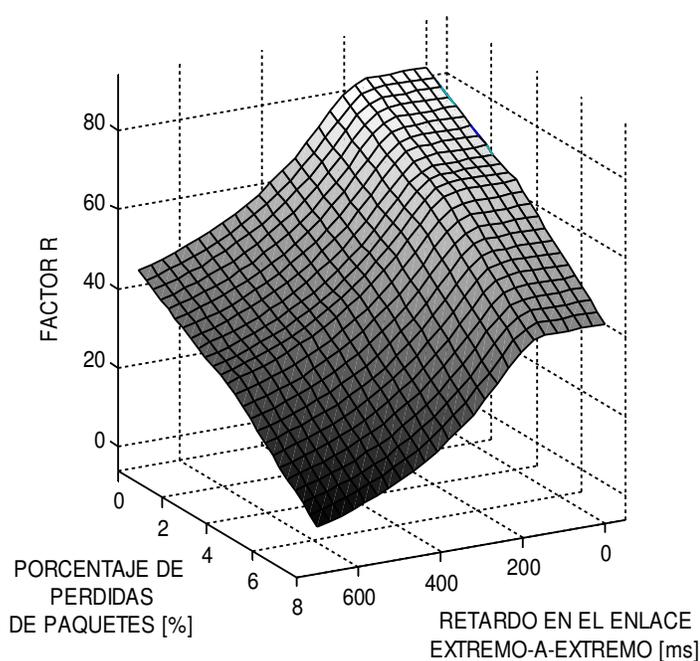


Figura 16: Factor R vs Porcentaje de pérdida de paquetes vs Retardo del enlace de punto-a-punto para un codificador G.729A

Los factores importantes que son usados como parámetros de entrada para el modelo-E son: *Retardo, tasa de pérdida de paquete, compresión de la voz y eco*. Estos y otros factores perjudiciales deben de ser controlados y mitigados en la red y en los puntos extremos para asegurar alta tasas de calidad de servicio y la satisfacción del usuario.

ITU-T G.107 presenta un modelo matemático, conocido como el modelo-E, el cual hace un

intento por predecir una puntuación de calidad de servicio usando factores de imperfecciones mas objetivos. TIA/EIA TSB116 provee una comparación de la escala de valores R del modelo-E y la puntuación MOS.

III DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN DE VOZ SOBRE IP POR SATÉLITE

En este capítulo se describe el diseño de un simulador de una red con tráfico de paquetes de voz sobre IP a través de satélites en el ambiente de trabajo de MATLAB. Se presentan la descripción de modelos matemáticos, las fuentes de información de donde se obtuvieron estos modelos así como su implementación en software.

III.1 Descripción

Para conocer el comportamiento de voz sobre IP a través de satélites y poder medir el desempeño de los parámetros de calidad de servicio en la red, se realizó un simulador que contemplase los diferentes componentes que conforman un sistema de red satelital para el transporte de datos, específicamente el tráfico de voz sobre IP. El simulador está compuesto por varios módulos donde cada uno representa etapas diferentes en el modelado de tráfico de VoIP por la red. En cada una de las etapas se monitorea los parámetros de desempeño de calidad de servicio de la red.

La siguiente sección III.2 explica el funcionamiento del módulo encargado de la simulación, los modelos empleados para la simulación de la red se describen a partir del capítulo III.3.

III.2 Kernel del simulador en Matlab

El Kernel del simulador no es ninguna etapa dentro del canal de tráfico de paquetes de voz sobre IP sino la base principal del funcionamiento en sí de la herramienta de simulación. Se encarga de administrar los eventos de ocurrencia en cada una de las etapas de la simulación.

El simulador desarrollado cuenta con las siguientes particularidades: Permite la simulación de eventos sincronizados, esto es, los eventos ocurren en tiempos definidos sin importar la

diferencia de tiempo entre un evento y otro, o si estos suceden al mismo tiempo. Simula la dirección de ocurrencia de tráfico de paquetes ya sea en el canal de ida o en el canal de retorno. Su estructura es modular, es decir, que se puedan describir los eventos en módulos para que sea más fácil la integración de eventos, o cambios de escenarios.

La simulación se encuentra basada en un sistema de estampa de tiempo, donde la simulación requiere de un sistema de tiempo simulado que permita la ocurrencia de eventos independientes entre sí. Todos los cambios son registrados según el evento en desarrollo con cada paquete IP. En la figura 17 se muestra el diagrama de flujo del funcionamiento de este bloque.

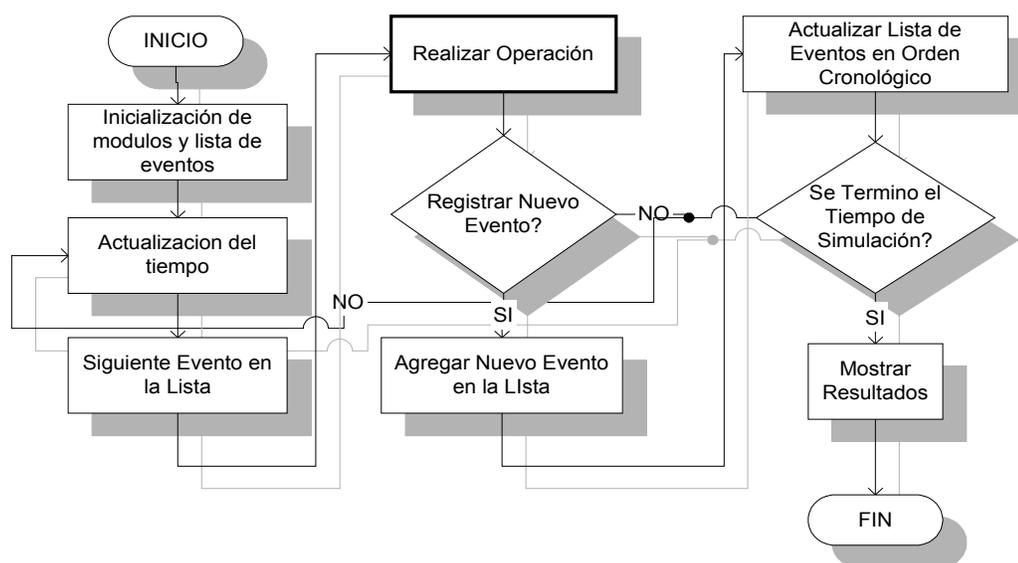


Figura 17: Diagrama de flujo del funcionamiento del kernel de simulación

El simulador inicia adquiriendo todos los parámetros proporcionados por el usuario y actualiza los estados de la red a su condición inicial en cada módulo, iniciando sus operaciones con el módulo de fuente de tráfico. Cada módulo es una caja negra para el

kernel, el cual desconoce los procesos que se desarrollan allí. Sin embargo, estos bloques regresan un *rastro* el cual es un registro de eventos que usualmente incluye el tiempo del evento, el tipo de evento y otros parámetros importantes asociados para que el kernel pueda seguir administrando las operaciones del simulador.

La administración de los eventos se hace mediante una *matriz de eventos*, cada uno de los bloques del simulador que manipule los parámetros del comportamiento de los paquetes dentro de la red registra el evento en esta matriz. La matriz de eventos es ordenada en forma cronológica con cada ciclo una vez finalizado cada evento dando mayor prioridad a los eventos próximos en tiempo simulado presente.



Figura 18: Campos de la matriz de eventos “*cal_event[]*”

A continuación se describirán cada uno de los diferentes módulos o bloques que conforman el simulador en el orden que se muestran en la figura 19, la cual representa nuestro escenario básico de simulación. De esta manera, al separar cada etapa de la simulación por módulos se puede manipular mejor la información y desarrollar mejor cada etapa.

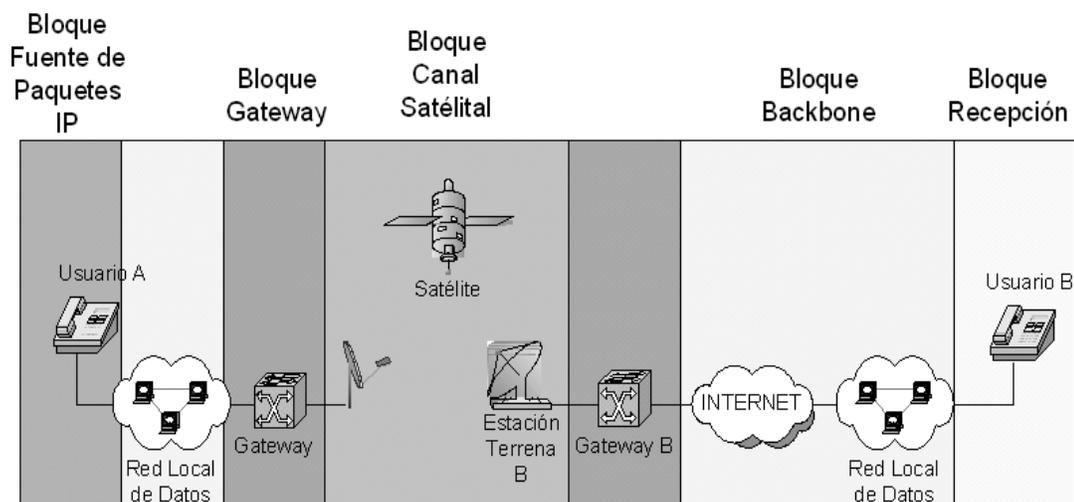


Figura 19: Bloques de funcionamiento del escenario básico del simulador

III.3 Bloque de fuente de paquetes de voz sobre IP

Este bloque funciona como la fuente de tráfico del simulador, está constituido por dos modelos en conjunto. Uno que modela la actividad de la voz y otro que genera los paquetes de voz sobre IP.

La actividad de una conversación telefónica tradicionalmente se ha modelado como una fuente ON-OFF con periodos de duración exponencial. Sin embargo (Jiang, 2000) realiza un análisis del tráfico de paquetes de VoIP, concluyendo que los periodos de duración ON-OFF se encuentran lejos de ser exponenciales debido a los nuevos métodos de muestreo y compresión de voz. Esto también es confirmado por (Jiang y Schulzirmine, 2002) y (Casilari et al, 2002). Así mismo, (Boris, 2002) muestra una aproximación al modelo de fuente de tráfico de VoIP utilizando los valores mostrados en la tabla III, valores obtenidos del análisis de tráfico de paquetes reales capturados en una red con tráfico de voz sobre IP.

Tabla II: Parámetros para el modelo de fuente de tráfico de VoIP

Parámetro	Media	Desviación estándar	PDF
Periodo en ON	0.4011 seg.	0.3637	Gamma
Periodo en OFF	0.5775 seg.	1.1774	Weibull

Utilizando las ecuaciones (1) y (2) para las distribuciones *Gamma* y *Weibull* respectivamente a las que hace mención (Boris, 2002), se realizó un programa para encontrar los valores de los parámetros α y β para estas distribuciones. Se encontró que la mejor aproximación para una distribución *Weibull* son los parámetros $a = 1.8255$ y $b = 0.5349$ para los tiempos en ON y para una distribución *Gamma* los parámetros $a = 1.2162$ y $b = 0.3298$ para los tiempos en OFF.

$$f(x) = \frac{\left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\frac{x}{\alpha}}}{\alpha \cdot \Gamma(\beta)} \quad \begin{array}{l} \mu = \alpha \cdot \beta \\ \sigma^2 = \alpha^2 \cdot \beta \end{array} \quad (1)$$

$$f(x) = \begin{cases} \alpha \cdot \beta \cdot x^{\beta-1} \cdot e^{-\alpha x^\beta} & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad \begin{array}{l} \mu = \alpha^{-\frac{1}{\beta}} \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \\ \sigma^2 = \alpha^{-\frac{2}{\beta}} \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{\beta}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \right] \end{array} \quad (2)$$

Los valores de estos parámetros son proporcionados a las funciones del Toolbox de estadística de MATLAB *weibull()* y *gamma()*, para generar los tiempos de actividad y silencio de la voz.

El modelado de la actividad de la voz se complementa con el modelado de la codificación de la voz, de acuerdo a los conceptos descritos en el capítulo II.1.1.3.

El modelo para la codificación es como sigue: el tiempo que tarda el codificador en llenar la carga útil de un paquete IP con muestras de voz codificada se encuentra dado por la ecuación (3).

$$T_{PAQ} = N_W T_{PRO} + T_{LA} \quad (3)$$

El retardo T_{PAQ} se encuentra en función del tiempo de procesamiento T_{PRO} que es el tiempo que tarda el procesador digital de señales (DSP por sus siglas en inglés) en comprimir un bloque de muestras PCM y del número de bloques de muestras de voz N_W colocadas en una sola trama. Algunos codificadores, para alcanzar mayores tasas de compresión, retienen durante un tiempo T_{LA} el paquete de voz mientras “mira hacia delante para estudiar como será el siguiente bloque de voz” (Chuah y Katz, 2002)

En la tabla III se muestra en forma comparativa los parámetros de tres codificadores empleados para transmitir voz a través de redes IP y que son de interés para nuestros escenarios de simulación (ver capítulo II.1.1.3). El parámetro B_W es el tamaño en bits de cada bloque codificado de voz, en otras palabras, el tamaño mínimo de la carga útil generado por el codificador.

Tabla III: Características de algunos codificadores de VoIP (ITU)

Estándar	T_{PRO} (ms)	T_{LA} (ms)	B_W (bits)
CS-ACELP, G.729A	10	5	80
MP-MLQ, G.723.1	30	7.5	189
PCM, G.711	0.125	0	8

III.3.1 Modelado de la generación de tráfico de paquetes de voz sobre IP

Con las estadísticas de los tiempos de actividad y silencio de la voz, y los tiempo de procesamiento del codificador de voz, se obtiene la fuente de tráfico para el simulador y el diagrama de flujo del funcionamiento de este bloque se muestra en la figura 20. La fuente de tráfico es un ciclo infinito que genera paquetes hasta que se cumpla cualquiera de las siguientes dos condiciones: que se termine el tiempo de simulación indicado por el usuario o que ya no exista más actividad de voz. En caso de que haya actividad de voz, la fuente generará paquetes IP de acuerdo a los parámetros del codificador seleccionado hasta que llegue un periodo de silencio, durante el cual no se transmiten paquetes y después inicia el ciclo nuevamente.

Para poder realizar comparaciones y tener una consistencia en los resultados se generó un archivo con periodos de actividad y silencio de la voz con una duración simulada de 15 minutos, el equivalente a grabar un mensaje o una conversación. Este archivo será usado como fuente para todas las simulaciones, inclusive cambiando los codificadores de voz.

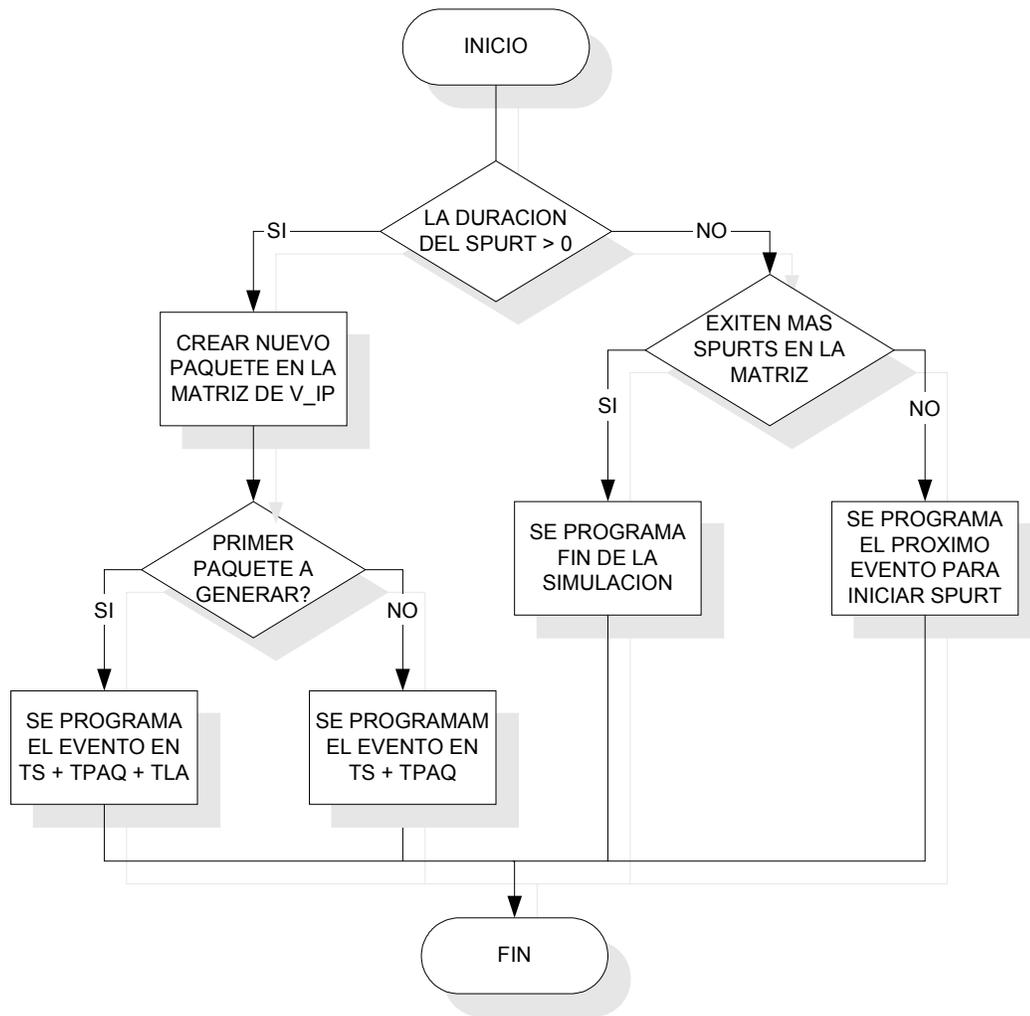


Figura 20: Diagrama de flujo para la generación de tráfico de paquetes de VoIP

Para quien revise el código, los paquetes generados son almacenados en la matriz `v_IP[]` representada en la figura 21, en donde se observa la información que debe llevar consigo cada paquete IP para los reportes de resultado del simulador. Cada uno de los renglones en la matriz significa un paquete IP generado por la fuente.

Estampa de tiempo	Número de secuencia para el protocolo RTP	Tamaño de la carga útil	Marca del paquete dentro de una cola	Número de celdas ATM-S que representan el paquete IP	Número de errores en el paquete	Número de secuencia para el protocolo cRTP
-------------------	---	-------------------------	--------------------------------------	--	---------------------------------	--

Figura 21: Campos de la matriz de control de paquetes “v_IP[]”

Se diseñó un programa para comprobar la eficacia del modelo de la fuente de tráfico antes de continuar con el resto del diseño al compararse con resultados reales publicados. Los resultados de la comparación se muestran en el capítulo IV.3.

III.4 Bloque de Redes Terrestres de IP

El modelado del retardo para las redes de área local terrestres y las redes de banda ancha utilizadas como troncal ha sido uno de los principales temas de investigación de voz sobre IP, por lo que existe una variedad de material de resultados como los de (Beltrán, 1999) y (González, 2000). De esta manera, en las tablas IV y V se presentan estadísticas basadas en los resultados de Hernandez (2003) para voz sobre IP bajo diferentes condiciones de carga de tráfico, ya que se ajustan a los codificadores de voz y tipos de redes que se simularán en este trabajo de investigación.

En base a los resultados consultados, la tabla IV muestra la media y la desviación estándar de los retardos en redes terrestres de área local con tráfico de VoIP derivado del tráfico de fondo de aplicaciones *WEB* y *FTP*.

Tabla IV: Parámetros para el modelo de retardo y errores de bit de una red de área local con tráfico de VoIP (Hernandez, 2003)

Red	Tráfico	Media (ms)	Desviación estándar (ms)	Probabilidad de error de bit
Red local	BAJO	.5830	.0562	1×10^{-11}
Red local	MEDIO	11.1	.2604	1×10^{-10}
Red local	ALTO	16	.1424	1×10^{-8}

La tabla V muestra la media y la desviación estándar del retardo en redes terrestres troncales con tráfico de VoIP derivado de las diferentes cargas de tráfico de *WEB* y *FTP*.

Tabla V: Parámetros para el modelo de retardo y errores de bit de una dorsal de banda ancha con tráfico de VoIP (Hernandez, 2003)

Red	Tráfico	Media (ms)	Desviación estándar (ms)	Probabilidad de error de bit
Internet	BAJO	61.6	13.5	1×10^{-8}
Internet	MEDIO	94.3	13.5	1×10^{-7}
Internet	ALTO	108.3	13.2	1×10^{-6}

Con los valores presentados en las tablas, el retardo se genera utilizando la función *normrnd()* de MATLAB, que genera valores aleatorios con una distribución normal de acuerdo a los parámetros de valor medio y desviación estándar presentados en las tablas IV y V. El valor generado es el retardo ocasionado por la red a un solo paquete de VoIP que entra en la red.

Para el modelado de la pérdida de paquetes, se utilizó el mismo algoritmo que se escribió

para la pérdida de bits del canal satelital el cual se describe más adelante en la sección III.6.6, pero utilizando los valores de probabilidad de error de bit de las tablas IV y V.

III.5 Bloque de las estaciones pasarelas

Las estaciones pasarelas actúan como una interfaz entre la red terrestre y la red de satélites. También pueden actuar como una fuente de señal de control, pero asumiremos que este control de tráfico es pequeño en comparación con el tráfico del usuario. La estación pasarela debe tener la capacidad de ver uno o más satélites en la constelación en todo momento para asegurar que se pueda realizar la conexión entre la red del segmento terrestre y la red del segmento espacial.

En este simulador se considera que paquetes IP bajo la arquitectura de red TCP/IP son transportados a otra arquitectura tipo ATM-S para ser transportados por el segmento satelital. Este modelo se encuentra basado en los conceptos descritos en el capítulo . El modelado es como se ilustra en el diagrama de flujo de la figura 22.

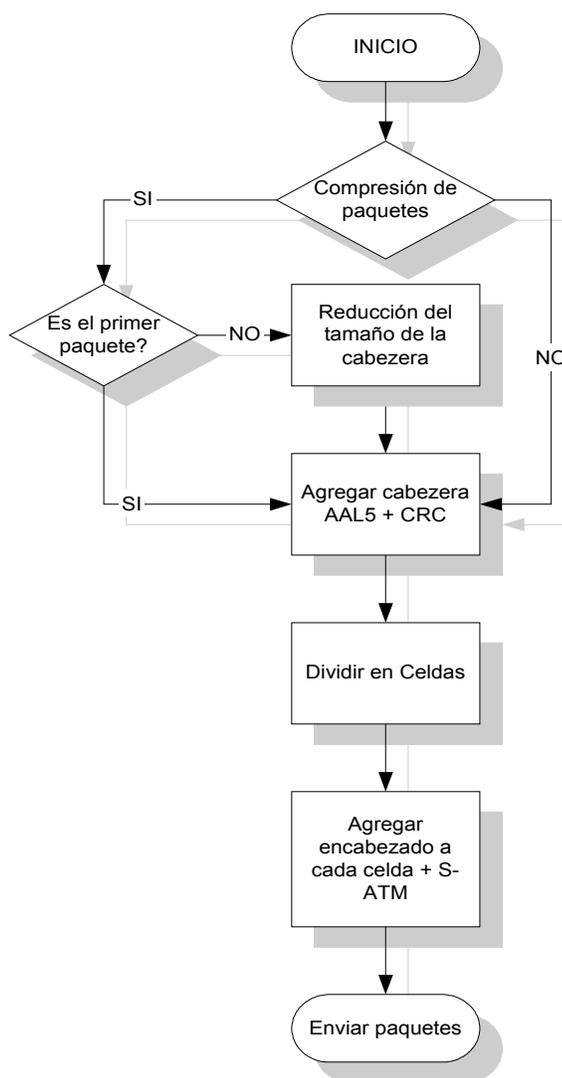


Figura 22: Diagrama de flujo para la estación terrena transmisora

Cada paquete IP que entra a la pasarela se le agrega un encabezado según la capa de segmentación, en este caso se considera servicio de *mejor esfuerzo*, la capa de segmentación a utilizar es la AAL5. Al paquete IP, el cual en esta arquitectura de ATM se el conoce como PDU, se le agrega un encabezado en la cola que consiste de 2 bytes reservados, 2 bytes para el tamaño de la información y 4 bytes para el algoritmo de código de redundancia cíclica (CRC-32) para detectar errores en la etapa de recepción. El siguiente paso es calcular el

número de celdas, que en caso del CS-PDU haya sido mayor a los 48 bytes de tamaño de cada celda y calcular el *relleno* que se adhiere a la cola descrito en los procedimientos de la capa de segmentación. A cada celda se le agregan 6 bytes de encabezado (cinco de ATM y uno de S-ATM) mas codificación para la corrección progresiva de errores (FEC por sus siglas en inglés). Al final las celdas llegan a ser de 63 bytes y las celdas son enviadas al segmento espacial, no sin antes pasar por la capa de acceso al medio descrita más adelante en el capítulo III.5.2.

En la pasarela de recepción se reconstruye el paquete IP original a partir de las celdas que se reciben del canal satelital, donde primero se detecta si hay errores en el paquete. Este modelo difiere del algoritmo de detección de errores de TCP, el cual consiste en descartar los paquetes si detecta un error en el paquete y solicitar una retrasmisión. Como el tráfico es de aplicación de voz en tiempo real y viene sobre el protocolo UDP, el decodificador en el nodo receptor puede soportar un nivel de error en la carga útil sin comprometer demasiado la calidad de servicio. Sin embargo, un error en el encabezado del paquete, en donde se encuentra información como la dirección del destinatario entre otros datos, es vital y no puede ser corrompida. Si se detecta que esta información no es confiable, el paquete es descartado por completo.

Si se considera un canal con ruido blanco gaussiano, todos los bits del paquete tienen la misma probabilidad p de haber sido afectados por el canal. La probabilidad de que un bit en el encabezado del paquete hayasido afectado se indica en la ecuación (4).

$$p_b = \frac{\text{tamaño del paquete IP} - \text{tamaño de la carga útil}}{\text{tamaño del paquete IP}} \quad (4)$$

Por cada error de bit computado por el bloque satelital en el paquete recibido, se genera un

valor aleatorio entre 0 y 1 que representa la probabilidad de que haya un bit erróneo en el encabezado. Si este valor es mayor al calculado por la ecuación (4), el paquete es descartado. Este ciclo se repite hasta haber contabilizado todos los bits erróneos indicados por el bloque satelital para el paquete en particular.

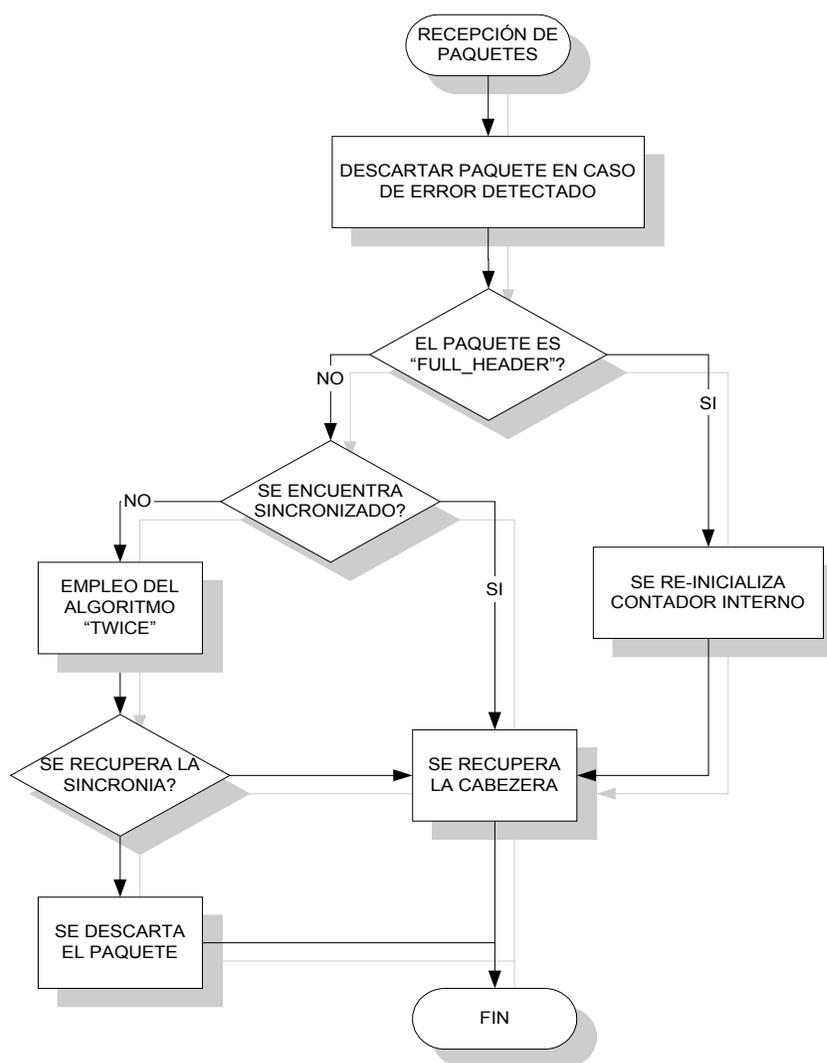


Figura 23: Diagrama de flujo del algoritmo de modelado para las estaciones pasarela

III.5.1 Compresión de paquetes

La pasarela tiene la opción de comprimir el encabezado del protocolo RTP. Este protocolo se explica en el capítulo II.1.2 y de ahí se ideó el modelado para este bloque.

Los paquetes son comprimidos al reducir el tamaño del encabezado a 4 bytes antes de entregar el paquete a la capa de adaptación de ATM-S. De acuerdo al RFC2508 el primer paquete no se comprime y se manda en su forma original para el primer estado de referencia en el algoritmo de compresión. Los siguientes paquetes consecutivos al primero se les aplica el método de compresión de encabezado para el protocolo de tiempo real.

En la pasarela del nodo receptor, si el paquete no es descartado por el detector de errores, se prosigue a revisar el campo de secuencia del encabezado de cRTP. Debido a que el algoritmo de recuperación es diferencial, se requiere de la información del paquete anterior para recuperar la información del paquete actual. Se puede tener el caso de detectar un error en el campo de secuencia (un paquete descartado por el receptor) y no por el arribo de un paquete fuera de secuencia. Debido a que el protocolo está diseñado para enlaces punto a punto sin nodos intermedios como lo es el canal satelital de nuestro modelo, se utiliza el método "twice" descrito en el capítulo II.1.2. El algoritmo implementado sólo hace 5 intentos de estimación para recuperar el paquete, de lo contrario es descartado. El paquete recuperado es entonces entregado al siguiente bloque.

III.5.2 Capa de Acceso al Medio

El protocolo para el acceso al medio considerado para las simulaciones es Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA por sus siglas en inglés). El primer modelo considerado para el retardo ocasionado por la capa de acceso al medio fue el descrito por Connors et al. (2002)

quien considera el sistema como una cola M/D/1, y la referencia demuestra como impacta el ancho de banda y caudal eficaz sobre el retardo total.

$$D = \frac{1}{2} Nt + Nt \frac{\rho}{2(1-\rho)} + t + \tau \quad (5)$$

En la ecuación (5) el retardo se encuentra en función de ρ que es la carga de tráfico, N el número de estaciones compartiendo el canal TDMA, t es el tiempo de transmisión de paquetes y τ el tiempo de propagación.

Debido a los diferentes cambios en el modelo del segmento espacial, este modelo se descartó al considerarse solo tráfico de VoIP en el enlace satelital. Por otro lado, este modelo no consideraba las diferentes ganancias de codificación de canal, por lo que se optó por cambiar el modelo utilizando la cola M/D/1 en forma de estados, con parámetros operativos de la red. Este algoritmo es una versión modificada del usado por la memoria de dispersión de retardo en la etapa de recepción de la sección III.7.1, con la diferencia de que la tasa de salida de paquetes no depende del tiempo de arribo.

III.6 Bloque de red satelital

Para la simulación de la mecánica orbital se ha contemplado simular tanto satélites geoestacionarios como satélites de órbita baja en tiempo real simulado.

III.6.1 Modelo de mecánica orbital

Como una primera aproximación a la simulación del segmento espacial, se realizaron los cálculos clásicos de la mecánica de Kepler. Sin embargo, esto requería de la información precisa de la posición de los satélites, los cuales se obtienen con las efemérides de constelaciones reales. Esto limitaba la capacidad de simulación de constelaciones a utilizar

únicamente constelaciones reales existentes, además de una cantidad elevada de cálculos y procesamiento.

Se ideó otra forma de modelar el movimiento de los satélites utilizando menos cálculos para optimizar los tiempos de simulación.

Los satélites se encuentran arreglados en una constelación de la siguiente manera. Organizados en un conjunto de planos orbitales, cada uno contiene un número de satélites. Las órbitas se asumen circulares y tienen en común un alto grado de ángulo de inclinación. Los satélites dentro de un mismo plano orbital se encuentran igualmente espaciados por un *ángulo de anomalía delta* entre las órbitas de los satélites dentro del plano.

$$\text{anomalía delta} = \frac{360^\circ}{\text{numero de satélites por plano}} \quad (6)$$

Los planos orbitales son eventualmente espaciados cerca del polo terrestre usando un *ángulo de ascensión delta* y un termino de corrección entre las órbitas.

$$\text{ángulo de ascensión delta} = \frac{180^\circ}{\text{numero de planos orbitales}} + \text{corrección RA} \quad (7)$$

Desplazando el ángulo de ascensión del plano orbital hacia 180 grados significa que los satélites en planos adyacentes se encuentran viajando en paralelo, con excepción del primero y último plano en donde los satélites se encuentran viajando en direcciones opuestas. El término de corrección RA en la ecuación (7) es necesario ya que las constelaciones de satélite LEO usan ángulos de inclinación menores a 90 grados. Debido a esto, el último plano tiende a inclinarse en la dirección opuesta al primer plano orbital aproximadamente el doble del complemento del ángulo de inclinación. Sin el término de corrección, resultaría un “hueco”

en la cobertura terrestre de la constelación en dos áreas de la tierra cerca de los polos.

$$\text{corrección RA} = \frac{1.5 (90^\circ - \text{ángulo de inclinación del plano orbital})}{\text{número de planos orbitales}} \quad (8)$$

Las órbitas satelitales son desfasadas casi uno y medio del espaciamiento entre planos satelital. De esta forma se obtiene una mejoría óptima y un patrón de cobertura uniforme, y maximiza la distancia entre los satélites.

$$\begin{aligned} \text{ángulo de fase entre planos} = & \frac{1}{2} \times \text{anomalía delta} + \text{ángulo de ascensión delta} \times \\ & \text{sen}(90^\circ - \text{ángulo de inclinación del plano orbital}) \end{aligned} \quad (9)$$

El número de ciclos requeridos para calcular la posición de los satélites disminuye a sólo el número de planos satelitales de la constelación. En la figura 24 se aprecia en forma clara cada uno de los parámetros utilizados para definir los planos orbitales de las constelaciones.

Con estas ecuaciones se consigue diseñar una constelación de satélites y se podrán definir los escenarios para las órbitas GEO y LEO.

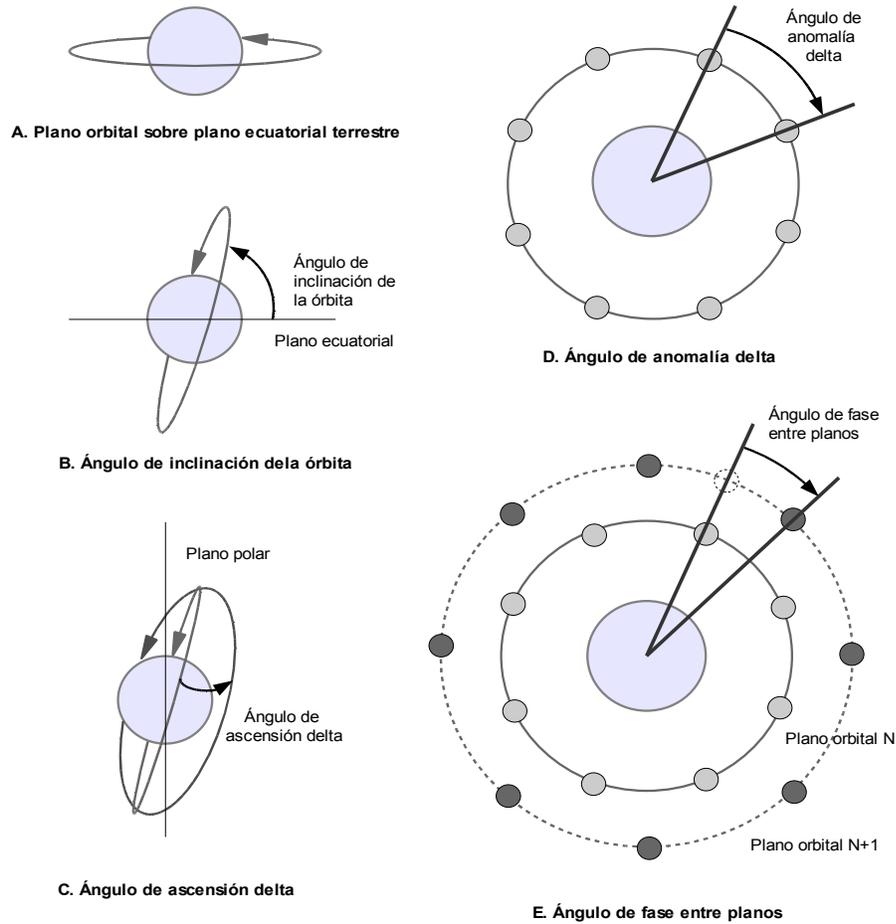


Figura 24: Diferentes parámetros utilizados para describir constelaciones de satélites

III.6.2 Movimiento de los satélites

Las órbitas de los satélites de comunicaciones son en general elipses definidas en un plano orbital, como se describe en capítulo II.3. El periodo de un satélite dentro de una órbita circular está dado por la ecuación (10), la cual resulta del cálculo del área de la elipse que describe la trayectoria del satélite, la fuerza de gravedad ejercido por la tierra y la velocidad requerida para mantenerse el satélite en órbita.

$$T = 2\pi\sqrt{a^3/\mu} \quad (10)$$

En donde μ es constante igual a $3.986 \times 10^{14} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$, y a es igual a la distancia desde el centro de la tierra hasta el satélite considerando una órbita circular (Maral, 2003).

Se asume que la tierra es esférica y de cuerpo homogéneo. Tomando en consideración esta hipótesis, se crea una esfera en el ambiente de MATLAB con dimensiones de 36,000 km. Las dimensiones usadas en el ambiente están dadas en metros, por lo tanto, cualquier cálculo de distancia entre un objeto y otro resultan en distancias reales.

Para calcular la posición de cada satélite siguiendo el tiempo de simulación. Se calcula la diferencia de tiempo que hay entre el paquete en transmitirse y el último paquete que se transmitió.

$$\Delta t = t_{\text{paquete actual}} - t_{\text{último paquete}} \quad (11)$$

Con el valor del incremento de tiempo se calcula los grados de movimiento de los satélites en sus respectivos planos orbitales.

$$\text{incremento del ángulo de rotación} = 360 \times \frac{\Delta t}{\text{periodo de la órbita}} \quad (12)$$

La rotación de la Tierra se hace mediante una rotación sobre su propio eje con un periodo de 24 horas, como lo indica la ecuación (13).

$$\text{incremento del ángulo de rotación de la tierra} = 360 \times \frac{\Delta t}{24 \times 60 \times 60} \quad (13)$$

Todos los planos orbitales son rotados por un ángulo igual al calculado en la ecuación (12).

III.6.3 Presupuesto de enlace

Para la simulación se calcula la distancia de las estaciones terrenas al satélite para el enlace de subida y bajada, utilizando la ecuación (14), considerando los componentes

tridimensionales de satélites y estaciones terrenas.

$$R_{d/u} = \sqrt{(sat_x - est_x)^2 + (sat_y - est_y)^2 + (sat_z - est_z)^2} \quad (14)$$

El resultado del cálculo de la distancia se utiliza para los cálculos de pérdidas por propagación descritos por las ecuaciones (15) y (16).

$$L_u = 10 \log \left((4 \pi R_u f_u / c)^2 \right) \quad (15)$$

$$L_d = 10 \log \left((4 \pi R_d f_d / c)^2 \right) \quad (16)$$

Las pérdidas por propagación son incluidas en el cálculo de potencia de portadora por densidad de ruido. La ecuación para el enlace de subida (17) incluye además un componente para calcular las pérdidas por atenuación por lluvia.

$$\left(\frac{C}{N_0} \right)_u = EIRP_{es} + G/T_{sl} + 228.6 - (L_u + 0.3 + L_r) \quad (17)$$

$$\left(\frac{C}{N_0} \right)_d = EIRP_{sl} + G/T_{es} + 228.6 - L_d \quad (18)$$

El resultado de cada cálculo es convertido a escala lineal para después calcular el C/N_0 total como se indica en la ecuación (19).

$$\frac{1}{\left(\frac{C}{N_0} \right)_t} = \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0} \right)_u} + \frac{1}{\left(\frac{C}{N_0} \right)_d} \quad (19)$$

Al resultado de la ecuación (19) se le agrega codificación de canal como se describe en la sección III.6.4.

III.6.4 Corrección de errores

Como primera aproximación a la simulación de corrección de errores, el modulo de enlace satelital le indicaba a cada paquete cuantos bits erroneos se le sumaba ha cada paquete dependiendo de una probabilidad de error especificado. El modelado de corrección consistía, en que de acuerdo a los parámetros del código corrector de error, cuantos bit corregir.

Después, conforme se le agrego el cálculo del presupuesto de enlace al simulador, el modelado de corrección de errores cambio ha ser parte del calculo del presupuesto de enlace.

De esta forma, cambia a especificarse por el parámetro de ganancia de codificación. La ganancia de codificación es incluida en el cálculo del presupuesto de enlace, como se muestra en la ecuación (20).

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_c = \left(\frac{C}{N_0}\right)_{t_db} + G_{cod} \quad (20)$$

En donde G_{cod} se determina por la ecuación (21).

$$G_{cod} = 10 \log\left(\frac{n}{n+r}\right) \quad (21)$$

Donde n es el número de bits del paquete y r son los bits de redundancia. El resultado es convertido nuevamente a una escala lineal para calcular finalmente la energía de bit contra densidad de ruido.

$$\frac{E_c}{N_0} = \frac{\left(\frac{C}{N_0}\right)_c}{R_c} \quad (22)$$

Con este valor se calcula la probabilidad de error de bit el cual se explica más adelante en el

capítulo III.6.6.

Todos los cálculos descritos en esta sección se desarrollan en el orden del diagrama de flujo de la figura 25.

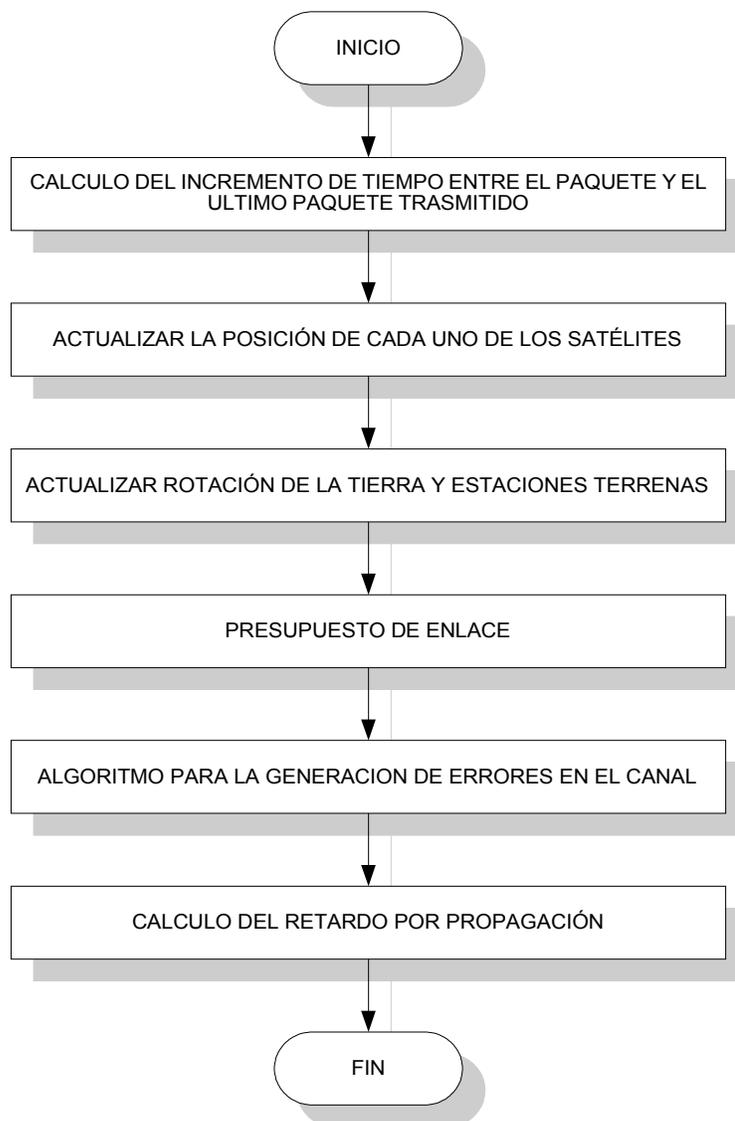


Figura 25: Ciclo de cálculos para la mecánica orbital y parámetros de desempeño

III.6.5 Retardo por propagación a distintas órbitas

El retardo por propagación para las celdas de una conexión es la suma del retardo por propagación desde la estación fuente hasta el satélite más cercano de la constelación y el retardo por propagación desde el satélite a la estación terrena pasarela.

El retardo por propagación de los enlaces de subida y de bajada representa el tiempo que tarda la señal en viajar desde la estación terrena fuente hasta la estación pasarela destino a través de un satélite repetidor.

El retardo por propagación depende directamente de la distancia entre las estaciones terrenas y el satélite expresado en la ecuación (14).

Con satélites de órbita baja se tiene un retardo variable dependiendo de la distancia con la estación terrena, y ésta varía desde que la estación terrena tiene el enlace de conexión visual con el satélite a partir de que aparece en el horizonte hasta que se pierde de vista en el otro extremo. En la figura 26 se muestra el cambio en la distancia de un satélite a 700 km sobre la superficie de la Tierra, donde se observa como las dos estaciones tienen diferentes distancias con respecto al mismo satélite dependiendo de su ubicación geográfica. La suma de ambas distancias es la considerada para el cálculo del retardo por propagación en el espacio libre y el presupuesto de enlace.

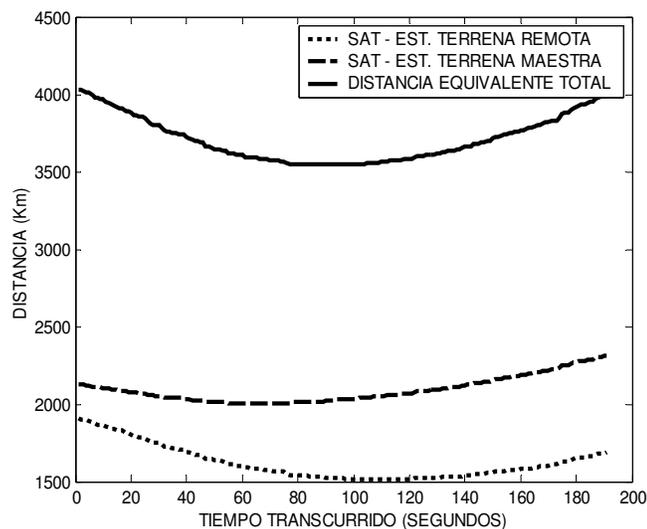


Figura 26: Cambio de la longitud del enlace de un satélite LEO con respecto al tiempo de visibilidad del satélite

III.6.6 Modelado de errores en el canal

Maral y Bousquet (2002) comentan que el modelo de errores del canal satelital se puede modelar en forma estadística como ruido blanco gaussiano, esto es, el canal satelital produce errores de un solo bit en forma aleatoria en los datos transmitidos. La tasa de error de bit (BER por sus siglas en inglés) depende de la relación señal a ruido en el receptor, o margen del enlace.

Continuando con el cálculo del presupuesto de enlace del capítulo III.6.3, a partir de la relación de la energía de bit sobre densidad ruido en el receptor de la ecuación (22), se calcula la probabilidad de error. Esta probabilidad depende del tipo de modulación empleado en el segmento espacial, en este caso, BPSK o QPSK (Maral y Bousquet, 2002). Una vez calculado el valor de energía de bit sobre densidad de ruido, se emplea la ecuación (23) para obtener la probabilidad de error de bit para el canal.

$$BEP = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_c}{N_0}} \right) \quad (23)$$

El siguiente algoritmo se basa en la expresión para la probabilidad de que exactamente k errores de bit ocurran en un segmento de tamaño N . Esta probabilidad es denotada por p_k . La probabilidad de que no ocurran errores corresponde a N sucesivos eventos con probabilidad $(1-p)$ y es dada por la ecuación (24).

$$P_0 = (1-p)^N \quad (24)$$

La probabilidad de que exactamente un error ocurra corresponde al número de diferentes arreglos de bits en el segmento expresado como sigue:

$$P_1 = p \cdot (1-p)^{N-1} \cdot \binom{N}{1} \quad (25)$$

Y en general, para k bits erróneos, se puede expresar como

$$P_k = p^k \cdot (1-p)^{N-k} \cdot \binom{N}{k} \quad (26)$$

El algoritmo usado para calcular el número de errores en un paquete utiliza la fórmula (26). El algoritmo primero genera un número aleatorio entre 0 y 1, para proveer los valores de comparación contra la probabilidad de ocurrencia de diferentes números de errores de bit y después el algoritmo inicia su iteración. Primero la probabilidad de que 0 errores ocurran es calculada de acuerdo a la fórmula (24) y comparada con el número aleatorio. Si el número aleatorio es menor que ésta probabilidad, entonces 0 es el número de bits erróneos en el

paquete. Si no, la probabilidad de ocurrencia de 1 o menos errores es computada. Si el número aleatorio es menor que esta probabilidad, y aun mayor que la probabilidad de ocurrencia del número previo de errores de bit, entonces 1 es el número de errores dentro en el paquete. El algoritmo continúa iterando de esta manera hasta encontrar el valor k para la probabilidad de que ocurran k o menos errores sea mayor que el valor aleatorio inicial. El número de errores asignados al paquete son k .

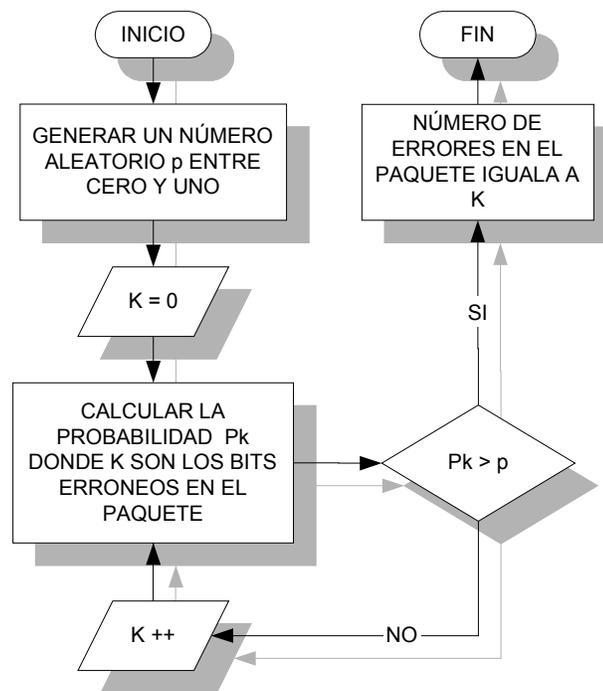


Figura 27: Diagrama de flujo para la generación de errores en el canal

III.7 Bloque de Recepción

III.7.1 Memoria de dispersión de retardo

El efecto de las variaciones de retardo en VoIP puede ser anulado con el uso de una memoria de dispersión de retardo en la recepción. Esta es una memoria usada para almacenar momentáneamente los paquetes de voz conforme van llegando al receptor con retardo

variable entre paquetes, para que a la salida parezca que han llegado exactamente uno detrás del otro. De esta manera, el sistema parecerá como si tuviera un retardo constante.

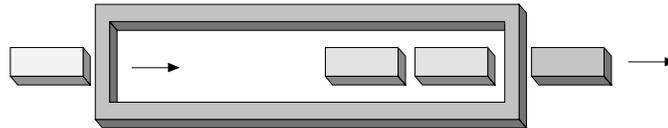


Figura 28: Memoria de eliminación de dispersión de retardo

El bloque de recepción realiza varias funciones. Al arribar un paquete, primero revisa su encabezado para saber si el paquete se encuentra fuera de secuencia. Con el parámetro de secuencia del protocolo RTP, si el paquete llega demasiado tarde, entonces se descarta por el receptor de lo contrario, se almacena en la memoria de dispersión de retardo. Si éste es el primer paquete en entrar a la memoria, entonces se programa su salida dentro de un tiempo máximo definido por el usuario. Conforme van llegando otros paquetes hacia la memoria, éstos son ordenados en forma cronológica de acuerdo a su marca de tiempo (indicado por el protocolo RTP) para que salgan en el mismo orden en que fueron generados y poder contrarrestar el caso de paquetes que hayan arribado fuera de secuencia. Los paquetes irán saliendo de la memoria a la misma tasa que en que fueron generados por el codificador, para entregar la carga útil al decodificador en forma constante y contrarrestar los efectos del retardo variable.

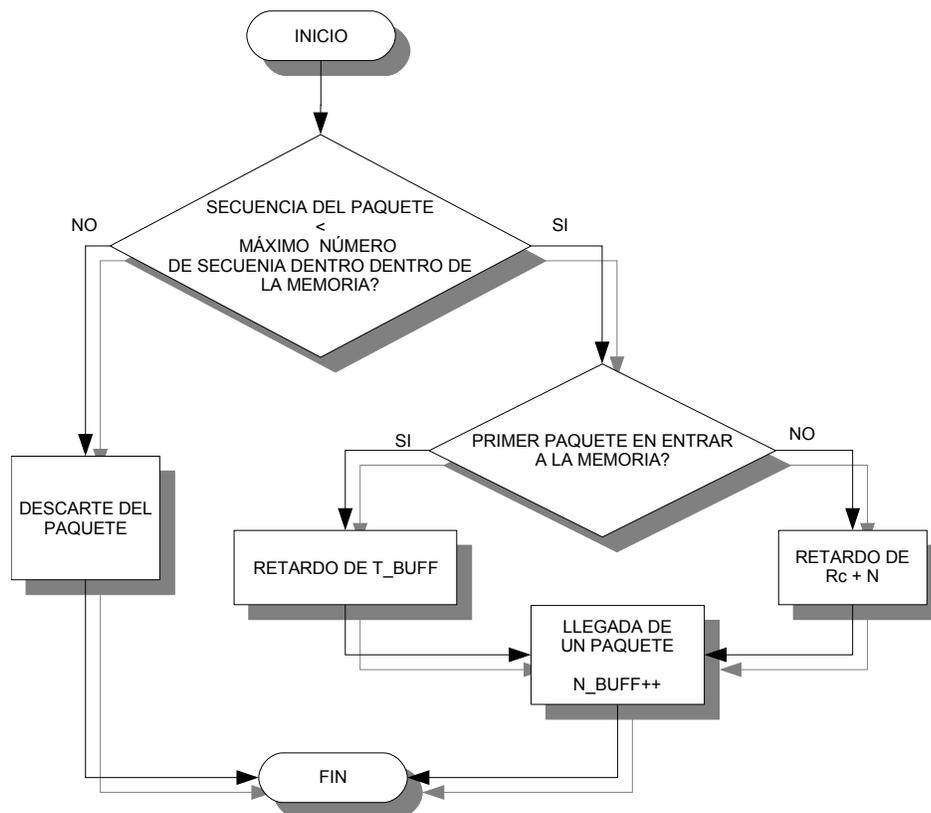


Figura 29: Diagrama de flujo para la memoria de dispersión de retardo

III.8 Monitores

Un **monitor** es una herramienta usada para observar las actividades del sistema. En general, los monitores observan el desempeño del sistema, colectan estadísticas de desempeño, analizan datos, y muestran resultados.

Los monitores se encuentran recolectando datos en los diferentes módulos, por ejemplo, los tiempos de arribo de cada paquete en el receptor o el número de paquetes recibidos en la pasarela receptora. Con base a los datos recolectados, se puede calcular los parámetros de calidad de desempeño como latencia y tasa de pérdida de paquetes.

IV SIMULACIÓN DE ESCENARIOS DE VOZ SOBRE IP A TRAVÉS DE SATÉLITES A DISTINTAS ÓRBITAS

IV.1 Propuesta de red satelital de órbita geoestacionaria

Se propone las siguientes características de red satelital de órbita geoestacionaria basado en los conceptos y propuestas de las siguientes fuentes: La mecánica orbital se basa en los parámetros técnicos de SATMEX 5. El presupuesto de enlace se basa en las recomendaciones de Euroskyway (Cruickshank et al, 2001), (Sun et al, 2001) y el concepto de distribución directa de datos de banda ancha en la banda de frecuencia Ka patrocinada por la NASA (Horan et. al., 2002). Estos parámetros son considerados para tener la mejor aproximación a sistemas reales en operación. Las características del segmento espacial de la red geoestacionaria se muestran en la tabla VI. Estos parámetros dan como resultado el escenario del segmento espacial mostrado en la figura 30. Los parámetros operativos de la red se muestran en la tabla VII.

Tabla VI: Parámetros de la mecánica orbital

Satélites por plano	1
Número de planos	1
Inclinación	0
Altitud del satélite	35,785 km.
Posicionamiento	-116.8 Latitud

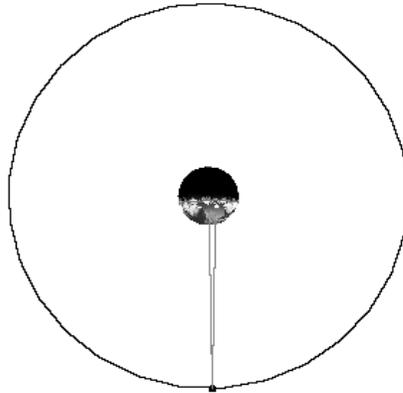


Figura 30: Órbita geoestacionaria representado por el simulador en Matlab

Tabla VII: parámetros del enlace satelital

Tasa de transmisión	2,048 kbps
Banda de operación	Ka
Frecuencia de subida	20 Ghz
Frecuencia de bajada	30 Ghz
PIRE de la estación terrena	36 dBW
G/T de la estación terrena	26.5 db/k
PIRE del satélite	54.2 dBW
G/T del satélite	13 db/k
Ganancia de codificación	5 db

IV.2 Propuesta de red IP satelital de órbita baja

Se propone las siguientes características de red satelital de órbita baja basado en los conceptos y propuestas de las siguientes fuentes: La mecánica orbital se basa en la

constelación (en funcionamiento actualmente) de *Iridium* (Gavish, 1997). El presupuesto de enlace se basa en las recomendaciones de Skybridge (Sourisse et al, 2001), (Henderson y Katz, 2000). Las características de la constelación de satélites de baja altura se muestran en la tabla VIII.

Tabla VIII: Parámetros de la mecánica orbital de una constelación LEO

Satelites por plano	11
Número de planos	6
Inclinación	86.4
Altitud del satélite	780 km
Posicionamiento	variable

Estos parámetros dan como resultado el escenario del segmento espacial mostrado en la figura 31, en donde se muestra la localización de las estaciones terrenas, el enlace del satélite con las estaciones y la cobertura del satélite.

Los parámetros operativos de la red satelital se muestran en la tabla IX.

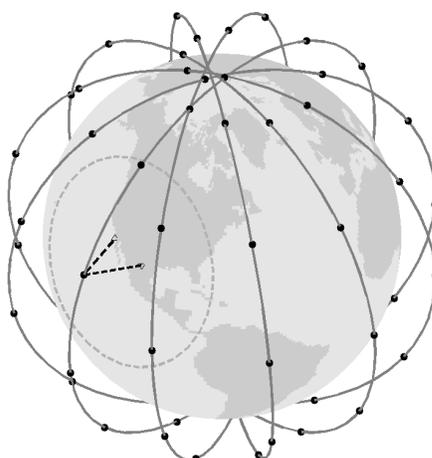


Figura 31: Escenario de la constelación de órbita baja proyectada por el simulador en Matlab

Tabla IX: Parámetros operativos de la red satelital de órbita baja.

Tasa de transmisión	2,048 kbps
Banda de operación	Ka
Frecuencia de subida	20 Ghz
Frecuencia de bajada	30 Ghz
PIRE de la estación terrena	8 dBW
G/T de la estación terrena	25.7 db/k
PIRE del satélite	36 dbW
G/T del satélite	13 db/k
Ganancia de codificación	5 db

La cobertura de la red satelital de órbita baja en consideración para la simulación se muestra en la figura 32, la cual es generada a partir de los datos de inicialización del simulador (y

corresponde a la misma constelación mostrada en la figura 31) esta cobertura puede ser comparada con la generada por el software de visualización de constelaciones satelitales *SAVI* de la figura 33.

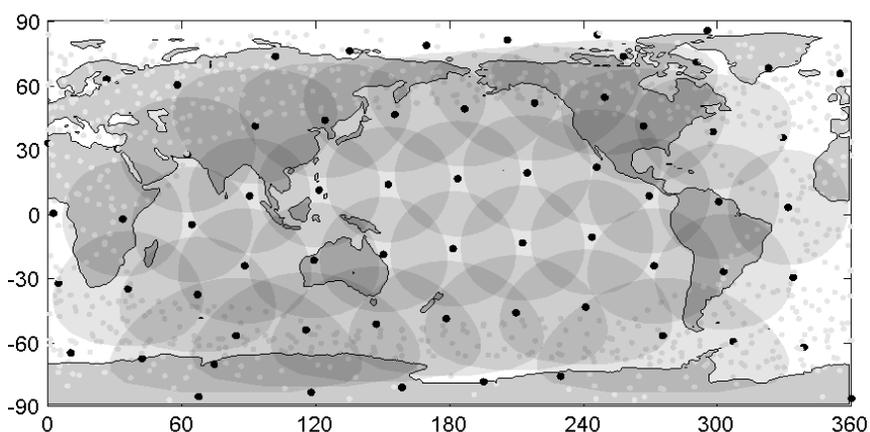


Figura 32: Cobertura de la constelación de satélites simulado en Matlab

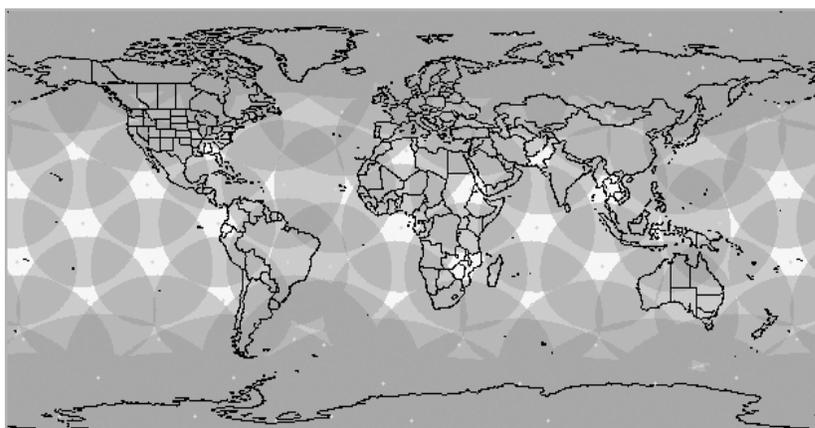


Figura 33: Cobertura de la red de Iridium mostrada por el software SAVI

IV.3 Fuente de tráfico

En la figura 34 se muestra la distribución de probabilidad acumulativa completaria de las dos distribuciones mencionadas.

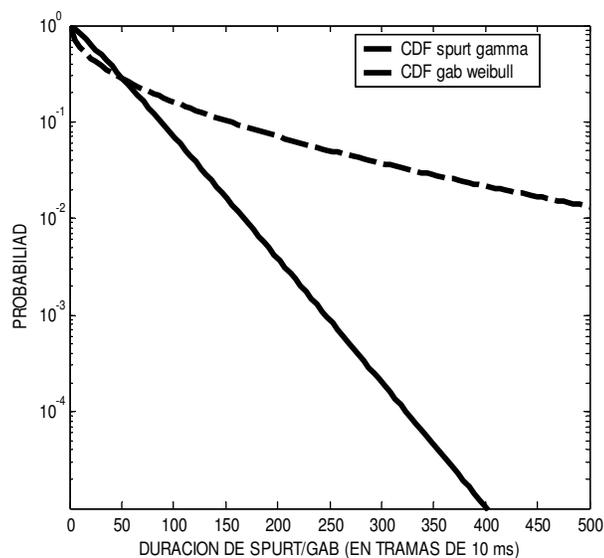


Figura 34: Función de distribución acumulativa complementaria para los periodos de duración de una fuente ON-OFF

Observando la gráfica presentada por Jiang et al, (2000) podemos comparar nuestra CDF generada con los parámetros obtenidos y ver que se igualan con los resultados demostrados en la figura 35. De esta forma, obtenemos una fuente confiable de paquetes de VoIP para el simulador.

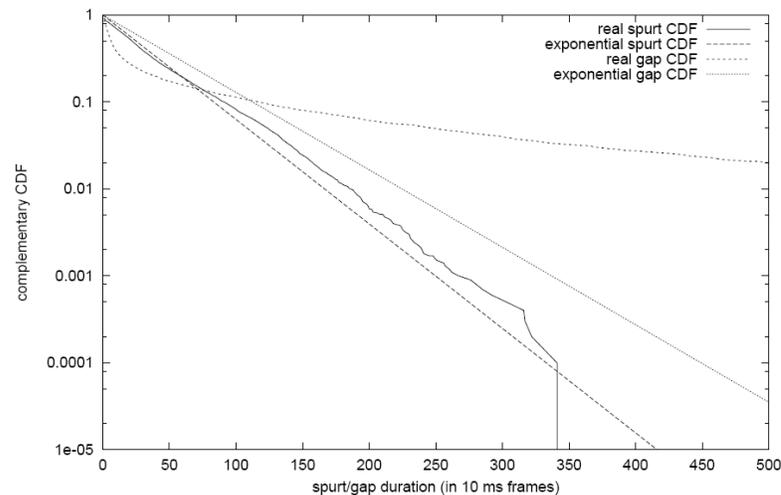


Figura 35: CDF promedio de un codificador G.729B VAD presentado por Jiang W.

Para la simulación de tráfico de paquetes de VoIP, se proponen las siguientes suposiciones

- La comunicación es un solo sentido, de una terminal terrena a un teléfono IP al otro extremo de la red terrestre.
- El tráfico proveniente de la pasarela de la estación terrena remota es únicamente paquetes de tráfico de voz sobre IP.
- Se discrimina otros tipos de tráfico de control en la red satelital.

Una consideración importante en tener en cuenta, es cuantas muestras de voz contener en la carga útil de cada paquete de IP.

Como las muestras de voz son de unos cuantos bytes y el encabezado de IP puede ser de 40 bytes, el encabezado puede ser hasta el 80% del paquete, por lo que los fabricantes configuran sus equipos para acomodar dos o más muestras por paquete IP. Sin embargo esto genera un mayor retardo como se puede observar en la figura 36.

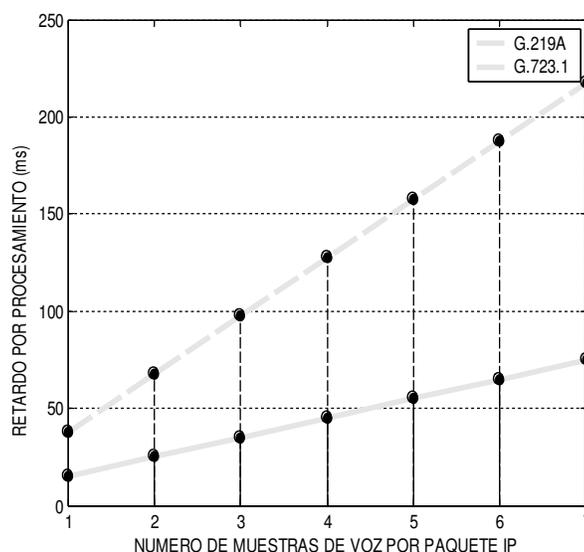


Figura 36: Comparación del retardo por procesamiento de paquetización de dos codificadores de acuerdo al número de muestras de voz por paquete IP.

IV.4 Estaciones terrenas

La estación transmisora se escogió que fuera en la ciudad de Ensenada, la posición de la estación pasarela fue determinado por la cobertura de los satélites de la constelación de órbita baja. La posiciones de estas estaciones se muestran en la tabla X.

Tabla X: Posiciones de las estaciones terrenas

Estación Terrena	Longitud	Latitud
Móvil	116° Oeste	31° Norte
Pasarela	102° Oeste	27° Norte

IV.5 Tráfico de las redes terrestres

Tabla XI: Combinaciones de tráfico posible en la redes terrestres

Simulación	LAN1	LAN2	TRONCAL
1	Bajo	Bajo	Bajo
2	Bajo	Bajo	Medio
3	Bajo	Bajo	Alto
4	Bajo	Medio	Bajo
5	Bajo	Medio	Medio
6	Bajo	Medio	Alto
7	Bajo	Alto	Bajo
8	Bajo	Alto	Medio
9	Bajo	Alto	Alto
10	Medio	Bajo	Bajo
11	Medio	Bajo	Medio
12	Medio	Bajo	Alto
13	Medio	Medio	Bajo
14	Medio	Medio	Medio
15	Medio	Medio	Alto
16	Medio	Alto	Bajo
17	Medio	Alto	Medio
18	Medio	Alto	Alto
19	Alto	Bajo	Bajo
20	Alto	Bajo	Medio
21	Alto	Bajo	Alto
22	Alto	Medio	Bajo
23	Alto	Medio	Medio
24	Alto	Medio	Alto
25	Alto	Alto	Bajo
26	Alto	Alto	Medio
27	Alto	Alto	Alto

En la tabla XI se muestran todas las combinaciones posibles para el tráfico de las redes terrestres. El simulador se configurará para realizar todas aquellas simulaciones descritas en esta tabla.

V RESULTADOS DE SIMULACIONES

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos por el simulador desarrollado. Cada una de las simulaciones de cada escenario es repetida 30 veces para obtener un promedio de los valores de los parámetros a analizar como requisito para calcular un intervalo de confianza del 95% para cada uno de los resultados.

V.1 Resultados del sistema empleando órbita geoestacionaria

V.1.1 Latencia

La medición de latencia es medida de extremo a extremo de la red simulada, etiquetando el paquete cuando se genera en la fuente y monitoreando el tiempo de llegada en el receptor. Las mediciones que se presentan en la figura 37 son evaluadas desde el punto después de que el paquete es liberado de la memoria de dispersión de retardo variable en el nodo receptor.

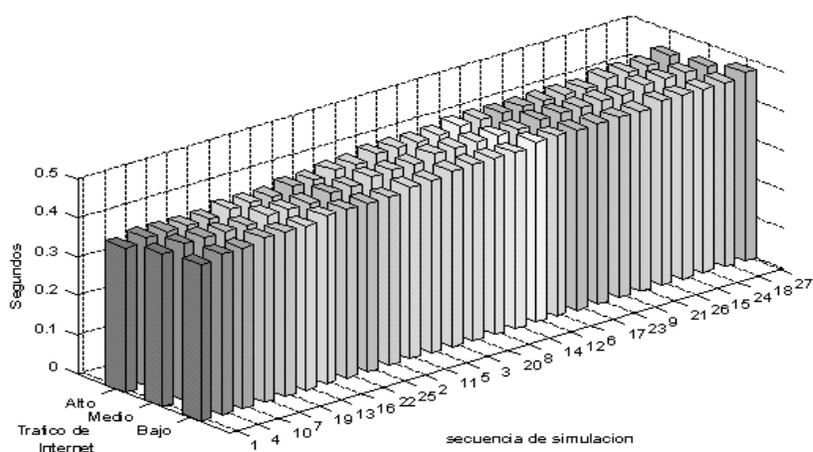


Figura 37: Resultados de Latencia para órbita geoestacionaria

Debido a la cantidad de escenarios de tráfico, los resultados mostrados a continuación son los valores más significativos de la simulación y los más útiles para realizar el análisis. Las

gráficas 38 y 39 muestran los resultados medidos de latencia media para las redes locales con tráfico alto, medio y bajo y las red de Internet con tráfico medio y bajo. Las Tablas XII y XIII muestran los valores correspondientes a la latencia media y su desviación estandar para cada uno de los codificadores de voz bajo diferentes condiciones de tráfico.

Tabla XII: Media y desviación estandar de la latencia en órbita GEO con codificador G.729

		G.729A			
		Bajo		Medio	
		Media	Desviación Std	Media	Desviación Std
GEO	Alto	0.43	0.01	0.45	0.01
	Medio	0.42	0.01	0.44	0.01
	Bajo	0.39	0.009	0.41	0.009

Tabla XIII: Media y desviación estandar de la latencia en órbita GEO con codificador G.723.1

		G.723.1			
		Bajo		Medio	
		Media	Desviación Std	Media	Desviación Std
GEO	Alto	0.46	0.015	0.48	0.015
	Medio	0.45	0.015	0.47	0.015
	Bajo	0.42	0.015	0.44	0.015

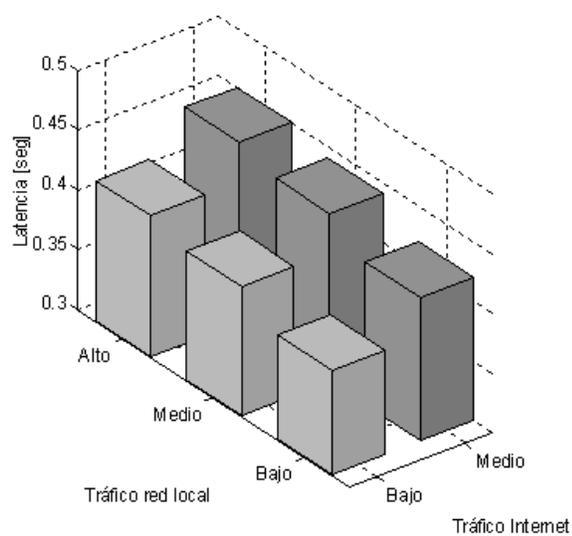


Figura 38: Resultados de Latencia para órbita GEO utilizando codificador G.729A

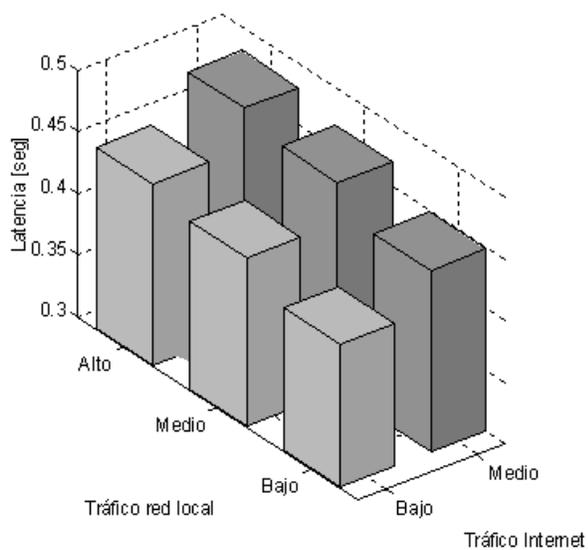


Figura 39: Resultados de Latencia para órbita GEO utilizando codificador G.723.1

V.1.2 Variación en el retardo

La medición para la variación del retardo se realizó en el módulo del nodo receptor al extremo de la red en dos puntos. Un punto, antes de que el paquete entre a la memoria de dispersión de retardo variable y otro a la salida. Con estos dos puntos se mide la variación de retardo entre paquetes al final de la red y la efectividad de la memoria para eliminar este efecto de variaciones de retardo.

El algoritmo para medir este parámetro trabaja iniciando en un estado cero el cual quiere decir que no tiene referencia alguna de paquetes. Al llegar el primer paquete al receptor, se captura el tiempo de arribo y se dice que el monitor cambia a estado uno, al detectar el segundo paquete se vuelve a capturar el tiempo de arribo. El monitor entonces registra la diferencia entre estos dos tiempo. El monitor regresa a su estado uno pero con la referencia del segundo paquete, para medir el tiempo de arribo de un tercer paquete y así el ciclo continua.

Para evitar errores en la medición cuando se mide el último paquete de un *spurt* y el primero del siguiente *spurt*, la fuente etiqueta cada *spurt* con un número consecutivo para facilitar esta medición. El monitor toma en cuenta este campo y detecta cuando un paquete proviene de un *spurt* diferente, y cuando se detecta un nuevo paquete, el monitor regresa a su estado cero y el ciclo continua.

El algoritmo no toma en cuenta el número de secuencia del encabezado de RTP, si dos paquetes llegan desfasados en secuencia (y no en el orden en que fueron generados), la medición registra solo la diferencia de tiempo al arribo de dos paquetes sin importar el orden de los paquetes.

Las gráficas 40 y 41 muestran los resultados medidos de variación de retardo para las redes locales con tráfico alto, medio y bajo y las red de Internet con tráfico medio y bajo. Las Tablas XIV y XV muestran los valores correspondientes a la variación de retardo y su desviación estandar para cada uno de los codificadores de voz bajo las diferentes condiciones de tráfico.

Tabla XIV: Media y desviación estandar de variación de retardo en la órbita GEO con codificador G.729

		G.729A			
		Bajo		Medio	
		Media	Desviación Std	Media	Desviación Std
GEO	Alto	0.020	0.014	0.020	0.014
	Medio	0.020	0.014	0.020	0.014
	Bajo	0.020	0.014	0.020	0.014

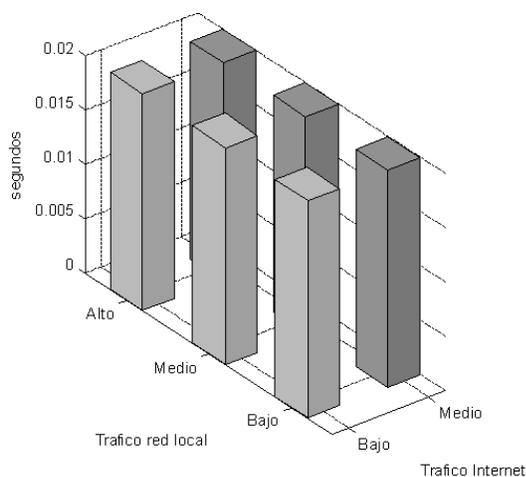


Figura 40: Resultados de variación de retardo para órbita GEO utilizando codificador G.729A

Tabla XV: Media y desviación estandar de variación de retardo en la órbita GEO con codificador G.723.1

		G.723.1			
		Bajo		Medio	
		Media	Desviación Std	Media	Desviación Std
GEO	Alto	0.059	0.022	0.059	0.022
	Medio	0.059	0.022	0.059	0.022
	Bajo	0.059	0.022	0.059	0.022

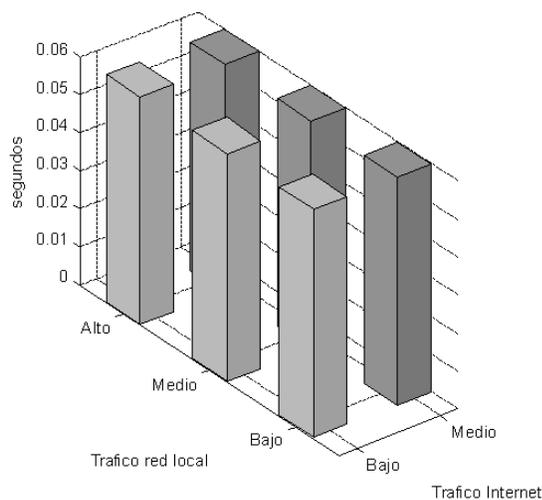


Figura 41: Resultados de variación de retardo para órbita GEO utilizando codificador G.723.1

V.1.3 Tasa de pérdida de paquetes

La medición de la tasa de pérdidas de paquetes se realiza de extremo a extremo. Un monitor en la fuente de paquetes lleva un contador de los paquetes generado. Un monitor en el receptor lleva el control de los paquetes recibidos, al igual que éste último, hay monitores en la recepción del canal satelital y en cada red terrestre.

Para tener mediciones mas exactas se considera la posibilidad que al finalizar el tiempo de

simulación, algunos paquetes se puedan quedar en estado de suspendido, es decir, aquellos paquetes que se generaron pero que no llegaron al su destino debido al termino de la simulación. El simulador lleva un control de estos paquetes y la cantidad de estos paquetes es restado del total de paquetes generados para el cálculo de la tasa de pérdidas. Las tablas XVI y XVII muestran los valores correspondientes a la latencia media y su desviación estandar para cada uno de los codificadores de voz bajo diferentes condiciones de tráfico.

Tabla XVI: Media y desviación estandar de la tasa de pérdidas de paquete en la órbita GEO con codificador G.729

		G.729A			
		Bajo		Medio	
		Media	Desviación Std	Media	Desviación Std
GEO	Alto	0.39%	9.60E-005	0.41%	7.18E-005
	Medio	0.37%	5.60E-005	0.39%	5.86E-005
	Bajo	0.34%	6.47E-005	0.36%	6.16E-005

Tabla XVII: Media y desviación estandar de la tasa de pérdidas de paquete en la órbita GEO con codificador G.723.1

		G.723.1			
		Bajo		Medio	
		Media	Desviación Std	Media	Desviación Std
GEO	Alto	0.43%	3.34E-004	0.45%	2.71E-004
	Medio	0.41%	2.74E-004	0.44%	2.43E-004
	Bajo	0.38%	3.32E-004	0.4%	2.73E-004

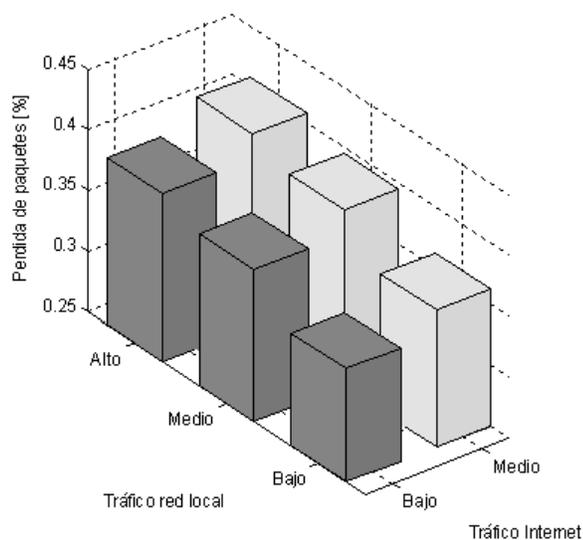


Figura 42: Resultados de tasa de pérdida de paquetes para órbita GEO utilizando codificador G.729A

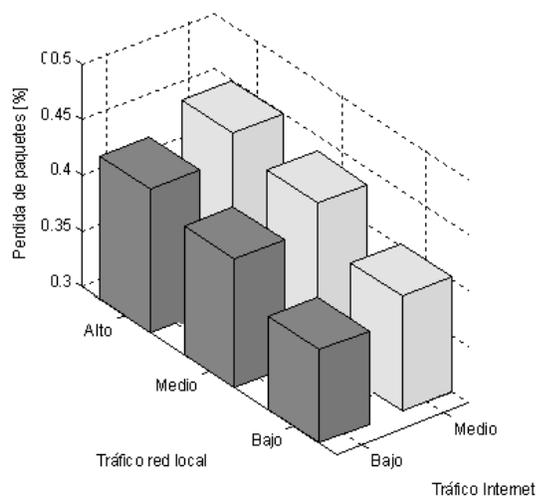


Figura 43: Resultados de tasa de pérdida de paquetes para órbita GEO utilizando codificador G.723.1

V.1.4 Caudal Eficaz

El caudal eficaz se mide con el monitor de bits recibidos en el receptor. Se divide el total de

bits entre el tiempo total de duración de la simulación. Debido a que el cálculo se realiza con el número de bits recibidos, el resultado de la medición de este parámetros es dependiente de la tasa de pérdidas de paquetes. Este cálculo incluye tanto los bits tanto de la carga útil como los de su encabezado.

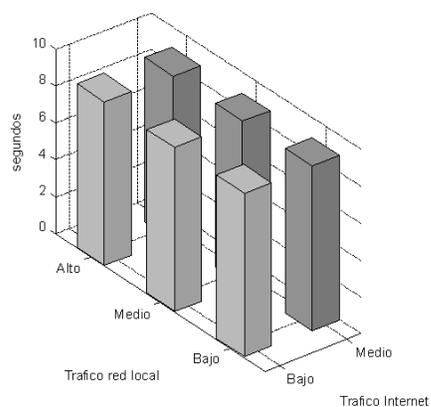


Figura 44: Resultados de caudal eficaz para órbita GEO utilizando codificador G.729A

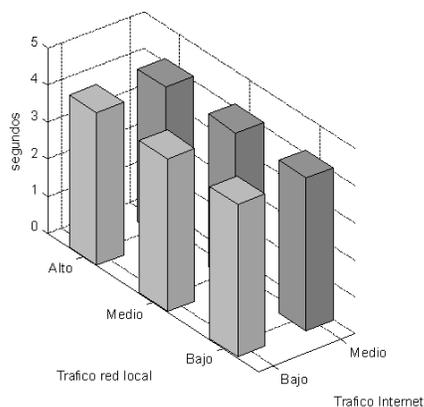


Figura 45: Resultados de caudal eficaz para órbita GEO utilizando codificador G.723.1

V.2 Resultados del sistema empleando una constelación de satélites de órbita baja

V.2.1 Latencia

Para la constelación de órbita baja, se midió la latencia igual que con la órbita geostacionaria, etiquetando el paquete cuando son generados por la fuente de tráfico y monitoreando el tiempo de llegada de los paquetes en el receptor. Las mediciones a continuación presentadas en la figura 46 son desde el punto después de que el paquete es liberado de la memoria de dispersión de retardo variable en el receptor.

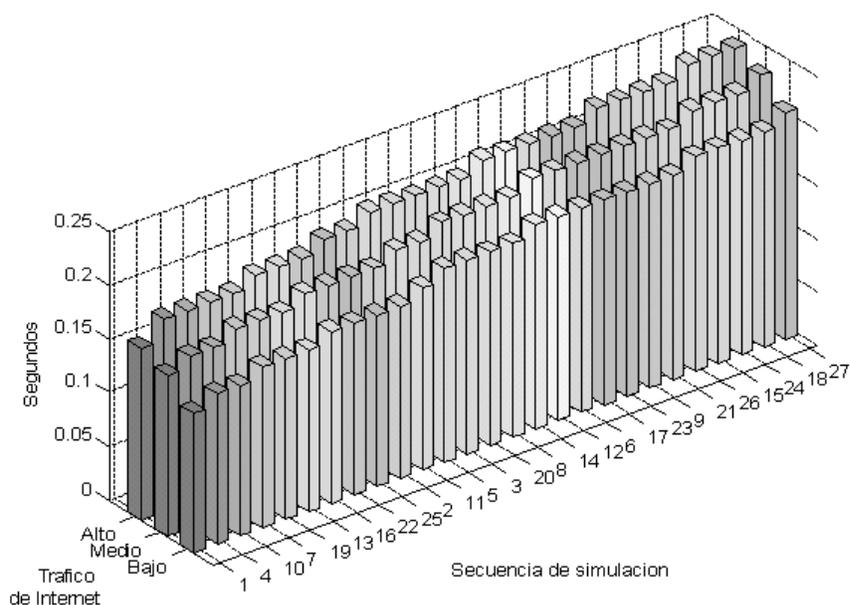


Figura 46: Resultados de Latencia para la órbita LEO

Las gráficas 47 y 48 muestran los resultados medidos de latencia media para las redes locales con tráfico alto, medio y bajo, y la red de Internet con tráfico medio y bajo. Las Tablas XVIII y XIX muestran los valores correspondientes a la latencia media y su

desviación estandar para cada uno de los codificadores de voz bajo las diferentes condiciones de tráfico.

Tabla XVIII: Media y desviación estandar de latencia en la órbita LEO con codificador G.729

		G.729A			
		Bajo		Medio	
		Media	Desviación Std	Media	Desviación Std
LEO	Alto	0.2	0.010	0.22	0.010
	Medio	0.18	0.010	0.2	0.010
	Bajo	0.15	0.010	0.17	0.010

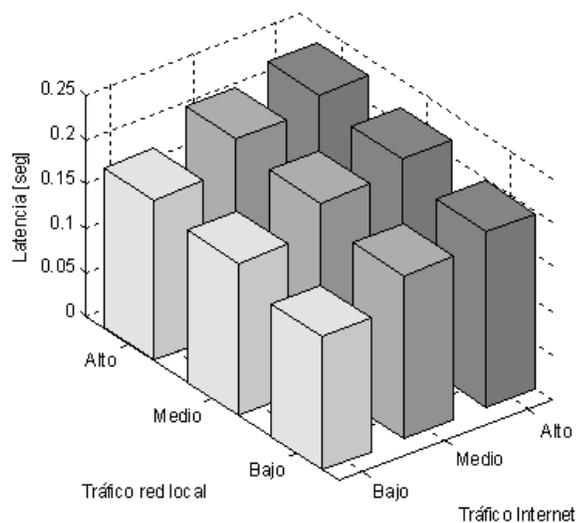


Figura 47: Resultados de Latencia para órbita LEO utilizando codificador G.729A

Tabla XIX: Media y desviación estándar de latencia en la órbita LEO con codificador G.723.1

		G.723.1			
		Bajo		Medio	
		Media	Desviación Std	Media	Desviación Std
LEO	Alto	0.23	0.015	0.25	0.015
	Medio	0.21	0.015	0.23	0.015
	Bajo	0.18	0.015	0.2	0.015

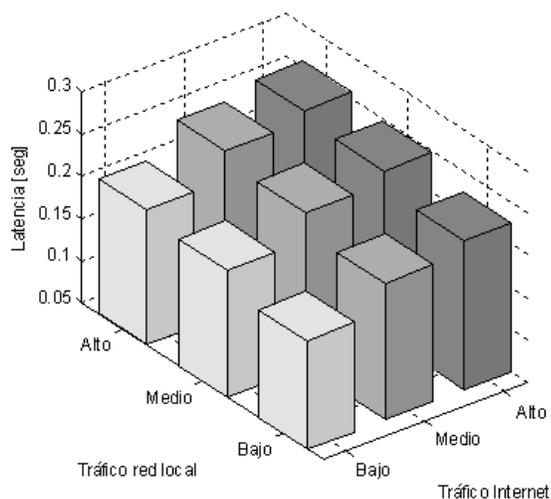


Figura 48: Resultados de Latencia para órbita LEO utilizando codificador G.723.1

V.2.2 Tasa de pérdida de paquetes

La medición de la tasa de pérdidas de paquetes cumple con las mismas condición que con la órbita geostacionaria, un monitor en la fuente de paquetes lleva un contador de los paquetes generado. Un monitor en el receptor lleva el control de los paquetes recibidos.

Las gráficas 49 y 50 muestran los resultados medidos de PLR media para las redes locales con tráfico alto, medio y bajo, y las red de Internet con tráfico medio y bajo. Las tablas XX y

XXI muestran los valores correspondientes al PLR media y su desviación estandar para cada uno de los codificadores de voz bajo las diferentes condiciones de tráfico.

Tabla XX: Media y desviación estandar de la tasa de pérdida de paquetes en la órbita LEO con codificador G.729

		G.729A			
		Bajo		Medio	
		Media	Desviación Std	Media	Desviación Std
LEO	Alto	0.15%	8.32E-005	0.17%	5.03E-005
	Medio	0.14%	7.42E-005	0.16%	5.52E-005
	Bajo	0.1%	8.85E-005	0.12%	7.21E-005

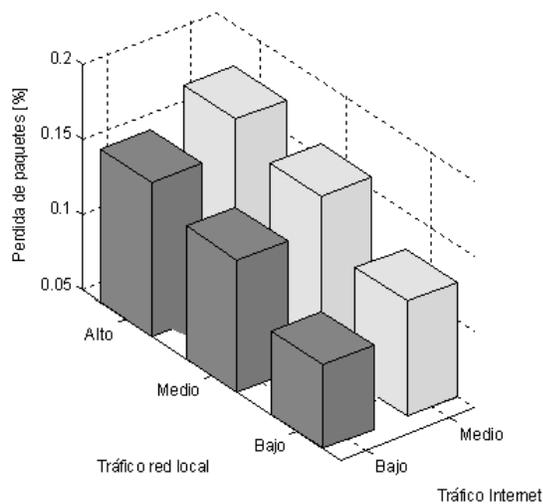


Figura 49: Resultados de tasa de pérdida de paquetes para órbita LEO utilizando codificador G.729A

Tabla XXI: Media y desviación estandar de la tasa de pérdida de paquetes en la órbita LEO con codificador G.723.1

		G.723.1			
		Bajo		Medio	
		Media	Desviación Std	Media	Desviación Std
LEO	Alto	0.19	2.44E-004	0.21	1.78E-004
	Medio	0.18	2.55E-004	0.2	2.93E-004
	Bajo	0.14	2.58E-004	0.17	1.72E-004

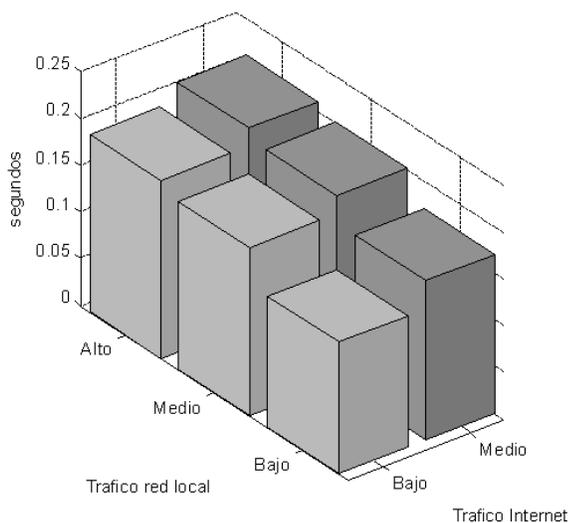


Figura 50: Resultados de tasa de pérdida de paquetes para órbita LEO utilizando codificador G.723.1

V.2.3 Variación en el retardo

La medición de *jitter* o variación del retardo, se realizó en el módulo del nodo receptor al extremo de la red en dos puntos. Un punto de medición se localiza antes de que el paquete entre a la memoria de dispersión de retardo variable, y el otro a la salida. Con estos dos puntos se mide la variación de retardo entre paquetes al final de la red y la efectividad de la

memoria para eliminar este efecto de variaciones de retardo.

Las gráficas 51 y 52 muestran los resultados medidos de jitter para las redes locales con tráfico alto, medio y bajo, y las red de Internet con tráfico medio y bajo. Las Tablas XXII y XIX muestran los valores correspondientes a la latencia media y su desviación estandar para cada uno de los codificadores de voz bajo las diferentes condiciones de tráfico.

Tabla XXII: Media y desviación estandar de la variación en el retardo de paquetes en la órbita LEO con codificador G.729

		G.729A			
		Bajo		Medio	
		Media	Desviación Std	Media	Desviación Std
LEO	Alto	0.020	0.014	0.020	0.014
	Medio	0.020	0.014	0.020	0.014
	Bajo	0.020	0.014	0.020	0.014

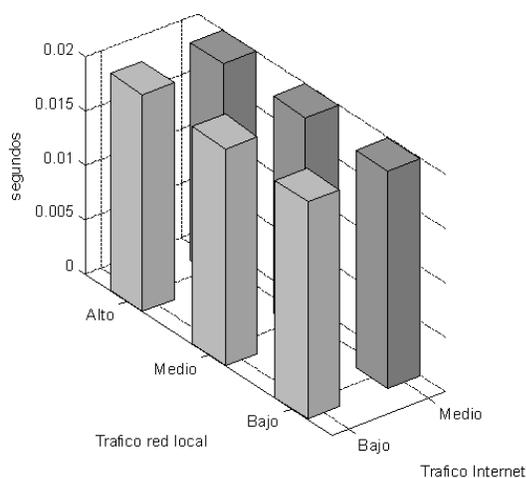


Figura 51: Resultados de variación de retardo para la órbita LEO utilizando codificador G.729A

Tabla XXIII: Media y desviación estandar de la tasa de variación de retardo de paquetes en la órbita LEO con codificador G.723.1

		G.723.1			
		Bajo		Medio	
		Media	Desviación Std	Media	Desviación Std
LEO	Alto	0.059	0.022	0.059	0.022
	Medio	0.059	0.022	0.059	0.022
	Bajo	0.059	0.022	0.059	0.022

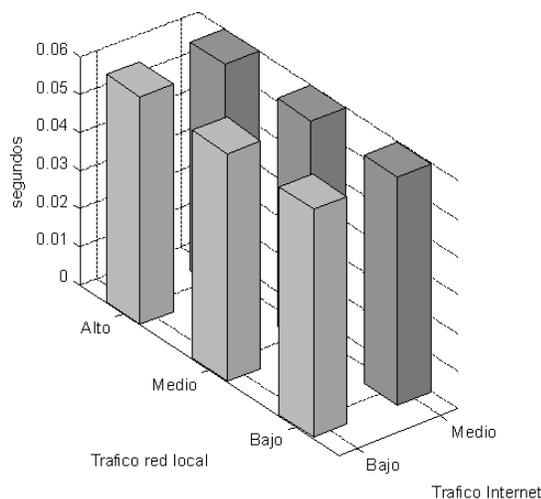


Figura 52: Resultados de variación de retardo para la órbita LEO utilizando codificador G.723.1

V.2.4 Caudal Eficaz

El caudal eficaz en órbita baja se mide con el monitor de bits recibidos por parte del receptor. Se divide el total de bits entre el tiempo total de simulación. Debido a que el cálculo se realiza con el número de bits recibidos, el resultado de la medición de este parámetro es dependiente de la tasa de pérdidas de paquetes.

En las gráficas 53 y 54 se muestran los resultados medidos de caudal eficaz para los dos

codificadores de voz respectivamente en redes locales con tráfico alto, medio y bajo, y la red de Internet con tráfico medio y bajo.

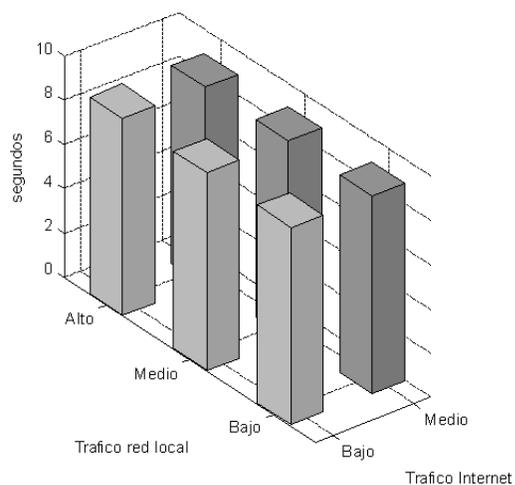


Figura 53: Resultados de cauda eficaz para la órbita LEO utilizando codificador G.729A

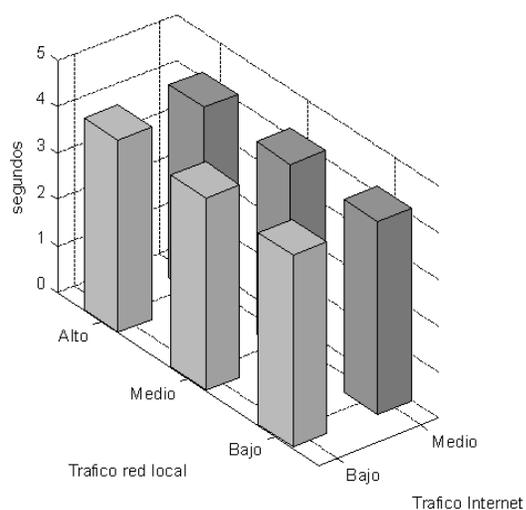


Figura 54: Resultados de cauda eficaz para la órbita LEO utilizando codificador G.723.1

VI ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se muestra el análisis de las tablas y gráficas presentadas en el capítulo anterior. Se resaltan los resultados de la comparación de los parámetros de calidad de servicio entre los dos escenarios de red satelital de órbita geoestacionaria y órbita baja.

VI.1 Comparación de resultados

VI.1.1 Latencia

De los resultados de la simulación de las dos órbitas satelitales, ya se anticipaba que la órbita LEO presenta menos retardo de extremo a extremo debido a que el retardo por propagación es dependiente de la altura del satélite.

Sin embargo, al hacer el análisis de toda la red bajo distintas condiciones de tráfico, el sistema que incluye un satélite de órbita geoestacionaria no deja margen de retardo a las redes terrestres para contrarrestar el efecto de latencia.

Por otro lado, la órbita baja agrega muy poco retardo a la red, permitiendo cumplir con las especificaciones de calidad de servicio para voz sobre IP. Como resultado comprobamos que las redes en los extremos de la red satelital son las que más afecta al retardo de los paquetes. En este caso en particular, para el escenario donde se especifica una altura orbital de 780 km, el retardo por propagación se encuentra por debajo del tiempo de codificación del codificador de voz G.723.1.

Las gráficas 55 y 56 muestran la distribución de retardo por propagación en un enlace satelital sobre una órbita geoestacionaria y una órbita de baja altura respectivamente. Con ello podemos comparar como actúa la variable de retardo de propagación por el espacio libre sobre la latencia.

En la figura 55 se muestra una delta de dirac cercana a los 250 ms para una órbita geoestacionaria, donde el retardo es fijo y es la suma de retardo del canal de subida y del canal de bajada. En cambio, el comportamiento de retardo para un sistema con satélites de órbita baja es completamente diferente, debido a que el satélite siempre está en movimiento con respecto a la estación terrena. El retardo es mayor cuando hay un ángulo de elevación bajo y el satélite se encuentra en el horizonte, ya que conforme el satélite se acerca a la estación terrena el retardo de propagación va disminuyendo. Esta ventana de retardo corto es más prolongada que la de retardo lejano y la mayoría de los paquetes se reciben con bajo retardo.

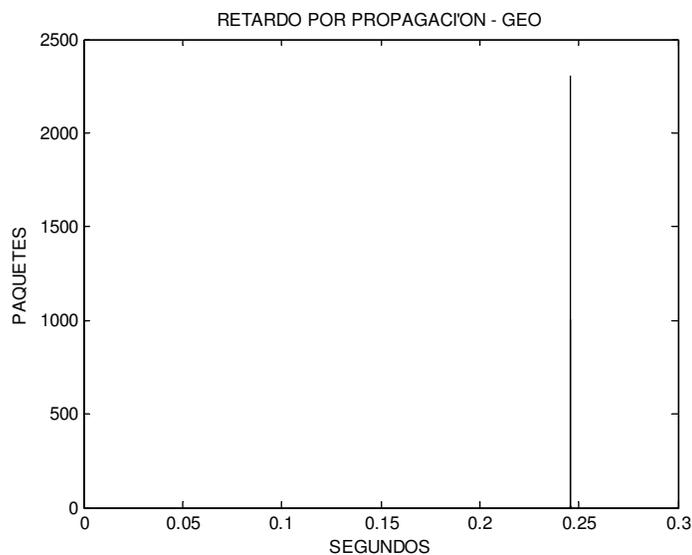


Figura 55: Distribución de retardos de los paquetes en órbita geoestacionaria

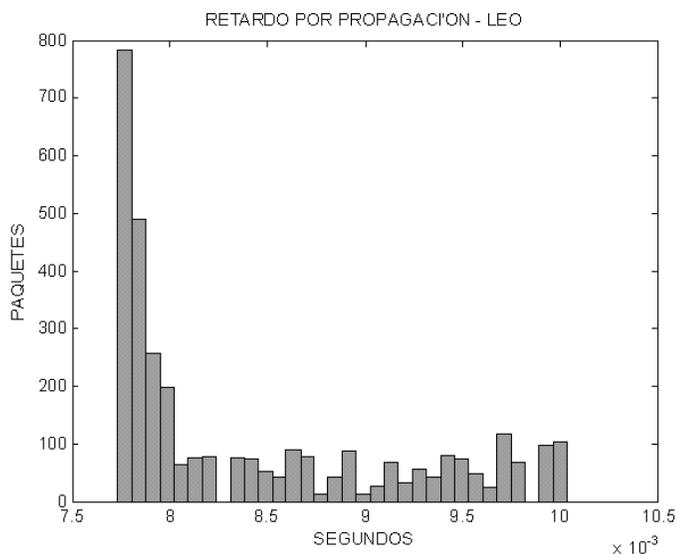


Figura 56: distribución de retardo de paquetes en una órbita baja

VI.1.2 Tasa de pérdidas de paquetes

Las mediciones de la tasa de pérdidas de paquetes (*PLR*) resultaron en valores más bajos de lo esperado. Esto es debido a que los paquetes en sí no son del todo descartados por el receptor satelital, ya que vienen montados sobre un protocolo de transporte que no especifica la recuperación de la integridad del paquete.

Para el caso de las dos órbitas, la órbita geoestacionaria tiene mayores pérdidas de paquetes debido principalmente a la mayor altura orbital y potencia de la estación terrena transmisora.

VI.1.3 Variación en el retardo

Para este parámetros se observó que la red satelital no agrega variaciones en el retardo de cada paquete (*Jitter*) gracias al uso de satélites repetidores. El efecto de retardo por procesamiento en la pasarela de enlace no afecta a este parámetro. El efecto del movimiento de los satélites de órbita baja tampoco afecta a este parámetro. La variación de retardo

ocasionada por la distancia del enlace con el satélite es una variable muy lenta que solo afecta al parámetro de latencia en comparación a las medidas instantáneas para el jitter.

El codificador G.729 fue el que presentó mejor desempeño en cuanto al parámetro de jitter. Como se puede observar en la gráfica 57 la mayoría de los paquetes llegan con un mínimo retardo entre ellos y dentro del promedio de los 10 ms. Dado que la memoria de retención es de 30 ms, a la salida se tiene un flujo de datos constantes para la tasa de decodificación de voz (figura 58).

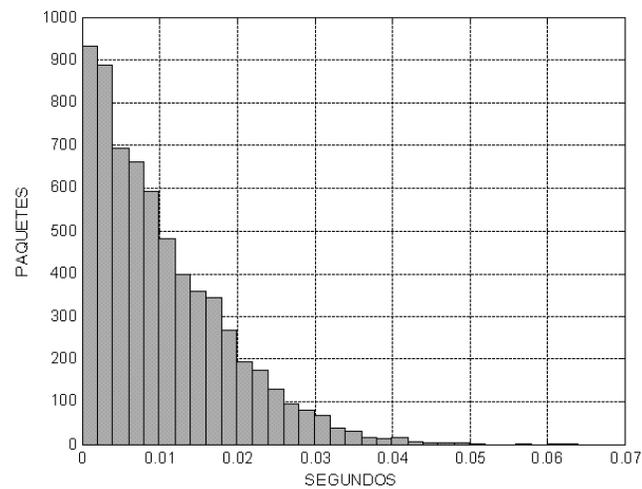


Figura 57: Histograma Jitter antes de la memoria de dispersión de retardo para el codificador G.729A

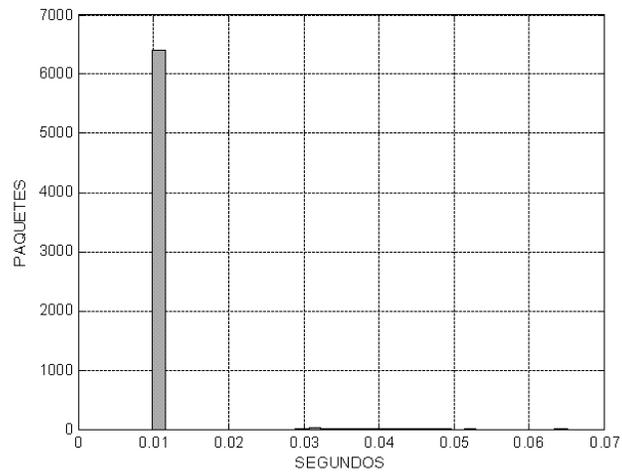


Figura 58: Histograma de Jitter después de la memoria de dispersión para el codificador G.729A

Sin embargo para el codificador G.723.1, el jitter medido es mayor que el de G.729, presentando un promedio de casi todos los paquetes en 60 ms como se demuestra en la figura 59. Este jitter es más grande que la capacidad de memoria de dispersión de retado, por lo que no logra hacer su función en forma óptima y permite retardos variables a la salida de receptor (figura 60).

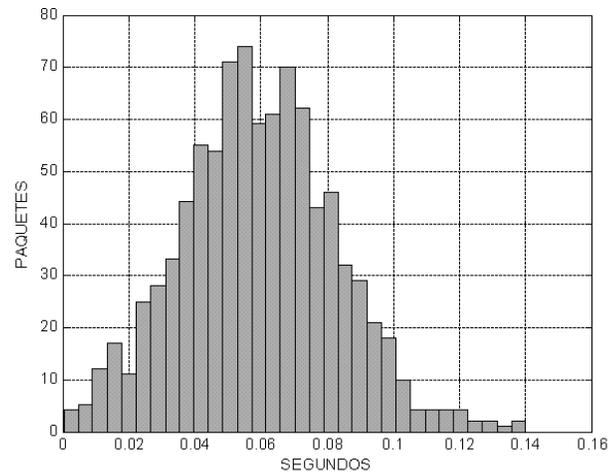


Figura 59: Histograma de Jitter para G.723 antes de la memoria de dispersión de retardo

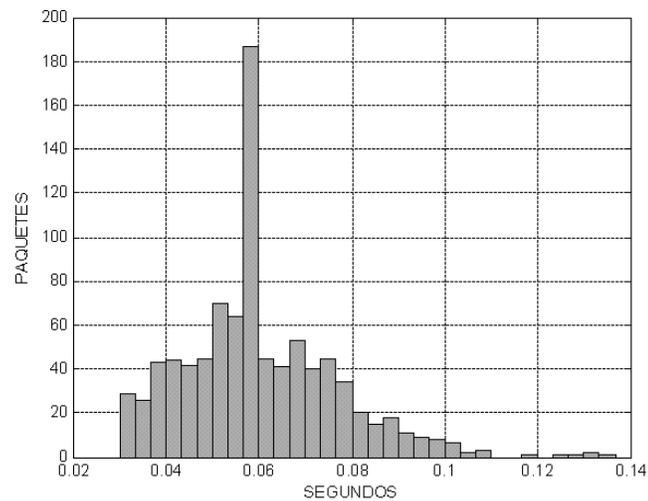


Figura 60: Histograma de Jitter para G.723 después de la memoria de dispersión de retardo

VI.1.4 Caudal Eficaz

El caudal eficaz para el codificador G.729A se encuentra cerca del valor de la tasa de transmisión del codificador de 8.88 Kbps, mientras que el codificador de G.723.1 es menor a

4.15 Kbps. Aún con una tasa de transmisión mayor de 5.3 Kbps, la reducción de la información recibida viene del hecho de una mayor pérdida de paquetes.

Al utilizar el protocolo de compresión de encabezado en el segmento espacial de la red podemos ver que mejora el rendimiento del canal eficaz, reduciendo la tasa de transmisión de información. En la gráfica 61 comparamos el valor del caudal eficaz utilizando el protocolo de cRTP para enfatizar la ganancia de compresión medida. Se observa que se tiene mayor ganancia utilizando el codificador G.729A.

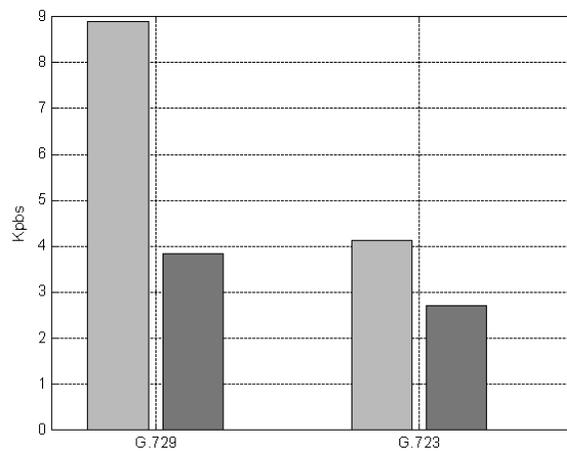


Figura 61: Ganancia de codificación del caudal eficaz en la transmisión de datos por el canal satelital utilizando compresión de encabezado

VII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

VII.1 Conclusiones

Se realizó un estudio de las tecnologías involucradas en VoIP por satélite. Entre ellas destacan varias arquitecturas para el transporte de paquetes IP a través de satélites como el de difusión de video directo por satélite, el cual canaliza paquetes IP junto con la información de video, además de especificar un canal de retorno para estaciones móviles. Otros estudios sugieren el transporte de paquetes IP mediante el encapsulado de protocolos de enlace punto a punto. Los estudios más desarrollados se encuentran basados en una arquitectura ATM para el transporte de paquetes IP con calidad de servicio. Se seleccionó esta última arquitectura para el desarrollo del simulador debido a que es la más madura de todas las arquitecturas mencionadas.

VII.1.1 Codificadores de voz y fuente de tráfico

Varios estudios de tráfico de paquetes de VoIP se encuentran basados en una fuente con un codificador PCM y aunque el rendimiento de este codificador es bueno, su tasa de transmisión de 64 Kbps no lo hace apropiado para su empleo en aplicaciones por satélite. Se investigó que los codificadores G.729A y G.723.1 presentan propiedades que los hacen candidatos para su aplicación por satélite, aunque G.729A presenta mejor desempeño en aspectos de retardo, jitter y PLR. Además, se realizó una fuente de tráfico para el simulador basada en estos codificadores, con resultados muy cercanos a distribuciones reales publicadas.

VII.1.2 Análisis de órbitas para VoIP

Debido al uso relativamente nuevo de constelaciones de satélites de órbita baja (al momento

solo existen dos sistemas funcionando, en comparación a los sistemas de órbita geoestacionaria) no se encontró una herramienta adecuada para la simulación de este tipo de redes satelitales. Se investigó y desarrolló un simulador que considera la simulación de una constelación funcional de satélites de órbita baja basado en parámetros de diseño orbital para el calculo de enlaces satelitales en tiempo real.

Se simuló una red de datos IP con una interconexión a una red satelital modelando la fuente de paquetes de voz sobre IP de acuerdo a diferentes redes terrestres, redes satelitales y tipos de codificadores de voz, siguiendo los estándares y recomendaciones publicados a la fecha.

Del análisis de resultados se puede concluir que la órbita geoestacionaria no permite margen para mejorar las prestaciones de calidad de servicio de voz sobre IP.

VII.1.3 Latencia

Aunque la altura orbital de la órbita geoestacionaria afecta gravemente al parámetro de latencia, todos los demás parámetros se comportan dentro de las normativas, por lo que este tipo de órbita puede transportar paquetes de VoIP cumpliendo con los requisitos de QoS para ciertas aplicaciones. La aplicación de telefonía no entra en este grupo debido a que depende de la interactividad de los usuarios. Por otro lado, la órbita LEO puede degradar el retardo de los paquetes hasta por 20 ms, y en combinación con las redes terrestres, la latencia se encuentra dentro de la ventana permitida para aplicaciones de telefonía en tiempo real con una calidad subjetiva comparable a las redes de telefonía móvil terrestres.

VII.1.4 Variación de retardo

La causa principal de la variación de retardo es debido al congestionamiento en las redes terrestres, y la red satelital no afecta a este parámetro. Debido a la naturaleza de los satélites

utilizados en este trabajo, dentro de la categoría de satélites repetidores, no se cuenta con procesamiento a bordo. Por esta razón los satélites no agregan retardo variable a los paquetes de VoIP y la reducción de jitter depende de los protocolos que garanticen calidad de servicio en las redes terrestres. La distancia variable de los satélites de órbita baja tampoco afecta a este parámetro debido a que el cambio de retardo es demasiado lento para afectar la distancia entre paquetes.

VII.1.5 Tasa de pérdida de paquetes

La tasa de pérdida de paquetes para ambas órbitas se encuentran por debajo del 1%, dentro de los límites permitidos de QoS para VoIP. Debido a que se utiliza un protocolo de transporte enfocado a la entrega de paquetes y no a su integridad, los paquetes pueden aceptar un BER más alto sin comprometer el parámetro de PLR.

VII.1.6 Tasa de errores de bits

La tasa de errores de bits (BER) fue menor usando el codificador de voz G.729 en comparación al codificador G.723.1 debido a que el tamaño de la carga útil de este codificador es más grande que el G.729, aumentando la probabilidad de error por bit en el canal satelital bajo las mismas condiciones para ambos codificadores.

VII.1.7 Caudal eficaz

El caudal eficaz presenta un mejor desempeño en la red satelital al utilizar el protocolo de compresión de encabezado para aplicaciones de tiempo real (RFC2508), contribuyendo a ser más robusta la aplicación de VoIP a mayores cargas de tráfico sobre el canal satelital. La ganancia de compresión se refleja al reducir a más de la mitad los datos transmitidos hacia el satélite, mejorando el rendimiento de la capa de acceso al medio del segmento satelital.

VII.1.8 Conclusiones finales

Considerando el planteamiento del problema y los objetivos de esta tesis, y siguiendo la metodología de investigación propuesta, se puede concluir finalmente que se alcanzaron los objetivos especificados para esta tesis, los cuales consistieron en analizar los parámetros de calidad de servicio y desempeño de paquetes de voz sobre IP a través de satélites geoestacionarios y de órbita baja mediante un simulador desarrollado para este propósito.

VII.2 Aportaciones

Una vez concluido este trabajo se puede mencionar las principales aportaciones de este trabajo de investigación:

Se analizan valores que caracterizan los parámetros de calidad de servicio como latencia, variación en el retardo, tasa de pérdida de paquetes y tasa de errores de bit para la aplicación de voz sobre IP cuando la red IP se encuentra integrada con una red satelital.

Se analizan los valores de los parámetros de las distribuciones de probabilidad weibull y gamma, necesarios para el modelado de fuente de tráfico para aplicaciones de VoIP con un comportamiento más cercano a la realidad.

Se implementa un algoritmo alternativo para modelar la mecánica orbital para sistemas de constelaciones de órbita baja polar, mejorando el desempeño del rendimiento del simulador.

Se implementó el algoritmo para modelar el protocolo para compresión de encabezado de tiempo real descrito en el RFC2508 mejorando el desempeño del caudal eficaz.

Se presentó un artículo en la decimoquinta Reunión de Otoño de Comunicaciones, Computación y Electrónica 2004 de la IEEE en Acapulco, con el título “Voz sobre IP y su Desempeño en Redes Satelitales de Órbita Baja”.

VII.3 Trabajo Futuro

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

Hacer un análisis de desempeño para aplicaciones comerciales de VoIP. Analizar el desempeño aplicaciones como Skype y la librería Jingle de Gtalk para conocer su comportamiento bajo las condiciones del canal satélital.

Realizar un simulador por hardware. CICESE tiene la infraestructura necesaria para realizar la simulación utilizando equipo físico. Las simplificaciones a los modelos presentados en este trabajo son fácilmente portables a dispositivos de programación de circuitería física. De esta manera se pueden realizar análisis con equipos reales.

Considerar la suite completa de protocolos de H.323 o SIP. En este trabajo, al hacer el análisis, se ha simplificado únicamente a los efectos de los paquetes que se transportan, sin embargo, el establecimiento de la conexión también implica un impacto en el desempeño de VoIP.

VIII BIBLIOGRAFÍA

- Bellalta, B., Oliver, M. y Rincón, D. 2002** Performance of the GPRS RLC/MAC protocols with VoIP traffic. Universitat Pompeu Fabra.
- Beltrán Jaime, R. 1999.** Impactos al implementar el servicio de voz a través de una red IP. Tesis de maestría en ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Ensenada, Baja California. 118 p.
- Cabanillas Noris, J. C. 2004.** Análisis de satélites con procesamiento a bordo y su impacto en QoS para redes de banda ancha por satélite. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Tesis de maestría. 177 p.
- Cantú Dávila, J. D. 2005.** Análisis de variantes de TCP en servicios IP sobre redes satelitales. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Tesis de maestría. 124 p.
- Casilari, E., H. Montes y F. Sandoval, 2002.** Modeling of voice traffic over IP networks, 3rd Internacional Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDPS 2002), Stafford (Reino Unido), Julio. 411-414 pp.
- Chuah, C. y R. H. Katz, 2002.** Characterizing packet audio streams from Internet multimedia applications. IEEE International Conference on Communications ICC 2002. 2002 (2): 1199-1203 p.
- Connors D., Ryu B., Pottie, G. J. y Dao S. 2002.** A Medium Access Control Protocol for Real Time Video over High Latency Satellite Channels. Mobile Networks and Applications (7): 9–20 p.
- Cruickshank, H., A. Sánchez, Z. Sun y B. Carro. 2001.** Voice over IP satellite links. The 8th ICECS conference in Malta. Septiembre 2001. 473- 476 pp.
- Cruickshank, H., Z. Sun, F. Carducci y A. Sánchez. 2001.** Analysis of IP voice conferencing over EuroSkyWay satellite system. IEE Proc. Commun. 148 (4): 202-206 p.
- Farserotu, J. y Prasat, R. 2002.** IP/ATM Mobile Satellite Networks. Artech House. Norwood, Massachusetts. Primera edición. 274 p.
- Gavish, B., 1997.** Low earth orbit satellite based communication systems. European Journal of Operational Research, 1997. (99): 166-179 p.
- González R. I, 2000.** Análisis del sistema de señalización No.7 para el transporte de voz mediante el protocolo de IP. Tesis de maestría en ciencias. Centro de Investigación

Científica y de Educación Superior de Ensenada. Ensenada, Baja California. 141 p.

- Hassan, M., A. Nayandoro y M. Atiquzzaman. 2000.** Internet Telephony: Services, Technical Challenges, and Products. IEEE Communications Magazine. 38. (4): 96-103 pp.
- Henderson, T. R. y Katz, R. H., 2000.** Network Simulation for LEO Satellite Networks, 18th AIAA International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC), Oakland, California, April 2000.
- Hersent O., D. Gurley y J.P. Petit, 2000.** IP Telephony Packet-based multimedia communications systems. Pearson Education Limited. Primera edición. Edinburgh Gate. 456 p.
- Horan, Stephen y Osborne William P. 2002.** Analysis of the Ka-band direct data distribution concept. National Aeronautics and Space Administration. Washington. D.C. 20 p.
- Jain Raj. 1991.** The art of computer systems performance analysis, techniques for experimental design, measurement, simulation, and modeling. John Wiley & Sons. Primera edición. New York. 685 p.
- Janssen, J., D. De Vleeschauwer, G.H. Petit, R. Windey y J.M. Leroy. 2002.** Delay Bounds for Voice over IP Calls Transported over Satellite Access Networks. Mobile Networks and Applications. (7): 79-89 p.
- Jiang W. y H. Schulzrinne, 2000.** Analysis of On-Off Patterns in VoIP and Their Effect on Voice Traffic Aggregation. Proc. of the 9th IEEE International Conference on Computer Communication Networks, Las Vegas (USA). junio, 2000.
- Kota, S., Pahlavan, K. y Leppanen, P. 2004.** Broadband Satellite Communications for Internet Access. Norwell, Massachusetts. Primera edición. 421 pags.
- Maral, G. y M. Bousquet. 2002.** Satellite Communications Systems, Systems, Techniques and Technology, Fourth Edition. John Wiley & Sons Ltd. Cuarta edición. West Sussex. 757 p.
- Metz, C., 2000.** IP-over-Satellite: Internet Connectivity Blasts Off. IEEE Internet Computing. 4 (4): 84-88 p.
- Nguyen, T., F. Yegenoglu, A. Sciuto y R. Subbarayan. 2001.** Voice over IP Service and Performance in Satellite Networks. IEEE Communications Magazine. 39. (3): 164 – 170 p.
- Oodan, A., Ward, K., Savolaine, C., Daneshmand M. y Hoath, P. 2003.** Telecommunications Quality of Service Management: From Legacy to Emerging

Services. Segunda edición. The Institution of Electrical Engineers, Londres, Reino Unido. 384 p.

Raya Díaz, K. 2003. Transporte de aplicaciones interactivas de MPEG-4 en sistemas de satélite con canal de retorno. Tesis de maestría en ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Ensenada, Baja California. 137 p.

Romero Hernández, R. A. 2003. Simulador para la transmisión de voz sobre redes de paquetes y medición de parámetros de calidad de servicio (QoS). Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, Baja California. 173 p.

Serger, J. 2003. Modeling Approach for VoIP Traffic Aggregations for Transferring Tele-traffic Trunks in a QoS enabled IP-Backbone Environment. International Workshop on Inter-domain Performance and Simulation (IPS). Salzburg, Austria, 20-21 Febrero, 2003

Sourisse, P., Rouffet, D., y Sorre H., 2001. SkyBridge: a broadband access system using a constellation of LEO satellites, The World Radiocommunication Conference, 21 Noviembre, 2001.

Sun, Z. 2005. Satellite Networking, principles and protocols. John Wiley & Sons. Primera edición. New York. 342 p.

Sun, Z., A. Sánchez, H. Cruickshank, B. Carro y M. Vázquez. 2001. VoIP real-time flows in satellite networks with OBP. Seventh International Workshop on Digital Signal Processing Techniques for Space Communications (DSP2000), Sesimbra, Portugal, 1-3 Octubre 2001.

Tanenbaum, A. S. 2003. Computer Networks Fourth Edition. Pearson Education, Inc. Cuarta edición, Upper Saddle River, New Jersey. 891 pags.

Tomasi, W. 2004. Electronic Communications Systems, Fundamentals through Advanced, Fifth Edition. Pearson Prentice Hall. Quinta edición. Upper Saddle River, New Jersey. 1163 p.

Vázquez Castro, M.A., F. J. González Serrano, A. Martínez Fernández y G. Mohedano Moya. 2003. Quality of Service of VoIP Over DVB-RCS. Sixth Baiona Workshop on Signal Processing in Communications. Septiembre 2003. 9): 22- 25 p.

A Código fuente del simulador

A.1 Kernel del simulador

```

% kernel de simulacion de VoIP / SAT
%
% Escrito por Julio Cesar del Valle P.
% CICESE
% Fisica Aplicada
% Departamento de Electronica y Telecomunicaciones
% Ensenada, Baja California, Mexico %{dd/mm/aa}
%
% v.5

% inicializacion de las constantes para cada modulo
% fec = evalin('base','fec');
save temp;
clear
vo = evalin('base','vo');
dest = evalin('base','dest');
sat2 = evalin('base','sat2');
lan = evalin('base','lan');
mac = evalin('base','mac');
sim = evalin('base','sim');

sim.i_rtp = 0; % indice de secuencia del protocolo RTP
sim.ts = 0; % estampa de tiempo inicial = 0 seg.
sim.bar = [0 0]; % variable para el calculo del porcentaje de progreso
v_IP = []; % vector de paquetes de IP
v_voz = []; % vector de voz
sim.i_pkt = []; % indice de paquetes

% f_voz; % fuente de voz
% load simu r_voz; % (desactivada la funcion de generacion de
% v_voz = r_voz; % fuente de voz)
% clear r_voz;
load voz15min v_voz; % ya se tiene un registro de la fuente de voz,
% con duracion de 15 minutos para propositos
% de comparacion entre todas las
% simulaciones.

% calendario de eventos
cal_evnt = [v_voz(1,1) 2 0]; % programar la fuente de voz
% programar la trama TDMA
cal_evnt(size(cal_evnt,1)+1,:) = [mac.t_frame 5 0];

if sum(sim.graf_res) % Agregar el evento para graficar resultados
% al finalizar la simulacion?.
cal_evnt(size(cal_evnt,1)+1,:) = [1 99 0];
end

info_bar.title = 'Simulacion...'; % configura 'barra de progreso'
info_bar.size = 1;
info_bar.color = [1 0 0];
info_bar.clearance=.1;
ph = progbar(info_bar);
clear info_bar

% -- inicializacion de la pantalla de eventos
disp(sprintf('-----'));
disp( sprintf('[%2.4g] inicio de simulacion...',sim.ts) );

% -- inicializacion de parametros para la constelacion satelital
sim.satelite = 1;
satelite4;

% -- inicializacion de los monitores de actividad y estadistica
sim.monitor = 1;
monitor;

```

```

% Visualizacion de la simulacion de la constelacion satelital
% en tiempo-real (al simulador)
if findobj(0,'Tag','simu_conf' )
    if get(handles.radiobutton1,'Value')
        hf = virtual5;
        ax = findobj(hf,'Type','Axes');
    end
end

end

tic % se inicia el cronometro de simulacion

% inicia simulacion de eventos
while (sim.ts < sim.T_SIMULACION) & ~sim.cancelar
    sim.ts = cal_evnt(1,1); % actualiza la estampa de tiempo

    % actualiza la barra de progreso
    sim.bar(1) = sim.bar(2); % Esta comparacion mejora
    sim.bar(2) = round(sim.ts/sim.T_SIMULACION*100); % el desempeno de la simulacion
    if sim.bar(1) ~= sim.bar(2) % al no mostrar cambios en
        progbar(ph,sim.bar(2)); % la barra que no son
        sim.bar(1) = sim.bar(2); % visibles e inecesario.
    end

    % seleccion del evento a ejecutar
    switch cal_evnt(1,2)
        case 2 % usuario genera paquetes de VoIP

            sim.fuente = 2;
            sim.sig_evnt = 3;
            fuente5;

        case 3 % LAN A
            sim.i_pkt = find(v_IP(:,2) == cal_evnt(1,3));
            sim.sig_evnt = 4;
            sim.red = 1;
            red2;

        case 4 % gateway en la ETR

            sim.i_pkt = find(v_IP(:,2) == cal_evnt(1,3));
            sim.gateway = 3;
            sim.sig_evnt = 5;
            gateway2;

        case 5 % acceso al medio TDMA

            mac.evnt = 5;
            sim.sig_evnt = 6;
            sim.mac = 2;
            mac2;

        case 6 % enlace satelital;

            sim.i_pkt = find(v_IP(:,2) == cal_evnt(1,3));
            sim.satelite = 2;
            sim.sig_evnt = 7;
            satelite4;

        case 7 % Gateway de la red satelital (A)

            sim.i_pkt = find(v_IP(:,2) == cal_evnt(1,3));
            sim.gateway = 6;
            sim.sig_evnt = 8;
            gateway2;

        case 8 % modelo de backbone

            sim.i_pkt = find(v_IP(:,2) == cal_evnt(1,3));
            sim.sig_evnt = 9;
            sim.red = 3;
            red2;

        case 9 % modelo de la LAN B

```

```

        sim.i_pkt = find(v_IP(:,2) == cal_evnt(1,3));
        sim.sig_evnt = 10;
        sim.red = 2;
        red2;

    case 10      % recepcion del paquete IP

        sim.i_pkt = find(v_IP(:,2) == cal_evnt(1,3));
        sim.destino = 1;
        sim.sig_evnt = 11;
        destino3;

    case 11      % salida del buffer de-jitter

        sim.i_pkt = find(v_IP(:,2) == cal_evnt(1,3));
        sim.destino = 2;
        sim.sig_evnt = 11;
        destino3;

    case {98, 99} % Monitorear estadisticas
        sim.monitor = 2;
        monitor;

    otherwise % cal_evnt(1,2) >= 100 : Fin de la simulacion
        sim.ts = sim.T_SIMULACION;
end %switch

    cal_evnt = sortrows(cal_evnt); % organiza los eventos en orden cronologico
end %while
toc % parar cronometro de simulacion

progbar(ph,-1) % cerrar barra de progreso
clear ph

% indicar el fin de la simulacion en la pantalla de eventos
if sim.cancelar
    disp(sprintf('*** SIMULACION ABORTADA ***'))
else
    disp(sprintf('\n -----'))
    m{1}(2) = length(v_IP);
    assignin('base','m',m);
    resultados2;
end
load temp

```

A.2 Modelo de fuente de tráfico

```

% Bloque de fuente de trafico de VoIP
%
% escrito por Julio Cesar del Valle P.
% CICESE
% Fisica Aplicada
% Departamento de Electronica y Telecomunicaciones
% Ensenada, Baja California, Mexico %{dd/mm/aa}

% vector de paquetes de IP
%-----
% ts | sec_rtp | TAMANO_PLY | retardo acumlado | 0 | 0 | 0 | sec_VA
%-----

% vector de fuente de voz
%-----
% ts | duracion del spurt |
%-----

switch sim.fuente
    case 1

        % parametros del vocoder -----
        % vo.TASA_DE_BITS = 8;                % [kbps] -> [bps]
        % vo.T_PROCESAMIENTO = (10 / 1000);  % [ms] -> [seg]
        % vo.TAMANO_PLY = 10 * 8;           % [bytes] -> [bits]
        % vo.TLA = (5 / 1000);              % retardo debido a "look ahead"
        % vo.N_PKTIV = 1;                    % numero de muestras por paq. IP
        % vo.TPAQ = vo.T_PROCESAMIENTO * vo.N_PKTIV; % retardo por paquetizacion [ms]
        % vo.c_pktiv = 0;                    % contador de muestras por paquete IP
        % vo.sec_rtp = 1;
        % vo.s RTP = 96; % tamano de encabezado de RTP [bits]
        % vo.s_UDP = 64; % tamano de encabezado de UDP [bits]
        % vo.s_IP = 160; % tamano de encabezado de IP [bits]
        % vo.s_HEADER = vo.s RTP + vo.s_UDP + vo.s_IP;
        % -----

        case 2

            v_voz(1,2) = v_voz(1,2) - (vo.TPAQ);
            if v_voz(1,2) >= 0

                % se crea un nuevo paquete
                v_IP(size(v_IP,1)+1,:) = ...
                    [ sim.ts vo.sec_rtp vo.s_HEADER + (vo.TAMANO_PLY * vo.N_PKTIV) 0 0 0 0 vo.sVA ];

                % se monitorea la cant. de bist generados
                m{5}(1) = m{5}(1) + vo.s_HEADER + (vo.TAMANO_PLY * vo.N_PKTIV);

                % generar el nuevo evento
                if vo.c_pktiv == 0
                    cal_evnt(size(cal_evnt,1)+1,:) = ...
                        [sim.ts + vo.TPAQ + vo.TLA sim.sig_evnt vo.sec_rtp];
                    cal_evnt(size(cal_evnt,1)+1,:) = [sim.ts + vo.TPAQ 2 0];
                    m.va{1}(size(m.va{1},1)+1,:) = [sim.ts + vo.TPAQ + vo.TLA 1];
                %
                    m{1}(1) = m{1}(1) + 1;
                    m{1}(2) = m{1}(2) + 1;
                else
                    cal_evnt(size(cal_evnt,1)+1,:) = ...
                        [sim.ts + vo.TPAQ sim.sig_evnt vo.sec_rtp];
                    cal_evnt(size(cal_evnt,1)+1,:) = [sim.ts + vo.TPAQ 2 0];
                    m.va{1}(size(m.va{1},1)+1,:) = [sim.ts + vo.TPAQ 1];
                %
                    m{1}(1) = m{1}(1) + 1;
                    m{1}(2) = m{1}(2) + 1;
                end

                % Programar la generacion del proximo paquete
                vo.sec_rtp = vo.sec_rtp + 1;
                vo.c_pktiv = vo.c_pktiv + 1;
            end
        end
    end
end

```

```
        else
v_voz(1,:) = [];
%       m.va{1}(size(m.va{1},1)+1,:) = [sim.ts 0];
if size(v_voz,1) == 0

        % se programa el fin de la simulacion
cal_evnt(size(cal_evnt,1)+1,:) = [sim.T_SIMULACION 100 0];
else

        % se programa el siguiente spurt
cal_evnt(size(cal_evnt,1)+1,:) = [v_voz(1,1) 2 0];
vo.c_pktv = 0;
vo.sVA = vo.sVA + 1;
end
        end
        cal_evnt(1,:) = [];
end % switch
```

A.3 Modelado de redes terrestres

```

% bloque de red LAN ETHERNET
%
% escrito por Julio Cesar del Valle P.
% CICESE
% Fisica Aplicada
% Departamento de Electronica y Telecomunicaciones
% Ensenada, Baja California, Mexico %{dd/mm/aa}
%
% vector de paquetes de IP
-----
% sim.ts | #ref_RTP | TAMANO_PLY | marca_buffer | n_cellATM | num_errs | #ref_cRTP |
-----
%
% vector calendario de eventos
-----
% ts | evento | correspondiente al paquete IP_ID |
-----

% calculo del retardo
lan.retardo = normrnd(lan.ret(sim.red), lan.jit(sim.red));

% calculo de errores en el canal -----
lan.num_errs = 0;
lan.s_paq = v_IP(sim.i_pkt,3);
lan.PE = lan.ber(sim.red);

for ii = 1:v_IP(sim.i_pkt,5)
    lan.r = rand;           % obtener un valor aleatorio uniforme
    lan.p_acum = 0;

    while ( lan.num_errs < lan.s_paq )
        lan.log_p1 = lan.num_errs * log ( lan.PE );
        lan.log_p2 = ( lan.s_paq - lan.num_errs ) * log ( 1 - lan.PE );
        lan.log_p3 = log_factorial ( lan.s_paq ) - log_factorial ( lan.num_errs ) - ...
            log_factorial ( lan.s_paq - lan.num_errs );
        lan.p_exact = exp ( lan.log_p1 + lan.log_p2 + lan.log_p3 );
        lan.p_acum = lan.p_acum + lan.p_exact;
        if ( lan.p_acum >= lan.r )
            break;
        end
        lan.num_errs = lan.num_errs + 1;
    end
end
v_IP(sim.i_pkt,6) = v_IP(sim.i_pkt,6) + lan.num_errs;

if lan.num_errs > 0
% falta agregar que busque si el encabezado resulto con errores
% por lo pronto, cualquier error causa que se pierda el paquete completo
    v_IP(sim.i_pkt,:) = []; % descarte del paquete
    m{1}(4) = m{1}(4) + 1;
else
    cal_evnt(size(cal_evnt,1)+1,:) = [sim.ts + lan.retardo sim.sig_evnt cal_evnt(1,3)];
end

cal_evnt(1,:) = [];

```

A.4 Modelado de mecanica orbital y canal satelital

```

% bloque de satelite v4
%
% escrito por Julio Cesar del Valle P.
% CICESE
% Fisica Aplicada
% Departamento de Electronica y Telecomunicaciones
% Ensenada, Baja California, Mexico %{dd/mm/aa}

% vector de paquetes de IP
%-----
% sim.ts | #ref_RTP | TAMANO_PLY | ? | n_cellATM | num_errs | #ref_cRTP |
%-----
%
% vector calendario de eventos
%-----
% ts | evento | correspondiente al paquete IP_ID |
%-----

switch sim.satelite(1)
case 1
    % inicializacion de variables para el calculo del presupuesto de
    % enlace

    % Posicion de referencia para la rotacion de la tierra
    % Equivalente a los vertices [x(26,26), y(26,26), z(26,26)]
    % de una sphere(50)
    TIERRA = [sat2.RADIUS_OF_EARTH, 0, 0];
    offset = 0;

    % posicion de la estacion terrena gateway
    long = sat2.LONGITUD(2);
    lat = sat2.LATITUD(2);
    phi = lat * pi/180;
    th = (long + 135 + offset) * pi/180 + pi/4;
    [xp(3), yp(3), zp(3)] = sph2cart(th,phi,sat2.RADIUS_OF_EARTH);

    % posicion de la estacion terrena remota
    long = sat2.LONGITUD(1);
    lat = sat2.LATITUD(1);
    phi = lat * pi/180;
    th = (long + 135 + offset) * pi/180 + pi/4;
    [xp(1), yp(1), zp(1)] = sph2cart(th,phi,sat2.RADIUS_OF_EARTH);

    % Calculo de los parametros orbitales [R. Goyal.1998]
    delta_anomaly = 360 / sat2.SATS_PER_PLANE;
    RA_correction = (1.5 * (90 - sat2.INCLINATION)) / sat2.NUM_PLANES;
    sat2.delta_right_ascension = 180 / sat2.NUM_PLANES + RA_correction;
    delta_inter_plane_phasing = 0.5 * delta_anomaly + sat2.delta_right_ascension ...
        * sin( 90 - sat2.INCLINATION);

    % Calculo de la posicion de los satelites en coord. esfericas
    % creacion de las variables
    sat2.sats = zeros( sat2.SATS_PER_PLANE * sat2.NUM_PLANES, 3);
    sat2.sats(:,3) = sat2.RADIUS_OF_EARTH + sat2.ALTITUD_OF_SAT;

    % Calculo de la separacion de los satelites
    i = 1:sat2.SATS_PER_PLANE;
    for j = 1:sat2.NUM_PLANES
        sat2.sats(i + ((j-1) * sat2.SATS_PER_PLANE),1) = ...
            (delta_anomaly * i' + ((j-1) * delta_inter_plane_phasing)) * pi/180;
    end

    % inicializacion de variables
    a = (sat2.RADIUS_OF_EARTH + sat2.ALTITUD_OF_SAT) * 1e3;
    MU = 3.986e14;
    T = 2 * pi * sqrt( a^3/MU ); % periodo completo de la orbital satelital
    sat2.P = [0 0];

case 2 % enlace de subida

```

```

m.trmd = m.trmd + 1;          % contador de paquetes trasmitidos
m.by_trmd = m.by_trmd + (sat.n_cellATM * 63 * 8);

m.R = [m.R; v_IP(sim.i_pkt,3)]; % tasa de transmision
m.thrpt(1) = m.thrpt(1) + (sat.n_cellATM * 63 * 8);
m.lat(2,1) = m.lat(2,1) + ( sim.ts - v_IP(sim.i_pkt, 1));
m.lat(2,2) = m.lat(2,2) + 1;

    % Calculo del moviemiento de los satelites -----
    i = 1:sat2.SATS_PER_PLANE;
% Calcular incremento de tiempo
sat2.P(1) = sim.ts - sat2.P(2);
sat2.P(2) = sim.ts;
INC = 360 * sat2.P(1) / T;
sat2.INC_TIERRA = 360 * sat2.P(1) / (24 * 60 * 60);

    sat2.sats(:,1) = sat2.sats(:,1) + (INC * pi/180);
    [x y z] = sph2cart(sat2.sats(:,1),sat2.sats(:,2),sat2.sats(:,3));
[x y z] = rot(x, y, z, 'y', sat2.INCLINATION);
[x y z] = rot(x, y, z, 'z', sat2.POSICION - 180 );

% Actualizar la posicion de cada uno de los satelites
for j = 1:sat2.NUM_PLANES
    i = ((j-1) * sat2.SATS_PER_PLANE + 1:j * sat2.SATS_PER_PLANE);

    % Medir la altura est.terr.remota al satelite
    [p(j,1) p(j,2)] = min(sqrt((x(i) - xp(1)).^2 + (y(i) - yp(1)).^2 + (z(i)- zp(1)).^2));
    % Medir la altura est.terr.gateway al satelite
    i = (j-1) * sat2.SATS_PER_PLANE + p(j,2);
    p(j,3) = sqrt((x(i) - xp(3)).^2 + (y(i) - yp(3)).^2 + (z(i)- zp(3)).^2);

    [x y z] = rot(x, y, z, 'z', sat2.delta_right_ascension);
    end

% Rotacion de la tierra
[TIERRA(1), TIERRA(2), TIERRA(3)] = ...
    rot(TIERRA(1), TIERRA(2), TIERRA(3), 'z', sat2.INC_TIERRA );
[xp(1), yp(1), zp(1)] = rot(xp(1), yp(1), zp(1), 'z', sat2.INC_TIERRA );
[xp(3), yp(3), zp(3)] = rot(xp(3), yp(3), zp(3), 'z', sat2.INC_TIERRA );

% p = [ dist.min.est.remt.a.sat., plano, dist.sat.a.est.terr.gwy]
% lo anterior es un comentario sobre el contenido de p.
[x y] = min(p(:,1)); % obtener el numero del plano

sat2.Ru = p(y,1);
sat2.Rd = p(y,3);

    if findobj(0,'tag','Virtual')
        virtual5('actualiza', ax(1), INC, sat2);
    end

% calculo para sat2.PE (BEP) -----
% calculo de las perdidas por propagacion en el espacio libre
sat2.log_Lu = 10 * log10 ((4 * pi * (sat2.Ru * 1e3) * sat2.fu / 3e8)^2 );
sat2.log_Ld = 10 * log10 ((4 * pi * (sat2.Rd * 1e3) * sat2.fu / 3e8)^2 );

% calculo del presupuesto de enlace
% C/No del enlace de subida (sin considerar atenuacion en el espacio [Lu])
sat2.log_C_Nou = sat2.EIRPes + sat2.G_Ts1 + 228.6 - (sat2.log_Lu + 0.3 + sat2.Lr);

% C/No del enlace de bajada (sin considerar la atenuacion en el espacio)
sat2.log_C_Nod = sat2.EIRPs1 + sat2.G_Tes + 228.6 - (sat2.log_Ld + 0.3);

sat2.C_Nou = 10^(sat2.log_C_Nou/10);
sat2.C_Nod = 10^(sat2.log_C_Nod/10);

% calculo del C/No total
sat2.C_Not = 1/(1/sat2.C_Nod + 1/sat2.C_Nou);

% se suma la ganancia de codificacion
sat2.C_Not_db = 10 * log10(sat2.C_Not);
sat2.C_Not_db = sat2.C_Not_db + sat2.Gcod;
sat2.C_Not = 10^(sat2.C_Not_db/10);

```

```

        % calculo para Ec/No
sat2.Ec_No = sat2.C_Not / sat2.Rc;

        % calculo para PE (Probabilidad de error de bit)
sat2.PE = (1/2) * erfc(sqrt(sat2.Ec_No));

if sat2.PE == 0
    pause
end

m{10}(length(m{10})+1) = sat2.PE;

% calculo de errores en el canal -----
sat2.num_errs = 0;
sat2.s_paq = 63 * 8;

for ii = 1:v_IP(sim.i_pkt,5)
    sat2.r = rand;           % obtener un valor aleatorio uniforme
    sat2.p_acum = 0;

    while ( sat2.num_errs < sat2.s_paq )
        sat2.log_p1 = sat2.num_errs * log ( sat2.PE );
        sat2.log_p2 = ( sat2.s_paq - sat2.num_errs ) * log ( 1 - sat2.PE );
        sat2.log_p3 = log_factorial ( sat2.s_paq ) - log_factorial ( sat2.num_errs ) - ...
            log_factorial ( sat2.s_paq - sat2.num_errs );
        sat2.p_exact = exp ( sat2.log_p1 + sat2.log_p2 + sat2.log_p3 );
        sat2.p_acum = sat2.p_acum + sat2.p_exact;
        if ( sat2.p_acum >= sat2.r )
            break;
        end
        sat2.num_errs = sat2.num_errs + 1;
    end
end
v_IP(sim.i_pkt,6) = sat2.num_errs;

%monitor de errores de bits en el canal
m{5}(5) = m{5}(5) + sat2.num_errs;

% calculo del retardo por propagacion (up/down link)
cal_evnt(size(cal_evnt,1)+1,:) = [sim.ts + ((sat2.Ru + sat2.Rd) / 3e5) ...
    sim.sig_evnt cal_evnt(1,3)];

%
%
m.retmin(4) = min([m.retmin(4), ((sat3.Ru + sat3.Rd) / 3e5)]);
m.retmax(4) = max([m.retmax(4), ((sat3.Ru + sat3.Rd) / 3e5)]);
m{9}(length(m{9})+1) = ((sat2.Ru + sat2.Rd) / 3e5);

cal_evnt(1,:) = [];
end

```

A.5 Modelado de pasarela satelital

```

% bloque de gateway
%
% escrito por Julio Cesar del Valle P.
% CICESE
% Fisica Aplicada
% Departamento de Electronica y Telecomunicaciones
% Ensenada, Baja California, Mexico %{dd/mm/aa}

% vector de paquetes de IP
%-----
% sim.ts | #ref_RTP | TAMANO_PLY | marca_buffer | n_cellATM | num_errs | #ref_cRTP |
%-----
%
% vector del calendario de eventos
%-----
% ts | evento | correspondiente al paquete IP_ID |
%-----

switch sim.gateway
%-----

    case 3          % UT con arquitectura tipo ATM
%-----

%
%      m.thrpt(2) = m.thrpt(2) + (v_IP(sim.i_pkt,3) - (vo.s_RTP+vo.s_UDP+vo.s_IP));
%
%      m.lat(1,1) = m.lat(1,1) + (sim.ts - v_IP(sim.i_pkt, 1));
%      m.lat(1,2) = m.lat(1,2) + 1;

% compresion del paquete IP
%   a la cabecera del paquete IP se le suprime sus 40 octetos
%   de encabezado y se le agrega solo 4 del cRTP.
if (sim.P_CRTP == 1)
    if (v_IP(sim.i_pkt,1) == (vo.T_PROCESAMIENTO*vo.N_PKTV+sat2.t_ant))
        v_IP(sim.i_pkt,3) = v_IP(sim.i_pkt,3) - (vo.s_RTP+vo.s_UDP+vo.s_IP) + (4 * 8);
        v_IP(sim.i_pkt,7) = sim.i_rtp;
    else
        sim.i_rtp = 0;
    end
    sim.i_rtp = sim.i_rtp + 1;
    sat2.t_ant = v_IP(sim.i_pkt,1);
end

m{5}(3) = m{5}(3) + v_IP(sim.i_pkt,3);

% Segmentacion para AAL5 [Perterson 182-185 pp]
%   A los paquete IP (PDU) se le agrega un encabezado en la
%   cola. Que consiste de 2 bytes reservados, 2 bytes
%   para el tamaño de la informacion y 4 bytes para
%   el CRC-32 de proteccion.
v_IP(sim.i_pkt,3) = v_IP(sim.i_pkt,3) + (8 * 8);

% modelo de encapsulacion ATM sobre una plataforma especifica
% para satelite.
%   se calcula el 'pad' (relleno) para colocar la cola del
%   CS-PDU al final de la celda y se calcula el numero de celdas
%   segmentado el CS-PDU en 48 bytes.
v_IP(sim.i_pkt,5) = ceil ( v_IP(sim.i_pkt,3) / (48 * 8));

% a cada celda se le agrega 6 octetos de encabezado
% (cinco de ATM y uno de S-ATM).
% mas codificacion de canal, al final las celdas son de 63 octetos.
% (no implementado, dado a que solo el numero de celdas son
% los datos que se necesitan para la simulacion).

% modelo de retardo para la capa MAC
sim.mac = 1;
mac2;

```

```

%-----
case 6      % nodo - UT - protocolo ATM (B)
%-----

% reensamble del paquete IP

if v_IP(sim.i_pkt,6) > 0
    % Calcular la probabilidad de que exista un error en el
    % encabezado

    p1 = (v_IP(sim.i_pkt,3) - (vo.TAMANO_PLY * vo.N_PKT)/v_IP(sim.i_pkt,3));
    % probabilidad de que el error haya sido en el encabezado

    p2 = rand; % obtener la probabilidad del error.

    if p2 > p1
        % hay un error en el encabezado
        sim.gateway = 100;      % indicar que no genere el nuevo evento
        v_IP(sim.i_pkt,:) = []; % descarte del paquete
        m{1}(3) = m{1}(3) + 1;
    end
end % v_IP(sim.i_pkt,6) > 0

if sim.gateway ~= 100
    % se elimina la cola del CS-DPU
    v_IP(sim.i_pkt,3) = v_IP(sim.i_pkt,3) - (8 * 8);

    % recuperacion de cabecera
    if (sim.P_CRTP == 1) && (sim.gateway ~= 100)
        if v_IP(sim.i_pkt,7) == 0
            sat2.n_sec_rcp = 1;
            disp(sprintf(['%2.4g] rx FULL HEADER...',sim.ts));
        elseif v_IP(sim.i_pkt,7) == sat2.n_sec_rcp
            sat2.n_sec_rcp = sat2.n_sec_rcp + 1;
            v_IP(sim.i_pkt,3) = v_IP(sim.i_pkt,3) + (vo.s RTP+vo.s_UDP+vo.s_IP) - (4 * 8);
        elseif v_IP(sim.i_pkt,7) <= sat2.n_sec_rcp + 10
            sat2.n_sec_rcp = v_IP(sim.i_pkt,7) + 1;
            v_IP(sim.i_pkt,3) = v_IP(sim.i_pkt,3) + (vo.s RTP+vo.s_UDP+vo.s_IP) - (4 * 8);
            disp(sprintf(['%2.4g] sincronizacion exitosa (TWICE)...',sim.ts));
        else
            disp(sprintf(['%2.4g] descarte de paquete por gateway2...',sim.ts));
            sim.gateway = 100;      % indicar que no genere el nuevo evento
            v_IP(sim.i_pkt,:) = []; % descarte del paquete
            m{1}(4) = m{1}(4) + 1;
        end
    end % if (sim.P_CRTP == 1)
end

if sim.gateway ~= 100
    %monitorea los bits recibidos
    m{5}(4) = m{5}(4) + v_IP(sim.i_pkt,3);
    cal_evnt(size(cal_evnt,1)+1,:) = [sim.ts sim.sig_evnt cal_evnt(1,3)];
end

end

cal_evnt(1,:) = [];

% [Perterson]
% Computer Networks: A system Approach / Larry L. Perterson and
% Bruce S. Davie. 1996. ISBN: 1-55860-368-9

```

A.6 Modelado de recepción de tráfico

```

% modulo de simulacion para el buffer de de-jitter
%
% escrito por Julio Cesar del Valle P.
% CICESE
% Fisica Aplicada
% Departamento de Electronica y Telecomunicaciones
% Ensenada, Baja California, Mexico %{dd/mm/aa}

% vector de paquetes de IP
%-----
% (1) sim.ts | (2) #ref_RTP | (3) TAMANO_PLY | (4) marca_buffer | (5) n_cellATM
% |(6) num_errs | (7) #ref_cRTP | (8) sec_VA |
%-----

switch sim.destino
case 1 % el paquete entra al buffer de-jitter

    % se verifica que el paquete no haya llegado tarde
    if v_IP(sim.i_pkt,2) < dest.ult_pkt
        disp(sprintf(['%2.4g] paquete rechazado por el buffer...',sim.ts));
        m{1}(5) = m{1}(5) + 1;
        v_IP(sim.i_pkt,:) = [];
    else
        % monitorear el retardo de paquetes antes de entrar al buffer
        m{2}(length(m{2})+1) = sim.ts - v_IP(sim.i_pkt,1);

        % monitorear el jitter
        if m{6}(1) == v_IP(sim.i_pkt,8)
            m{7}(length(m{7})+1) = sim.ts - m{6}(2);
            m{6}(2) = sim.ts;
        else
            m{6}(1) = v_IP(sim.i_pkt,8);
            m{6}(2) = sim.ts;
        end

        i = find(v_IP(:,4) == 2);
        if isempty(i) % si el buffer esta vacio, retarda el paquete

            v_IP(sim.i_pkt,4) = 2;

            % se retarda la salida del paquete un tiempo determinado
            cal_evnt(size(cal_evnt,1)+1,:) = [sim.ts + dest.RETARDO sim.sig_evnt cal_evnt(1,3)];
            disp(sprintf(['%2.4g] Buffer vacio...',sim.ts));

        else
            % se marca paquete dentro del buffer
            v_IP(sim.i_pkt,4) = 2;
            end
    end

case 2 % el paquete sale del buffer

    % se busca el paquete a salir
    i = find(v_IP(:,4) == 2);
    [x, y] = min(v_IP(i,2));
    sim.i_pkt = i(y);

    % se monitorea la latencia total de la red
    m{3}(length(m{3})+1) = sim.ts - v_IP(sim.i_pkt,1);
    % se monitorea la cant. de bits recibidos
    m{5}(2) = m{5}(2) + v_IP(i(y),3);

    % monitorear el jitter total de la red
    if m{6}(3) == v_IP(sim.i_pkt,8)
        m{8}(length(m{8})+1) = sim.ts - m{6}(4);
        m{6}(4) = sim.ts;
    else
        m{6}(3) = v_IP(sim.i_pkt,8);
    end
end

```

```
        m{6}(4) = sim.ts;
    end

    % sale el paquete del buffer hacia el decodificador
    dest.ult_pkt = v_IP(i(y),2);
    v_IP(i(y),:) = [];
    m{1}(7) = m{1}(7) + 1;
    m{1}(2) = m{1}(2) - 1;

    % se programa el siguiente evento de salida para el
    % proximo paquete
    if size(i,1) > 1
        cal_evnt(size(cal_evnt,1)+1,:) = ...
            [sim.ts + vo.TPAQ sim.sig_evnt 0];
    end
end

cal_evnt(1,:) = [];
```